



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL (MII)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR
PLASMA PARA EL TRATAMIENTO DE RSU DE UN
VERTEDERO CONTROLADO EN EL SOMONTANO

Autor: Marta Pilar Romeo Guillén

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid

Junio de 2019

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

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

El autor D. **Marta Pilar Romeo Guillén** DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **Diseño de una planta de gasificación por plasma para el tratamiento de RSU de un vertedero controlado en el Somontano**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

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

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

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

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

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

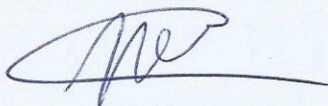
La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes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

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

Madrid, a 25 de Junio de 2019

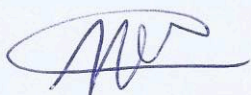
ACEPTA

Fdo Marta Pilar Romeo Guillén



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño de una planta de gasificación por plasma para el tratamiento de RSU de un vertedero controlado en el Somontano

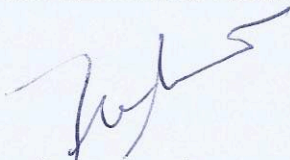
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **2018/2019** es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni
total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Marta Pilar Romeo Guillén Fecha: **25** / **6** / **19**

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Julio Montes Ponce de León

25 6 2019
Fecha: / /



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL (MII)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR
PLASMA PARA EL TRATAMIENTO DE RSU DE UN
VERTEDERO CONTROLADO EN EL SOMONTANO

Autor: Marta Pilar Romeo Guillén

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid

Junio de 2019

Diseño de una planta de gasificación por plasma para el tratamiento de RSU de un vertedero controlado en el Somontano

Autor: Romeo Guillén, Marta Pilar

Director: Montes Ponce de León, Julio

Entidad colaboradora: ICAI- Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto presenta un análisis del estado y del funcionamiento del vertedero de Gazo, en la comarca del Somontano, para el cual se ha diseñado una planta de gasificación por plasma para el tratamiento de RSU.

El tratamiento de RSU es un problema que tanto en España como en Europa está ganando peso con los años: por un lado, se estima un crecimiento importante en la generación de este tipo de residuos en un futuro próximo. Por otro lado, se considera necesaria una alternativa al tratamiento mediante vertederos, dado a los altos niveles de contaminación que estos suponen y a que no se encuentran sujetos a ningún tipo de control riguroso.

Además, en el ámbito legal, se debe cumplir con las imposiciones de la Comisión Europea, la cual indica en su comunicación sobre Economía Circular que a partir del año 2020 solamente se puede incrementar la eliminación de residuos sólidos urbanos en vertederos controlados un máximo del 10%, y en 2030 el número de vertederos controlados deberá quedar reducido al 10%.

La gasificación por plasma se presenta como una alternativa, ya que permite aprovechar la biomasa contenida en los residuos. Se lleva a cabo mediante un convertidor de plasma que genera un campo eléctrico radiante. Así se alcanzan altas temperaturas que permiten la disociación molecular y se logra la transformación de los residuos en un gas rico en hidrógeno. Este hidrógeno se emplea posteriormente para alimentar pilas de combustible, con las cuales se obtiene energía eléctrica.

Además, este gas se hace pasar por un intercambiador de calor como parte de un ciclo Rankine, donde se reduce la temperatura del gas y se emplea dicho calor para evaporar agua y generar energía eléctrica, que se puede aprovechar en la propia planta de gasificación.

Por tanto, se ha diseñado una planta de gasificación por plasma que permite, por un lado, tratar los residuos que recibe la planta de Gazo diariamente, procedente de las tres plantas de transferencia que lo conforman: Campo, Tolve y Aínsa. Por otro lado, sirve para el vaciado de los RSU que actualmente se encuentran depositados en el vertedero, con el objetivo de su aprovechamiento energético y de la erradicación del vertedero.

Para su dimensionamiento, se ha considerado el tratamiento conjunto de los residuos ya depositados y los que van entrando diariamente. El vertedero, en sus 11 años de utilización, ha acumulado 308.000 Tm. de RSU. Se ha estimado un periodo de vaciado de 10 años, lo que supone un tratamiento diario de 96,25 Tm. de residuos procedentes del vertedero. Además, se ha tenido en cuenta el volumen de residuos que se aceptan cada día en el vertedero, de 88,21 Tm, sumando un total de 184,5 Tm. diarias.



Con la ayuda de la empresa *Materiales Renovados*, se ha realizado un balance de energías, tras el cual se ha obtenido que introduciendo en la planta 7.686 kg/h de residuos, se puede obtener un gas de síntesis limpio con un poder calorífico de 29.702 kW.

Además, este gas de síntesis se ha hecho pasar por un ciclo Rankine, con un doble objetivo. Por un lado, se ha demostrado que el calor extraído del gas de síntesis se puede emplear para el propio secado de los residuos en la planta de gasificación por plasma, al obtenerse en el condensador un calor de 968 kW, superior al requerido por los residuos (722 kW). Por otro lado, en la turbina del ciclo de Rankine, se ha obtenido una generación anual de 3.613 MWh.

Por otro lado, tras la planta de gasificación, el gas de síntesis se ha introducido en un reactor Shift para aumentar el porcentaje de hidrógeno contenido en este. Este hidrógeno se ha empleado para alimentar pilas de combustible. Se ha elegido una pila tipo PEM de 1MW, por las bajas temperaturas a las que opera y la alta densidad energética que presenta en comparación con otro tipo de pilas. Se ha dimensionado para una generación de 50 MW, de forma que se han necesitado 50 pilas. Además, se han necesitado 113 tanques de almacenamiento de hidrógeno de una capacidad de 5000L, con almacenamiento mediante hidruros metálicos.

Por último, y a pesar de que el principal objetivo del proyecto es resolver un problema medioambiental, se ha llevado a cabo un análisis económico de la instalación. Se han analizado los tres procesos del proyecto por separado: la planta de gasificación, el ciclo Rankine y las pilas de combustible. Se ha establecido una amortización a 25 años, y se han tenido en cuenta los distintos costes derivados de cada uno de ellos. Como era de esperar, no se obtienen grandes beneficios económicos ya que el proyecto se ha

diseñado para cubrir una necesidad en el largo plazo. Además, el principal objetivo es el de resolver un problema que afecta a toda la sociedad por lo que no debe importar lo que cueste, ya que es algo que se tiene que hacer. Se debe potenciar su desarrollo, con el objetivo de que con el tiempo se puedan abaratar los costes y lograr, además, una ventaja económica.

Design of a plasma gasification plant for the treatment of MSW from a landfill in Somontano

Author: Romeo Guillén, Marta Pilar

Director: Montes Ponce de León, Julio

Collaborating entity: ICAI- Universidad Pontificia de Comillas

ABSTRACT

The project analyses the current situation and performance of Gazo's landfill - located in Somontano region, in Spain- and purposes a plasma gasification system as an alternative for treating USW.

Waste storage is becoming a problem which is gaining weight as years go on in Spain and Europe: on the one hand, it is expected that the amount of waste produced will increase in the near future. On the other hand, landfill sites and incinerators continue to be the primary methods used to dispose wastes, but it is necessary to design an alternative system for USW treatment, as landfills are heavily polluting and they are not strictly under control.

Moreover, they have to comply with the norms imposed by the European Commission, which stated through the Circular Economy that by 2020 only a 10% of USW will be accepted in landfill sites and by 2030, the amount of landfills able to operate will have to be reduced to a 10%.

Plasma gasification is presented as an alternative to landfills, as it is capable of producing energy from wastes. In the process, an electrical arc gasifier passes a very high voltage electrical current through two electrodes, creating an arc between them. This arc releases very high temperatures that are able to convert organic matter into a syngas which is primarily made up of hydrogen and carbon monoxide. This hydrogen can be used afterwards with fuel cells to produce electricity.

Afterwards, the syngas obtained in the gasification plant can be introduced in a heat exchanger as part of a Rankine cycle in order to reduce its temperature. The heat extracted is then used to evaporate water and move a turbine that produces the electricity the plant needs to operate.

This project consists on the design of a plasma gasification plant able to treat the waste managed by Gazos' plant. Moreover, this gasification plant will be used to empty the landfill by treating the wastes that are currently deposited in it. Consequently, there are two main objectives: to eradicate the landfill and to obtain energy from the USW.

The plant has been designed considering the treatment of the wastes altogether. During its 11 operating years it has stored 308.000 Tm of USW. It is estimated to be emptied in 10 years, so that each day the plant has to treat 96,25 Tm. from the landfill. In addition, Gazo receives around 88,21 Tm from the daily collection, so both of them make a total of 184,5 Tm. of daily waste for the gasification plant.



The energy balance has been developed with the collaboration of the company *Materiales Renovados*. The results showed that from 7.686 kg/h of USW introduced in the plant, it is possible to obtain a clean syngas with a heating power of 29.702 kW.

Furthermore, the syngas has been taken to a Rankine cycle with a twin objective. First, the heat extracted from the syngas is able to dry the wastes before they are introduced in the plant. Calculations showed that they require around 722 kW for drying, while the condensator in the Rankine cycle produces 968 kW. On the other side, from the turbine it is possible to obtain 3.613 MWh annually.

After the gasification plant, the syngas is introduced in a Shift reactor in order to increase its hydrogen composition percentage. This hydrogen can be used to produce electricity through fuel cells. The design of the fuel cells has been done in order to meet a demand of 50 MW. The installation includes 50 fuel cells of 1MW and 113 storage units, with a capacity of 5000L each.

Although the main purpose of this project is to solve an environmental problem, it is also necessary to evaluate the costs and incomes of the installation. So finally, the last section of the project consists of an economic analysis of the three main processes: the gasification plant, the Rankine cycle and the fuel cells. It's been asumed a lineal 25-year amortization for all of them. As it was expected, the project has been designed for the long time so after 25 years there are not still economic benefits. However, it shouldn't be a problem because as it was said before, it's been designed to solve an environmental problem as soon and fast as possible, no matter how much it costs.

Índice

PARTE I: Introducción	5
1. Introducción del proyecto	7
1.1. Estado de la cuestión	7
1.2. Motivación	8
1.3. Objetivos del proyecto	9
PARTE II: Memoria	11
2. Vertederos controlados	13
2.1. Definición	13
2.2. Impacto ambiental	14
2.3. Criterios de diseño y estructura del vertedero controlado	14
3. Vertedero GAZO	19
3.1. Introducción	19
3.2. Emplazamiento y características del suelo	20
3.3. Normativa aplicable	23
3.4. Instalaciones de la planta	24
4. La economía circular y la gestión de residuos	26
4.1. ¿Qué es la economía circular?	26
4.2. Aplicación de la economía circular a la gestión de residuos	27
5. Gasificación por plasma	28
5.1. La gasificación por plasma	28
5.2. Aplicación tecnológica a los vertederos de residuos sólidos urbanos	30
5.3. Proceso de gasificación por plasma	32
5.4. Sistemas y equipos necesarios para la gasificación por plasma	37
5.5. Ventajas de la gasificación por plasma para el tratamiento de residuos	40
6. Dimensionamiento de la planta	41
6.1. Gasificación por plasma	41
6.2. Recuperación de calor: ciclo Rankine	45
6.3. Calor aplicado al secado de residuos	50
6.4. Hidrógeno contenido en el gas de síntesis. Reactor Shift	51
7. Pilas de combustible	53
7.1. Descripción	53
7.2. Principios de funcionamiento	54
7.3. Tipos de pilas	56
7.4. Elección de la pila combustible	61
8. Almacenamiento de hidrógeno	62
8.1. Almacenamiento en estado gaseoso	62
8.2. Almacenamiento a temperatura criogénica o en estado líquido	63
8.3. Almacenamiento mediante hidruros metálicos o en estado sólido	64
8.4. Elección del sistema de almacenamiento de hidrógeno	64
8.5. Generación de energía	65
PARTE III: Análisis económico	67
9. Análisis económico de la tecnología de plasma	69
9.1. Análisis económico de la gasificación por plasma	70
9.2. Análisis económico del ciclo de Rankine	72
9.3. Análisis económico de las pilas de combustible	73

9.4. Costes totales de la planta de gasificación	74
10. Análisis conjunto de la planta de gasificación	75
11. Conclusiones	80
PARTE IV: Anexos	83
ANEXO A: Pila de combustible Ballard – 1MW	85
ANEXO B: Tanque de almacenamiento de hidrógeno Ariema - Hbond	86
ANEXO C: Análisis de costes de explotación de los diferentes procesos	87
ANEXO C.1: Costes de explotación planta de gasificación	87
ANEXO C.2: Costes de explotación ciclo de Rankine	88
ANEXO C.3: Costes de explotación pilas de combustible	89
ANEXO C.4: Costes de explotación totales	90
ANEXO D: Evolución precio medio de la electricidad	91
Referencias	93
Bibliografía	94

Figuras

Figura 2. Vertedero controlado residuos no peligrosos COGERSA (Asturias)	13
Figura 3. Lixiviados derivados del vertedero de COGERSA (Asturias)	14
Figura 4. Gases producidos en el vertedero de COGERSA (Asturias)	14
Figura 5. Esquema básico de un vertedero controlado	16
Figura 6. Estructura de impermeabilización de un vertedero de RSU	17
Figura 7. Estructura de sellado final de un vertedero de RSU	18
Figura 8. Localización aérea vertedero GAZO	21
Figura 9. Vaso de vertido GAZO	24
Figura 10. Tuberías de canalización de lixiviados	25
Figura 11. Balsas de lixiviados GAZO	25
Figura 12. Esquema del funcionamiento de la economía circular	27
Figura 13. Representación de los estados de la materia	28
Figura 14. Soplete de plasma	29
Figura 15. Transformación molecular debida a la temperatura	30
Figura 16. Vasija de gasificación por plasma	31
Figura 17. Etapas del proceso de la gasificación por plasma	33
Figura 18. Esquema de funcionamiento de una vasija de plasma	37
Figura 19. Antorcha de arco eléctrico transferido (izquierda) y de arco eléctrico transf.	38
Figura 20. Método de tratamiento y vaciado de residuos del vertedero	43
Figura 21. Esquema básico ciclo de potencia de Rankine	45
Figura 21. Proceso convencional para producir hidrógeno a partir del gas de síntesis	51
Figura 22. Funcionamiento de una pila de combustible	55
Figura 23. Esquema pila de combustible PEM	58
Figura 24. Esquema pila de combustible AFC	60
Figura 25. Esquema pila de combustible PAFC	61
Figura 26. Esquema de tanque de hidrógeno comprimido	62
Figura 27. Esquema de tanque de hidrógeno líquido	63
Figura 28. Evolución precio medio de la electricidad (€/KWh)	76

Tablas

Tabla 1. Composición de residuos GAZO.....	42
Tabla 2. Registro de entrada de residuos Gazo (2018)	44
Tabla 3. Condiciones de funcionamiento en la caldera	46
Tabla 4. Condiciones de funcionamiento en la turbina	47
Tabla 5. Condiciones de funcionamiento en el condensador	48
Tabla 6. Condiciones de funcionamiento en la bomba	49
Tabla 7. Composición gas de síntesis limpio	52
Tabla 8. Tabla resumen tipos de pilas de combustible.....	57
Tabla 9. Tabla de capacidad de almacenamiento de hidruros	64
Tabla 10. Costes de operación y mantenimiento	71
Tabla 11. Costes de personal de la planta	72
Tabla 12. Resumen de costes de inversión y explotación de la planta de gasificación.....	75
Tabla 13. Costes totales de las pilas de combustible	75
Tabla 14. Ingresos derivados de la recogida de residuos	77
Tabla 15. Balance de gastos e ingresos de la planta de gasificación	78
Tabla 16. Anexo costes de explotación planta de gasificación	87
Tabla 17. Anexo costes de explotación ciclo de Rankine	88
Tabla 18. Anexo costes de explotación pilas de combustible	89
Tabla 19. Anexo costes de explotación totales	90
Tabla 20. Evolución precio medio de la electricidad.....	91

PARTE I: Introducción

1. Introducción del proyecto

Se consideran residuos sólidos urbanos (RSU), por un lado, todos aquellos residuos que se generan tanto en servicios e industrias como en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas cotidianas, incluyendo así residuos de aparatos eléctricos, electrónicos y pilas o muebles, entre otros. Por otro lado, también se consideran residuos sólidos urbanos a los generados en obras menores en hogares, así como los procedentes de los servicios que tienen lugar en la vía pública, tales como la limpieza de las vías, de las zonas verdes o de áreas recreativas, entre otros.

En la actualidad, la fracción orgánica de este tipo de residuos se gestionan en España principalmente mediante el almacenamiento en vertederos (controlados y no controlados), y en menor medida mediante incineración y compostaje. No obstante, algunos de los vertederos controlados en España no se someten a un control riguroso, por lo que se debe proponer una alternativa para promover una gestión más sostenible.

Por otro lado, la Comisión Europea en su comunicación sobre Economía Circular [1] indica que a partir del año 2020 solamente se puede incrementar la eliminación de residuos sólidos urbanos en vertederos controlados un máximo del 10%, y en 2030 el número de vertederos controlados deberá quedar reducido al 10%.

En este proyecto se van a estudiar las características fundamentales de los vertederos controlados y específicamente las del vertedero controlado del Somontano, en Aragón, analizando su posible eliminación posterior de acuerdo con las recomendaciones de la UE.

1.1. Estado de la cuestión

En una primera parte de este proyecto se realizará un análisis, por un lado, de las legislaciones vigentes en España y su transposición en Aragón en relación a la generación y tratamiento de residuos sólidos urbanos. Se analizará la situación concretamente de uno de los vertederos que se encuentran operativos en Aragón, el

vertedero Gazo SL, perteneciente a la comarca del Somontano, en Barbastro. En este proyecto se va a proponer una forma de tratamiento de los residuos que se encuentren depositados en un vertedero de forma definitiva con el mínimo impacto ambiental.

La propuesta será una planta de gasificación por plasma, que permita transformar los residuos en un gas de síntesis rico en hidrógeno, el cual se podrá utilizar posteriormente para la generación de energía eléctrica, mediante pilas de combustible.

1.2. Motivación

La principal motivación de este proyecto es tratar de resolver un problema doble que va ganando peso con el tiempo: por un lado, la generación de residuos constante y que con los años se estima que continúe creciendo y, por otro lado, la forma de tratamiento de dichos residuos mediante vertederos está siendo restringida por la legislación y en un futuro próximo, dichos vertederos deberán ser erradicados. Por tanto, hay que buscar una solución para los residuos ya existentes en los vertederos así como los nuevos que se vayan generando, de una manera comprometida con el medioambiente.

Por otro lado, con el desarrollo de las tecnologías se ha incrementado el consumo de energía por parte de toda la población, por lo que también entra en juego el problema de la contaminación que suponen algunas fuentes de energía convencionales, además de las limitaciones de algunos de los recursos que se emplean actualmente. Es por ello que se va a proponer la gasificación por plasma como alternativa al tratamiento de residuos en vertederos controlados. Con ello se pretende someter a los residuos a un proceso térmico en el que se va a descomponer la materia orgánica gracias a las altas temperaturas que se alcanzan en un gas ionizado, dando lugar a productos aprovechables energéticamente.

La gasificación por plasma permite la eliminación total de los residuos de una forma limpia, al producirse a temperaturas muy elevadas que no generan subproductos contaminantes tales como dioxinas o furanos. Se obtiene un balance energético positivo, ya que se obtiene hidrógeno como subproducto, que puede ser almacenado y

aprovechado posteriormente para la generación de energía eléctrica.

Así, se consigue combatir el problema de la acumulación de residuos y de contaminantes derivados de su tratamiento y, además, se obtiene un recurso renovable y limpio para la producción de electricidad.

1.3. Objetivos del proyecto

Entendimiento y cumplimiento de la legislación sobre residuos urbanos del vertedero de Gazo, en el Somontano

El primero de los objetivos del proyecto consiste en analizar la actual legislación europea española y su transposición aragonesa sobre la gestión de residuos mediante vertederos controlados. Una vez analizadas todas las directrices y objetivos tanto actuales como futuros, se analizará el nivel de cumplimiento actual y se tratará de ofrecer una solución para que dichas normativas se empiecen a respetar en su totalidad en el vertedero del Somontano.

Detalle del funcionamiento de los vertederos de residuos sólidos urbanos y análisis del vertedero de Gazo

El segundo objetivo es el estudio del funcionamiento de los vertederos, para analizar el vertedero de la comarca del Somontano, lugar donde se va a desarrollar el proyecto. Así, una vez entendida también la evolución de la producción de residuos, se podrá proponer una solución para una mejor gestión, más sostenible de acuerdo con las directrices europeas.

Sostenibilidad medioambiental

Al proponer como nuevo proceso de tratamiento la gasificación por plasma, se van a reducir considerablemente los factores contaminantes que derivan de los vertederos que dejen de ser operativos, tales como los lixiviados, que son líquidos tóxicos que se producen al descomponerse los residuos, o como los gases que se liberan a partir de los procesos de fermentación anaeróbica. Así, la propuesta de este proceso térmico supone

otro objetivo: la sostenibilidad medioambiental.

Aprovechamiento energético

Por último, al plantear como opción alternativa la gasificación por plasma, se fomentará el aprovechamiento energético, ya que dicho proceso conlleva la producción de un gas de síntesis rico en hidrógeno, que se puede explotar para la generación de energía mediante las pilas de combustible.

PARTE II: Memoria

2. Vertederos controlados

2.1. Definición

Se definen como vertederos controlados las instalaciones donde se depositan los residuos sólidos orgánicos urbanos para su fermentación anaerobia generando gases, entre ellos metano y lixiviados líquidos. Estructuralmente, son capas cuyas paredes se impermeabilizan, y los residuos se van depositando y posteriormente se recubren y también se impermeabilizan.

El carácter controlado de la instalación implica el uso de técnicas que minimizan algunas de las consecuencias directas de los vertederos tales como la contaminación de aguas, la emisión de polvo, gases y sustancias contaminantes. Dicho carácter controlado exige la elección de un emplazamiento adecuado.

Entre las principales ventajas de los vertederos controlados, destacan su versatilidad y sencillez técnica y las ventajas económicas que presenta. No obstante, los vertederos suponen un elevado consumo de terreno y una mala gestión de los residuos biomásicos, ya que no se aprovechan adecuadamente desde un punto de vista energético.



Figura 1. Vertedero controlado residuos no peligrosos COGERSA (Asturias) [2]

2.2. Impacto ambiental

Un vertedero controlado da lugar a un impacto ambiental que es necesario minimizar al máximo.



Figura 2. Lixiviados derivados del vertedero de COGERSA (Asturias) [2]

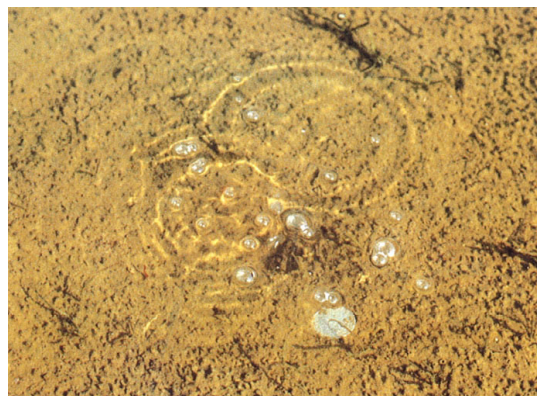


Figura 3. Gases producidos en el vertedero de COGERSA (Asturias) [2]

2.3. Criterios de diseño y estructura del vertedero controlado

El primer punto a la hora de diseñar y construir un vertedero controlado es realizar un estudio ambiental de la zona. Además, hay que considerar los siguientes aspectos:

- Tipo y cantidad de residuos
- Material de cobertura disponible
- Vida útil del vertedero y uso que se espera darle tras su sellado
- Localización
- Recuperación energética de los resultados de la fermentación anaerobia

A partir de estos datos, se diseña una instalación adaptada a las necesidades específicas del vertedero. Dicho diseño debe incluir un sistema de impermeabilización de fondo, un sistema de recogida de lixiviados, de control de aguas de escorrentía y de desgasificación, una instalación para el aprovechamiento de los gases producidos en la fermentación anaerobia con reducción de los posibles impactos ambientales. También debe incluir las diferentes fases de funcionamiento del vertedero, así como el sistema del sellado final.

Todos los vertederos responden a un esquema básico común, que resulta de la deposición de los residuos en capas, que, tras haber sido compactados, son recubiertos con otra capa de tierra impermeabilizada que a continuación también es compactada. Tal y como muestra la Figura 4, en el sentido horizontal las capas se prolongan dando lugar un recubrimiento lateral en pendiente, formando así células, que son unidades menores y que conforman toda la instalación. En el sentido vertical, se suele disponer de como máximo dos terrazas, con el objetivo de reducir y controlar la producción de lixiviados y de metano.

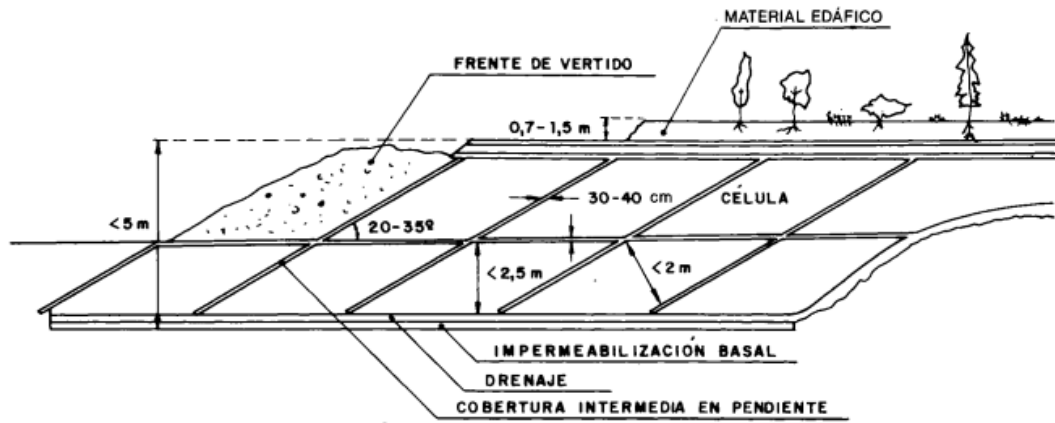


Figura 4. Esquema básico de un vertedero controlado [3]

2.3.1. Impermeabilización de fondo

Los vertederos deben contar con una impermeabilización de fondo para evitar que los lixiviados u otros restos de residuos penetren en el interior de la tierra y puedan contaminar las aguas subterráneas. Tal y como se muestra en la siguiente Figura, la estructura básica en la impermeabilización de fondo, de acuerdo con el RD 1481/2001 [4] debe de constar de:

- Barrera geológica natural, con un espesor mayor o igual a 1m.
- Barrera geológica artificial, si no existe la natural, con un espesor mayor o igual a 0.5m
- Geotextil
- Revestimiento artificial impermeable
- Geotextil
- Capa de drenaje con espesor mayor o igual a 0.5m.

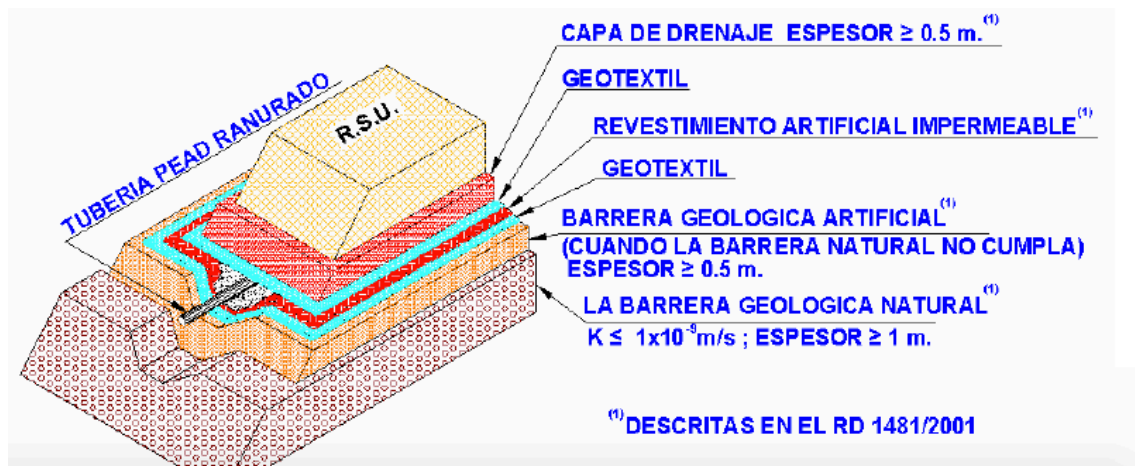


Figura 5. Estructura de impermeabilización de un vertedero de RSU [5]

2.3.2. Sellado final

El diseño de una estructura para el sellado final del vertedero es imprescindible para evitar la entrada de pluviales y para gestionar de forma correcta la emisión del biogás. Para ello, constará de las siguientes partes:

- Tierras de cobertura
- Capa drenaje de gas
- Capa mineral impermeable
- Geotextil
- Capa de drenaje de espesor mayor o igual a 0.5m
- Geotextil
- Cobertura superior de tierra con un espesor igual o mayor a 1m.

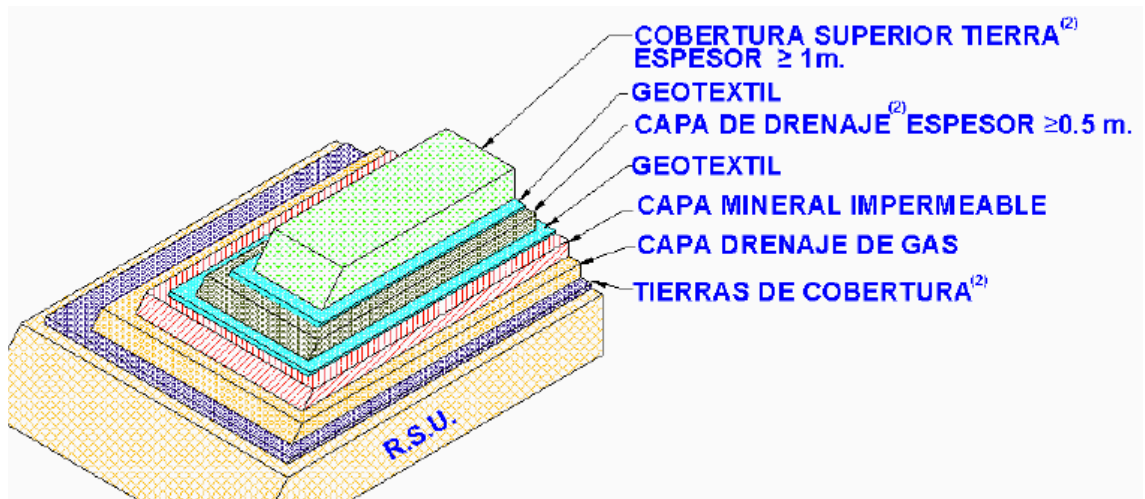


Figura 6. Estructura de sellado final de un vertedero de RSU [5]

2.3.3. Sistema de recogida de lixiviados

Los lixiviados son líquidos que se generan por la fermentación anaerobia de los residuos en el vertedero. Es un líquido que, por tanto, se almacena en el vertedero.

Para evitar la contaminación del terreno por la filtración de lixiviados, es necesario diseñar un depósito para su almacenamiento sobre un suelo impermeable, para ser posteriormente tratado y depurado. Los cuatro factores que propician la producción de lixiviados son los siguientes:

- Aguas pluviales
- Características de la superficie del vertedero
- Características y condiciones del suelo
- Estado de los residuos

El tratamiento de los lixiviados se realiza mediante dos tipos de procesos diferentes:

- Procesos físico-químicos: incluye la neutralización, precipitación, oxidación,

sedimentación o flotación, entre otros. Dichos procesos actúan sobre la fracción suspendida del lixiviado: se eliminan sólidos que se encuentran suspendidos, metales pesados y otros contaminantes en precipitación.

- *Procesos biológicos:* incluyen los procesos de membranas, los biorreactores de membranas o el reactor discontinuo secuencial. En este caso, se elimina la materia orgánica soluble sin emplear reactivos químicos.

2.3.4. Control de aguas de escorrentía

Se debe plantear un diseño que incluya los siguientes elementos para el control de las aguas de escorrentía:

- Cuneta perimetral
- Drenaje control de erosión en diques
- Balsa de pluviales

3. Vertedero GAZO

3.1. Introducción

El proyecto se centra en el vertedero de GAZO, situado en la comarca del Somontano de Aragón, el cual se va a presentar y describir a continuación, teniendo en cuenta el Proyecto de Construcción de la “Ampliación del vaso de vertido del vertedero de residuos sólidos urbanos de Barbastro” [3] , que data de 2013.

GAZO SL es una Sociedad de Responsabilidad Limitada de capital público, que abarca las Comarcas de Somontano de Barbastro, Cinca Medio, La Litera, Sobrarbe y Ribagorza, que conforman el Área de Agrupación Nº 2, Barbastro,

del Plan de Residuos de Aragón.

Actualmente, se encarga de gestionar el Vertedero de Agrupación, que se encuentra en el término municipal de Barbastro, conformada por las plantas de transferencia de Campo y Tolva (Ribagorza) y Aínsa (Sobrarbe).

En el vertedero se tratan exclusivamente Residuos Sólidos Urbanos, que proceden de la recogida a nivel municipal y comarcal. Es un vertedero de alta densidad, en el que se prensan los RSU, formando pacas atadas que posteriormente se apilan en el vertedero, cubriéndose con una capa de tierra por cada 6 ó 7 m. de altura. El vaso de vertido tiene unas dimensiones en planta de 454 x 219 m (alrededor de 10 hectáreas de superficie), con una capacidad estimada de 512.312 m^3 .

Actualmente, se encuentra en el proceso de finalización de la primera fase, que consta de dos plataformas que se ubican en la parte superior del vaso de vertido, con una superficie útil de 27.300 m^2 , así como una balsa de lixiviados de 1.165 m^3 . La segunda fase, que comenzará a principios del año 2020, permitirá prolongar la utilización y la explotación del vertedero durante un mayor periodo de tiempo, logrando una capacidad útil total de 160.000 m^3 . Partiendo de que anualmente se ocupan unos 25.000 m^3 , permite una prolongación de la vida del vertedero de 6,4 años.

3.2. Emplazamiento y características del suelo

El vertedero de residuos sólidos urbanos de Barbastro se encuentra emplazado en el polígono nº 18 del municipio de Barbastro (Huesca).



Figura 7. Localización aérea vertedero GAZO [6]

3.2.1. Geología

El valle donde se encuentra el vertedero tiene una morfología típica de fondo llano y laderas tendidas. [6]

El sustrato lo constituyen principalmente yesos de tipo alabastrino y sacaroideo con inclusiones margosas de tonos gris-verdosos de la formación Yesos de Barbastro, de edad Eocena. Su disposición es plegada formando en conjunto una estructura anticlinal, formada a partir de fenómenos halocinéticos originados a cierta profundidad. Su parte superior se encuentra alterada en un espesor de alrededor de 0,5-1 m. a limos yesíferos con restos de yesos y margas.

El recubrimiento Cuaternario es típico de los fondos de val en yesos. Son limos, en algunos casos yesíferos y normalmente aciliosos, con algunos cantos dispersos, y algunos de yeso. Los limos presentan una permeabilidad muy variable en función de su litología y distribución, y generalmente aumenta hacia las laderas. Su comportamiento hidrogeológico resulta imprevisible, aunque es potencialmente permeable

por karstificación de los yesos.

3.2.2. Características del terreno

En la zona donde se ubica el vertedero, el sustrato terciario está formado predominantemente por yesos que presentan intercalaciones e inclusiones margosas.

Su disposición es de una estructura general de tipo anticlinal replegada en detalle en pliegues de menor amplitud por efecto de fenómenos halocinéticos originados en profundidad.

Los yesos son materiales competentes (roca), mientras que las intercalaciones margosas pueden clasificarse como arcillas duras de baja plasticidad, CL. Los yesos de la formación de Barbastro están fuertemente karstificados en algunos sectores de la gran estructura anticlinal, y la permeabilidad se desarrolla a favor de diaclasas y de discontinuidades. El recubrimiento está constituido por limos. En la zona central del valle tienden a ser arcillosos, con cantos dispersos, mientras que en determinados tramos se desarrollan precipitados de carbonato, y hacia la parte superficial, aparecen raíces.

Las muestras ensayadas de limos presentan porcentajes de sulfatos de alrededor del 5% en dos casos y del 0,7% en otro. Tienen cierta tendencia al colapso, habiendo obtenido deformaciones unitarias de colapso de 0,0085, 0,0037 y 0,019 cm^2/kg , lo cual permite clasificarlos como colapsables, y se puede tomar una deformación unitaria de colapso media de 0,01 cm^2/kg . Su densidad seca es del orden de 1,5 gr/cm^3 .

3.2.3. Geotecnia

Se dispone de un recubrimiento permeable en ciertas zonas, y un sustrato potencialmente karstificable, por lo que resulta imprescindible la impermeabilización de toda la superficie del vaso mediante lámina.

No es aconsejable el uso de limos compactadas como impermeabilización, ya que los porcentajes de yesos que contienen representan un riesgo de disolución y erosionabilidad inasumible.

El cemento a emplear debe ser sulforesistente.

3.3. Normativa aplicable

3.3.1. Residuos urbanos

- El Real Decreto 1481/2001, de 27 de Diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, incorpora el derecho español la Directiva 1999/31/CEE.
- Desarrollo técnico del R.D. 1481/2001 relativo a las instalaciones de vertido de residuos

3.3.2. Obra civil

- Pliego de Prescripciones técnicas Generales para obras de carreteras y puentes

3.3.3. Seguridad y salud

- Real Decreto 1627/1997, de 24 de Octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad en las obras de construcción.
- Ley 31/95, de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales

3.3.4. Instalaciones

- Reglamento electrotécnico para baja tensión e instrucciones técnicas complementarias, aprobado por el Real Decreto 842/2002, de 2 de Agosto de 2002.
- Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales, aprobado por el RD 2267/2004 de 3 de Diciembre.

3.4. Instalaciones de la planta

A continuación se describen brevemente las instalaciones más relevantes que componen la planta:

- Vaso de vertido:

Es el agujero donde se depositan las balas de residuos que han sido compactadas previamente. Consta de numerosas chimeneas que constituyen la red de desgasificación, así como de tuberías que se emplean para recircular los lixiviados.



Figura 8. Vaso de vertido GAZO [7]



Figura 9. Tuberías de canalización de lixiviados [7]

- Balsas de lixiviados y sistema de recirculación de lixiviados:

El vertedero de Gazo cuenta con dos balsas de lixiviados, donde se almacenan los lixiviados.



Figura 10. Balsas de lixiviados GAZO [7]

3.4.1. Tratamiento de aguas subterráneas y de gases

Durante la explotación del vertedero, las aguas subterráneas no se someten a un control o tratamiento exhaustivo. De la misma forma, el metano que sale por las chimeneas se mezcla con oxígeno y se expulsa directamente a la atmósfera, de manera que ni es tratado ni aprovechado energéticamente. Esta situación debería reconsiderarse con la máxima urgencia.

4. La economía circular y la gestión de residuos

4.1. ¿Qué es la economía circular?

La economía circular es un concepto económico que tiene como principio fundamental la sostenibilidad y que trata de reducir los residuos, fomentando la reutilización, reparación, renovación y reciclaje de estos. Pretende abrir caminos a nuevas oportunidades de negocio e impulsar la competitividad, a través de los incentivos que están estableciendo. Así, sus principales objetivos son los siguientes:

- Mejorar resultados económicos a la vez que se reduce el uso de recursos
- Analizar e identificar nuevas oportunidades de crecimiento económico, impulsando más innovación y competitividad entre los países de la UE
- Fomentar la seguridad en el suministro de recursos esenciales
- Combatir el cambio climático y reducir los efectos medioambientales relacionados con el uso de los recursos



Figura 11. Esquema del funcionamiento de la economía circular [8]

4.2. Aplicación de la economía circular a la gestión de residuos

La propuesta legislativa revisada relativa a los residuos fija una serie de objetivos basados en la reducción y una renovación en la gestión de residuos y el reciclado. Así, la Comisión Europea [1] redactó, en 2015, una serie de medidas clave respecto a los residuos, entre las que destacan:

- Un objetivo común de la UE para el reciclado del 65% de los residuos municipales de aquí a 2030
- Un objetivo común de la UE para el reciclado del 75% de los residuos de envases de aquí a 2030
- Un objetivo vinculante de reducción de la eliminación en vertedero a un máximo del 10% de todos los residuos de aquí a 2030
- Una prohibición del depósito en vertedero de los residuos recogidos por separado
- La promoción de instrumentos económicos para desalentar la eliminación en vertedero

- Una simplificación y mejora de las definiciones y una armonización de los métodos de cálculo de los porcentajes de reciclado en toda la UE
- Medidas concretas para promover la reutilización y estimular la simbiosis industrial, convirtiendo los subproductos de una industria de materias primas de otra
- Incentivos económicos para que los productores pongan en el mercado productos más ecológicos y apoyo a los regímenes de recuperación y reciclado

Mediante este proyecto, se pretende dar una solución a las medidas más específicas de los vertederos de residuos, por lo que se va a plantear como método sustitutivo el diseño e implementación de plantas de gasificación por plasma.

5. Gasificación por plasma

5.1. La gasificación por plasma

El plasma es un gas ionizado que se encuentra a altas temperaturas, pudiendo llegar a alcanzar los 14.000 °C.



Figura 12. Representación de los estados de la materia [9]

El proceso de gasificación por plasma se lleva a cabo mediante un convertidor de plasma que genera un campo eléctrico radiante. Con este arco se desprenden altas temperaturas y el aporte de energía, que permiten la disociación molecular de la materia. Se produce, por tanto, la transformación de la materia: las moléculas orgánicas pasan a ser o bien un gas de síntesis rico en hidrógeno, o bien una lava fundida que, una vez enfriada pasa a ser un producto vítreo inerte.

La aplicación de la gasificación por plasma a la eliminación de RSU permite el aprovechamiento de la biomasa contenida en estos. Se logra su transformación en gas rico en hidrógeno, que a su salida de la planta de gasificación se hace pasar por un intercambiador de calor como parte de un ciclo Rankine con una doble finalidad. Por un lado, se reduce la temperatura del gas y, por otro lado, se emplea dicho calor extraído para evaporar agua de un circuito externo y generar energía eléctrica al hacer pasar el vapor por una turbina eléctrica.

La gasificación por plasma puede ser una alternativa a los convencionales vertederos de residuos, ya que permitiría, por un lado, cumplir con la normativa circular europea y erradicar los vertederos antes del año 2030. Además se lograría un aprovechamiento energético de la biomasa contenida en los residuos mediante la explotación del hidrógeno derivado de su tratamiento.



Figura 13. Soplete de plasma [10]

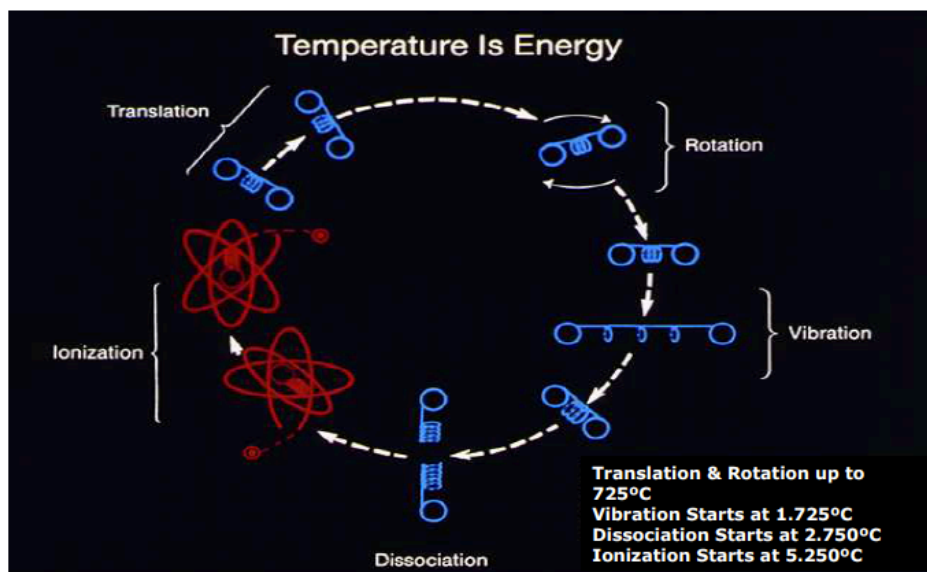


Figura 14. Transformación molecular debida a la temperatura [10]

5.2. Aplicación tecnológica a los vertederos de residuos sólidos urbanos

Como se ha explicado previamente, las altas temperaturas que se obtienen mediante el proceso de gasificación por plasma son las que permiten la disociación molecular de todo tipo de sustancias (sólidos, líquidos y gases), y, en este caso, la de los residuos. Una vez que se han roto los enlaces moleculares de dichos residuos, estos pueden pasar a transformarse en un gas de síntesis con un bajo poder calorífico, o bien en una lava que cuando se enfría pasa a ser un producto vítreo inerte. Cabe destacar, como se ha indicado anteriormente, que a pesar de las reacciones de oxidación que se pueden dar en el proceso, no se trata de un proceso de combustión.

La aplicación de dicha tecnología a los vertederos de residuos sólidos urbanos se realiza mediante gasificadores provistos con una antorcha de plasma. Así, el gasificador se encarga de crear un fuerte campo de energía radiante dentro de una vasija, lo que permite que se alcancen temperaturas del orden de los 20.000 °C.

Gracias a las elevadas temperaturas y al gas ionizado se logra realizar una disociación molecular completa por lo que no se generan otros subproductos tóxicos.



Figura 15. Vasija de gasificación por plasma [11]

Tal y como se puede observar en la Figura 16, se introducen los residuos en el gasificador, donde se descomponen formando dos corrientes de salida. En la parte superior de la vasija se encuentra la salida de un gas sintético puro rico en CO y H₂. Esta corriente gaseosa, que sale depurada del gasificador se puede emplear para producir hidrógeno en la planta de valorización del syngas, con el objetivo de su posterior almacenaje en pilas de hidrógeno o como metanol en plantas de ciclo combinado. Por otro lado, debido a la alta temperatura a la que sale del gasificador, el calor de este gas se puede aprovechar en un ciclo Rankine, para mover una turbina de vapor que genera energía eléctrica. En la parte inferior de la vasija se encuentra una salida en la que circula el material inorgánico fundido (metales, silicatos, etc.), en forma de lava. Este líquido se solidifica produciendo un material inerte vítreo que tendrá diferentes usos en diferentes industrias, como por ejemplo como relleno de construcción o como aislante.

5.3. Proceso de gasificación por plasma

5.3.1. Características del proceso

Desde que se introducen los residuos en el gasificador hasta que se obtienen las moléculas completamente disociadas existe un proceso que consta de distintas reacciones como consecuencia de las altas temperaturas. Estas reacciones se describen a continuación:

- Cracking térmico:

Se produce la disociación de todas las moléculas, hasta formar elementos primarios, como son los hidrocarburos o el hidrógeno.

- Oxidación parcial:

Se genera el CO (monóxido de carbono) así como CO₂ y H₂O en menores cantidades. Los dos últimos compuestos son productos de una oxidación total y su efecto es negativo, por lo que se deberá controlar el oxígeno que se introduzca en el gasificador. No obstante, las reacciones parciales son beneficiosas y muy importantes para alcanzar los valores de energía adecuados para que se produzca la gasificación.

- Reacciones de reformación:

Con las reacciones de reformación se produce el ensamblaje o formación de nuevas moléculas a partir de las moléculas disociadas. Estas reacciones permiten que se forme el nuevo gas de síntesis y que se reduzca la presencia de otros compuestos que al haberse oxidado podrían reducir el poder calorífico de dicho gas. alguna de estas reacciones sería, por ejemplo, la del carbono y el agua, produciendo monóxido de carbono e hidrógeno.

Durante la gasificación se asumen unas condiciones de presión y temperatura óptimas, que afectarán a la velocidad a la que se producen las reacciones entre el

monóxido de carbono y el hidrógeno. Así pues, el proceso suele ocurrir entre los 1700 °C, que se corresponde con la temperatura máxima de salida del gas de síntesis, y los 4000 °C, que es la temperatura a la que se da el plasma. Este rango de temperaturas permite que las reacciones se den mucho más rápidamente, y que por tanto se pueda reducir el tamaño del gasificador. Todas estas ventajas permiten reducir los costes de construcción del gasificador.

5.3.2. Etapas del proceso de gasificación

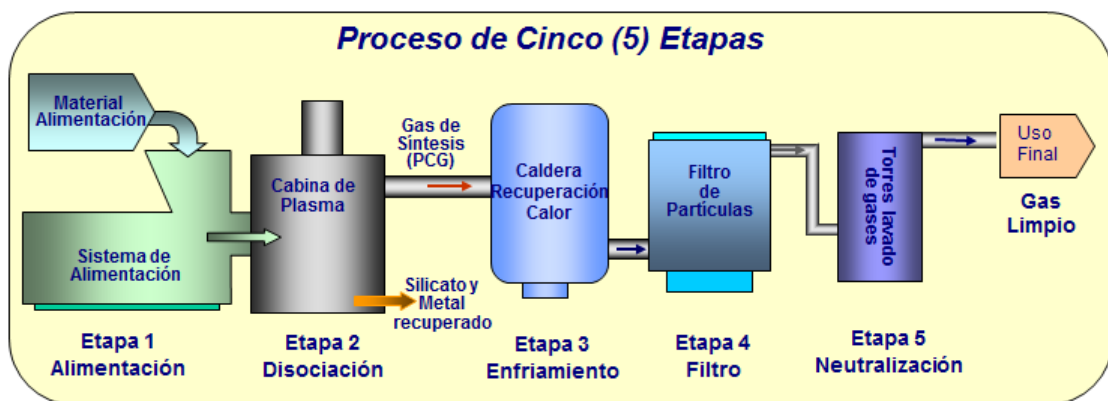


Figura 16. Etapas del proceso de la gasificación por plasma [12]

1. Primera etapa: Alimentación

En la primera fase se introducen tanto los residuos como el O_2 y el gas plasmógeno que permitirá generar el plasma en el reactor. Para ello se emplea un sistema de alimentación. Esta primera etapa consta de cuatro subetapas principales, que se realizan previamente a la inserción de los residuos para optimizar el proceso. Estos procedimientos son los siguientes:

- Reducción de tamaño: se reduce el volumen de los residuos, con el objetivo de lograr la uniformidad entre los compuestos más finos y los más gruesos y facilitar la inserción de los residuos en el reactor.

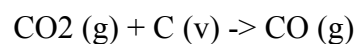
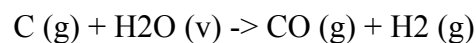
- Separación: a pesar de que con el primer procedimiento se pretende aumentar la uniformidad de los compuestos, esto no se consigue al 100%, por lo que los compuestos se someten a un proceso de separación. Es importante que se introduzca un compuesto uniforme en el reactor, ya que de esta manera el gas de síntesis no varía. Se emplean separadores magnéticos, balísticos y ópticos.
- Compactación: con este procedimiento se aumenta la densidad de los residuos para que el flujo de entrada de los residuos sea mayor.
- Reducción de humedad: Se reduce la humedad de los residuos empleando el calor generado por el gas de síntesis al salir del gasificador.
- Alimentación: se introducen los residuos en el reactor mediante una línea para que estos entren de manera continua. Se debe de contar con un sistema de control para regular la entrada y la circulación de los residuos.

2. Segunda etapa: Gasificación por plasma

La segunda etapa tiene tres características principales:

- 1- Disociación: durante la segunda etapa se consigue la disociación de las moléculas de los elementos que se han introducido en el reactor. Este procedimiento se realiza en el interior de una vasija, donde el plasma logra deshacer los elementos formando H_2 y CO , entre otros, especialmente en las moléculas orgánicas. El arco eléctrico que se produce en el interior de la vasija lo produce una antorcha de plasma gracias a la diferencia de potencial que se genera entre sus electrodos. Con la disociación se consigue una reducción volumétrica 300:1, ya que los metales pesados que se hayan podido introducir en la vasija pasan a fusionarse con el silicio que se encuentra en la arena fundida. Tal y como se ha explicado y desarrollado en el apartado anterior, en la etapa de la disociación se dan las siguientes reacciones:

- Cracking térmico: las moléculas más complejas se disocian produciendo moléculas más simples y formando hidrógeno e hidrocarburos.
- Oxidación parcial: a partir de la oxidación del carbono se forma el CO, y en menores cantidades el CO₂ y H₂O. Se debe controlar el aporte de oxígeno, ya que los dos últimos compuestos son desfavorables para el poder calorífico del gas de síntesis.
- Reformación: los elementos obtenidos tras la disociación reaccionan formando nuevas moléculas, y más concretamente H₂ y CO. Se dan las siguientes reacciones:



2- Destrucción: incluye la destrucción de cualquier tipo de compuesto tóxico. A partir de los 2700 °C comienza la disociación de los compuestos, y en durante este proceso se alcanzan los 5000 °C.

3- Fusión: se produce la unión de las moléculas inorgánicas, generándose una lava que, una vez enfriada, pasa a ser un vidrio basáltico inerte totalmente inocuo.

3. **Tercera etapa: Enfriamiento**

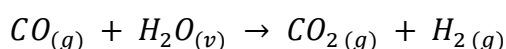
Durante la tercera etapa se debe enfriar el gas a la salida de la valija, que se encuentra entorno a los 1.000°C, por dos motivos principales: por un lado, para evitar que se combinen el monóxido de carbono con el hidrógeno, y por otro lado, para que las altas temperaturas no afecten a los equipos que se emplearán en las fases posteriores. Además, el calor extraído se puede emplear en un ciclo Rankine

para generar vapor y mover una turbina, produciendo así energía eléctrica.

4. Cuarta etapa: Postratamiento

Una vez que el gas ha sido enfriado, este debe ser tratado y purificado. Como se ha explicado previamente, los principales compuestos que se obtienen de la vasija son hidrógeno y monóxido de carbono. Sin embargo, se deben considerar otros componentes que hacen que este gas no sea tan puro, ya que el proceso no es ideal. Es por eso que es conveniente que se le realice un proceso de filtrado y purificación, que va a constar de:

- Filtro de mangas: es el filtro encargado de eliminar las partículas más gruesas que pueda contener el gas de síntesis. Se trata de una tela con forma de manga. Estas partículas quedan retenidas en la tela que conforma el filtro, y el gas continúa el proceso. Este filtro actúa como un ciclón, cuya tecnología se basa en la diferencia de densidades que hay entre las partículas sólidas y el gas.
- Torre de eliminación: mediante el método Scrubber, se elimina el H_2S que contiene el gas de síntesis. Mediante este método se mezcla el gas con una disolución de hidróxido de sodio, convirtiendo el H_2S en monóxido de sodio y agua.
- Reacción Shift: durante este proceso se emplea el hierro como catalizador para aumentar la pureza del hidrógeno que se encuentra en el gas de síntesis, mediante la eliminación del monóxido de carbono. Se da la siguiente reacción:



- Captura y secuestro de CO_2 : se elimina el exceso de CO_2 que se ha obtenido durante la reacción Shift, ya que este pasa a tener un 10% más de volumen del aceptado. Para ello, se hace pasar el gas por un baño de ánimas, las cuales captarán dichos excesos.

5.4. Sistemas y equipos necesarios para la gasificación por plasma

5.4.1. Vasija

Tal y como se ha explicado previamente, la vasija es el recipiente cilíndrico donde se introducen los residuos y se produce la disociación de las moléculas de los compuestos. Consta de una chapa de acero con una apertura por la que se introduce la antorcha de plasma, que generará el arco voltaico. Sus paredes son refractarias para proteger la estructura de la vasija de las altas temperaturas que se consiguen en el interior del reactor. Además se requiere un sellado compacto en su funcionamiento, por lo que esta operará a presiones negativas con el objetivo de evitar fugas del gas al introducirse los residuos en el interior del reactor. Finalmente, la salida del producto vítreo y del gas de síntesis puede darse por una misma salida o por dos salidas diferentes.

A continuación se muestra un esquema de su funcionamiento, así como las temperaturas a las que opera:

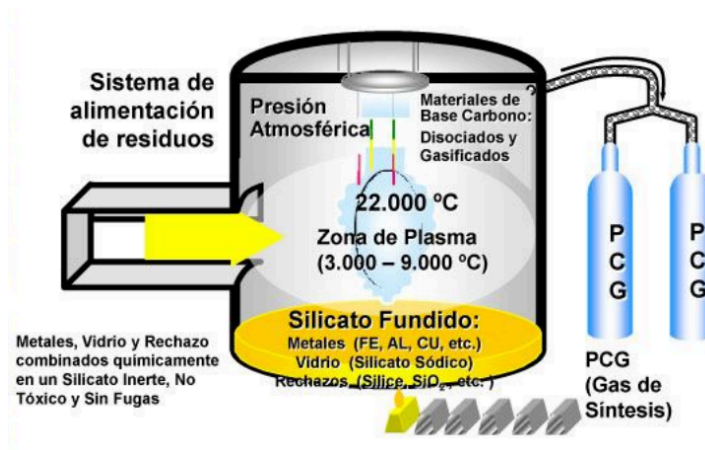


Figura 17. Esquema de funcionamiento de una vasija de plasma [12]

5.4.2. Antorcha de plasma

La antorcha de plasma, compuesta por dos electrodos, el cátodo y el ánodo, es el elemento que se introduce en el interior de la vasija y que permite que se forme el arco eléctrico que generará las altas temperaturas y la ionización molecular. El principal material que compone las antorchas de plasma es el acero inoxidable, y es importante que estas dispongan de un sistema de refrigeración para evitar posibles sobrecalentamientos. Además, estas funcionan a partir de corriente continua, por lo que será necesario incluir un generador como fuente de alimentación. Se pueden distinguir dos tipos de antorchas: antorcha transferida y antorcha no transferida. A continuación se muestran las diferencias:

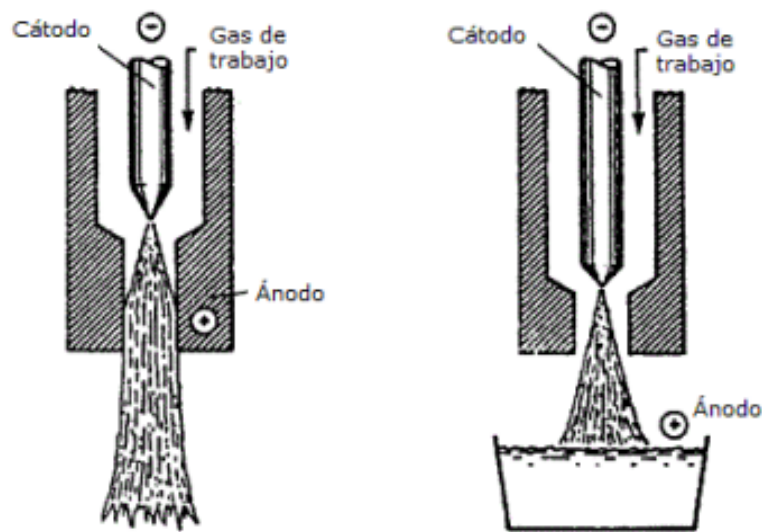


Figura 18. Antorcha de arco eléctrico transferido (izquierda) y de arco eléctrico no transferido [10]

En las antorchas de arco eléctrico transferido uno de los electrodos no se encuentra en el interior de la antorcha, por lo que se pueden conseguir arcos más largos y concentrados. En este caso, la energía se obtiene a partir de la transmisión de calor que se da por convección, conducción y radiación.

Por otro lado, en las antorchas de arco eléctrico no transferido, tal y como se muestra en la Figura 19, ambos electrodos se encuentran en el interior de la antorcha. Este tipo de antorcha presenta más ventajas, ya que podrá trabajar tanto con residuos formados por materiales conductores como no conductores. En este caso, la energía se obtiene a partir de la transmisión de calor que se da por radiación.

Las antorchas requieren de un sistema de refrigeración. Estos generalmente se componen de dos intercambiadores de calor: uno de ellos agua-aire, y otro de ellos agua-agua, de forma que el calor se transmite a un circuito de agua desionizada, que circulará a una presión mayor.

5.4.3. Sistemas de generación de gas y de control del proceso

Por un lado, se tiene el sistema de generación de gas. Este se encarga de introducir el gas que necesita la antorcha para generar el arco. El gas se introduce a 6 ó 7 bares, y es regulado por el sistema de control. Se conoce como gas plasmógeno, y puede ser oxidante, reductor o inerte.

Por otro lado, se tiene el sistema de control del proceso. Este se encarga de regular la entrada de la materia y del gas en la vasija, de controlar la composición del gas y de los productos que se van generando, y de supervisar al generador de corriente continua que necesita la antorcha. Para ello, se emplea un control lógico programable (PLC), que puede ser gestionado por desde un puesto de control mediante un interfaz humano.

5.4.4. Sistema de descarga y extracción

Una vez finalizado el proceso, se deben extraer tanto el material vitrificado como el gas de síntesis.

El material vitrificado se puede obtener de manera continua o no continua. La

extracción continua se da mediante un sistema mecánico, como por ejemplo un tornillo sin fin, mientras que la extracción no continua se realiza mediante extracciones puntuales una vez que se forma suficiente cantidad de material vitrificado. Una vez que se ha extraído, se debe almacenar en un depósito con agua para enfriarlo y poder obtener material manipulable.

Por último, el gas de síntesis se obtiene mediante un extractor. Se trata de un soplante de extracción, formada por un ventilador impulsado por un motor, que regula la presión de la vasija, manteniéndola con valores negativos.

5.5. Ventajas de la gasificación por plasma para el tratamiento de residuos

Una vez entendido el proceso de la gasificación por plasma, conviene analizar algunas de las ventajas que supone su aplicación al tratamiento de residuos. En primer lugar, y en comparación con otros métodos convencionales, permite no solo el aprovechamiento energético de los residuos, sino también la erradicación de estos. Los vertederos que existen en la actualidad continúan emitiendo contaminantes a pesar de encontrarse inactivos, y cada vez requieren de más espacio terrestre para acumular todos los residuos que se van produciendo. Con la gasificación por plasma se puede evitar dicho problema, ya que además de obtenerse la energía contenida en la materia orgánica, se obtiene un material vitrificado procedente de la materia inorgánica. Por tanto, permite el tratamiento de todo tipo de residuos.

Otra de las ventajas que supone es que dicho sistema es capaz de trabajar en agujeros subterráneos, al introducirse la antorcha en el interior de la tierra, por lo que puede servir para el vaciado de los vertederos que existen actualmente, de los cuales se puede seguir aprovechando el potencial de sus residuos.

Además, y también en comparación con los métodos tradicionales de depósito en vertederos o incineración, con el proceso de gasificación por plasma se obtienen

temperaturas muy altas, de hasta más de 7.000°C. A dichas temperaturas todos los posibles contaminantes quedan erradicados, y no se emiten al exterior.

Y, por último, la gasificación por plasma permite cumplir con los objetivos y las normas impuestas por la Economía Circular, por la cual se exige que el depósito de residuos en vertederos debe quedar reducido a un 10% en 2020.

6. Dimensionamiento de la planta

6.1. Gasificación por plasma

A continuación, se ha procedido a dimensionar la planta que se propone para el vertedero de Gazo. Los residuos se van a someter al proceso de gasificación por plasma para lograr un doble objetivo: por un lado, se pretende aprovechar el calor obtenido en el proceso mediante un ciclo de Rankine y, por otro lado, se pretende obtener hidrógeno a partir del gas de síntesis. Con este hidrógeno se alimentarán pilas de combustible, a partir de las cuales se obtiene energía eléctrica. El diseño de la planta se va a realizar tomando como referencia la empresa *Materiales Renovados*, y se va a detallar a continuación.

El punto de partida a la hora de diseñar la planta de gasificación es analizar la cantidad y el tipo de residuo que se va a tratar. Con el proyecto se pretende realizar un doble tratamiento: por un lado, se irá vaciando el vertedero, tratándose los residuos que ya han fermentado en el vertedero. Por otro lado, se irán tratando nuevos residuos que van entrando en la planta. Por tanto, se van a analizar las dos componentes:

6.1.1. Residuos fermentados en el vertedero

Se dispone de un registro del vertedero en el que consta que durante sus 11 años de

utilización se han acumulado 308.000 Tm. de residuos. En la siguiente tabla se muestra la composición de dichos residuos, partiendo de una muestra de 254,24kgr.

Tabla 1. Composición de residuos GAZO

Componente	kg	%
Materia orgánica	133,77	52,61%
Papel/cartón	34,57	13,60%
Férricos	6,60	2,60%
Materiales no férricos	2,72	1,07%
Cartón de bebidas (brick)	3,32	1,30%
Plásticos	28,72	11,30%
Vidrio	8,20	3,22%
Ropa/calzado	6,63	2,61%
Textiles sanitarios	17,75	6,98%
Varios (otros, madera,etc.)	11,98	4,71%
Total muestra	254,24	100%

Se va a establecer un plazo de vaciado de 10 años, de forma que diariamente se van a tratar 96,25 Tm. del vertedero. El método que se propone se muestra a continuación, inspirado en el proyecto de Louis J. Circeo, “*Plasma Arc Gasification of Municipal Solid Waste*”.

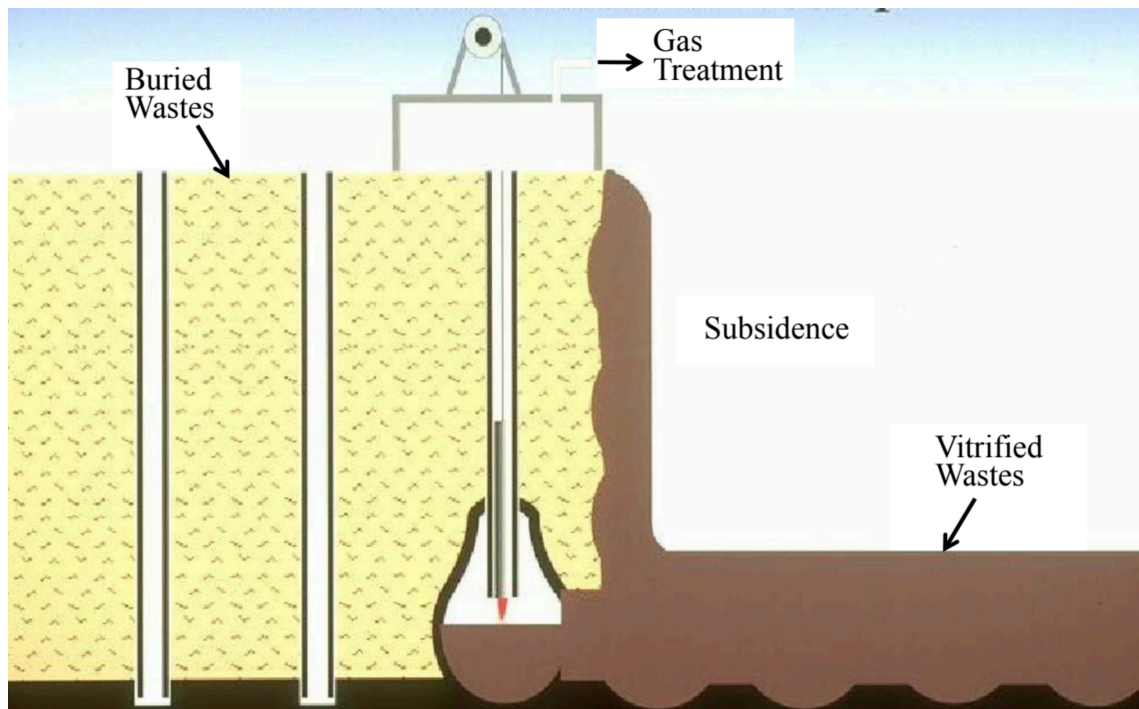


Figura 19. Método de tratamiento y vaciado de residuos del vertedero [13]

6.1.2. Residuos registrados diariamente

Además de ir vaciando el vertedero, se irán tratando nuevos residuos que van entrando en la planta. Para estimar este último dato se va a tomar como referencia el total de kg. de residuos sólidos urbanos que se registraron en el vertedero de Gazo a lo largo de 2018, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

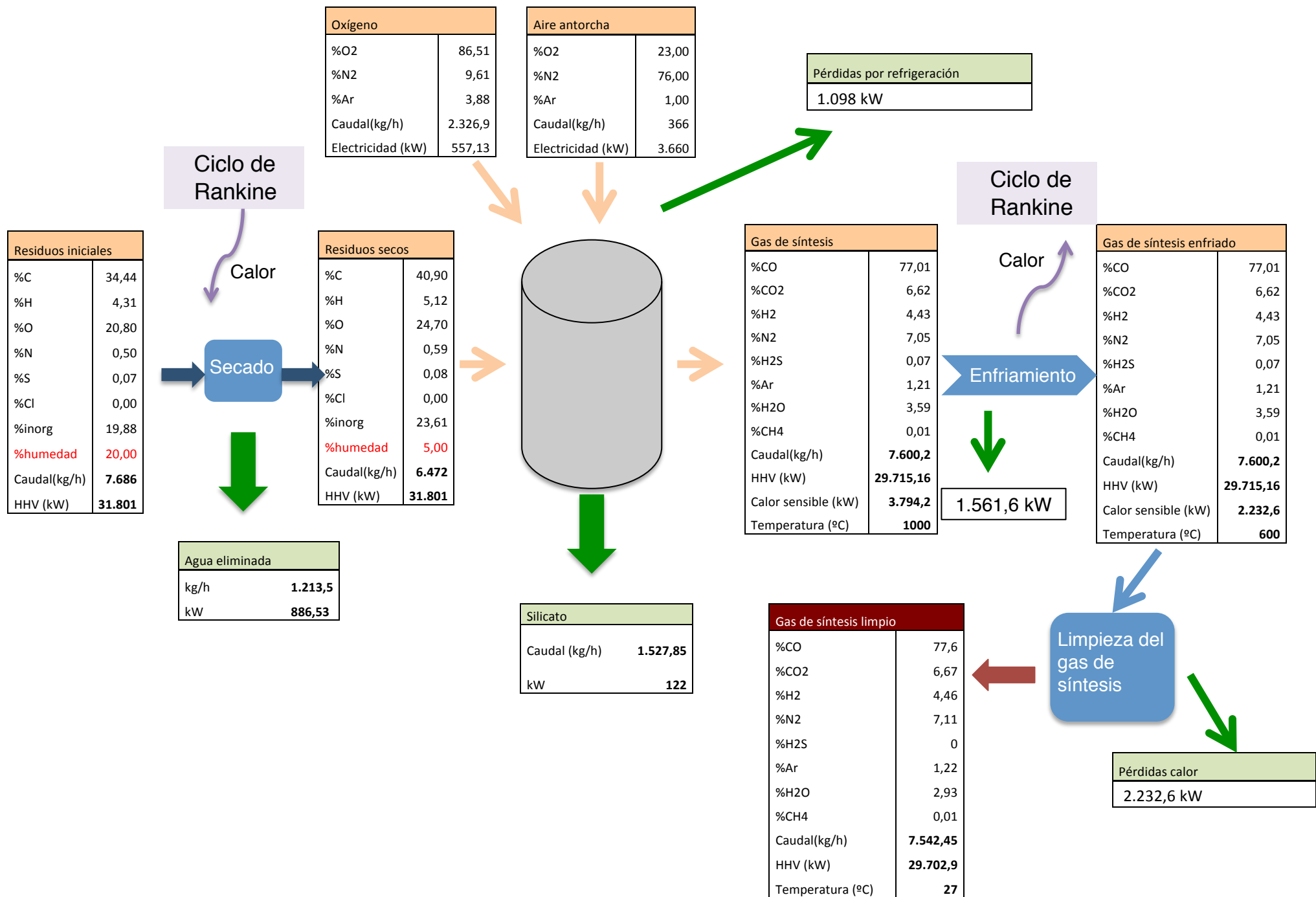
Tabla 2. Registro de entrada de residuos Gazo (2018) [14]

Empresa	ENERO	FEB.	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL 2018
COMARCA DE SOMONTANO(CIUDAD)	462,3	363,2	362,1	362,6	398,5	416,7	538,8	487,9	518,0	451,1	432,2	550,1	5.343,5
COMARCA DE SOMONTANO (PUEBLOS)	204,9	153,5	331,7	369,7	368,2	335,7	292,0	426,7	259,8	282,2	202,1	189,5	3.415,9
COMARCA DE CINCA MEDIO	593,5	490,1	588,5	603,6	628,7	622,0	650,4	720,7	644,9	650,9	572,9	603,8	7.370,1
COMARCA DE SOBRARBE	262,2	213,8	238,6	349,7	341,8	329,5	598,4	762,7	373,9	374,9	285,3	286,5	4.417,3
COMARCA DE RIBAGORZA(BENABARRE)	98,1	58,7	94,1	115,6	99,7	94,3	115,9	182,1	91,4	117,4	52,6	78,9	1.198,5
COMARCA DE RIBAGORZA(CAMPO)	255,7	187,2	223,8	188,3	173,8	163,6	304,4	401,9	177,4	194,7	163,6	217,6	2.652,0
COMARCA DE RIBAGORZA(GRAUS)	97,1	73,4	107,6	107,7	112,4	115,6	132,7	159,1	120,6	114,4	105,6	101,7	1.347,7
COMARCA DE LA LITERA	490,9	434,5	508,8	525,6	542,7	534,7	578,9	645,3	572,8	559,7	517,9	541,2	6.453,1
TOTAL MENSUAL	2.464,7	1.974	2.455	2.622	2.665	2.612	3.211	3.786	2.758	2.745	2.332	2.569	32.198,2
TOTAL DIARIO BALAS POR MESES (UNIDADES)	82,2	65,8	81,8	87,4	88,9	87,1	107,0	126,2	92,0	91,5	77,7	85,6	88,2
	1.620	908	1.624	1.447	1.548	1.486	1.784	1.987	1.320	0	0	0	13.724

Se va considerar una cantidad diaria de 88,21 Tm. Por tanto, si sumamos ambas cantidades de residuos, se estimará que la planta debe tratar un total de 184,5 Tm. diarias.

Antes de comenzar el proceso, dichos residuos se deben compactar para mejorar su procesamiento, y posteriormente se introducen en una secadora para mejorar los rendimientos y eficacia del proceso. Se debe reducir la humedad hasta un 5%.

Por otro lado, se debe introducir el comburente que permitirá encender la antorcha de plasma. En este caso, se emplearán oxígeno y aire. A continuación se muestra el esquema con el balance energético obtenido:



6.2. Recuperación de calor: ciclo Rankine

Los gases, al salir de la vasija, se encuentran a una temperatura de en torno los 1000°C , por lo que es necesario enfriarlos antes de ser introducidos en el filtro y en el sistema de limpieza. Para optimizar el proceso, el enfriamiento de los mismos se va a realizar con un intercambiador de calor, de manera que se pueda aprovechar la energía calorífica para emplearla en el mismo proceso. Así, se instalará un ciclo rankine, de forma que, por un lado, se aproveche el calor al hacer pasar el gas de síntesis por una turbina de vapor que genere electricidad y, por otro lado, se obtenga el calor necesario para secar los residuos y reducir su humedad al 5%, empleando un condensador. A continuación se muestra el esquema básico de un ciclo de Rankine, que se aplicará a la planta de Gazo:

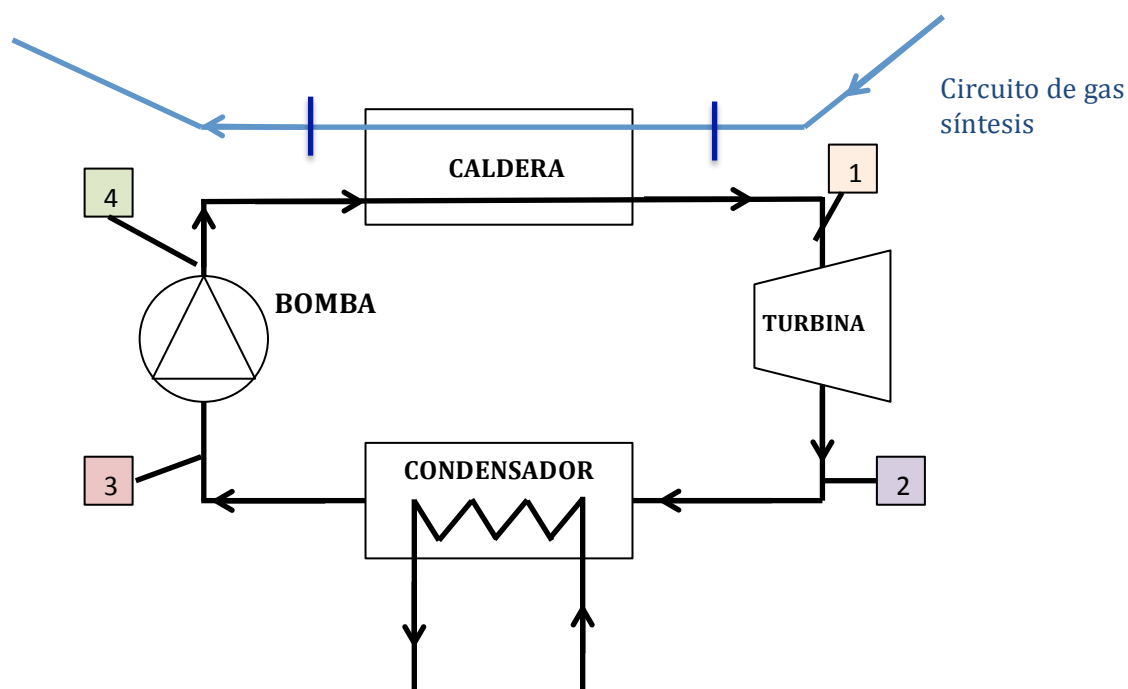


Figura 20. Esquema básico ciclo de potencia de Rankine [7]

A continuación se va a detallar en mayor profundidad el funcionamiento de cada uno de los elementos y de las etapas de las que consta el ciclo, así como de las condiciones de trabajo a las que estos funcionan.

6.2.1. Caldera de recuperación de calor

El gas de síntesis que sale de la vasija se lleva a la caldera, donde se reduce su temperatura hasta aproximadamente los 500°C. La caldera es un intercambiador de calor formada por dos circuitos cerrados, a contracorriente, entre los cuales se da una transferencia de calor:

- Circuito de gases, por donde circula el gas de síntesis. Este cede el calor al circuito, reduciendo así su temperatura tal y como se ha comentado antes, desde aproximadamente los 1000°C hasta los 500°C. Durante este proceso de reducción de temperatura se produce una liberación de calor de 1.561,60 kW que se cederá al circuito de agua/vapor para permitir el cambio de estado del agua.
- Circuito agua/vapor, de forma que llega agua comprimida en estado líquido a la caldera y sale en forma de vapor sobrecalentado, al calentarse con el calor cedido por el gas de síntesis, hasta una temperatura de unos 500°C.

Se asume que la caldera tiene una presión de trabajo de 40 bar, así como un rendimiento del 90%. En la siguiente tabla se muestran las condiciones tanto de la entrada como de la salida del agua en la caldera:

Tabla 3. Condiciones de funcionamiento en la caldera [7]

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (KJ/kg)
4	40	41,6	178,8
1	40	600	3666,8

Además, se calcula el calor cedido y el gasto másico de agua:

$$Q_{cedido} = 1.561,60 \cdot 0,9 = 1.405,44 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{agua} = \frac{1.561,6}{3666,8 - 178,8} \cdot 3600 = 1.611,7 \text{ kg/s}$$

6.2.2. Turbina

Se encuentra a la salida de la caldera. Tras la caldera, el agua sale en forma de vapor sobrecalentado, de forma que en la turbina se produce una expansión del vapor, con la consiguiente generación de electricidad. La siguiente tabla muestra las condiciones del agua en el punto de antes y después de la turbina:

Tabla 4. Condiciones de funcionamiento en la turbina [7]

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

Se considera un rendimiento isentrópico de 0,85, y el trabajo que se produce se puede expresar como:

$$W_{turbina} = 0,85 \cdot \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 0,85 \cdot 1.611,7 \cdot (3.666,8 - 2.576,2)/3600$$

$$= 415,01 \text{ kW}$$

6.2.3. Condensador

Esta formado por un intercambiador de calor, en el cual se enfría el circuito agua/vapor mediante el uso de un refrigerante externo. El condensador tiene dos objetivos principales:

- Enfriar el vapor que llega de la turbina, generando así de nuevo líquido saturado que se comprimirá en la bomba.
- Obtención de calor, que permitirá secar los residuos a la entrada de la vasija de plasma para reducir su humedad.

La siguiente tabla muestra las condiciones del agua en su paso por el condensador:

Tabla 5. Condiciones de funcionamiento en el condensador [7]

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (KJ/kg)
2	0,08	41,5	2.576,2
3	0,08	41,5	173,8

Al igual que ocurre en la caldera, en el condensador se produce un intercambio de calor. En este caso, el intercambio se da entre el circuito de agua/vapor, y los residuos que posteriormente se introducen en la vasija. De esta manera, con el calor recibido pueden ser secados antes de comenzar el proceso. Se considera un rendimiento del condensador de un 90%, por lo que el calor extraído se expresa como:

$$Q_{residuos} = 0,9 \cdot \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) / 3600 = 967,98 \text{ kW}$$

6.2.4. Bomba

Se encarga de comprimir el líquido saturado del circuito agua/vapor que proviene del condensador, al cual se le aumenta la presión antes de ser

introducido en la caldera, a unos 40 bar. Para poder realizar la compresión, la bomba necesita ser accionada, aprovechando la energía generada en la turbina de vapor. La siguiente tabla muestra las condiciones del agua en su paso por la bomba:

Tabla 6. Condiciones de funcionamiento en la bomba [7]

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (KJ/kg)
3	0,08	41,5	173,8
4	50	41,6	178,8

Considerándose un rendimiento del 90%, el trabajo que empleará la bomba se expresa, por tanto, como:

$$W_{bomba} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3)/3600 = 2,23 \text{ kW}$$

$$W_{bomba} = \frac{2,23}{0,9} = 2,47 \text{ kW}$$

6.2.5. Energía obtenida en el ciclo

La potencia o trabajo total del proceso será el producido por la turbina, restándole lo que consumirá la bomba para comprimir el líquido. Por tanto:

$$W_{neto} = W_{turbina} - W_{bomba} = 415,01 - 2,47 = 412,54 \text{ kW}$$

Y, por tanto, el rendimiento total del ciclo será el siguiente:

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neto}}{Q_{aportado}} = \frac{412,54}{1.405} = 0,29$$

Este rendimiento del 29% se va a aceptar, ya que el principal objetivo del ciclo

de Rankine es aprovechar el calor del gas de síntesis a la salida del gasificador.

Una vez calculada la potencia total del proceso, se puede obtener la energía que se genera anualmente, para lo que se considerará que la planta se encuentra operativa 8760h. anuales. Por tanto:

$$E_{total} = 412,54 \cdot 8760h = 3.613 \text{ MWh}$$

6.3. Calor aplicado al secado de residuos

Tal y como se ha explicado en el proceso de gasificación, los residuos se deben secar antes de ser introducidos en la vasija para mejorar el rendimiento general del proceso. Así, se reduce la humedad del 20% al 5%. El calor que será necesario aportar se calcula con la siguiente fórmula:

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

De dónde,

$\dot{m}_{vapor}$, es el gasto másico de humedad que se desea eliminar

L_{agua} , es el calor latente del agua = 2255 KJ/kg

El gasto másico se calcula teniendo en cuenta el caudal de residuos de entrada (7.686 kg/h), y que se va a reducir la humedad del 20% al 5%. Por tanto:

$$\dot{m}_{vapor} = (0,2 - 0,05) \cdot 7.686 = 1.152,9 \text{ kg/h}$$

$$Q = 1.152,9 \cdot 2255 = 2,59 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} = 722,16 \text{ kW}$$

Este calor se va a obtener del condensador del ciclo de Rankine. Como se ha calculado previamente, el calor que se cede en el condensador es de 967,98 kW, por lo que se comprueba que es suficiente para el secado de los residuos.

6.4. Hidrógeno contenido en el gas de síntesis. Reactor Shift

Como se ha mencionado previamente, el aprovechamiento energético de los residuos se va a realizar mediante pilas de combustible, las cuales necesitan de hidrógeno para producir energía eléctrica. Dicho hidrógeno se obtiene a partir del gas de síntesis, por lo que este se debe someter a un proceso a la salida de la planta de gasificación para aumentar su porcentaje. Este proceso tiene lugar lo que se denomina como reactor Shift, y se describe a continuación:

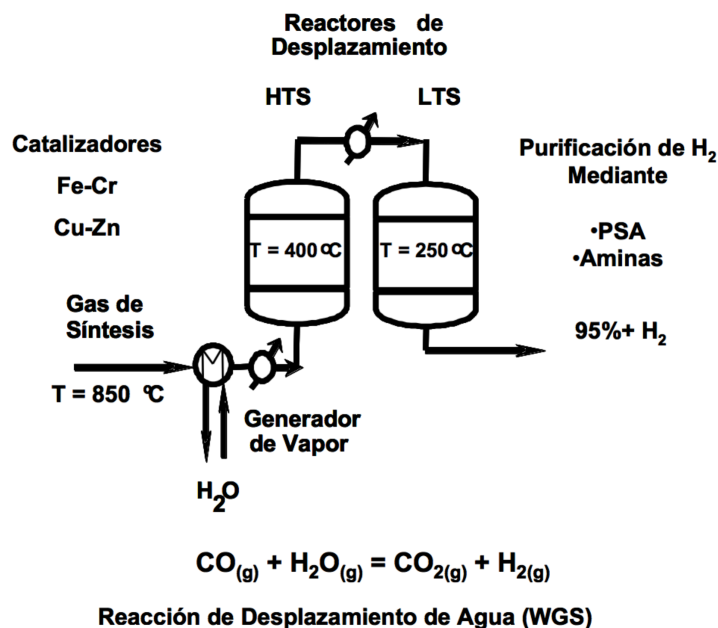
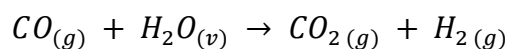


Figura 21. Proceso convencional para producir hidrógeno a partir del gas de síntesis [12]

- El primer paso consiste en la reacción de desplazamiento de agua WGS (water gas shift), durante la cual el monóxido de carbono es convertido a

dióxido de carbono e hidrógeno a alta temperatura HTS (High Temperature Shift). Se da la siguiente reacción:



Esta reacción tiene lugar con un catalizador de óxido de hierro-cromo a una temperatura de alrededor de los 350-450 °C en un reactor de cámara fija. Aproximadamente el 94% del CO se consume en la reacción WGS.

- Los gases que derivan de la reacción se enfrían fuera del reactor generando vapor de agua, y a continuación se transportan a otro reactor WGS de cámara fija que trabaja a baja temperatura LTS (Low Temperature Shift), el cual trabaja a 200-215 °C.

El gas de síntesis, una vez que ha sido neutralizado en la torre de eliminación, se introduce en un reactor Shift, donde se produce una reacción con la que se aumenta el porcentaje de hidrógeno contenido en el gas. En la siguiente tabla se muestra la composición del gas de síntesis limpio:

Tabla 7. Composición gas de síntesis limpio [13]

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

Se puede calcular el hidrógeno obtenido, teniendo en cuenta la relación estequiométrica que se da en la reacción.

$$\dot{m}_{H_2\text{inicial}} = 7.542,45 \cdot 0,046 = 346,95 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{H_2, \text{shift}} = \frac{\dot{m}_{CO}}{MM_{CO}} \cdot MM_{H_2} = \frac{0,776 \cdot 7.542,45}{28,01} \cdot 2 = 417,91 \text{ kg/h}$$

De forma que, sumando el hidrógeno inicial más el producido durante la reacción shift, se obtiene un total de 764,86 kg/h de hidrógeno por cada 7.686 kg/h de residuos que se introducen en la planta.

7. Pilas de combustible

7.1. Descripción

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten de manera directa la energía química en energía eléctrica. Para ello necesitan un combustible, que generalmente es hidrógeno, y un comburente, principalmente oxígeno, para producir agua, calor y electricidad en forma de corriente continua.

Tal y como se ha analizado en el apartado anterior, la planta de gasificación por plasma facilita el aprovechamiento de los residuos generando un gas de síntesis, el cual contiene grandes cantidades de hidrógeno. Este hidrógeno se puede emplear posteriormente para producir electricidad mediante las pilas de combustible. El uso de pilas presenta muchas ventajas, como su alta eficiencia, su facilidad para acoplarse a los sistemas y proporcionar la electricidad, o el bajo impacto que supone al medio ambiente. Además su rango de aplicación es muy amplio, ya que es capaz de alimentar desde pequeñas instalaciones hasta otras más grandes como sistemas de cogeneración o producción de electricidad.

Por tanto, a continuación se elegirán y se dimensionarán las pilas que mejor se adapten a la instalación propuesta de manera que se pueda utilizar el hidrógeno

para generar y almacenar electricidad.

7.2. Principios de funcionamiento

En la pila de combustible se genera electricidad a partir de las reacciones químicas que se dan entre ciertas sustancias, admitiendo un suministro continuo de reactivos.

Las pilas son dispositivos electroquímicos en las que mediante un proceso catalítico electrolítico se transforma energía química en calor y electricidad, empleando directamente la energía que contienen los combustibles. La reacción entre el combustible y el comburente se produce sin combustión, por lo que se evita la contaminación que se da en otro tipo de transformaciones.

Las pilas de combustible constan de dos electrodos: el ánodo, donde se oxida el combustible, y el cátodo, donde se reduce el comburente. Además, se emplea un electrolito como catalizador y permite la unión entre ambos electrodos. Tal y como se muestra en la siguiente figura, la pila se alimenta con el combustible (hidrógeno) y el comburente (oxígeno), quedando el electrolito en la zona central de la pila, tocando los electrodos por su cara opuesta. El modo de funcionamiento se describe a continuación.

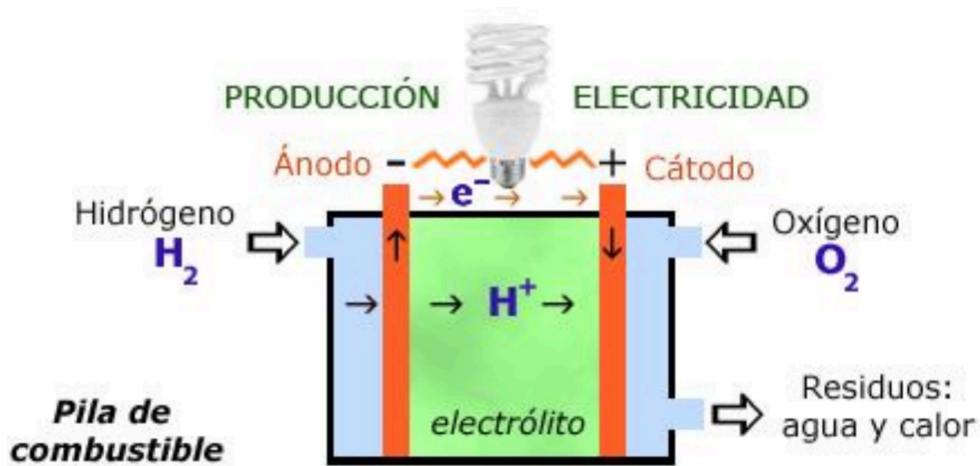
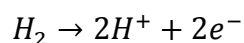
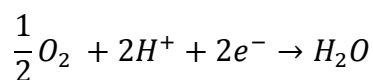


Figura 22. Funcionamiento de una pila de combustible [15]

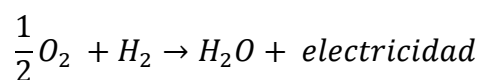
Por un lado, en el ánodo se produce una reacción química, en la cual se le extraen los electrones al hidrógeno. La reacción que se produce es la siguiente:



De esta manera, los átomos de hidrógeno se ionizan con una carga positiva. Por otro lado, se desprenden electrones con una carga negativa que se encargarán de generar la corriente eléctrica. Estos iones se transportan a través del electrolito hasta encontrarse con el oxígeno, que entra por el lado del cátodo, donde se produce la siguiente reacción:



La combinación de ambas reacciones da, a su vez, la siguiente reacción:



Mediante la ecuación de Nernst se deduce el rendimiento de la reacción:

$$E = E_o - \left[\frac{RT}{nF} \right] \ln(Q)$$

Donde:

- Eo es el potencial estándar = 1.229V
- R es una constante = 8,31 J/Kmol
- T es la temperatura absoluta en K
- F es la constante de Faraday = 96.480 J/Vmol
- n es la cantidad de mol de electrones que participan en la reacción
- Q es el coeficiente de reacción correspondiente

Cabe destacar que todos los términos de la ecuación de Nernst son constantes excepto la temperatura. Es por ello que esta jugará un papel fundamental a la hora de diseñar y escoger las pilas de combustible.

7.3. Tipos de pilas

Existen distintos tipos de pilas de combustible. Se clasifican en función del material del electrolito, y operarán a diferentes temperaturas. Actualmente las pilas de combustible se encuentran en fase de desarrollo, por lo que se valorarán solo las más óptimas desde un punto de vista tanto tecnológico como económico. A continuación se muestra una tabla resumen con los distintos tipos de pilas:

Tabla 8. Tabla resumen tipos de pilas de combustible

Tipo	Electrolito	Tª Operación	Rango potencia	Ventajas	Aplicaciones
PEM	Membrana de Polímero Sólido	60-80	5-250 kW	Baja Temperatura Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento Mayor eficiencia	Trasnporte Portátiles Residencial
AFC	Solución Alcalina	100-120	5-150 kW	Reacción catódica más rápida	Espaciales
PAFC	Ácido Fosfórico	200-250	50 kW-11 MW	Acepta H ₂ impuro	Generación eléctrica distribuida y calor
MCFC	Carbonatos Fundidos	600-700	100 kW- 2MW	Reformado interno Cogeneración	Generación eléctrica distribuida y calor
SOFC	Óxido Sólido	800-1000	100-250 kW	Reformado interno Cogeneración	Generación eléctrica distribuida y calor
DMFC	Membrana de Polímero Sólido	50-120	5 kW	No necesita reformador de combustible	Portátiles

De los distintos tipos de pilas, se van a considerar para el proyecto aquellas que operen a temperaturas más bajas. La pila DMFC se descartará por su baja potencia. Se va a analizar de forma más detallada, por tanto, el funcionamiento de las pilas PEM, AFC y PAFC.

7.3.1. Pilas de combustible de membrana polimérica (PEM)

Las pilas de membrana polimérica (PEM) o de membrana de intercambio de protones, usan como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen un catalizador de platino. Trabajan con hidrógeno, oxígeno y agua, y, a diferencia de otros tipos de pilas, no necesitan usar fluidos corrosivos. Suelen emplear hidrógeno puro, el cual se almacena en depósitos incorporados en el propio sistema.

Este tipo de pilas operan a una temperatura de en torno a 80°C y su eficiencia es de alrededor 40% - 50%. Su baja temperatura de operación reduce los problemas de corrosión y permite que estas arranquen más

rápido, ya que necesitan menos tiempo de calentamiento. Este hecho resulta muy favorable para el caso que se está estudiando, en el que se pretende instalar un sistema de reserva con una respuesta rápida. Además, su vida útil es considerablemente mayor que para otras pilas, al operar a bajas temperaturas y, por tanto, estar sometidas a un menor desgaste.

Este tipo de pilas presentan una densidad energética elevada, son ligeras y de pequeño tamaño. Además poseen una alta resistencia química y mecánica, de forma que sus membranas pueden ser muy delgadas.

Su desventaja es que emplean un catalizador de platino extremadamente sensible al monóxido de carbono, de forma que se tiene que emplear un reactor de más para reducir dicha sustancia del combustible y, por tanto, se encarece el sistema.

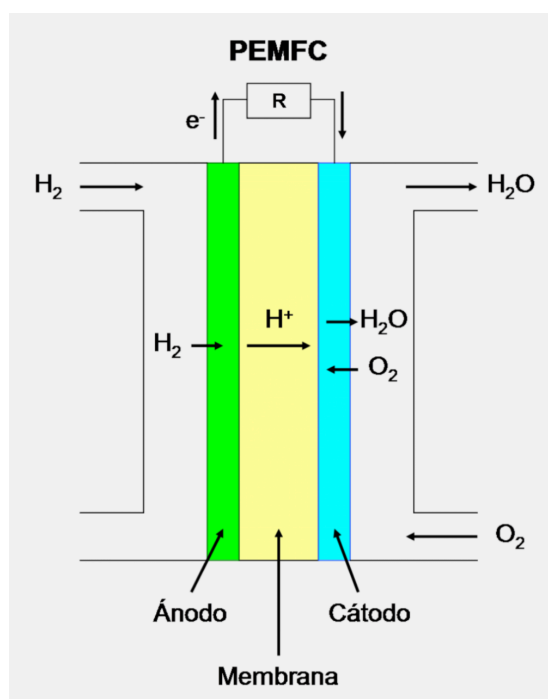


Figura 23. Esquema pila de combustible PEM

7.3.2. Pilas de combustible alcalinas (AFC)

Las pilas de combustible alcalinas fueron unas de las primeras en comercializarse, tras el trabajo que llevo a cabo Francis Bacon en los años 50. Del mismo modo, fueron las primeras empleadas en el programa espacial de EE.UU. para generar energía eléctrica y agua para las naves espaciales.

El electrolito de las pilas AFC es una disolución de hidróxido de potasio (KOH) en agua (85%), y permite el uso de metales no preciosos como catalizadores en el ánodo y en el cátodo. Existen dos modelos de pilas AFC: las de alta temperatura, que operan a temperaturas de entre 100°C y 250°C, y las de baja temperatura, más modernas, capaces de operar a temperaturas de menos de 70°C.

Este tipo de pilas presentan un alto rendimiento gracias a la velocidad a la que se dan las reacciones que se producen en ellas, llegando al 60% de rendimiento en ciertas aplicaciones espaciales.

No obstante, requieren de hidrógeno y oxígeno purificado para su funcionamiento, por lo que los costes se incrementan. Además, poseen altos rendimientos durante más de 8.000h. de funcionamiento, pero para lograr su amortización económica sería necesario que funcionasen más de 40.000h., lo cual se complica por la degradación de los materiales.

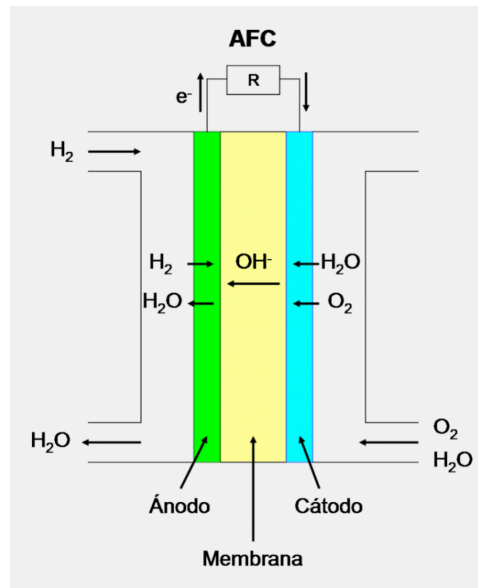


Figura 24. Esquema pila de combustible AFC

7.3.3. Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

Las pilas de combustible de ácido fosfórico emplean un electrolito conductor de protones compuesto por ácido fosfórico (H_3PO_4) líquido y electrodos de carbono poroso con un catalizador de platino (Pt). Este tipo de pilas se consideran las primeras pilas modernas que se desarrollaron.

Su temperatura de funcionamiento oscila entre los $150^{\circ}C$ y $200^{\circ}C$, siendo preferible operar a temperaturas mayores para reducir los problemas de contaminación con CO de los catalizadores. Su eficiencia es de entre 37% y 42%, pero si se aplica a la cogeneración de energía eléctrica, se aumenta la eficiencia hasta 85% para dispositivos que trabajen a más de $200^{\circ}C$.

Este tipo de pilas son capaces de producir menos energía que otros tipos de pilas que presentan mismo peso y volumen. Por tanto, suelen ser pilas de gran tamaño y más caras.

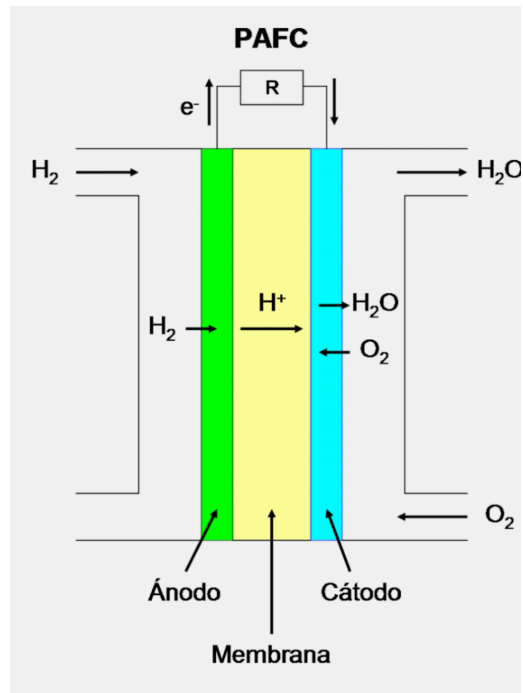


Figura 25. Esquema pila de combustible PAFC

7.4. Elección de la pila combustible

Las pilas se van a emplear para alimentar a la red eléctrica, de forma que estas funcionen como sistemas de reserva. Por tanto se va a elegir una pila de tipo PEM, ya que como se ha mencionado previamente ofrece dos ventajas principales: por un lado, opera a bajas temperaturas, lo que permite un arranque rápido. Esto permitiría satisfacer rápidamente con la demanda en las ocasiones en las que fuese necesario su funcionamiento. Por otro lado, las pilas PEM presentan una densidad energética mayor en comparación con otro tipo de pilas.

Existen numerosas empresas que desarrollan pilas PEM, y se va a elegir una del fabricante Ballard. Sus módulos son de 1 MW, con una eficiencia del 40%, y presentan una admisión de hidrógeno de 63 kg/h.

8. Almacenamiento de hidrógeno

Una de las principales ventajas que tiene el hidrógeno como recurso energético es que se puede almacenar. Esto resulta especialmente útil en las instalaciones de energía renovable, ya que mientras estas energías están en funcionamiento el hidrógeno se va almacenando, para luego ser utilizado en los picos de demanda o en las situaciones en las que energías convencionales no son capaces de cubrir la demanda.

La forma de almacenamiento del hidrógeno se clasifica según el estado en el que este se encuentre, que podrá ser sólido, líquido o gaseoso.

8.1. Almacenamiento en estado gaseoso

En este tipo de almacenamiento el gas se debe comprimir previamente hasta alcanzar altas presiones, de entorno a los 200-700 bar. Esto supone un inconveniente, ya que se necesitan tanques muy gruesos capaces de soportar dichas presiones y que encarecen la instalación. A continuación se muestra un tanque de almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso:

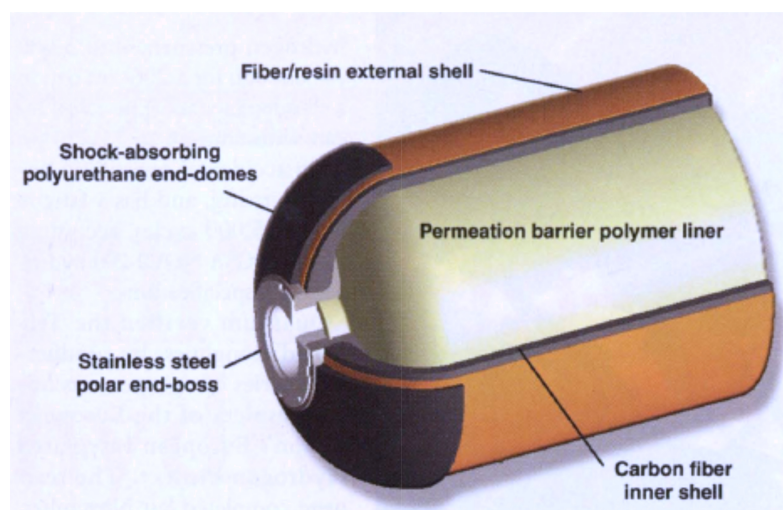


Figura 26. Esquema de tanque de hidrógeno comprimido

El gas hidrógeno en estado gaseoso presenta una densidad baja, de $12 \text{ MJ}/\text{m}^3$ y, como ya se ha mencionado, esta forma de almacenamiento se trata de un sistema caro. Se ha empleado durante mucho tiempo en la industria naval y en aplicaciones móviles, pero se va a descartar su aplicación en la planta de gasificación del proyecto.

8.2. Almacenamiento a temperatura criogénica o en estado líquido

Mediante este sistema se trata de bajar la temperatura del hidrógeno hasta los 20K aproximadamente, temperatura a la cual el gas se condensa a una presión de 1atm. La mínima temperatura necesaria para que se de dicha condensación es de 33K, pero para ello el gas debe estar sometido a 13 bar, por lo que se encarece la instalación. Además, para mantener el gas a dicha temperatura se necesitan tanques criogénicos, como el que se muestra a continuación, de forma que también supone un incremento en el coste del sistema.

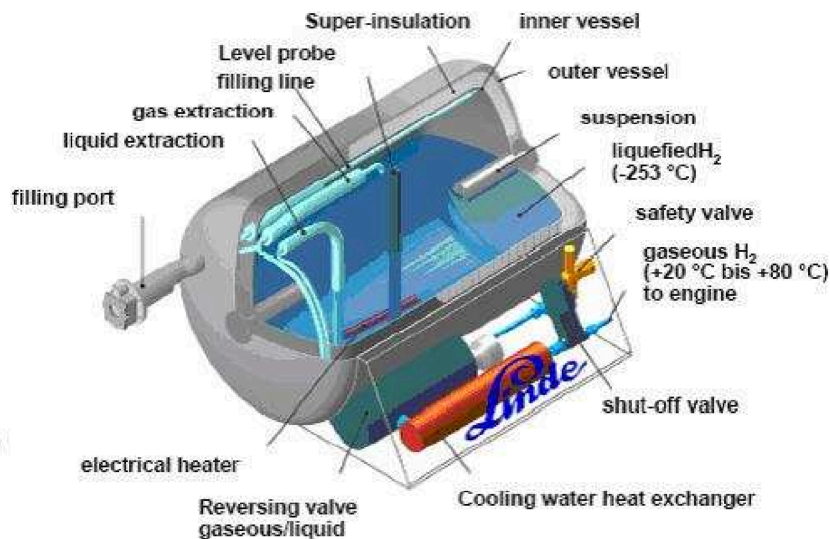


Figura 27. Esquema de tanque de hidrógeno líquido

8.3. Almacenamiento mediante hidruros metálicos o en estado sólido

Este tipo de almacenamiento se realiza mediante hidruros metálicos. Su principio de funcionamiento es el siguiente: en un principio, el metal se encuentra limpio de hidrógeno. Poco a poco se le inyecta hidrógeno a cierta temperatura y éste se va disolviendo en el metal, aumentando la presión de la mezcla. A medida que va aumentando la presión, los incrementos de hidrógeno en el compuesto van disminuyendo, hasta que se considera lleno. Posteriormente, en la descarga, la presión va disminuyendo y se debe ir suministrando calor al hidruro para que se mantenga su reversibilidad. En la siguiente tabla se muestran los diferentes hidruros con sus capacidades de almacenamiento:

Tabla 9. Tabla de capacidad de almacenamiento de hidruros [16]

Hidruro	Capacidad de almacenamiento	Calor de formación (kcal/mol)
FeTiH	0,096	13
LaNiH	0,089	7,4
MgNiH	0,081	6,7

Los hidruros metálicos, en general, son muy favorables para almacenar hidrógeno, ya que poseen buenas características de almacenamiento y además son seguros. No obstante, como ocurre en los casos anteriores, el almacenamiento mediante hidruros metálicos también supone el encarecimiento del sistema.

8.4. Elección del sistema de almacenamiento de hidrógeno

Tras analizar las tres opciones de almacenamiento, se va a optar por el almacenamiento en estado sólido mediante hidruros metálicos, ya que se trata del

método más seguro y no requiere de volúmenes muy altos de hidrógeno.

En este caso, se va a escoger la empresa ARIEMA, la cual trabaja con numerosos fabricantes de hidruros metálicos y ofrece depósitos de un amplio rango de volúmenes. En concreto, se elige el depósito HBond- 10.000L, con una capacidad de almacenamiento de 10.000 L. de hidrógeno.

8.5. Generación de energía

Se va a establecer una generación de 50 MW, de manera que se pueda integrar con la red y satisfacer los picos de demanda. Ya que las pilas elegidas tienen son de 1 MW, serán necesarias 50 pilas. Además, cada una de ellas admiten un flujo de 63 kg/h, con un 40% de rendimiento. Esto supone que cada una de ellas necesiten 157,5 kg/h para generar 1 MW. Por tanto, el flujo másico de hidrógeno que será necesario es:

$$\dot{m}_{H_2} = 157,5 \cdot 50 = 7.875 \text{ kg/h}$$

Además, se han elegido como tanques de almacenamiento los depósitos de capacidad de 10.000L, que admiten 70 kg de hidrógeno. Por tanto, se puede calcular los depósitos que serán necesarios:

$$\text{depósitos} = \frac{7875}{70} = 113 \text{ unidades}$$

PARTE III: Análisis **económico**

9. *Análisis económico de la tecnología de plasma*

Tal y como se ha diseñado el proyecto, su principal objetivo es el de resolver un problema medioambiental y social y cubrir una necesidad que con el tiempo se está haciendo más y más indispensable, la acumulación y el tratamiento de residuos. Por tanto, la valoración económica que se realiza a continuación contribuye al desarrollo del proyecto, pero no se debe buscar como objetivo último la riqueza o los beneficios económicos derivados de él.

Además, en la actualidad es la sociedad la que paga tanto la recogida como el funcionamiento de los vertederos, por lo que se deberá tener en cuenta dicha contribución para el desarrollo del proyecto y el mantenimiento de la instalación de plasma.

La instalación se compone de tres procesos principales, por lo que el estudio económico se va a realizar para cada uno de ellos por separado. Estos tres procesos son la gasificación por plasma, el ciclo de Rankine y las pilas de combustible con el almacenamiento de hidrógeno en tanques.

Para realizar el estudio económico se van a tener en cuenta las siguientes hipótesis, que se considerarán en cada uno de los ciclos de la gasificación por plasma:

1. Se va a establecer una vida útil de la instalación de 25 años, coincidiendo con el periodo de amortización de la inversión inicial de cada ciclo.
2. Se va a partir de que la inversión inicial total se da en el año cero, a pesar de que ciertos elementos de la instalación ya se encuentran en funcionamiento
3. Se va a tomar un valor de IPC de 2% que se aplicará a los costes de explotación, a lo largo de la vida útil.

A continuación se va a hacer un análisis detallado de cada uno de ellos, para lo que se han tomado como referencia los datos aportados por la empresa Materiales Renovados.

9.1. Análisis económico de la gasificación por plasma

La planta de gasificación, tal y como se ha estudiado previamente, cuenta con una entrada de residuos diaria de 184,46 Tm. Considerando que la planta se encuentra operativa 8760h en un año, se establece una entrada anual de residuos de 60.412 Tm. Cabe destacar que esta cantidad se compone de dos vertientes: por un lado, la cantidad que se recibe nueva en el vertedero día tras día, procedente de la recogida, y, por otro lado, la cantidad diaria que se ha fijado tratar para vaciar el vertedero en un plazo de 10 años.

Mediante el proceso de la gasificación, se obtiene un gas de síntesis a partir de los residuos. La principal característica de este gas es que contiene altos porcentajes de hidrógeno, que pueden ser utilizados a continuación para generar electricidad. No obstante, en este apartado no se tendrá en cuenta el precio del kWh, ya que mediante el proceso de la gasificación solo se obtiene el hidrógeno directamente, y la electricidad se obtendrá en los siguientes apartados.

De esta forma, se van a analizar los costes de inversión y de explotación de este proceso, y se incluirán más adelante en el balance económico total. De acuerdo con lo establecido por la empresa Materiales Renovados, se considera una vida útil, y por tanto un periodo de amortización de 25 años. Además, los datos económicos se obtendrán del proyecto final de carrera de Almudena Valenciano.

9.1.1. Inversión inicial

La inversión inicial hace referencia al coste o capital invertido para adquirir los distintos elementos de la planta (vasija, sistema de antorcha, sistema de retirada de los residuos del gasificador, sistemas de control, etc.) y su consiguiente instalación.

Partiendo de la cantidad de residuos que se van a tratar, se considera una inversión inicial de 15 M€, la cual se pretende amortizar en un plazo de 25 años. Además, se va a considerar un interés del 5% sobre el capital, de

manera que se obtiene la amortización anual mediante siguiente ecuación:

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

De dónde,

Co = Coste de inversión total

N = Años de vida útil de la instalación

Siendo la amortización anual, P, de 1,06 M€.

9.1.2. Costes de explotación

Los costes de explotación se dividen en costes de operación y mantenimiento, y los costes de personal asociado al funcionamiento de la instalación.

Los costes de operación y mantenimiento que se considerarán se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla 10. Costes de operación y mantenimiento [17]

Operación y mantenimiento	€/Tm	Tm	Total (k€)
Productos químicos	9	60.412	543,7
Electrodos	5	60.412	302
Mantenimiento refractario y antorchas	5	60.412	302
Mantenimiento general	6	60.412	362,5
Total			1.510,2

Por otro lado, a la hora de establecer los costes de personal, se van a considerar tres operarios trabajando en turnos de 8h. Se considera que la planta opera las 24h del día, por lo que se van a requerir un total de 9 operarios. Además, se contará con dos jefes de planta.

Tabla 11. Costes de personal de la planta [17]

Costes personal	€/trabajador	Trabajadores	Total (k€)
Operarios	22.000	9	198
Jefe de planta	45.000	2	90
Total			288

Por tanto, se obtienen unos costes anuales totales de explotación de 1,79M€. No obstante, se les va a aplicar el 2% del IPC y a partir del cuarto año, una mejora del 1,6% debida a la curva de aprendizaje. De esta forma, se obtiene un coste medio de explotación de 1,93 M€.

9.2. Análisis económico del ciclo de Rankine

El análisis económico del ciclo se realiza teniendo en cuenta la producción que se obtiene del ciclo. Tal y como se ha calculado previamente, en el proyecto se produce una generación de 3.613 MWh.

El coste se va a estimar tomando como base a la empresa Materiales Renovados y el trabajo de fin de carrera de Almudena Valenciano. No obstante, se va a adaptar a las dimensiones de la planta, de manera que se considera una inversión de 2,2 M€. Su amortización, como en el caso anterior, será de 25 años, por lo que el coste anual de amortización es de 0,16 M€.

Además, tal y como se ha calculado en el apartado de la instalación de gasificación por plasma, en este caso también se deben calcular unos costes relativos a la

explotación del ciclo. En este caso, se van a considerar un coste de explotación de 90.000€, que tras aplicar el 2% del IPC y la mejora del 1,6% a partir del cuarto año, supondrá un coste de explotación medio anual de 0,1 M€.

9.3. *Análisis económico de las pilas de combustible*

Tal y como se ha estudiado en apartados anteriores, las pilas de combustible constituyen la tecnología menos desarrollada en el proyecto, y todas las opciones que se planteaban suponían un incremento en los costes totales del proyecto. No obstante, no se puede prescindir de ellas ya que además de presentar muchas ventajas medioambientales y tecnológicas, son las encargadas del funcionamiento del sistema de reserva. De nuevo, se va a tomar como inspiración el proyecto de final de carrera de Almudena Valenciano, y se distinguirá entre la inversión inicial y los costes derivados de su explotación.

9.3.1. Inversión inicial

En primer lugar, se debe tener en cuenta que los costes de las pilas de combustible van a incluir la parte de almacenamiento de hidrógeno. Para ello se va a considerar 2,61 M€ por cada MW instalado.

En este caso, se han elegido 50 pilas con una capacidad de 1MW, por lo que se dispone de un total de 50 MW. Por tanto, el coste de inversión en pilas de combustible sumaría 130,5 M€.

En este caso, también se va a tomar una amortización en un plazo de 25 años, por lo que los costes de amortización anuales serían de 9,26 M€.

9.3.2. Costes de explotación

En los costes de explotación de las pilas se van a englobar los costes de operación y mantenimiento, así como cualquier otro gasto variable relativo a las pilas de combustible.

Se van a asumir unos costes de 14,92 €/MWh. No se puede conocer la producción de energía anual exacta mediante pilas de combustible, porque no se ha desarrollado el proyecto para satisfacer una demanda concreta. Por tanto, se va a asumir que estas se encuentran en funcionamiento 10h al día, produciendo 125 MWh/día, o lo que es lo mismo, generando anualmente 45.625 MWh. El coste de explotación total sería, por tanto, de 0,680 M€ anuales, que se verían afectados por el IPC y la mejora de aprendizaje, dando lugar a un coste medio anual de 0,74 M€.

9.4. Costes totales de la planta de gasificación

Una vez analizados los ciclos de la planta de gasificación, se va a calcular el total, o el kWh que se obtiene a partir de la planta, gracias a las pilas de combustible. La producción que se obtiene del ciclo de Rankine se va a incluir dentro de las pilas, ya que la potencia que se genera es mínima y su principal uso va a ser el de alimentar los elementos internos de la planta de gasificación, permitiendo un balance energético.

A continuación se muestra una tabla resumen con los costes obtenidos en los tres ciclos de la planta:

Tabla 12. Resumen de costes de inversión y explotación de la planta de gasificación

Proceso	Inversión inicial (M€)	Coste de explotación anual (M€)	Producción anual (GWh)
Gasificación	15	1,79	-
Ciclo Rankine	2,2	0,09	3,613
Pilas de combustible	130,5	0,68	45,625
Total	147,7	1,369	49,255

Una vez obtenidos los costes totales, se va a aplicar el 2% del IPC y la mejora del 1,6% por la curva de aprendizaje a partir del año cuarto en los costes de explotación, tal y como puede observarse en la siguiente tabla:

Tabla 13. Costes totales de las pilas de combustible

Pilas de combustible	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Coste amortización (M€)	10,48	10,48	10,48	10,48	10,48	10,48
Coste explotación (M€)	1,37	1,44	1,46	1,49	1,52	1,56
Electricidad producida (GWh)	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25	49,25
Coste del kWh (€/kWh)	0,24058	0,24193	0,24252	0,24312	0,24373	0,24436

10. Análisis conjunto de la planta de gasificación

Una vez analizados los costes que suponen la instalación y la explotación de la planta de gasificación, se va a analizar los beneficios económicos que se pueden

obtener de ella y en un plazo de 25 años, periodo en el que se pretende amortizar.

Como resumen, se tiene una inversión inicial de 147,7 M€. Además, anualmente se van a considerar unos costes de explotación que van a partir de 1,37 M€ el primer año, y que irán variando según el 2% considerado del IPC y según la curva de aprendizaje (mejora del 1,7%). Así, el último año se obtienen unos costes de 1,56 M€.

En cuanto a los ingresos, se van a considerar dos fuentes principales: la venta de electricidad y el coste de la recogida de residuos. Para la venta de electricidad se va a estimar que se vende toda la energía producida (49,25 GWh al año). Esta energía se venderá al precio medio de mercado, partiendo de la evolución histórica que se muestra en el siguiente gráfico:

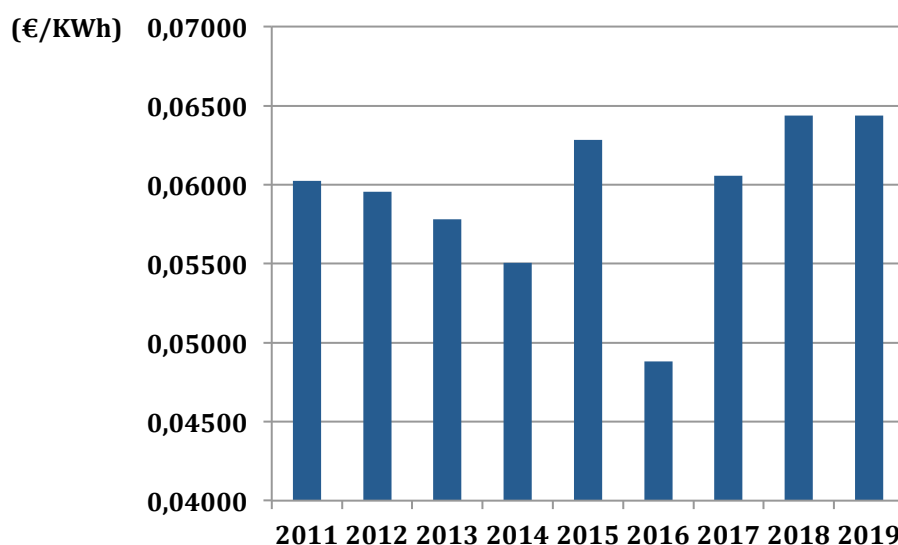


Figura 28. Evolución precio medio de la electricidad (€/KWh) [18]

A partir de esta información, se extrapolará el precio para los 25 años para los cuales se va a realizar el estudio económico.

Por otro lado, la otra fuente de ingresos que se va a considerar es la tasa que se fija por la recogida de residuos sólidos urbanos. Partiendo de la información

aportada por Gazo, esta tasa se aproxima actualmente a 86,50€ por tonelada de residuos recogida en la comarca del Somontano. Por tanto, considerando que se recogen anualmente 60.000 Tm, se obtendría unos ingresos anuales de 5,23 M€ derivados de la recogida de residuos. Además, se debe tener en cuenta que se espera un crecimiento en la producción de residuos en los próximos años, por lo que esta cifra se vería incrementada. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los ingresos de la planta, por parte de la recogida de residuos.

Tabla 14. Ingresos derivados de la recogida de residuos

Recogida de residuos	
Residuos anuales (Tm)	60.412
Tasa de recogida (€/Tm)	86,5
Ingresos anuales (M€)	5,23

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los gastos y los ingresos obtenidos en un periodo de 25 años:

Tabla 15. Balance de gastos e ingresos de la planta de gasificación

	Gastos	Ingresos	Beneficio
Año 0	147,7	-	-147,7
Año 1	1,369	8,396	7,03
Año 2	1,396	8,449	7,05
Año 3	1,424	8,503	7,08
Año 4	1,430	8,558	7,13
Año 5	1,436	8,614	7,18
Año 6	1,441	8,670	7,23
Año 7	1,447	8,728	7,28
Año 8	1,453	8,786	7,33
Año 9	1,459	8,846	7,39
Año 10	1,465	8,906	7,44
Año 11	1,471	8,968	7,50
Año 12	1,476	9,030	7,55
Año 13	1,482	9,094	7,61
Año 14	1,488	9,158	7,67
Año 15	1,494	9,224	7,73
Año 16	1,500	9,291	7,79
Año 17	1,506	9,359	7,85
Año 18	1,512	9,428	7,92
Año 19	1,518	9,498	7,98
Año 20	1,524	9,569	8,05
Año 21	1,530	9,642	8,11
Año 22	1,537	9,715	8,18
Año 23	1,543	9,790	8,25
Año 24	1,549	9,867	8,32
Año 25	1,555	9,944	8,39

De los datos anteriores se va a calcular el TIR, partiendo del beneficio obtenido. El TIR (Tasa Interna de Retorno) es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es igual a la tasa de descuento para la cual el valor actual neto es igual a 0. En este caso, se obtiene un TIR del 2%.

Para calcular la rentabilidad del proyecto se va a calcular el WACC, que es la tasa de descuento que analiza el coste de capital medio ponderado. En definitiva, es la media de lo que ha costado la inversión y su financiación. El proyecto se considerará rentable si el TIR es porcentualmente superior al WACC. Para el cálculo del WACC, se van a tomar como referencia valores similares a los presentados por la empresa Endesa, ya que el proyecto va dirigido a empresas similares a ella.

Para obtener el valor del WACC se aplica el CAPM Model, para lo que se aplica la siguiente fórmula:

$$KE = RF + \beta(RM - RF)$$

De dónde,

KE es la tasa de costo de oportunidad de los accionistas;

RF es el valor del bono a 10 años español, cuyo valor es del 0,499 [19];

β es la correlación entre el mercado y la empresa, estimado a 0,42

RM es el *market risk*, 7,66% [20]

De forma que se obtiene una tasa de costo de oportunidad de 3,5%. Con este valor, se calcula a continuación el WACC:

$$WACC = \frac{E}{E + D} \cdot KE + \frac{D}{E + D} \cdot KD \cdot (1 - t)$$

De dónde:

E= Equity, con un valor de 9.181 M€

D= Deuda, con un valor de 6.177 M€ [21]

KE= Cost of equity, 7,4%

KD= Cost of debt, 2,3% [21]

Por último, $(1-T)$ representa el *tax shield*, que en España se toma un valor de $T=25\%$.

Como resultado, se obtiene un WACC del 5,1%. Tal y como se había mencionado previamente, para que el proyecto fuese rentable en un periodo de 25 años, el WACC tendría que haber salido inferior al TIR. No obstante, es de esperar este resultado dado el tipo de proyecto del que se trata, que se encuentra actualmente en fase de desarrollo y que constituye más una necesidad que un proyecto del que obtener grandes beneficios en el corto plazo.

11. Conclusiones

A la hora de establecer las conclusiones, se debe partir de que en el desarrollo del proyecto se ha hecho especial hincapié en que su principal objetivo es el de cubrir una necesidad que con el tiempo se está convirtiendo en un problema, el de la acumulación de residuos. Por tanto, la valoración económica se debe considerar desde otra perspectiva. En primer lugar, se debe tener en cuenta que actualmente la gestión de los residuos supone un gasto que la sociedad está afrontando, por lo que la nueva instalación también es responsabilidad de toda la población, y no se busca que el proyecto aporte beneficios económicos en un periodo corto de tiempo, ya que los beneficios que se obtienen son medioambientales y energéticos. En este caso, se pretende poner fin a un problema que la sociedad tiene que afrontar y que se va a complicar con el paso de los años, si no se toman las medidas pertinentes: la acumulación de residuos en los vertederos y la elevada contaminación que estos suponen. Se debe frenar esta situación, y el coste económico no debería ser el principal factor que influyese a la hora de su desarrollo e implementación.

La instalación de la planta de gasificación por plasma permitiría un tratamiento de residuos sin contaminación, y además de erradicar los residuos por completo,

permite que se obtenga energía limpia de ellos, la cual se puede emplear a posteriori para otras aplicaciones.

Desde el punto de vista puramente económico, se debe considerar que actualmente el vertedero de Gazo funciona gracias a las tasas de recogida de residuos impuestas por el Gobierno de Aragón, mientras que con la planta de gasificación, además de contar con dichas tasas, se podría vender la electricidad derivada del tratamiento de los residuos. Por tanto, no se debe establecer una proyección a 25 años, sino que se debe ver con una perspectiva a largo plazo. Se deben impulsar este tipo de proyectos para incentivar al desarrollo de dichas tecnologías de manera que en el futuro se abaraten sus costes y que, por tanto, puedan ofrecer ventajas económicas. Por tanto, para concluir, se deduce que no se debería prestar atención a los beneficios económicos a corto plazo, sino centrarse en las ventajas que ofrece para el futuro desde un punto de vista energético y medioambiental.

Por último, al tratar de solucionar un problema de interés de la sociedad en general, como es la contaminación medioambiental, se podría contar con ayudas económicas tanto de instituciones públicas como de empresas privadas, que apoyen el desarrollo de este tipo de energías sostenibles.

PARTE IV: Anexos

ANEXO A: Pila de combustible Ballard – 1MW

BALLARD®

SMARTER SOLUTIONS FOR A CLEAN ENERGY FUTURE

ClearGen™

SPECIFICATION SHEET



PRODUCT SPECIFICATIONS

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

1. At beginning of life (HHV).

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

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

Distributed Generation - 1MW

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

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

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

Please contact us for product availability and pricing.



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

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

ANEXO B: Tanque de almacenamiento de hidrógeno Ariema - Hbond



Hbond-5000

Metal Hydride Hydrogen Storage System

This systems are able to store hydrogen inside of the metallic structure of the hydride: it's a more compact and safe solution in comparison with the traditional high pressure bottles. On the base of this unit HB-5000 could be produced Hydrogen Storage systems up to 100 Nm³ hydrogen.

	HBond-5000 L	HBond-5000 H	HBond-7000 L	HBond-7000 H
Hydrogen Capacity	5000 NI H2	5000 NI H2	7000 NI H2	7000 NI H2
Diameter:	169 mm	169 mm	169 mm	169 mm
Weight	76 kg (34 kg MH)	76 kg (34 kg MH)	98 kg (46 kg MH)	98 kg (46 kg MH)
Length	1100 mm	1100 mm	1650 mm	1650 mm
Charging Pressure	15 Bar	5 Bar	15 Bar	5 Bar
Charging temperature	Max. 25° C	Max. 25° C	Max. 25° C	Max. 25° C
Charging Time	45-60 minutes	45-60 minutes	45-60 minutes	45-60 minutes
Discharging Pressure	10 to 2 Bar	5 to 2 Bar	10 to 2 Bar	5 to 2 Bar
Discharging Temperature	10 – 30° C	65 – 75° C	10 – 30° C	65 – 75° C

ANEXO C: Análisis de costes de explotación de los diferentes procesos

ANEXO C.1: Costes de explotación planta de gasificación

Tabla 16. Anexo costes de explotación planta de gasificación

Año	M€
Año 1	1,79
Año 2	1,83
Año 3	1,86
Año 4	1,87
Año 5	1,88
Año 6	1,88
Año 7	1,89
Año 8	1,90
Año 9	1,91
Año 10	1,92
Año 11	1,92
Año 12	1,93
Año 13	1,94
Año 14	1,95
Año 15	1,95
Año 16	1,96
Año 17	1,97
Año 18	1,98
Año 19	1,99
Año 20	1,99
Año 21	2,00
Año 22	2,01
Año 23	2,02
Año 24	2,03
Año 25	2,03
Media	1,93

ANEXO C.2: Costes de explotación ciclo de Rankine

Tabla 17. Anexo costes de explotación ciclo de Rankine

Año	M€
Año 1	0,090
Año 2	0,092
Año 3	0,094
Año 4	0,094
Año 5	0,094
Año 6	0,095
Año 7	0,095
Año 8	0,096
Año 9	0,096
Año 10	0,096
Año 11	0,097
Año 12	0,097
Año 13	0,097
Año 14	0,098
Año 15	0,098
Año 16	0,099
Año 17	0,099
Año 18	0,099
Año 19	0,100
Año 20	0,100
Año 21	0,101
Año 22	0,101
Año 23	0,101
Año 24	0,102
Año 25	0,102
Media	0,097

ANEXO C.3: Costes de explotación pilas de combustible

Tabla 18. Anexo costes de explotación pilas de combustible

Año	M€
Año 1	0,681
Año 2	0,695
Año 3	0,709
Año 4	0,711
Año 5	0,714
Año 6	0,717
Año 7	0,720
Año 8	0,723
Año 9	0,726
Año 10	0,729
Año 11	0,732
Año 12	0,734
Año 13	0,737
Año 14	0,740
Año 15	0,743
Año 16	0,746
Año 17	0,749
Año 18	0,752
Año 19	0,755
Año 20	0,758
Año 21	0,761
Año 22	0,764
Año 23	0,767
Año 24	0,770
Año 25	0,774
Media	0,736

ANEXO C.4: Costes de explotación totales

Tabla 19. Anexo costes de explotación totales

Año	Amortización (M€)	Costes explotación (M€)	Electricidad vendida (GWh)	Precio electricidad (€/kWh)
Año 1	10,48	1,37	49,25	0,240582293
Año 2	10,48	1,40	49,25	0,241138232
Año 3	10,48	1,42	49,25	0,24170529
Año 4	10,48	1,43	49,25	0,24182097
Año 5	10,48	1,44	49,25	0,241937113
Año 6	10,48	1,44	49,25	0,24205372
Año 7	10,48	1,45	49,25	0,242170793
Año 8	10,48	1,45	49,25	0,242288335
Año 9	10,48	1,46	49,25	0,242406347
Año 10	10,48	1,46	49,25	0,242524831
Año 11	10,48	1,47	49,25	0,242643789
Año 12	10,48	1,48	49,25	0,242763223
Año 13	10,48	1,48	49,25	0,242883134
Año 14	10,48	1,49	49,25	0,243003525
Año 15	10,48	1,49	49,25	0,243124398
Año 16	10,48	1,50	49,25	0,243245754
Año 17	10,48	1,51	49,25	0,243367596
Año 18	10,48	1,51	49,25	0,243489925
Año 19	10,48	1,52	49,25	0,243612743
Año 20	10,48	1,52	49,25	0,243736053
Año 21	10,48	1,53	49,25	0,243859856
Año 22	10,48	1,54	49,25	0,243984154
Año 23	10,48	1,54	49,25	0,244108949
Año 24	10,48	1,55	49,25	0,244234244
Año 25	10,48	1,56	49,25	0,244360039

ANEXO D: Evolución precio medio de la electricidad

Tabla 20. Evolución precio medio de la electricidad

Año	€/kWh
Año 1	0,064390000
Año 2	0,065465313
Año 3	0,066558584
Año 4	0,067670112
Año 5	0,068800203
Año 6	0,069949166
Año 7	0,071117317
Año 8	0,072304977
Año 9	0,07351247
Año 10	0,074740128
Año 11	0,075988288
Año 12	0,077257293
Año 13	0,078547489
Año 14	0,079859232
Año 15	0,081192882
Año 16	0,082548803
Año 17	0,083927368
Año 18	0,085328955
Año 19	0,086753948
Año 20	0,088202739
Año 21	0,089675725
Año 22	0,09117331
Año 23	0,092695904
Año 24	0,094243925
Año 25	0,095817799

Referencias

- [1] Circular Europea
- [2] Cogersa
- [3] Proyecto “Ampliación del vaso de vertido del vertedero de residuos sólidos urbanos de Barbastro, 2013”
- [4] Real Decreto 2481/2001
- [5] Máster Energías Renovables, Pilas de Combustible e Hidrógeno, CSIC- Universidad Menéndez Pelayo
- [6] Gazo SL: “Suelo- Cact. Constructivas”
- [7] Propia elaboración
- [8] Google Imágenes – Economía Circular
- [9] Trabajo Fin de Grado Jaime Diez de Bustamante
- [10] Google Imágenes
- [11] Westinghouse Plasma Corporation www.westinghouse-plasma.com
- [12] Producción de hidrógeno mediante la reacción de desplazamiento de agua (WGS) combinada con absorción de CO₂. Centro de investigación en materiales avanzados, S.C.
- [13] Materiales Renovados
- [14] Louis Circeo – Plasma Arc Gasification of Municipal Solid Waste
- [15] Departamento de física y química I.E.S. Valle del Saja
- [16] Norvento Enerxia
- [17] Proyecto Fin de Carrera Almudena Valenciano
- [18] Statista
- [19] https://ycharts.com/indicators/spain_10_year_government_bond_yield
- [20] <http://www.finanzas.com/ibex-35/>
- [21] Financial report FY2018, Endesa

Bibliografía

- Apuntes de la asignatura de Termodinámica ICAI
- Apuntes de la asignatura de Ingeniería Energética ICAI
- Centro Nacional del Hidrógeno. Pilas de Combustible, <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- Wordpress. Pilas de combustible. Conocimientos básicos
- Ballard, <http://www.ballard.com/>
- Recuperación energética de los residuos urbanos, residuos agrícolas y residuos forestales. Julio Montes Ponce de León
- Plasma Arc Gasification of Municipal Solid Waste. Louis Circeo
- Tecnología de gasificación por plasma de Westinghouse. Westinghouse
- Vertederos y su aprovechamiento energético. Urbaser
- Apuntes de la asignatura Otras Energías: Geotérmica y Recuperación de Residuos CSIC- Universidad Menéndez Pelayo
- Proyecto final de carrera Almudena Valenciano
- Trabajo fin de grado de Jaime Díez de Bustamante
- Principales técnicas de almacenamiento del Hidrógeno. María Esther Cuervos Sánchez
- Endesa, resultados del año 2018
- https://ycharts.com/indicators/spain_10_year_government_bond_yield
- <http://www.finanzas.com/ibex-35/>
- Gazo SL
- Plan GIRA 2018-2022
- Redes eléctricas inteligentes. Gas Natural Fenosa
- Selección de emplazamientos para vertederos controlados. E.T.S de Ingenieros de Montes
- El tratamiento de residuos mediante arco de plasma, ¿sueño o realidad?. Materiales Renovados
- El proceso de gasificación y vitrificación de residuos por plasma con optimización de la producción eléctrica. Acciona
- Evolución del precio medio de la energía. Statista
- Almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos. Norvento Enerxía

- Hydrogen-based energy storage solutions. SBC Energy institute
- El ciclo rankine. Centrales térmicas de ciclo combinado
- Circular europea sobre la gestión de residuos. Comisión Europea
- Real decreto 1481/2001. BOE
- Reuters
- Energética del Hidrógeno. Clara Fernández-Bolaños Badía
- El paso de la combustión convencional a la economía del hidrógeno.
nergíasostenible.net
- Producción de hidrógeno mediante la reacción de desplazamiento de agua (WGS)
combinada con absorción de CO₂. Centro de investigación en materiales
avanzados, S.C.