



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Máster en ingeniería industrial

Estudio de distintas tecnologías para gestión y valorización energética de RSU en la Comunidad de Madrid

Marusela Guillén Saras

Directora: Mar Cledera Castro

Director: Carlos Morales Polo

Madrid

Julio, 2018

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. Marusela Guillén Saras

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Estudio de distintas tecnologías para gestión y valorización energética de residuos sólidos urbanos en la Comunidad de Madrid*, 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) Reproducirla 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

podrían 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 26 de JUNIO de 2018

ACEPTA

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estudio de distintas tecnologías para gestión y valo-
rización energética de RSU en la Comunidad de Madrid
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017/2018 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.

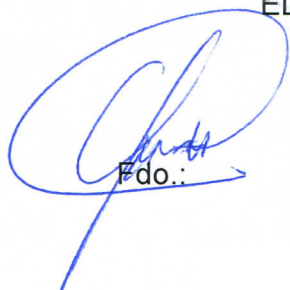
Fdo.:



Fecha: 22 / 06 / 2018

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.:

Fecha: 22 / 06 / 2018





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Máster en ingeniería industrial

Estudio de distintas tecnologías para gestión y valorización energética de RSU en la Comunidad de Madrid

Marusela Guillén Saras

Directora: Mar Cledera Castro

Director: Carlos Morales Polo

Madrid

Julio, 2018



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



ESTUDIO DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS PARA GESTIÓN Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA COMUNIDAD DE MADRID.

Autor: Guillén Saras, Marusela.

Directores: Cledera Castro, Mar y Morales Polo, Carlos.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

En la actualidad existe una problemática debido al constante crecimiento de la población, y con ello, al aumento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generados ya que cada vez hay una sociedad más consumista.

El objetivo de este proyecto consiste en transformar estos RSU inherentes a cualquier actividad humana, en energía eléctrica útil. Un porcentaje de dicha energía va a ser utilizada para autoabastecer la propia planta que la genera, mientras que otro porcentaje (el mayor de los dos) va a ser inyectado a la red.

En el presente proyecto se estudia el caso de 4 sistemas de valorización energética de residuos para posteriormente poder establecer conclusiones de cada escenario de estudio. Se analizará un vertedero controlado y una planta de biometanización, cuya ubicación va a ser muy cercana para poder aprovechar conjuntamente el biogás generado en ambos casos, una planta de incineración y una planta de gasificación por plasma.

Se ha establecido como hipótesis inicial que la vida útil de todas las plantas sea de 15 años y la cantidad de RSU entrantes en todas ellas sea la misma, 300.000 toneladas anuales cuya composición se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Composición de los RSU

Materia orgánica	48,9%
Papel	18,5%
Plástico	11,7%
Vidrio	7,6%
Textil	3,7%
Materiales féreos	2,5%
Celulosa y complejos	2%
Materiales no féreos	1,6%
Varios	3,5%

Metodología

En primer lugar se realiza el análisis del vertedero controlado y la planta de biometanización. La ubicación óptima elegida para estas instalaciones, tras la realización de los planos oportunos, ha sido en el municipio de Anchuelo, al este de la Comunidad de Madrid. La superficie necesaria para el vertedero ha sido de $74.532,62m^2$ y la



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

necesaria para la planta de biometanización de $49.600m^2$.

De ambas ubicaciones se extrae el biogás generado a partir de la materia orgánica y tras hacerlo pasar por un motor de ciclo Otto se obtiene la energía eléctrica. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla II y Tabla III.

Tabla II. Resultados obtenidos del vertedero controlado y la planta de biometanización

Vida útil del vertedero	7 años
Vida útil de la planta de biometanización	15 años
Biogás obtenido en el vertedero	$2.831,67 m^3/h$
Biogás obtenido en la planta	$2.929,31 m^3/h$
Rendimiento motor ciclo Otto	40%
Potencia generada los primeros 7 años	17.279,68 kW
Potencia entregada a la red	13.823,7 kW
Potencia para el autoconsumo	3.455,94 kW
Potencia generada los últimos 8 años	8.786,28 kW

Tabla III. Resultados económicos del vertedero controlado y la planta de biometanización

Inversión inicial	41.661.000 €
Costes de operación	21,67 €/ton
TIR	6,97 %
VAN con una tasa de retorno del 6%	2.647.869,01 €
Período de retorno	9,86 años

A continuación se realiza el análisis de la planta de incineración. Tras la elaboración de los planos se ha establecido el tamaño del terreno necesario ($35.070 m^2$) así como la forma del mismo requerida. Finalmente la ubicación de esta planta se ha establecido en el municipio de Leganés.

En la planta de incineración se produce la combustión de los residuos no útiles y gracias a un ciclo Rankine se obtiene energía eléctrica. Debido a que de las 300.000 toneladas entrantes tan solo el 10,8% son residuos incinerados, la potencia generada resulta muy escasa (4.345 kW). Normalmente se trasladan a las incineradoras residuos inútiles de otras plantas para que el rendimiento en estas sea superior. Por ello, para la realización de todos los cálculos se va a considerar que el 50% de los residuos entrantes son incinerados. Los resultados se muestran en la Tabla IV y Tabla V.

Tabla IV. Resultados obtenidos de la planta de incineración

Rendimiento ciclo Rankine	35,21 %
Potencia generada	20.115,76kW
Potencia entregada a la red	17.098,40 kW
Potencia destinada para el autoconsumo	3.017,36 kW



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla V. Resultados económicos de la planta de incineración

Inversión inicial	43.166.000 €
Costes de operación	31,43 €/ton
TIR	8,42 %
VAN con una tasa de retorno del 6%	8.485.958,77 €
Período de retorno	9,53 años

En la planta de gasificación por plasma todos los residuos entrantes son utilizados para la obtención de energía eléctrica a partir de una turbina de gas. El terreno elegido para la construcción de dicha planta se encuentra en el municipio de Villanueva del Pardillo con una superficie de $7.350m^2$. Los resultados se muestran en la Tabla VI y Tabla VII.

Tabla VI. Resultados obtenidos de la planta de gasificación por plasma

Rendimiento turbina de gas	40 %
Potencia generada	79.444,4 kW
Potencia entregada a la red	71.500 kW
Potencia destinada para el autoconsumo	7.944,4 kW

Tabla VII. Resultados económicos de la planta de gasificación por plasma

Inversión inicial	200.000.000 €
Costes de operación	66,67 €/ton
TIR	5,97 %
VAN con una tasa de retorno del 6%	-418.496,05 €
Período de retorno	10,25 años

Resultados

Tras la realización de los cálculos oportunos se procede a la comparación de las técnicas de valorización energética analizadas en el presente proyecto.

El nivel de la potencia generada es bastante superior en el caso de la planta de gasificación, como se puede comprobar en la Figura I.

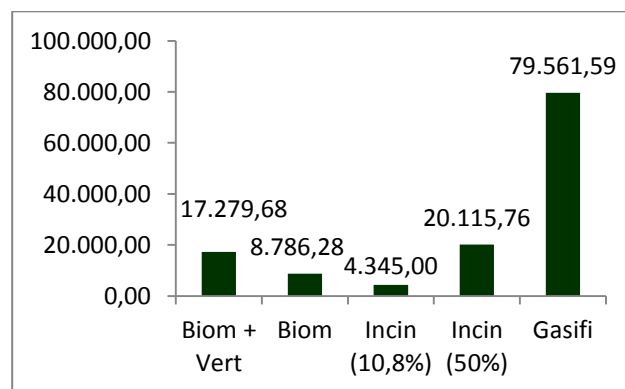


Figura I. Potencia generada por cada planta de valorización energética en kW

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, dicha planta es la que requiere una inversión inicial mayor, así como unos costes de operación superiores.

En la Figura II se pueden comprobar los períodos de retorno de cada escenario analizado. Como se puede observar, es la planta de incineración la que posee un período de retorno más reducido.

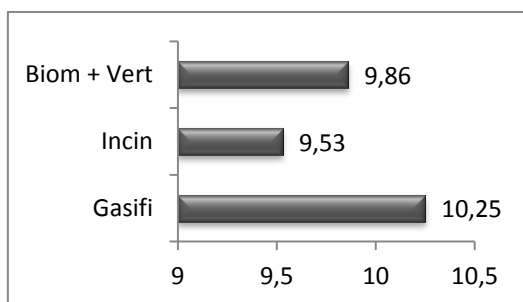


Figura II. Período de retorno de cada planta de valorización energética en años

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la inversión inicial necesaria, la planta de gasificación por plasma requiere una inversión mucho más elevada que en el resto de escenarios estudiados, como se puede comprobar en la Figura III.

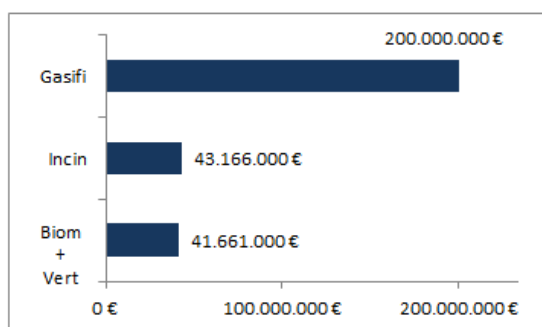


Figura III. Inversiones iniciales necesarias en cada planta de valorización energética

Fuente: Elaboración propia

Si se analiza la rentabilidad de cada planta, de nuevo, la planta de gasificación por plasma es el caso menos rentable.

Para una tasa de retorno de un 6%, se obtienen los VAN mostrados en la Figura IV.

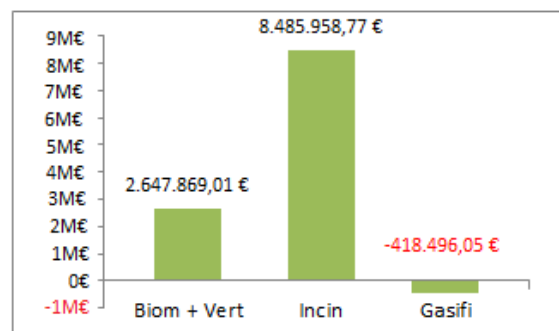


Figura IV. VAN de cada planta de valorización energética para una tasa de retorno de un 6%

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al tamaño de terreno necesario, las plantas de incineración y biometanización necesitan un terreno muy superior al necesario en las plantas de gasificación por plasma. Esto se explica debido a que la gasificación es una tecnología mucho más modular que las otras, además de no requerir de una clasificación previa de residuos.

La gran ventaja que poseen las plantas de gasificación por plasma es que no se genera ningún residuo, si no que todas las sustancias obtenidas son aprovechables. Con las plantas de biometanización, incineración o vertederos puede haber problemas por la formación de dioxinas y furanos, formación de cenizas o contaminación por lixiviados.

Conclusiones

Cualquier estudio económico posee un grado de incertidumbre que se puede mitigar realizando un análisis de sensibilidad. En el funcionamiento diario de las plantas de valorización energética de residuos hay muchos parámetros que varían constantemente debido a su propia naturaleza. A

continuación se muestra lo que sucede al modificar algunas variables que hasta ahora han sido consideradas fijas en el presente proyecto.

Variación en la cantidad de RSU entrantes en las plantas de tratamiento.

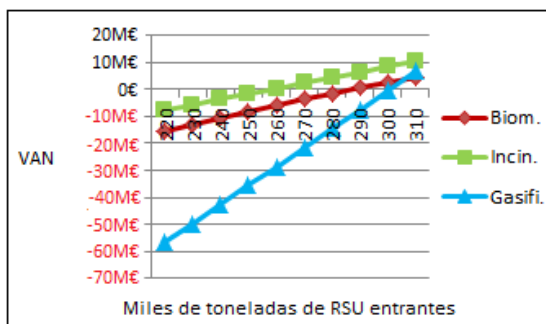


Figura V: Comparativa de las tres plantas al modificar la cantidad de RSU entrantes en las mismas

Fuente: Elaboración propia

Variación del canon por tonelada de residuo.

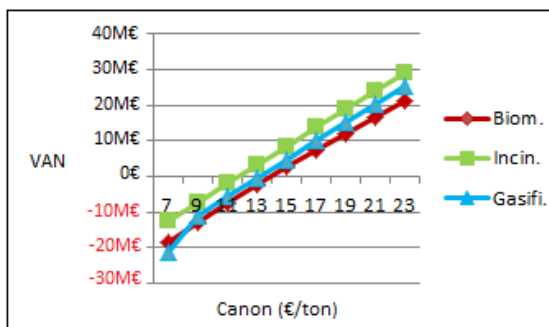


Figura VI. Comparativa de las tres plantas al modificar el canon cedido por el ayuntamiento

Fuente: Elaboración propia

Variación del precio de la potencia entregada a la red.

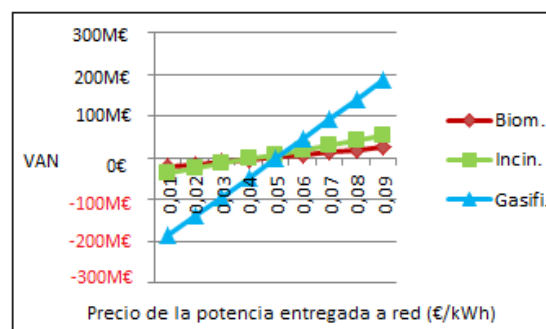


Figura VII. Comparativa de las tres plantas al modificar el precio de la potencia entregada a red

Fuente: Elaboración propia

Variación de la prima recibida

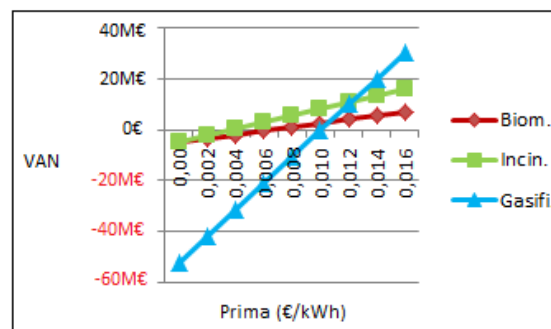


Figura VIII: Comparativa de las tres plantas al modificar la prima recibida

Fuente: Elaboración propia

Desde un punto de vista sostenible, la técnica que se debería desarrollar más en el futuro es la gasificación por plasma, ya que se trata de un proceso que no genera ninguna sustancia de desecho y no emite sustancias nocivas al exterior. De esta forma se consigue satisfacer las necesidades presentes sin condicionar las de las generaciones futuras.



STUDY OF DIFFERENT TECHNOLOGIES FOR THE MANAGEMENT AND ENERGY VALORIZATION OF SOLID URBAN WASTE IN THE COMMUNITY OF MADRID

Author: Guillén Saras, Marusela.

Supervisors: Cledera Castro, Mar and Morales Polo, Carlos.

Collaborating entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

PROJECT SUMMARY

Introduction

Nowadays, there is a problem due to the constant growth of the population, and with it, to the increase of the Urban Solid Residues (USR) generated due to the fact that every time there is a more consumer society.

This is why the objective of this project is considered so interesting, since it consists in transforming these inherent USR in any human activity, into useful electrical energy. A percentage of this energy will be used to self-supply the plant that generates it, while another percentage (the larger of both of them) will be injected into the network.

In the present project the case of 4 waste energy recovery systems is studied in order to subsequently be able to draw conclusions from each study scenario. A controlled landfill and a biomethanization plant will be analyzed, the location of which will be very close so as to take advantage of the biogas generated in both cases, an incineration plant and a plasma gasification plant.

It is important to establish that the useful life of all plants is 15 years and the amount of incoming residues in all of them has been the same, 300,000 annual tons whose composition is shown in the Table I.

Table I. Composition of USR

Organic matter	48,9%
Paper	18,5%
Plastic	11,7%
Glass	7,6%
Textile	3,7%
Ferrous materials	2,5%
Cellulose and complexes	2%
Non-ferrous materials	1,6%
Various	3,5%

Methodology

Firstly, the controlled landfill and the biomethanization plant are analyzed. The optimal location chosen for these facilities, after the realization of the appropriate plans, has been in the municipality of Anchuelo, east of the Community of Madrid. The necessary surface area for the landfill was



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

74,532.62m² and that needed for the biomethanization plant of 49,600m².

From both locations the biogas generated from the organic matter is extracted and after passing through an Otto cycle engine, the electrical energy is obtained. The results obtained are shown in Table II and Table III.

Table II. Results obtained from the controlled landfill and the biomethanization plant

Landfill useful life	7 years
Biomethanization plant useful life	15 years
Biogas obtained in the landfill	2.831,67 m ³ /h
Biogas obtained in the plant	2.929,31 m ³ /h
Performance motor cycle Otto	40%
Power generated the first 7 years	17.279,68 kW
Power delivered to the network	13.823,7 kW
Power for self-consumption	3.455,94 kW
Power generated the last 8 years	8.786,28 kW

Table III. Economic results of the controlled landfill and the biomethanization plant

Initial investment	41.661.000 €
Operating costs	21,67 €/ton
IRR	6,97 %
NPV with a return rate of 6%	2.647.869,01 €
Return period	9,86 years

The analysis of the incineration plant is then carried out. After the elaboration of the plans, the necessary land size (35.070m²) has been

established as well as the required shape. Finally the location of this plant has been established in the municipality of Leganés.

In the incineration plant, the combustion of unusable waste occurs and, thanks to a Rankine cycle, electrical energy is obtained. Due to the fact that of the 300,000 tons entering, only 10.8% are incinerated waste, the power generated is very scarce (4,345 kW). In real life, useless residues from other plants are transferred to the incinerator so that the yield in these is superior. Therefore, for the realization of all the calculations it will be considered that 50% of the incoming waste is incinerated. The results are shown in Table IV and Table V.

Table IV. Results obtained in the incineration plant

Rankine cycle yield	35,21 %
Generated power	20.115,76kW
Power delivered to the network	17.098,40 kW
Power for self-consumption	3.017,36 kW

Table V. Economic results obtained in the incineration plant

Initial investment	43.166.000 €
Operating costs	31,43 €/ton
IRR	8,42 %
NPV with a return rate of 6%	8.485.958,77 €
Return period	9,53 years



In the plasma gasification plant all incoming waste is used to obtain electricity from a gas turbine. The land chosen for the construction of this plant is located in the municipality of Villanueva del Pardillo with an area of $7.350m^2$. The results are shown in Table VI and Table VII.

Table VI. Results obtained of the gasification plant

Performance gas turbine	40 %
Generated power	79.444,4 kW
Power delivered to the network	71.500 kW
Power for self-consumption	7.944,4 kW

Table VII. Economic results obtained of the gasification plant

Inversión inicial	200.000.000 €
Operating costs	66,67 €/ton
IRR	5,97 %
NPV ith a return rate of 6%	-418.496,05 €
Return period	10,25 years

Results

After carrying out the appropriate calculations, a comparison of the energy recovery techniques analyzed in this project will be carried out.

The level of power generated is much higher in the case of the gasification plant, as can be seen in Figure I.

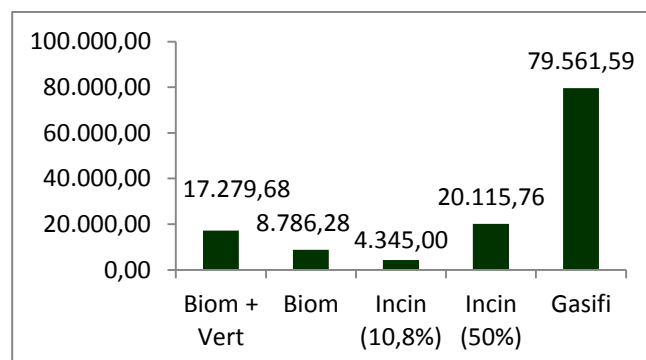


Figure I. Generated power of each studied scenario

Source: Self made

However, economically it is precisely where the plant has the worst conditions.

In Figure II you can check the return periods of each scenario analyzed. As can be seen, it is the incineration plant that has a shorter return period.

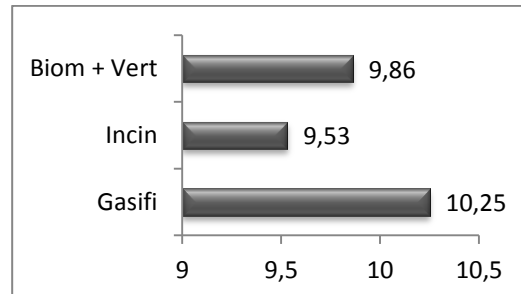


Figure II. Return period of each studied scenario in years

Source: Self made

Regarding the initial investment required, the plasma gasification plant requires a much higher investment than in the other scenarios studied, as can be seen in Figure III.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

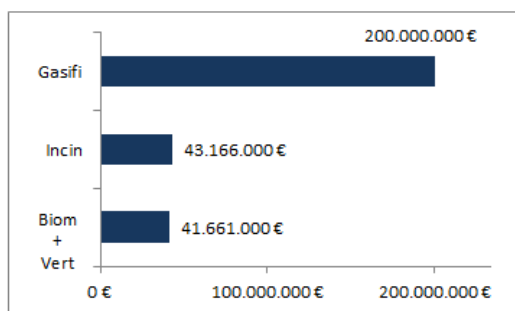


Figure III. Initial investment of each studied scenario

Source: Self made

If the profitability of each plant is analyzed, again, the plasma gasification plant is the least profitable case.

With a return rate of 6%, the NPV is shown in Figure IV.

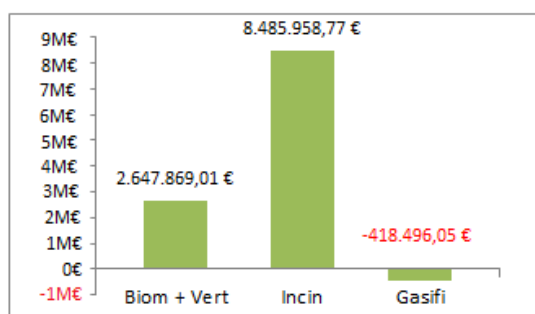


Figure IV. NPV with a return rate of 6% of each studied scenario

Source: Self made

In terms of the size of the land required, the incineration and biomethanization plants need much more land than is necessary in plasma gasification plants. This is explained because gasification is a much more modular technology than the others, as well as it does not require a previous classification of waste.

The biomethanization plants need this classification because they will only take advantage of the organic matter, and the incineration plants will only take advantage of the waste that is not useful in any case.

The great advantage of gasification plants by plasma is that no waste is generated, but that all the substances obtained are usable. With biomethanization, incineration or landfill plants there may be problems due to the formation of dioxins and furans, ash formation or contamination by leachates.

Conclusions

Any economic study has a degree of uncertainty, because they are based on future events, which can be mitigated by conducting a sensitivity analysis. In the daily operation of waste energy recovery plants there are many parameters that vary constantly due to their own nature. Below is what happens when modifying some variables that until now have been considered fixed in the present project.



Variation of the amount of incoming residues in the treatment plants.

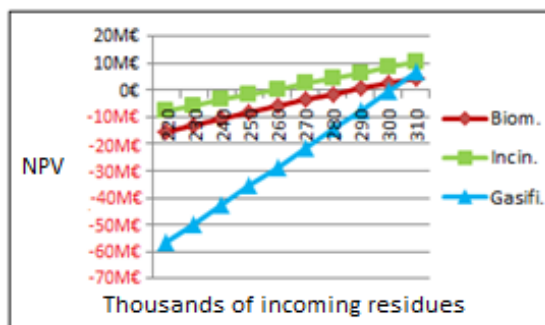


Figure V. Comparison of the three plants by modifying the number of incoming residues in them

Source: Self made

Variation of the price of the power delivered into the network.

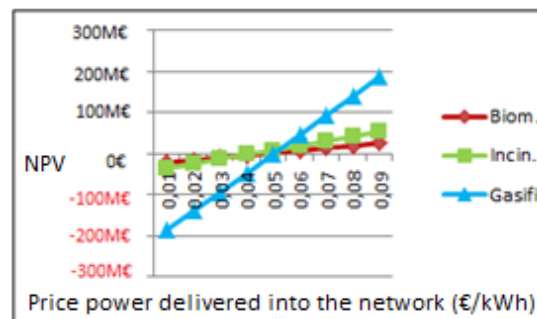


Figure VII. Comparison of the three plants by modifying the price of the power delivered into the network

Source: Self made

Variation of the canon per ton of waste.

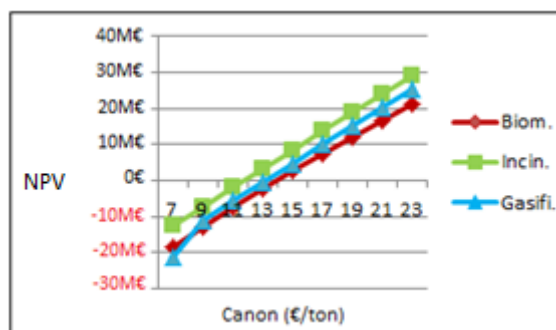


Figure VI. Comparison of the three plants by modifying the canon per ton of waste

Source: Self made

Variation of the premium received.

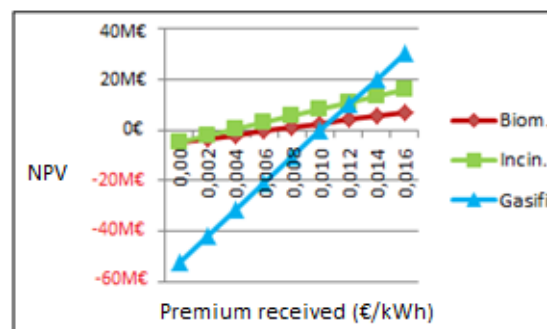


Figure VIII. Comparison of the three pants by modifying the premium received

Source: Self made

From a sustainable point of view, the technique that should be developed more in the future and replace the others is gasification by plasma, since it is a process that does not generate any waste substance and does not emit harmful substances abroad.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Máster en ingeniería industrial

Estudio de distintas tecnologías para gestión y valorización energética de RSU en la Comunidad de Madrid

Marusela Guillén Saras

Directora: Mar Cledera Castro

Director: Carlos Morales Polo

Madrid

Julio, 2018



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



ÍNDICE DE LA MEMORIA

Capítulo I. Estado del arte	11
Actualidad e introducción a los residuos	13
Capítulo II. Tipos de residuos.....	17
Definición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	19
Capítulo III. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de un vertedero controlado	21
Descripción.....	23
Localización	26
Rendimiento.....	35
Viabilidad económica.....	35
Capítulo IV. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de una planta de biometanización	39
Descripción.....	41
Descripción de equipos.....	43
Localización	49
Rendimiento.....	52
Diagrama de Sankey.....	56
Viabilidad económica.....	57
Capítulo V. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de una incineradora.....	67
Descripción.....	69
Descripción de equipos.....	70
Localización	76
Rendimiento.....	79
Diagrama de Sankey.....	84
Viabilidad económica.....	86
Capítulo VI. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de una planta de gasificación por plasma	95
Descripción.....	97



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Descripción de equipos.....	98
Localización	105
Rendimiento.....	107
Diagrama de Sankey.....	110
Viabilidad económica.....	110
Capítulo VII. Conclusiones	119
Comparativa de RSU utilizados en cada tecnología	121
Tamaño de terreno necesario	122
Emisión de gases de efecto invernadero (GEI) – Contaminación atmosférica.....	123
Comparativa de la generación de energía eléctrica de cada planta	123
Comparativa del rendimiento de cada planta de valorización energética.....	126
Reducción volumétrica de los RSU	127
Generación de dioxinas y furanos/cenizas y escombros.....	128
Generación de malos olores	128
Comparativa económica	129
Capítulo VIII. Análisis de sostenibilidad	137
Análisis de sostenibilidad.....	139
Capítulo IX. Análisis de sensibilidad	141
Análisis de sensibilidad	143
Variación en la cantidad de RSU entrantes en las plantas de tratamiento.....	143
Variación del canon cedido por el ayuntamiento.....	148
Variación del precio de la potencia entregada a red.....	152
Variación de la prima	156
Capítulo X. Planos	161
Capítulo XI. Anexos	163
Capítulo XII. Bibliografía	169
Bibliografía.....	171



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1: Evolución de la población y de la generación de residuos urbanos en la Comunidad de Madrid sin el núcleo (Madrid, Arganda del Rey y Rivas Vaciamadrid)..	14
Figura. 2: Mapa con los vertederos controlados de la Comunidad de Madrid.....	27
Figura. 3: Flujo de RSU en la Comunidad de Madrid.....	30
Figura. 4: Zona este de la Comunidad de Madrid	31
Figura. 5: Situación posibles territorios para construcción de vertedero.....	32
Figura. 6: Superficie total del vertedero elegido.....	34
Figura. 7: Ubicación del vertedero elegido	34
Figura. 8: Esquema de una planta de biometanización	41
Figura. 9: Foso inicial de vertido de residuos	44
Figura. 10: Digestor de la planta de biometanización.....	46
Figura. 11: Motor de combustión interna (ciclo Otto)	48
Figura. 12: Municipio de Anchuelo donde se ubicará la planta de biometanización	50
Figura. 13: Situación de la planta de biometanización	51
Figura. 14: Dimensiones planta de biometanización	51
Figura. 15: Ubicación vertedero y planta de biometanización	52
Figura. 16: Composición de los RSU	54
Figura. 17: Diagrama de Sankey de la planta de biometanización	57
Figura. 18: Valores del VAN del vertedero y planta de biometanización para distintos WACC.....	64
Figura. 19: Flujos de caja acumulados del vertedero y la planta de biometanización ..	65
Figura. 20: Clasificación de residuos	72
Figura. 21: Chimenea.....	72
Figura. 22: Caldera de combustión elegida	73
Figura. 23: Turbina de vapor elegida	74
Figura. 24: Esquema de una planta de incineración con valorización energética	75
Figura. 25: Mapa con las plantas incineradoras de valorización energética en España	76
Figura. 26: Municipio de Leganés donde se ubicará la planta de incineración	77
Figura. 27: Situación geográfica de la planta incineradora	77
Figura. 28: Ubicación en el mapa de la planta incineradora	78
Figura. 29: Dimensiones de la parcela para la planta de incineración.....	78
Figura. 30: Esquema ciclo Rankine	79
Figura. 31: Diagrama TS del ciclo vapor	83
Figura. 32: Diagrama de Sankey de la planta de incineración con un 10,8% de residuos desechables	85



Figura. 33: Diagrama de Sankey de la planta de incineración con un 50% de residuos desechables	86
Figura. 34: Valores del VAN de la planta incineradora para distintos WACC	93
Figura. 35: Flujos de caja acumulados en la planta incineradora	93
Figura. 36: Trituradora de RSU	99
Figura. 37: Gasificador	100
Figura. 38: Antorcha de plasma	102
Figura. 39: Antorcha de plasma elegida	103
Figura. 40: Turbina de gas	104
Figura. 41: Municipio de Villanueva del Pardillo donde se ubicará la planta de gasificación	105
Figura. 42: Situación geográfica de la planta de gasificación	106
Figura. 43: Ubicación en el mapa de la planta de gasificación	106
Figura. 44: Dimensiones de la parcela para la planta de gasificación	107
Figura. 45: Diagrama de Sankey de la planta de gasificación por plasma	110
Figura. 46: Valores del VAN de la planta de gasificación por plasma para distintos WACC	117
Figura. 47: Flujos de caja acumulados en la planta de gasificación por plasma	117
Figura. 48: Comparativa del tamaño del terreno necesario para cada caso de estudio	122
Figura. 49: Comparación de la potencia generada en cada caso de estudio (kW)	124
Figura. 50: Reparto de viviendas suministradas por tecnologías de valorización energética de residuos	125
Figura. 51: Compostaje en hileras aireadas	129
Figura. 52: Comparativa del período de retorno de las distintas tecnologías en años	131
Figura. 53: Comparativa de las inversiones iniciales necesarias en los tres casos de estudio (€)	132
Figura. 54: Comparativa entre los costes de operación y mantenimiento (€/ton)	133
Figura. 55: Comparativa entre los distintos TIR de los tres casos de estudio	134
Figura. 56: VAN de cada planta de valorización energética de residuos para una tasa de retorno de 6%	135
Figura. 57: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar las toneladas de RSU entrantes	145
Figura. 58: Variación del VAN en la planta de incineración al variar las toneladas de RSU entrantes	146
Figura. 59: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar las toneladas de RSU entrantes	147
Figura. 60. Comparativa de las tres plantas al modificar la cantidad de RSU entrantes en las mismas	148



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Figura. 61: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar el canon cedido por el ayuntamiento	149
Figura. 62: Variación del VAN en la planta de incineración al variar el canon cedido por el ayuntamiento.....	150
Figura. 63: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar el canon cedido por el ayuntamiento.....	151
Figura. 64: Comparativa de las tres plantas al modificar el canon cedido por el ayuntamiento	152
Figura. 65: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar el precio de la potencia entregada a la red.....	153
Figura. 66: Variación del VAN en la planta de incineración al variar el precio de la potencia entregada a la red.....	154
Figura. 67: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar el precio de la potencia entregada a la red.....	155
Figura. 68: Comparativa de las tres plantas al modificar el precio de la potencia entregada a red	156
Figura. 69: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar la prima recibida	157
Figura. 70: Variación del VAN en la planta de incineración al variar la prima recibida	158
Figura. 71: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar la prima recibida	159
Figura. 72: Comparativa de las tres plantas al modificar la prima recibida	160



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las distintas UTG de la Comunidad de Madrid	26
Tabla 2. Posibles emplazamientos del vertedero.....	33
Tabla 3. Presupuesto de construcción de un vertedero controlado.....	36
Tabla 4. Presupuesto de mantenimiento de un vertedero controlado	36
Tabla 5. Presupuesto de clausura de un vertedero controlado.....	37
Tabla 6. Plantas de biometanización en España	43
Tabla 7. Características digester elegido.....	47
Tabla 8. Características del motor de combustión interna elegido	49
Tabla 9. Composición química del biogás	52
Tabla 10. Coeficientes de los términos de la reacción química entre biogás y aire	53
Tabla 11. Presupuesto de urbanización de la planta de biometanización.....	58
Tabla 12. Presupuesto de obra civil e instalaciones de la planta de biometanización ..	58
Tabla 13. Presupuesto de maquinaria de la planta de biometanización	59
Tabla 14. Inversión inicial del vertedero y la planta de biometanización.....	59
Tabla 15. Costes variables de la planta de biometanización.....	60
Tabla 16. Costes fijos de la planta de biometanización	61
Tabla 17. Depreciación maquinaria planta de biometanización.....	62
Tabla 18. Depreciación edificación planta de biometanización.....	62
Tabla 19. Plantas incineradoras en España	70
Tabla 20. Características principales de la caldera de recuperación elegida.....	73
Tabla 21. Principales características de la turbina de vapor elegida	74
Tabla 22. Composición química de los residuos sólidos urbanos	79
Tabla 23. Coeficientes de los términos de la reacción química entre residuos y aire ...	80
Tabla 24. Presupuesto de urbanización de la planta incineradora	87
Tabla 25. Presupuesto de obra civil e instalaciones de la planta incineradora	88
Tabla 26. Presupuesto de maquinaria de la planta incineradora	88
Tabla 27. Costes variables de la planta incineradora	89
Tabla 28. Costes fijos de la planta incineradora.....	90
Tabla 29. Depreciación maquinaria planta incineradora	91
Tabla 30. Depreciación edificación planta incineradora	91
Tabla 31. Características de los tipos de gasificadores existentes.....	100
Tabla 32. Características modelo gasificador elegido	101
Tabla 33. Características de los modelos de antorchas de plasma existentes	102
Tabla 34. Características de la Turbina GE6581B	104
Tabla 35. Composición química del syngas	107
Tabla 36. Coeficientes de los términos de la reacción química entre syngas y aire	108



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 37. Presupuesto de urbanización de la planta de gasificación por plasma.....	111
Tabla 38. Presupuesto de obra civil e instalaciones de la planta de gasificación por plasma.....	112
Tabla 39. Presupuesto de maquinaria de la planta de gasificación por plasma	112
Tabla 40. Costes variables de la planta de gasificación por plasma.....	113
Tabla 41. Costes fijos de la planta de gasificación por plasma	114
Tabla 42. Depreciación maquinaria planta de gasificación por plasma	115
Tabla 43. Depreciación edificación planta de gasificación por plasma.....	115
Tabla 44. Superficie necesaria para cada planta de valorización energética.....	122
Tabla 45: Kw eléctricos generados en cada planta de valorización energética	124
Tabla 46. Potencia inyectada en la red anualmente y cuántas viviendas se abastecen con dicha potencia.....	125
Tabla 47: Comparativa de los períodos de retorno de cada planta de valorización energética	130
Tabla 48: Inversiones iniciales de cada planta de valorización energética	131
Tabla 49: Costes de operación y mantenimiento de cada planta de valorización energética	132
Tabla 50: TIR de cada planta de valorización energética	133
Tabla 51: VAN de cada planta de valorización energética para un WACC del 6%	134
Tabla 52. Variaciones de algunos parámetros de la planta de biometanización intrínsecos a la modificación de la cantidad de toneladas de RSU entrantes anualmente	144
Tabla 53. Variaciones de algunos parámetros de la planta incineradora intrínsecos a la modificación de la cantidad de toneladas de RSU entrantes anualmente	145
Tabla 54. Variaciones de algunos parámetros de la planta de gasificación intrínsecos a la modificación de la cantidad de toneladas de RSU entrantes anualmente	146



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Capítulo I. Estado del arte



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En el presente apartado se estudia la problemática que existe en la actualidad debido a la generación en aumento de los residuos sólidos urbanos, así como se analizan los objetivos futuros de la UE para un mejor tratamiento de los mismos.

Actualidad e introducción a los residuos

La gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) es un problema al que hay que hacer frente en la actualidad, debido al aumento gradual de la población así como al hecho de que haya una sociedad cada vez más consumista. La generación de residuos es natural de cualquier actividad que lleve a cabo un ser humano, sin embargo, en los últimos años ha sido un factor muy preocupante debido a dos aspectos principalmente. Por un lado la composición de los residuos es cada vez menos orgánica, debido al consumo masivo de plásticos y vidrios, lo que provoca que se conviertan en sustancias mucho más contaminantes y perjudiciales para el medio ambiente. Por otro lado, se ha producido una migración de las zonas rurales a las ciudades por lo que la generación de residuos se ha visto enormemente concentrada en dichos lugares. Este aumento en la cantidad de residuos provoca diversos problemas medioambientales como son la contaminación de suelos, aguas, atmósfera y posible intoxicación de cadenas tróficas.

Sin embargo, estos residuos poseen un poder calorífico de entre 1.500Kcal/Kg y 2.500Kcal/Kg, lo que significa que tienen propiedades excelentes para ser utilizados como combustible. Por ello, es de vital importancia el desarrollo de tecnologías de valorización energética que permitan dar una utilidad a las grandes toneladas de residuos que son generadas continuamente y evitar así, que el destino principal de estas sean los vertederos.

Actualmente existen diversas técnicas de gestión de residuos que pueden ser diferenciadas en dos grupos dependiendo del tratamiento que vaya a sufrir el residuo:

- Tratamientos térmicos. En este grupo se encuentran la incineración, pirolisis o gasificación.
- Tratamientos biológicos. En este grupo se encuentra la biometanización o digestión anaerobia y el compostaje o digestión aerobia.

En el año 2016 hubo en España casi 47 millones de habitantes, generando una cantidad aproximada de 531kg de residuos por habitante al año. La comunidad de Madrid cuenta con varias medidas de tratamiento de residuos como son los vertederos



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

controlados, plantas de biometanización o incineradoras, así como se continua trabajando por insertar nuevas técnicas, como podría ser en un futuro cercano la gasificación por plasma.

Sin embargo, a pesar de todas estas medidas la situación en muchos casos se hace insostenible ya que la población aumenta cada año y, por tanto, las plantas de tratamiento de residuos se ven saturadas en muchas ocasiones. En la Figura. 1 se puede ver dicha tendencia.

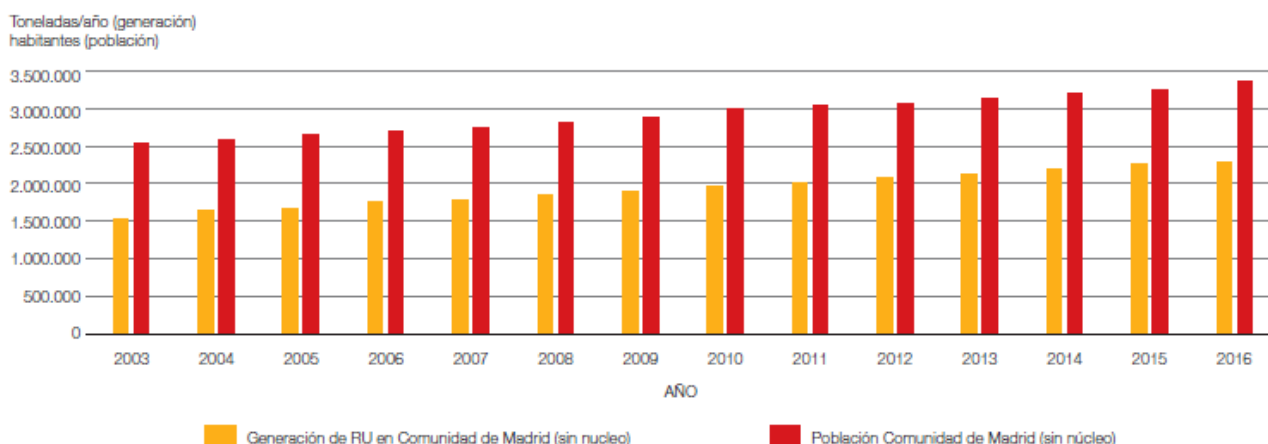


Figura. 1: Evolución de la población y de la generación de residuos urbanos en la Comunidad de Madrid sin el núcleo (Madrid, Arganda del Rey y Rivas Vaciamadrid)

Fuente: [1]

Es por esto, que la primera medida que se debe llevar a cabo por parte de todos los habitantes es la conocida como la de las 3R: reducir, reutilizar y reciclar.

- **Reducir:** Es tarea de todos los habitantes la reducción de los residuos que se generan a diario. Con prácticas sencillas como reducir el consumo de bolsas de plástico utilizadas principalmente en los supermercados, o comprar preferiblemente aquellos alimentos u objetos que tengan menor cantidad de empaquetado, se pueden obtener grandes logros que reducen enormemente el impacto de estos residuos en el medio ambiente.
- **Reutilizar:** La reutilización de los objetos hace que su vida útil se vea aumentada con la reducción de basura que eso conlleva. El vidrio por ejemplo, puede ser reutilizado en varias ocasiones.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

- **Reciclar:** Con el reciclaje se consigue una mayor rapidez en las plantas de tratamiento de residuos, ya que se evita el proceso de separación de unos materiales con otros, así como se consigue que estos elementos vuelvan a ser utilizados tras pasar por las etapas necesarias.

En los últimos años, desde la Unión Europea se han promovido muchas prácticas para evitar el impacto que los residuos generan en el medio ambiente, habiendo países más avanzados en estos aspectos que otros.

Dentro de los objetivos de la Unión Europea del tratamiento de residuos destaca que para el año 2020 se desea que todos los países miembros reciclen el 50% de los residuos domésticos y similares, así como el 65% para 2030. Austria es el país más avanzado pues ya presenta una tasa del 63%, seguida de Alemania cuya tasa es 62%, Bélgica 58% y los Países Bajos 51%. España tiene una cifra aproximada de 35%. Por su parte, aunque Suiza no pertenece a la Unión Europea tiene una tasa de reciclaje para el vidrio de 95% y más del 51% de sus basuras son tratadas. [2]

En el 2030 el empaquetado debe ser en un 80% material reciclado. El objetivo es conseguir una economía circular, donde los materiales puedan ser reutilizados, en lugar de la economía lineal actual en la que los materiales se utilizan una vez para posteriormente desecharlos.

Otro de los objetivos establecidos para el 2030 es que sólo el 10% de los residuos generados acabe en vertederos. Existen ciertos países como Croacia, Grecia o Malta que envían a vertederos más del 75% de los residuos generados. Mientras que por otro lado se encuentran Austria, Alemania o Suecia que prácticamente no vierten residuos a vertederos. La situación en España está más cerca del primer grupo, por lo que queda mucho trabajo por hacer para conseguir los objetivos establecidos. Es por esto por lo que se cree de gran importancia el estudio realizado en este proyecto respecto a las técnicas de valorización energética de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) actuales, ya que reducen enormemente la cantidad de dichos residuos que acaban en vertederos. [3]



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Capítulo II. Tipos de residuos



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se analizan los distintos tipos de residuos que existen, así como se realiza una definición de los residuos sólidos urbanos que se van a tratar en adelante en este proyecto.

Definición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Según la Ley 22/2011 se entiende por residuos *“cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar”*.

Una vez definido el concepto es necesario conocer los distintos tipos de residuos que existen dependiendo de su naturaleza y composición.

Los **residuos industriales** son aquellos que se generan en las grandes industrias dentro de los cuales cabe diferenciar los siguientes:

- Residuos inertes: Por lo general se trata de residuos no peligrosos para el medio ambiente tales como escombros y materiales similares.
- Residuos peligrosos: Estos residuos tienen una composición química especial y, por tanto, deben tener un tratamiento especializado. También entran dentro de este grupo los recipientes que contienen a dichos residuos.
- Residuos similares a residuos sólidos urbanos: En las industrias también se generan residuos con características similares a los urbanos en los comedores u oficinas.

Se denomina **residuos agrarios** a aquellos que proceden de actividades agropecuarias como son la agricultura, ganadería, pesca, las explotaciones forestales o la industria alimenticia.

En los hospitales y clínicas se generan los **residuos médicos y de laboratorios**.

Los **residuos radiactivos** son aquellos que poseen cierta radiactividad, y que por tanto tienen un tratamiento muy especializado y cuidadoso.

Se entiende por **residuos sólidos urbanos** aquellos que quedan fuera de la definición de residuos peligrosos y que normalmente se generan en las viviendas, oficinas, comercios y servicios. También se considera dentro de este tipo a los residuos procedentes de la limpieza de vías públicas, áreas recreativas, zonas verdes y playas; los animales domésticos muertos, así como muebles y vehículos abandonados; y finalmente aquellos residuos que se generan en obras menores de construcción y reparación domiciliaria. [4]



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



Capítulo III. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de un vertedero controlado



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se va a analizar el impacto de la construcción de un vertedero controlado en la Comunidad de Madrid a partir de una cantidad fija de RSU. Se estudiará la dimensión y la mejor ubicación del mismo, así como el coste de dicha construcción y el rendimiento obtenido.

Descripción

Se define como vertedero controlado al terreno preparado para el depósito de residuos sólidos urbanos (RSU), en el cual se acumulan dichos residuos en distintas capas separadas unas de otras por finas capas de tierra. Los principales objetivos de un vertedero son evitar la entrada de animales y la transmisión por el aire de olores e insectos, así como evitar problemas de incendios. También debe prevenir la contaminación del agua y mejorar aspectos estéticos.

La principal valorización de un vertedero se encuentra en **el aprovechamiento de los gases generados (fundamentalmente CO_2 y CH_4)**.

Para el estudio de un vertedero es importante conocer los términos de *celda* con el cual se denomina al volumen de residuos depositado en un periodo de operación, y *nivel* con el cual se conoce a la capa completa de celdas a la misma altura en un vertedero. Además se distinguen dos tipos de recubrimientos en un vertedero, recubrimiento intermedio, que es el que separa celdas y niveles a diario y la capa final que es más gruesa y se coloca a la clausura del vertedero. Los lixiviados son los líquidos que se acumulan en el fondo del vertedero debido a la humedad que contienen los residuos, el agua que generan los residuos orgánicos en su degradación y las precipitaciones. En los vertederos también se pueden originar gases durante la biodegradación de los residuos orgánicos.

La gestión de un vertedero incluye las siguientes fases:

- Planificación
- Diseño y construcción
- Explotación
- Clausura
- Control postclausura

A continuación van a desarrollarse cada una de estas fases.



Planificación

La planificación consiste en la elección del lugar y las condiciones que debe tener el terreno donde se asentará el vertedero controlado.

Debido a restricciones de seguridad, el vertedero no debe situarse cerca de aeropuertos, en zonas húmedas o terreno aluvial, zonas con fallas o de impacto sísmico.

La disponibilidad del terreno debe ser de al menos 5 años de explotación, ya que en otro caso no resultaría una explotación rentable.

Las condiciones climatológicas son influyentes a la hora de la elección del terreno, por lo que si se trata de una zona de muchas lluvias se deben construir zonas de vertido separadas y si se trata de una zona de viento fuerte se deben construir cortavientos, evitando así la proliferación de olores y contaminación. También son igualmente importantes las condiciones geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas.

El vertedero controlado debe estar ubicado lejos de zona urbana.

Diseño y construcción

En primer lugar, se prepara la zona de vertido realizando la canalización del drenaje superficial natural, construyendo las carreteras necesarias y colocando las vallas que eviten el paso a los animales. A continuación se lleva a cabo la excavación de la zona de vertido (donde el material excavado se almacena para la cubrición diaria), y se instalan los sistemas para el control de fugas de gases y lixiviados.

Posteriormente se recubren el fondo y las paredes del vertedero con recubrimientos mixtos de arcilla y geomembrana.

También es de vital importancia la instalación de sistemas de recogida de lixiviados con terrazas inclinadas con tuberías perforadas en los canales del fondo.

Explotación

La explotación del vertedero se realiza de manera diaria colocando residuos en capas de 45-60cm que posteriormente serán compactadas y finalmente se colocará una nueva capa. Al final de cada periodo se cubren los residuos con una capa delgada (15-30cm) de la tierra excavada en la etapa de diseño y construcción.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Cada periodo se rellenan las celdas del mismo nivel y cuando se completa se excavan zanjas horizontales para colocar tuberías de extracción del gas y se comienza a trabajar en el nivel superior.

Clausura

La cobertura final del vertedero debe satisfacer asegurar la integridad del mismo, así como soportar el uso de la zona.

Control postclausura

Una vez clausurado el vertedero, existe un periodo de entre 30 y 50 años de vigilancia y restauración de los daños causados por el asentamiento del vertedero, vigilancia de los sistemas de control de gases y lixiviados y supervisión de la calidad ambiental (verificar la ausencia de fugas).

Dentro de las ventajas de los vertederos controlados destacan:

- Capacidad de almacenar aquellos residuos que no pueden ser reciclados ni tienen valorización energética posible
- Es necesaria una inversión pequeña en comparación con el resto de técnicas de tratamiento de residuos
- Aprovechamiento de los gases generados en los vertederos
- Facilidad de implantación

Los vertederos presentan múltiples desventajas mostradas a continuación:

- Proliferación de animales tales como gaviotas o roedores
- Contaminación a lo largo de la cadena trófica
- Generación de malos olores
- Emisiones de gases que producen efecto invernadero (CH₄ y CO₂, básicamente)
- Posible contaminación de aguas fluviales cercanas al vertedero debido a la filtración de lixiviados

[5]



Localización

La comunidad de Madrid cuenta con una división territorial para la mejor organización de la gestión de residuos. Cada una de estas divisiones se denomina UTG (Unidad Territorial de Gestión) y en la Figura. 2 se puede observar la zona ocupada por cada una. [6]

Tabla 1. Características de las distintas UTG de la Comunidad de Madrid

Fuente: Elaboración propia

	Población	Superficie (km ²)	Nº Municipios
UTG1	564.202	833	24
UTG2A	1.440.411	2.110	42
UTG2B	634.698	1.985	45
UTG3	422.349	2.300	65
UTG4	3.397.024	753	3
TOTAL	6.458.684	7.980	179

En la actualidad existen cuatro vertederos controlados dentro de la Comunidad de Madrid (ya que con el tiempo se han cerrado numerosos vertederos para utilizar otros sistemas más sostenibles de tratamiento de residuos):

- Zona Este: A esta zona corresponden el Vertedero Controlado de Alcalá de Henares y el Vertedero Controlado de Nueva Rendija. El primero abastece a 31 municipios con un total de 650.000 habitantes.
- Zona Sur: A esta zona corresponden el Vertedero Controlado de Pinto, que recibe anualmente más de 700.000 toneladas de residuos provenientes de los 65 municipios que comprenden la Mancomunidad del Sur además de los seis municipios adheridos o no mancomunados que también hacen uso de la instalación, sumando cerca de 2.000.000 de habitantes.
- Zona Norte: A esta zona corresponde el Vertedero Controlado de Colmenar Viejo, donde más de 80 municipios (aproximadamente 600.000 habitantes) llevan sus residuos acumulando unas 300.000 toneladas de basura al año.



Figura. 2: Mapa con los vertederos controlados de la Comunidad de Madrid

Fuente: Elaboración propia

A la hora de elegir la mejor ubicación de un vertedero controlado hay que prestar especial atención a las características del terreno así como a los criterios económicos. A continuación se adjuntan los requisitos más determinantes.

Características climatológicas

El estudio de las características climatológicas del terreno donde se desee construir un vertedero controlado es crucial, sin embargo, por lo general estas características serán idénticas en todo el territorio elegido ya que no son necesarias dimensiones tan grandes para la construcción de un vertedero como para que se produzca una variación de la climatología en el mismo.

Es necesario prestar especial atención a las precipitaciones de la zona en la que deseemos realizar la construcción ya que una zona de precipitaciones de intensidad extrema puede ocasionar una fuerte erosión o una inundación del vertedero.

Otro parámetro climatológico importante es el régimen de vientos, ya que una zona con fuertes vientos puede ocasionar el movimiento de malos olores a terrenos colindantes.



Características geológicas

Dentro de las características geológicas debe evitarse la utilización de territorios en los que puedan surgir deslizamientos, movimientos de tierras, o desprendimiento de bloques.

La permeabilidad del terreno es una característica fundamental, por lo que deben evitarse zonas de media o alta permeabilidad.

La topografía del terreno

Respecto a la topografía del terreno tiene un papel principal la pendiente del mismo, debiendo elegir territorios que tengan una pendiente inferior al 8%. Aquellos terrenos con una pendiente entre 8 y 15% deberán ser sometidos a una segunda evaluación a partir de otros parámetros y posteriormente determinar si a pesar de la elevada pendiente del terreno resulta viable la construcción del vertedero. Territorios con una pendiente superior al 15% no podrán ser utilizados para este fin.

Criterios hidrológicos

Se trata de prevenir la posible contaminación de lixiviados a aguas fluviales próximas al vertedero.

Aspectos florísticos y faunísticos

Los aspectos florísticos y faunísticos son los más perjudicados en la construcción de un vertedero, ya que para comenzar es necesario excavar todo el terreno en el que se vaya a realizar la implantación pudiendo ocasionar cambios en el hábitat de la fauna que esté asentada en ese lugar. En caso de producirse fugas, se podría contaminar el terreno colindante o aguas fluviales, con lo que se ocasionaría así mismo una contaminación en los animales herbívoros de la zona. A continuación los animales carnívoros que se alimenten de los anteriores tendrían también un pequeño porcentaje de sustancias tóxicas y así sucesivamente a lo largo de la cadena trófica pudiendo llegar incluso a los seres humanos. Para evitar estos sucesos es especialmente importante la buena elección del material de recubrimiento de un vertedero.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Teniendo en cuenta estos factores, las zonas a elegir para la ubicación de un vertedero deben tener un bajo riesgo de incendio (que pudiera afectar a la flora y fauna de los terrenos colindantes) y no deben existir especies frágiles ni en peligro de extinción.

El paisaje

Cuando se produce la construcción de un vertedero se produce un gran impacto en el paisaje, debido a la tala de cualquier árbol que se halle en la zona y la excavación del terreno para comenzar la construcción del mismo. Es por esto por lo que se deben tener en cuenta las siguientes medidas en la fase de selección de emplazamientos:

- Tener preferencia por aquellos terrenos en los que existan en sus alrededores elementos del paisaje que pudiera facilitar la ocultación del vertedero (colinas, por ejemplo)
- Tener preferencia por territorios poco concurridos
- Intentar que el impacto paisajístico sea mínimo buscando colores y formas lo más parecidas posibles a las existentes en los terrenos colindantes
- Evitar aquellos territorios que posean paisajes muy particulares o diferentes

Usos del suelo actuales previstos

Otro parámetro importante en la construcción de un vertedero es que no dificulte otros usos del suelo, por lo que se deberán excluir aquellos terrenos de los cuales se obtengan grandes ganancias (agrícolas, ganaderas, industriales o de otro tipo), y aquellos con gran población, evitando así zonas residenciales.

Punto de vista económico: El transporte y la dotación de infraestructuras

Hasta este punto, siempre se ha dado preferencia a aquellos terrenos que se encuentran aislados y alejados de cualquier zona residencial o urbana. Sin embargo, estos territorios poseen una clara desventaja: los elevados costes de transporte.

Generalmente las características ambientales deberán anteponerse a los criterios económicos de cada territorio, sin embargo, aquellos emplazamientos que tengan unos costes elevados y no presenten grandes ventajas adicionales serán



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

eliminados de la lista de “posibles candidatos”, como es el caso de los terrenos situados a distancias superiores a 20 km de los centros productores. [7]

Teniendo en cuenta todos estos parámetros se va a proceder a la construcción de un vertedero controlado con una capacidad de 300.000 toneladas de RSU al año. La superficie que debe tener el vertedero para que pueda asimilar dicha capacidad debe ser de aproximadamente 7,7 hectáreas.

La primera ubicación que se pensó para el desarrollo de este proyecto fue en la zona oeste debido a que no existe ningún vertedero en la UTG2B organizándose tan solo a partir de estaciones de transferencia como se observa en la Figura. 3.

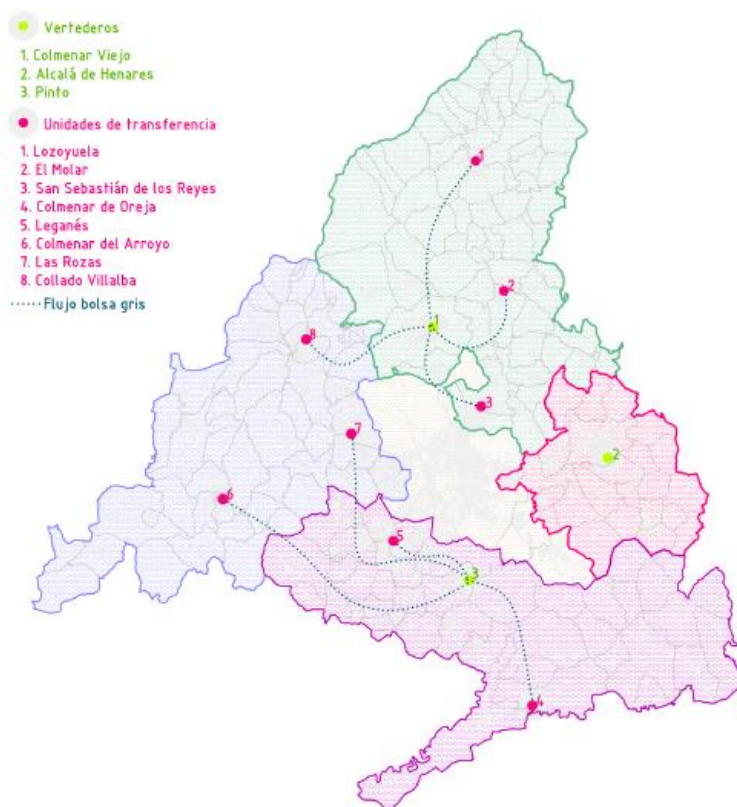


Figura. 3: Flujo de RSU en la Comunidad de Madrid

Fuente: Eficiencia de la estrategia de gestión y localización de los residuos de la Comunidad de Madrid (Clara Martínez Miguel)

Sin embargo, esta es una zona de carácter urbano residencial, cuya población ha aumentado fuertemente en los últimos años. Además se trata de una zona muy afectada por el tráfico ya que es atravesada por la carretera A-6, una de las autovías con más densidad de tráfico de la Comunidad de Madrid.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Se caracteriza por su disposición como zona residencial, mayoritariamente en urbanizaciones y viviendas unifamiliares, dispuestas a ambos lados de la Autovía A-6 (La Coruña), así como es el área de la Comunidad Autónoma con un menor número de instalaciones industriales.

Otro aspecto por el que se descartó la construcción en la zona oeste del vertedero controlado es porque se trata de una zona mucho más montañosa que la este, dificultando por tanto la construcción.

En el año 2018 se pondrá en funcionamiento un nuevo vertedero en la localidad de **Loeches**, debido a que el vertedero de Alcalá de Henares colmatará en dicho año. Para que este proyecto mantenga un carácter original no se va a construir el vertedero en dicha localización, posiblemente la más óptima, sino que se ha optado por construirlo en el municipio de anchuelo, en la zona este de la Comunidad de Madrid.

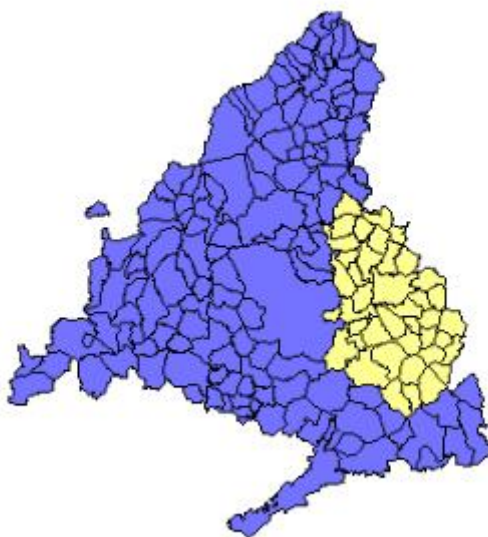


Figura. 4: Zona este de la Comunidad de Madrid

Para comenzar con la valoración de este territorio se van a estudiar sus características climatológicas, que como se mencionó anteriormente, son muy similares en todo el territorio debido a sus pequeñas dimensiones.

Se encuentra que en esta zona hay una precipitación anual inferior a 550 mm, con una precipitación en el mes más lluvioso inferior a 60 mm, datos que resultan verdaderamente buenos para el vertedero.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Dentro de todo el territorio elegido se van a eliminar el 85% de los terrenos debidos a criterios como pendientes mayores del 10%, y el 50% de los terrenos no eliminados hasta ahora van a ser excluidos debido a usos del suelo inviables con la construcción del vertedero, como núcleos urbanos y su entorno.

Finalmente serían válidas 1.350 hectáreas para la ubicación de este vertedero.

Dentro de estas hectáreas se van a eliminar los terrenos que posean una forma incompatible con el vertedero, (como pueden ser terrenos demasiado alargados, o aquellos en los que no sea posible la entrada de camiones), así como aquellos terrenos situados a más de 20 km de Alcalá de Henares y que no posean ventajas adicionales.

Una vez finalizada esta primera criba, se obtienen 5 áreas que se denominarán **alternativas iniciales** y que pueden localizarse en la Figura. 5.

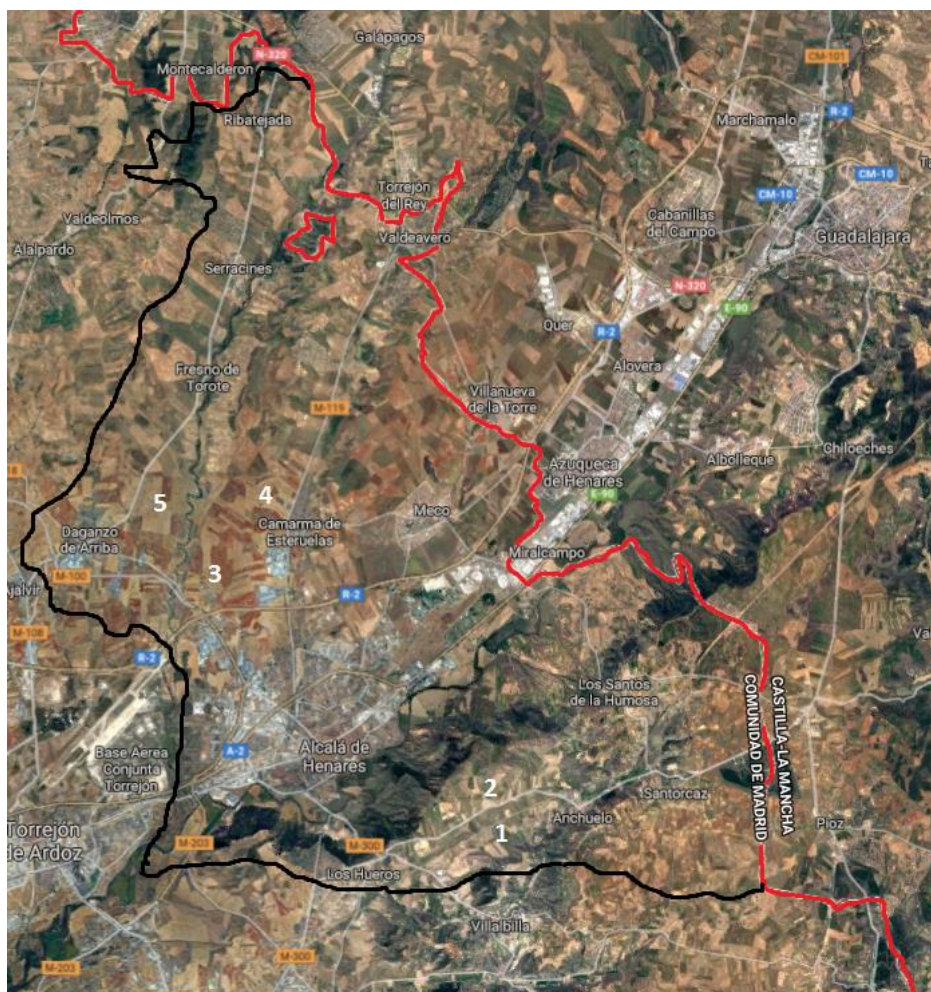


Figura. 5: Situación posibles territorios para construcción de vertedero

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Las zonas 4 y 5 son las más alejadas de Alcalá superando en más del 50% los costes de transporte del resto de zonas. Así finalmente se establecen las **alternativas finales** formadas por los territorios 1, 2 y 3.

A continuación se presenta una tabla comparativa de estos 3 territorios con algunas de las características descritas anteriormente (Tabla 2).

Tabla 2. Posibles emplazamientos del vertedero

Fuente: [7]

VARIABLES	ALTERNATIVAS		
	1	2	3
Hidrogeología	Óptima	Óptima	Mediocre
Topografía	Adecuado	Mediocre	Adecuado
Influencia en hábitat humanos	Adecuado	Mediocre	Mediocre
Paisaje	Adecuado	Deficiente	Deficiente
Flora y fauna	Adecuado	Mediocre	Adecuado
Usos del suelo	Adecuado	Mediocre	Deficiente
Disponibilidad de terrenos	Adecuado	Adecuado	Mediocre
Infraestructura y transporte	Deficiente	Deficiente	Adecuado

Finalmente se ha decidido claramente que el territorio óptimo para la construcción del vertedero es el terreno número 1. En la Figura. 6 se observa en amarillo el terreno que se ha elegido de dicha zona (en el municipio de Anchuelo) con una amplitud de $74.532,62 m^2$.



Figura. 7: Ubicación del vertedero elegido

Fuente: Elaboración propia

Para el aprovechamiento energético del vertedero, se va a construir en un terreno cercano al mismo una planta de biometanización de manera que se pueda aprovechar el biogás de las celdas ya selladas del vertedero, junto con el obtenido en



la combustión de la planta de biometanización. Este aprovechamiento energético se encuentra en el Capítulo III.

A continuación se va a calcular la vida útil del vertedero partiendo de unos datos iniciales:

- Densidad del vertedero=800kg/m³
- Altura de las celdas del vertedero=4m
- Espesor de las capas que separan celdas=20cm
- Profundidad del vertedero=40m
- Espesor de la capa final=1m

En primer lugar es necesario determinar el número de capas que tendrá el vertedero.

$$40 = 1 + 4 * n + 0,2 * (n - 1) \rightarrow n = 9 \text{ capas}$$

$$\text{Volumen de almacenamiento} = 74.532,62\text{m}^2 * 9 \text{ capas} * \frac{4\text{m}}{\text{capa}} = 2.683.174,32\text{m}^3$$

$$\text{Capacidad necesaria} = 2.683.174,32\text{m}^3 * \frac{0,8\text{ton}}{\text{m}^3} = 2.146.539,45\text{ton}$$

$$\text{Vida útil} = \frac{2.146.539,45\text{ton}}{300.000\text{ton/año}} = 7,1 \text{ años}$$

Por tanto la vida útil del vertedero es de aproximadamente 7 años.

Rendimiento

El rendimiento del proceso de obtención de energía eléctrica también se puede observar en el Capítulo III, debido a que se estudian conjuntamente el vertedero y la planta de biometanización.

Viabilidad económica

En este apartado se analiza el presupuesto detallado que se va a requerir para la construcción de este vertedero, así como para su mantenimiento y clausura.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Se va a considerar un coste inicial debido a la expropiación o compra de terrenos de 1.000.000 de euros.

Para la construcción del vertedero la primera acción que se debe llevar a cabo es el movimiento de tierras firmes y pavimentos, así como el recubrimiento del fondo y las paredes, lo que supone un gasto de alrededor de 305.000€. La construcción de un cierre adecuado para evitar la entrada de animales y permitir el paso de camiones, compone un gasto total de 106.000€ y finalmente se consideran 250.000€ necesarios para la construcción de las instalaciones auxiliares como sanitarios o el parking donde deban estacionar los camiones.

En el mantenimiento destaca el drenaje de aguas, tanto de percolación como pluviales a lo largo de toda la vida del vertedero, así como el cubrimiento diario de las capas de tierra que se depositan encima de las celdas, forman un gasto de 700.000€. Adicionalmente se pueden considerar unos gastos varios no tenidos en cuenta hasta ahora (como la gasolina de los camiones necesarios para el transporte de RSU), de 60.000€

La clausura está compuesta por el recubrimiento del vertedero para evitar la proliferación de malos olores así como la entrada de animales y aves al mismo, supone un gasto de 880.000€, y finalmente, 550.000€ irían destinados a la revegetación de la zona.

Tabla 3. Presupuesto de construcción de un vertedero controlado

Fuente: [8]

PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN	
Expropiaciones/compra terrenos	1.000.000
Construcción del vertedero	305.000
Construcción de un cerramiento adecuado	106.000
Instalaciones auxiliares	250.000
TOTAL	1.661.000 €

Tabla 4. Presupuesto de mantenimiento de un vertedero controlado

PRESUPUESTO DE MANTENIMIENTO	
Mantenimiento del vertedero	700.000
Gastos varios	60.000
TOTAL	760.000 €/año



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 5. Presupuesto de clausura de un vertedero controlado

PRESUPUESTO DE CLAUSURA	
Clausura	880.000
Revegetación	550.000
TOTAL	1.430.000 €

Este presupuesto se tendrá en cuenta en el Capítulo III para realizar la viabilidad económica del vertedero junto con la planta de biometanización.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



Capítulo IV. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de una planta de biometanización



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se va a analizar el impacto de la construcción de una planta de biometanización en la Comunidad de Madrid a partir de una cantidad fija de RSU. Se estudiará la dimensión y la mejor ubicación de la planta, así como el coste de dicha construcción y el rendimiento obtenido de la misma.

Descripción

Se denomina biometanización o digestión anaerobia, al proceso por el cual se descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, dando lugar a un gas con alto contenido energético (denominado **biogás**) y a materia orgánica descompuesta que puede ser empleada para hacer **compost**.

La biometanización se desarrolla en numerosas etapas, entre las que destaca la última, en la que se transforman los productos finales en CO_2 y CH_4 (componentes principales del biogás).

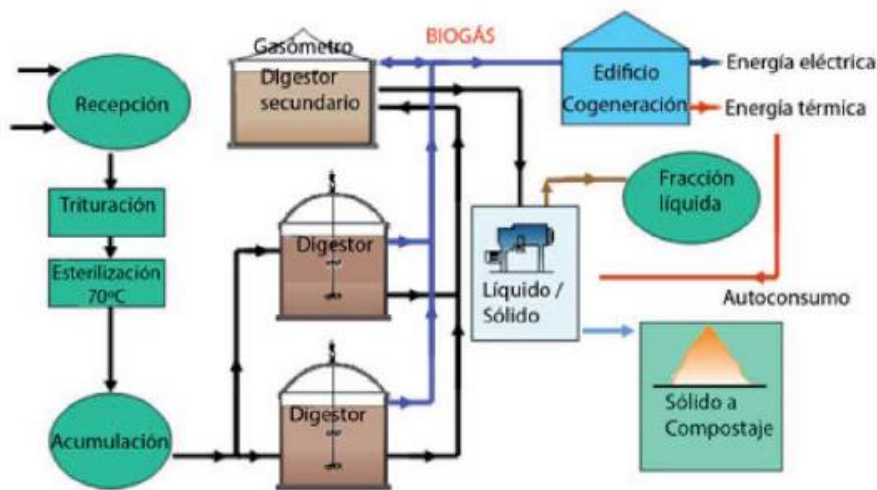


Figura. 8: Esquema de una planta de biometanización

Fuente: Asignatura de ingeniería y desarrollo sostenible de Comillas

La valorización energética de esta técnica reside en la alta capacidad calorífica que posee el biogás, gracias a la cual es perfectamente apto para utilizarlo como fuente primaria de motores de cogeneración, calderas y turbinas. El aprovechamiento de este gas, formado principalmente por metano y CO_2 , tiene la principal ventaja de



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero debido a dos factores: el aprovechamiento del biogás para obtener energía eléctrica evitando así la expulsión a la atmósfera de dicho metano y CO_2 y el reemplazo de combustibles fósiles para producir la electricidad que se genera a partir del biogás.

El rendimiento de una planta de estas características está estrechamente unido al tipo de residuos que se asimilan en la misma, por lo que es importante realizar en un comienzo una recogida separada, utilizando prioritariamente para la digestión anaeróbica residuos ricos en grasas, proteínas e hidratos de carbono ya que nos proporcionarán ácidos grasos volátiles, precursores del metano.

Debido a la necesidad de ausencia de oxígeno para que el proceso se lleve a cabo correctamente, la biometanización se desarrolla en recipientes denominados reactores de fermentación anaerobia.

El compost es un producto de la biometanización que es empleado como abono sustituyendo total o parcialmente a los fertilizantes químicos. Sin embargo, presenta ciertos inconvenientes como que puede contener metales, puede producir olores debido a una maduración incompleta y puede tener patógenos. Estos últimos se destruyen manteniendo a los RSU a 55°C durante 15-20 días.

La biometanización tiene la ventaja de que al desarrollarse en ausencia de oxígeno, se produce una reducción de los microorganismos que puedan dañar a personas o animales. Además al desarrollarse en el interior de los reactores, se evita la contaminación atmosférica de malos olores producidos por la descomposición de la materia orgánica. [9]

En España existen las plantas de biometanización mostradas en la Tabla 6.



Tabla 6. Plantas de biometanización en España

Localización de la planta	Provincia	Municipio	Año instalación
Castilla y León	Ávila	Urraca Miguel	
	Valladolid	Valladolid	2003
Cataluña	Barcelona	Barcelona	2004
	Barcelona	Moncada i Reixach	2001
	Barcelona	Sant Adrià de Besós	2006
Galicia	A coruña	A coruña	2002
	Vigo	Vigo	2016
Madrid	Madrid	Pinto	2004
	Madrid	Valdemingómez	2014
Navarra	Navarra	Tudela	2006
La Rioja	La Rioja	Villamediana de Iregua	2005

Descripción de equipos

En el presente apartado se va a proceder a describir detalladamente los equipos principales para la construcción de una planta de biometanización. Se va a suponer que la planta trabaja 6 días cada semana, haciendo un total de aproximadamente 313 días al año, considerando así posibles paradas de la planta debido a desperfectos y averías. Por tanto la planta funciona el 85,75% de un año y debe tener la siguiente capacidad.

$$\frac{313 \text{ días}}{\text{año}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} = 7512 \text{ horas/año}$$

$$\text{Capacidad de la planta} = 300.000 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{7512 \text{ horas}} = 39,94 \text{ ton/hora}$$

Capacidad total de la planta 39,94 ton/hora



Foso de recogida de RSU

Para comenzar el proceso, los RSU se depositan en un foso situado en la entrada, desde el cual unas grúas dotadas de unos pulpos se van a encargar de recoger los residuos y transportarlos hasta la cabina de clasificación, donde los más voluminosos serán eliminados para evitar problemas en etapas futuras de la planta. En esta cabina también se separan aquellos residuos que puedan ser reciclables para su aprovechamiento en otras líneas de tratado.

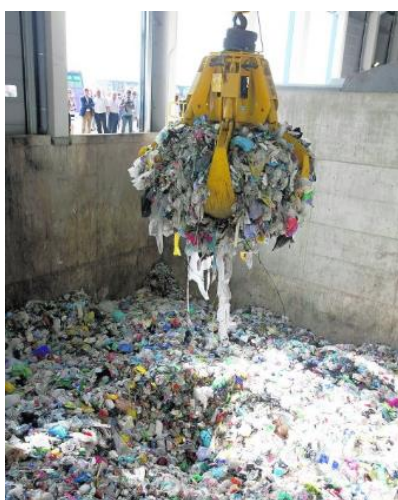


Figura. 9: Foso inicial de vertido de residuos

Fuente: [10]

A continuación se va a diseñar el volumen que debe tener el foso inicial, suponiendo que tenga capacidad para almacenar los residuos durante 1 día. Se va a considerar que en $1m^3$ hay 250kg de residuos.

$$Volumen\ del\ foso = \frac{40.000kg}{hora} * \frac{1m^3}{250kg} * \frac{24horas}{día} * 1día = 3.840m^3$$

Volumen total foso inicial de vertido de residuos3.840m³



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Para dimensionar los pulpos de las grúas se va a considerar que están formados por cucharas de 5 m^3 , cuya capacidad de carga es de 1 tonelada.

$$\text{Pulpadas requeridas cada hora} = \frac{20 \text{ ton/hora}}{1 \text{ ton/pulpada}} * 1 \text{ hora} = 20 \text{ pulpadas/hora}$$

Pulpadas requeridas cada hora.....20 pulpadas/hora

Cribas rotatorias

La segunda fase consiste en la división mediante unas cribas rotativas, dotadas de cuchillas gracias a las cuales se produce la rotura de las bolsas de plástico, de los residuos con diámetro mayor de 80 mm (materia seca, constituida fundamentalmente por materiales reciclables), y menor de 80mm (materia húmeda, constituida mayormente por materia orgánica).

Tratamiento de la materia seca

En el tratamiento de la **materia seca**, se utiliza primeramente un separador geométrico con el que se consigue la discriminación de los residuos voluminosos de los planos, como papel. A continuación, los envases (denominados materiales rodantes), se transportan a un sistema de clasificación que permite identificar los materiales celulósicos, los cartones compuestos (briks), cartón y plásticos. Finalmente los materiales rodantes que no han sido clasificados, se hacen pasar por un electroimán para extraer todos los materiales ferromagnéticos. El flujo de materiales planos se divide manualmente en plásticos y elementos celulósicos. Todos aquellos residuos que no hayan sido clasificados en ninguno de los procesos anteriores, son llevados al vertedero situado en las inmediaciones de la planta de biometanización descrito en el Capítulo II.

Tratamiento de la materia húmeda

Por otro lado, el tratamiento de la **materia húmeda** comienza haciendo pasar a los residuos por electroimanes y corrientes de Foucault, eliminando así materiales ferromagnéticos y aluminio. A continuación, el resto de residuos se transportan a una



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

zona en la que se inicia el proceso de hidrólisis, que consiste en la transformación de compuestos orgánicos complejos en compuestos mucho más sencillos gracias a la acción de unas enzimas. Una vez conseguida la mezcla de agua y materia orgánica, se hace pasar dicha mezcla por una criba y por un sistema de desarenado. Finalmente el producto resultante se deja reposar durante 24 horas.

Digestor

Una vez transcurrido ese tiempo, se transportan los materiales obtenidos del proceso de la materia húmeda a unos tanques de digestión. En estos digestores los RSU permanecen alrededor de 2 semanas en unas condiciones de temperatura constantes en torno a 35°C debido a que se trata de una digestión mesofílica (por lo que es óptimo que se produzca un precalentamiento de los residuos para que se introduzcan en el digestor ya a la temperatura adecuada). Dentro de estos tanques anaerobios (sin presencia de oxígeno), unas bacterias se encargan de descomponer la materia orgánica y expulsar biogás.



Figura. 10: Digestor de la planta de biometanización

Fuente: [11]

En los digestores se deposita una materia conocida como digestato, que es sometida a fermentación y esterilización para finalmente introducirla en unos túneles cerrados herméticamente donde se afina. El resultado de este proceso es el compost.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

A continuación se va a calcular la capacidad que debe tener cada digestor en función de la materia entrante en la planta. Para ello, se debe tener en cuenta que en los digestores tan solo entra materia orgánica.

$$\frac{300.000.000kg}{año} * 0,489 * \frac{1año}{313días} * \frac{m^3}{250kg} * 14días = 26.246,64m^3$$

En la Tabla 7 se observan las características más importantes del digestor elegido.

Tabla 7. Características digestor elegido

Lugar de origen	Henan, China (Mainland)
Marca	Sunsungs
Modelo	ECPC
Producción de biogás (m^3/ton)	150
Dimensiones (m)	30D/13H
Vida útil (años)	15
Espesor de recubrimiento (mm)	0,25-0,45
Recubrimiento de color	Verde oscuro

La capacidad del digestor elegido se calcula a continuación.

$$\pi * 15^2 * 13 = 9.189,16 m^3$$

Por tanto, con 3 digestores de este tipo se obtiene el volumen total que se necesita más un pequeño margen ($27.567,47m^3$).

Motor de combustión interna (ciclo Otto)

Finalmente, la generación de energía eléctrica se consigue mediante la utilización del biogás obtenido tanto en la planta de biometanización como el extraído del vertedero, en motores de combustión interna (motores ciclo Otto). El principio de funcionamiento consiste en la obtención de energía mecánica a partir de la energía

química que contiene el biogás. En las cámaras de combustión, donde se produce el quemado del biogás, se encuentran unos pistones que se mueven linealmente. Estos pistones están conectados con un cigüeñal que se encarga de transformar el movimiento lineal en rotatorio. El calor emitido por los gases de escape (400°C) puede ser aprovechado para precalentar los residuos que se introducen en el digestor o para mantener la temperatura necesaria en el mismo (35°C).

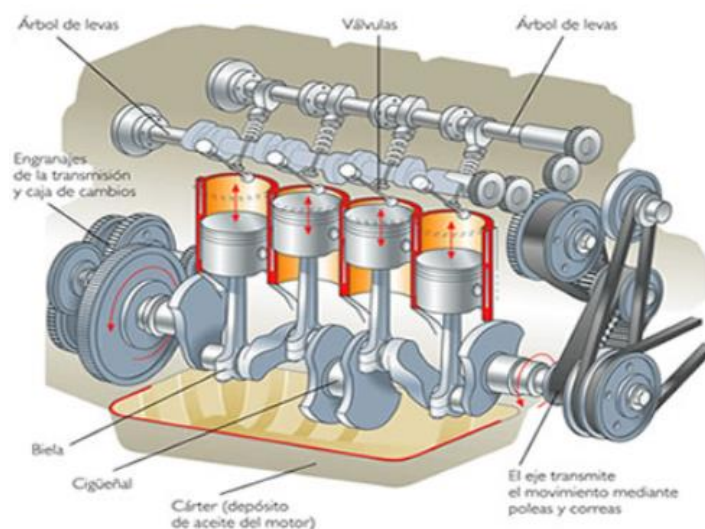


Figura. 11: Motor de combustión interna (ciclo Otto)

Fuente: [12]

Este tipo de motores pueden funcionar utilizando como combustible únicamente el biogás, a excepción del momento del arranque, donde sí es necesaria la utilización de nafta.

La energía obtenida se va a utilizar tanto para la alimentación de la planta como para su entrega a la red.

En la tabla Tabla 8 se puede observar el modelo de motor elegido.



Tabla 8. Características del motor de combustión interna elegido

Fabricante	General Electric
Modelo	JMS 420 GS-B.L
Electrical output (kWe)	1.415
Electrical efficiency	40%
Thermal efficiency	42,4%
Total efficiency	82,4%
Energy input (kW)	3.375

Al darnos cada motor una potencia de 1.415kWe, en este proyecto se van a utilizar 13 motores de este tipo consiguiendo así una potencia de 18.395kWe, mayor de la necesaria para tener un margen de seguridad en el arranque (17.279,68kW).

Transformador

Finalmente es necesaria la utilización de un transformador para elevar la tensión de la corriente eléctrica generada y así evitar mayores pérdidas en el transporte de la misma. Estará formado por dos devanados, el primario y el secundario. En el primario se encontrará la energía que se desea transformar, mientras que en el secundario sale la energía eléctrica transformada con un alto voltaje y baja intensidad.

Parte de esta energía generada se autoconsume y parte se conecta a la red de transporte consiguiendo así inyectar electricidad en la misma a partir de una fuente renovable como son los RSU. Para inyectar potencia a la red es necesario que dicha potencia sea generada en 400/230V y a 50Hz. Además será imprescindible un sincronizador para que la secuencia de fases de la potencia generada y la de la red sea la misma.

[13]

Localización

En la actualidad existen dos plantas de biometanización y compostaje en la Comunidad de Madrid, una situada en el Complejo Ambiental de Tratamiento de Residuos en el término municipal de Pinto y la otra en el complejo de Valdemingómez.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

La primera fue inaugurada en el año 2003 y permite tratar anualmente 140.000 toneladas de RSU. En esta instalación los residuos se transforman en compost y gas.

A continuación se va a proceder a la construcción de una nueva planta de biometanización en la Comunidad de Madrid con una capacidad de 300.000 toneladas al año. Su construcción junto al vertedero descrito en el Capítulo II, permite aprovechar ambas corrientes de metano.

Por tanto, al ubicar la planta de biometanización junto al vertedero, dicha planta se encontrará en el municipio de Anchuelo.

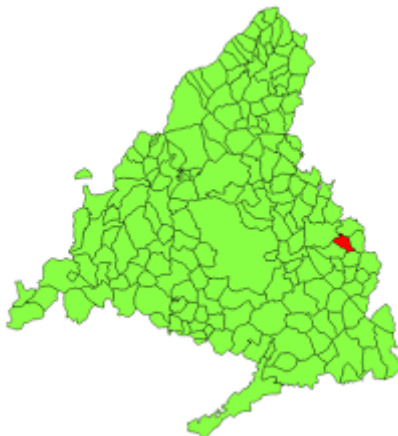


Figura. 12: Municipio de Anchuelo donde se ubicará la planta de biometanización

Fuente: [14]

En las Figura. 13 y Figura. 14 se puede observar el territorio final elegido para la construcción de la planta de biometanización. Estos planos se han obtenido de la sede electrónica del catastro y en ellas se pueden comprobar que las dimensiones de estos terrenos coinciden con las utilizadas en los planos adjuntados en este proyecto (310x169m).



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

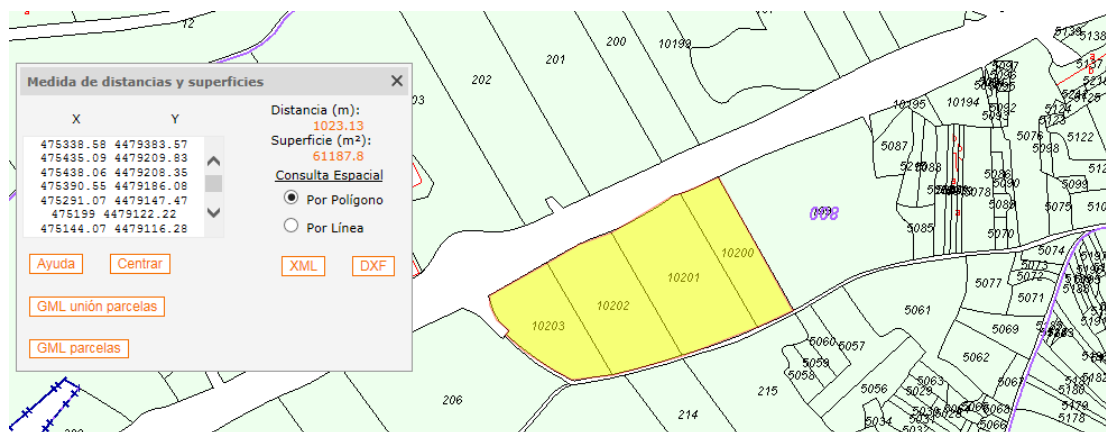


Figura. 13: Situación de la planta de biometanización

Fuente: Elaboración propia



Figura. 14: Dimensiones planta de biometanización

Fuente: Elaboración propia



Figura. 15: Ubicación vertedero y planta de biometanización

Fuente: Elaboración propia

Rendimiento

Para el estudio del rendimiento del motor de cogeneración es necesario recordar que el biogás introducido en el mismo es la suma del obtenido a partir del digestor de la planta de biometanización y el que se obtiene del vertedero.

A continuación se va a calcular el PCI del biogás necesario para saber la energía primaria que entra en el motor de ciclo Otto. Para ello se parte de la composición química del biogás mostrada en la Tabla 9.

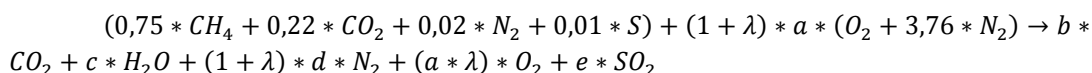
Tabla 9. Composición química del biogás

Elemento	Análisis volumétrico
CH_4	75%
CO_2	22%
N_2	2%
S	1%
TOTAL	100%



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Sabiendo el análisis volumétrico del biogás se puede proceder a realizar la combustión completa del mismo.



Procediendo a igualar cada elemento a ambos lado de la ecuación, se obtienen los coeficientes de la reacción química mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10. Coeficientes de los términos de la reacción química entre biogás y aire

a	1,51
b	0,97
c	1,5
d	5,69
e	0,01

Para calcular el PCI del biogás se calcula la entalpía molar estándar de combustión (considerando el agua de los productos en estado gaseoso), a partir de las entalpías de formación, sabiendo que los elementos puros tienen una entalpía de formación nula. Se obtiene así una entalpía de combustión de valor - 604.685,92kJ/kmol.

$$V_n = \frac{R * T}{P} = \frac{83,4 * 273,15}{101,325} = 22,4m^3/kmol$$

$$PCI = \frac{604.685,92kJ/kmol}{22,4m^3/kmol} = 26.994,9kJ/m^3 = 6.458,11kcal/m^3$$

Poder calorífico inferior del biogás.....6.458,11kcal/m³

Como se ha mencionado anteriormente, el biogás se obtiene a partir de la materia orgánica (materia húmeda) que es tratada en los digestores. En la Figura. 16 se muestra la composición de los RSU y se puede concluir que de todos los residuos que



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

entran en la planta de biometanización, solo el 48,9% serán utilizados para la obtención de energía eléctrica.

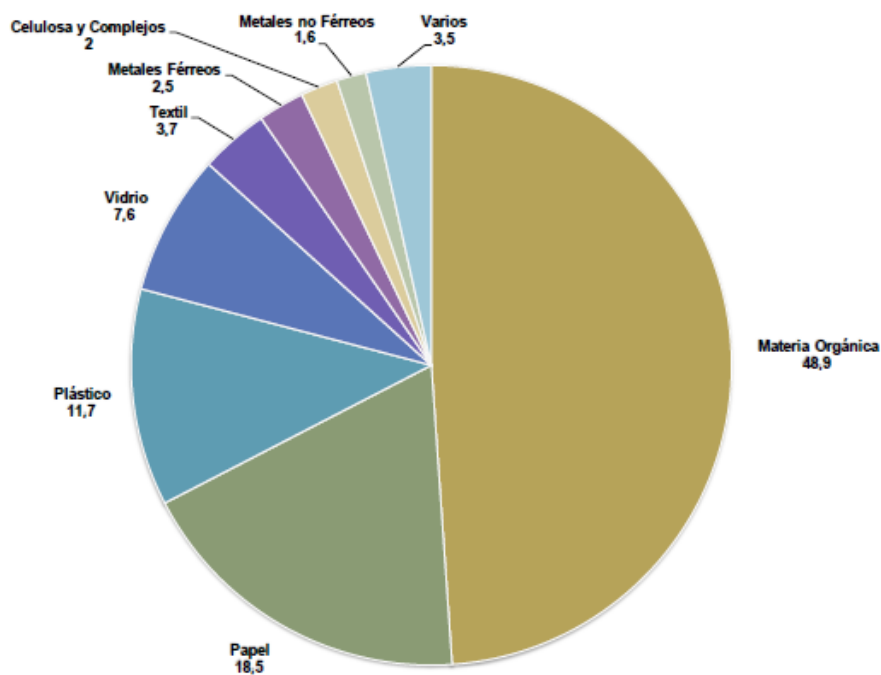


Figura. 16: Composición de los RSU

Fuente: [15]

Sabiendo que el poder calorífico inferior del biogás es de $26.994,9 \text{ kJ/m}^3$ y que se obtiene aproximadamente 150 m^3 por cada tonelada de residuo tratado en la planta de biometanización, se puede calcular la energía primaria disponible.

$$\text{Caudal biogás} = \frac{150 \text{ m}^3}{\text{ton}} * \frac{300.000 \text{ ton}}{\text{año}} * 0,489 * \frac{1 \text{ año}}{7512 \text{ h}} = 2.929,31 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Energía primaria} = \frac{26.994,9 \text{ kJ}}{\text{m}^3} * \frac{2.929,31 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ seg}} = 21.965,7 \text{ kW}$$

Si se considera también la obtención de la energía primaria a partir del vertedero se obtienen los siguientes resultados.



$$\text{Caudal biogás} = \frac{145 \text{ m}^3}{\text{ton}} * \frac{300.000 \text{ ton}}{\text{año}} * 0,489 * \frac{1 \text{ año}}{7512 \text{ h}} = 2.831,67 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Energía primaria} = \frac{26.994,9 \text{ kJ}}{\text{m}^3} * \frac{2.831,67 \text{ m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ seg}} = 21.233,51 \text{ kW}$$

Por tanto, la energía primaria que se introduce en el motor de combustión interna tiene un valor de 43.199,21kW.

En la Tabla 8 se observa que el motor de combustión interna elegido tiene un rendimiento eléctrico de un 40%, por lo que la energía eléctrica obtenida se calcula a continuación.

$$\text{Energía eléctrica} = 0,4 * 43.199,21 = 17.279,68 \text{ kW} = 129,8 \text{ GWh}$$

Energía eléctrica generada los primeros 7 años.....129,8 GWh

El 20% de la energía eléctrica producida va a servir para abastecer a la propia planta (3.455,94kW) y el resto será inyectado en la red (13.823,75kW). En cuanto a la energía térmica, toda ella va a ser usada para necesidades de la propia planta como precalentar los residuos antes de introducirlos en los digestores o mantener la temperatura necesaria en los mismos.

La vida útil del vertedero es de 7 años mientras que la de la planta de biometanización es de 15 años. Por tanto, los últimos 8 años sólo se generará energía eléctrica a partir de la planta de biometanización obteniendo la siguiente potencia.

$$\text{Energía eléctrica} = 0,4 * 21.965,7 = 8.786,28 \text{ kW} = 66 \text{ GWh}$$

Energía eléctrica generada los últimos 8 años.....66 GWh



En este caso, el 30% de la potencia generada va a servir para abastecer a la planta (2.635,88kW) y el resto se vierte a la red (6.150,4kW).

Se establece que se generan $1,4 \text{ m}^3$ de compost por cada tonelada de materia orgánica que se procesan. Sabiendo que la densidad de dicho material está entre 150-250 kg/m^3 se puede obtener la cantidad de compost que se genera en la planta propuesta.

$$\frac{1,4 \text{ m}^3}{\text{ton de materia orgánica}} * \frac{146.700 \text{ ton de materia orgánica}}{\text{año}} * \frac{200 \text{ kg}}{\text{m}^3} \\ = 41.076 \text{ ton de compost/año}$$

Generación anual de compost.....41.076ton/año

Diagrama de Sankey

Para el mejor entendimiento de lo que sucede en la planta de biometanización que se está desarrollando en este proyecto, se incluye a continuación el diagrama de Sankey de la misma.

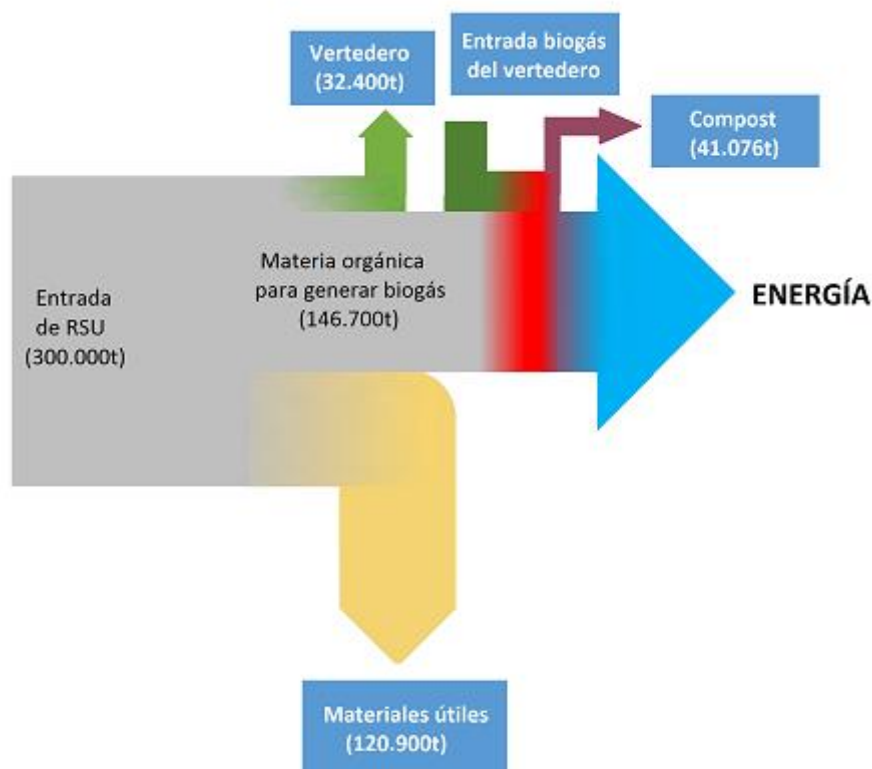


Figura. 17: Diagrama de Sankey de la planta de biometanización

Fuente: Elaboración propia

Viabilidad económica

Para el estudio de la viabilidad económica se van a analizar todos los costes e ingresos que habrá cada año a lo largo de la vida útil del vertedero (7 años) y de la planta de biometanización (15 años) considerando en ingresos y costes una inflación anual de un 2%. Se estudiarán también las depreciaciones a tener en cuenta y finalmente se analizarán los resultados obtenidos para concretar si el proyecto resulta rentable.

Inversión inicial



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Primeramente se va a considerar un coste debido a la expropiación o compra del terreno donde se ubica la planta de biometanización.

Para la construcción de la planta es necesario comenzar teniendo en cuenta todos los costes asociados a la urbanización del terreno. Dentro de dichos costes se encuentran el movimiento de tierras, la construcción del cerramiento y parking, todos los costes asociados a la jardinería de la planta, las señalizaciones necesarias para que la planta sea fácilmente identificable y los accesos y viales que abastecerán a la planta una vez se ponga en funcionamiento.

Tabla 11. Presupuesto de urbanización de la planta de biometanización

PRESUPUESTO DE URBANIZACIÓN	
Expropiaciones/compra terrenos	1.000.000
Movimiento de tierras	1.500.000
Cerramiento	1.000.000
Parking	340.000
Jardinería	150.000
Señalización	220.000
Accesos y viales	800.000
TOTAL	5.010.000 €

A continuación, se procede a evaluar el presupuesto que supone la obra civil y las instalaciones necesarias. En obra civil se incluyen los costes de la construcción de la planta propiamente dicha. Dentro de las instalaciones necesarias se estudia el presupuesto necesario para cada una de ellas: instalación eléctrica, ya que es necesaria una instalación para que la energía eléctrica generada sea aprovechada en la misma planta, de climatización, de megafonía, contra incendios, de telefonía y de agua.

Tabla 12. Presupuesto de obra civil e instalaciones de la planta de biometanización

PRESUPUESTO DE OBRA CIVIL E INSTALACIONES	
Obra civil	12.123.000
Instalación eléctrica	989.000
Instalación de climatización	995.000
Instalación de megafonía	732.000
Instalación contra incendios	850.000
Instalación de telefonía	777.000
Instalación de agua	991.670
TOTAL	17.457.000 €



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Por último, para finalizar los costes asociados a la inversión inicial se añade el precio de la maquinaria necesaria. Se diferencia entre la maquinaria de pretratamiento, que es aquella que se encuentra antes del digestor, el digestor, los motores de combustión interna a partir de los cuales se obtendrá energía eléctrica y las cintas de transporte utilizadas a lo largo de todo el proceso. Se añaden unos costes de equipos varios para todos aquellos equipos de menor tamaño que no están siendo considerados en los números anteriores.

Tabla 13. Presupuesto de maquinaria de la planta de biometanización

PRESUPUESTO DE MAQUINARIA	
Maquinaria de pretratamiento	3.780.000
Digestor	7.000.000
Motores de ciclo Otto	3.230.000
Transformador	1.200.000
Alternador	800.000
Cintas de transporte	500.000
Varios	1.023.000
TOTAL	17.533.000€

La inversión inicial de una planta de biometanización con capacidad de 300.000 toneladas anuales es de 40.000.000€.

Se van a añadir los costes asociados a la construcción del vertedero descritos en el apartado anterior ya que ambas construcciones funcionan conjuntamente. La inversión inicial de construcción del vertedero y del cerramiento es de 1.661.000€ como se analizó en la Tabla 3.

Tabla 14. Inversión inicial del vertedero y la planta de biometanización

INVERSIÓN INICIAL TOTAL	
Inversión planta biometanización	40.000.000
Inversión vertedero	1.661.000
TOTAL	41.661.000 €



Costes fijos y variables

Dentro del presupuesto necesario para el mantenimiento de la planta se pueden diferenciar los costes fijos, aquellos que no se modifican aunque varíe la capacidad de la planta, de los variables, cuyo valor varía con la capacidad de la planta.

Dentro de los costes variables cabe destacar los salarios de los trabajadores de la planta que se han diferenciado en función de su papel en la empresa. Se consideran los siguientes trabajadores:

- 1 jefe de mantenimiento con un salario de 59.500€ anuales.
- 1 jefe de operación con un salario de 59.500€ anuales.
- 1 jefe de turno con un salario de 55.200€ anuales.
- 50 operadores en la planta con un salario cada uno de 23.250€ anuales.
- 5 operador de mantenimiento con un salario de 23.250€ anuales.
- 5 operador de limpieza con un salario de 21.500€ anuales.

También se han considerado los costes del transporte de los RSU a la planta y la compra de nafta para el arranque del motor de combustión interna, así como el consumo de agua necesaria para el lavado y para los servicios de limpieza.

Tabla 15. Costes variables de la planta de biometanización

COSTES VARIABLES DE LA PLANTA	
Salario jefe mantenimiento	59.500
Salario jefe de operación	59.500
Salario jefe de turno	55.200
Salario operarios	1.162.500
Salario mantenimiento	116.250
Salario limpieza	107.500
Piezas de recambio	100.000
Reparaciones	100.000
Transporte de los RSU a la planta	600.000
Compra de nafta para el arranque	100.000
Consumo de agua	300.000
Consumo de electricidad	400.000
TOTAL	3.160.450 €/año

Durante los 7 primeros años se deben añadir los costes variables del mantenimiento del vertedero que se aproximan a 760.000€ como se analizó en la Tabla 4.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

En el año 7 se deben incluir los costes de clausura y revegetación del vertedero que son 1.430.000€ como se estudió en la Tabla 5, así como a partir de dicho año eliminar los costes de mantenimiento del mismo.

Dentro de los costes fijos se encuentran los impuestos a los que debe hacer frente la planta que forman un 0,5% de la inversión inicial y los seguros un 1% de la misma. También se añade el coste de mantenimiento del material utilizado en la planta.

Tabla 16. Costes fijos de la planta de biometanización

COSTES FIJOS DE LA PLANTA	
Impuestos	200.000
Seguros	400.000
Mantenimiento material	1.980.000
TOTAL	2.580.000 €/año

Depreciación

Una vez analizados todos los costes (inversión inicial y costes anuales), es necesario analizar la depreciación lineal que se va a llevar a cabo. Por un lado, la maquinaria se va a considerar que tiene una vida útil de 15 años y posteriormente su valor será nulo. Mientras que se va a considerar una vida útil de la edificación de 50 años, tras los cuales su valor también será nulo.

$$\text{Depreciación maquinaria} = \frac{17.533.000 - 0}{15} = 1.168.866,67\text{€}$$



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 17. Depreciación maquinaria planta de biometanización

Año	Valor residual
0	17.533.000,00
1	16.364.133,33
2	15.195.266,66
3	14.026.399,99
4	12.857.533,32
5	11.688.666,65
6	10.519.799,98
7	9.350.933,31
8	8.182.066,64
9	7.013.199,97
10	5.844.333,30
11	4.675.466,63
12	3.506.599,96
13	2.337.733,29
14	1.168.866,67
15	0,00

$$\text{Depreciación edificación} = \frac{22.467.000 - 0}{50} = 449.340\text{€}$$

Tabla 18. Depreciación edificación planta de biometanización

Año	Valor residual
0	22.467.000
1	22.017.660
2	21.568.320
3	21.118.980
4	20.669.640
5	20.220.300
6	19.770.960
7	19.321.620
8	18.872.280
9	18.422.940
10	17.973.600
11	17.524.260
12	17.074.920
13	16.625.580
14	16.176.240
15	15.726.900



El valor residual de la edificación en el último año se añadirá como un ingreso al finalizar el periodo.

Ingresos

Los ingresos que se reciben a partir de la energía producida en el vertedero y en la planta de biometanización son los siguientes:

- Una prima debido a que se produce energía a partir de una fuente renovable y la potencia instalada es menor de 50MW.
- El precio de la energía que se inyecta en la red que es comprada por las compañías eléctricas.
- Un canon que da el ayuntamiento gracias a que este tipo de instalaciones tratan los residuos de su municipio y permiten así cumplir con las leyes establecidas.
- Precio de venta del compost generado en los digestores.
- Precio de venta de los materiales reciclados y de los materiales férreos.

A partir del año 2007 se produjo un gran aumento de las instalaciones de energías renovables en España debido a que se daban unas primas muy altas y por tanto, muchas personas se sintieron atraídas a este sector y debido también a que se estableció una ley que concedía autonomía a las comunidades autónomas para permitir la construcción de energías renovables. Al haber cada vez más instalaciones que debían ser primadas, comenzó a originarse una deuda tarifaria de miles de millones de euros, por lo que en el año 2013 se modificó este sistema de retribución disminuyendo las primas y con ello la deuda.

En este proyecto, se ha considerado una prima de 0,01€/kWh (sobre la energía generada) debido a que se trata de un período muy convulso en el que no queda claro si se van a suprimir del todo estas retribuciones o permanecerán en valores bajos.

En la actualidad el precio que cobran las compañías eléctricas a sus clientes es de 0,08€/kWh. Se ha considerado que en este proyecto se vende toda la energía que no se utiliza para autoabastecer a la planta, y que las compañías eléctricas querrán tener un beneficio, por tanto se ha utilizado un precio medio de venta de la energía del presente proyecto a las compañías eléctricas de 0,05€/kWh (sobre la energía inyectada a la red).



También se tienen ingresos de los habitantes de los municipios de los cuales se tratan los residuos, debido a que el ayuntamiento concede un terreno a este tipo de plantas y un canon a cambio de que se traten los RSU en la misma y puedan cumplir con el reglamento establecido. En el presente proyecto se ha considerado un canon de 15€/tonelada de RSU tratada.

Por último se debe tener en cuenta el ingreso que reciben las plantas de biometanización por el compost generado, así como por los materiales reciclables y los materiales férricos. Se ha establecido un precio de venta de 19€/ton, 9€/ton y 20€/ton respectivamente.

Resultados

Para comprobar la viabilidad económica de este proyecto se van a analizar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial realizada.

En la Figura. 18 se muestran los resultados del VAN para distintos valores de tasa de retorno o WACC. En aquellos casos en los que el valor del VAN sea positivo el proyecto se aceptará, mientras que cuando sea negativo será rechazado y por tanto no se llevará a cabo.

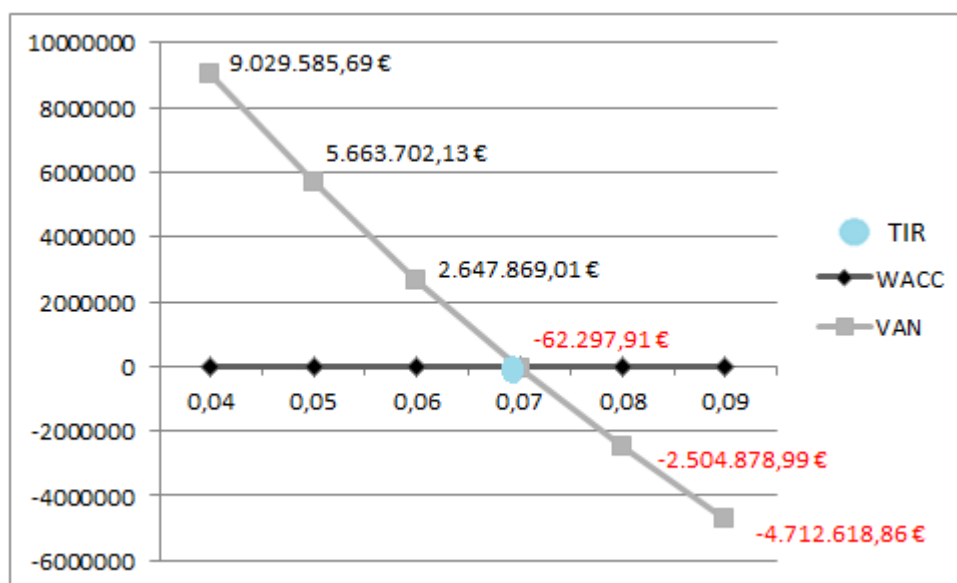


Figura. 18: Valores del VAN del vertedero y planta de biometanización para distintos WACC

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Para los flujos de caja de este proyecto se obtiene un TIR del 6,98%, como se observa en azul en la Figura. 18. El proyecto se aceptaría si el valor del TIR es mayor que el del WACC utilizado, por tanto si se utiliza un WACC inferior al 6,98% el proyecto sería aceptado, mientras que si utilizamos un WACC mayor, el proyecto sería rechazado.

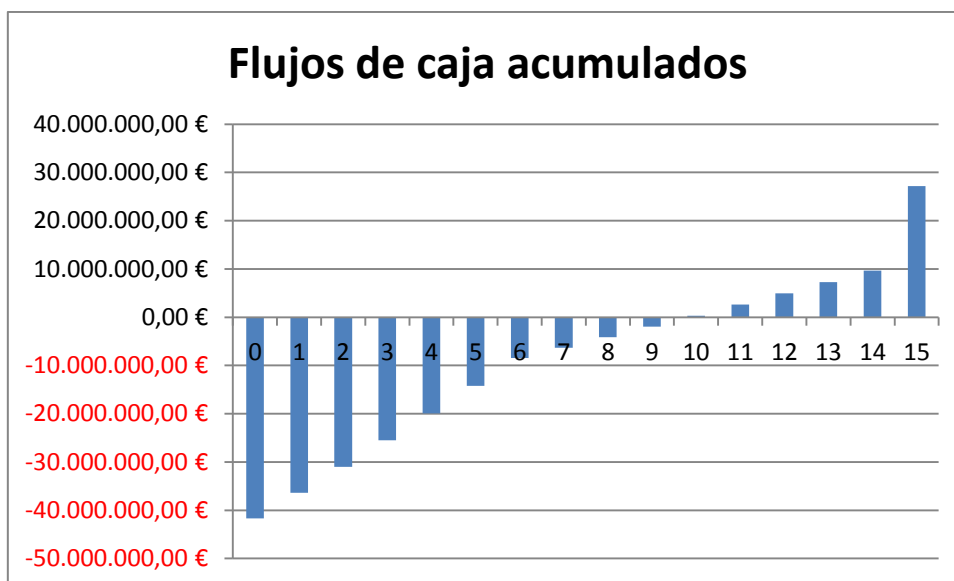


Figura. 19: Flujos de caja acumulados del vertedero y la planta de biometanización

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura. 19, el período que se tardaría en recuperar toda la inversión inicial realizada es de 9,86 años. También se aprecia con claridad el ingreso que hay en el último año debido al valor residual del edificio por causa de tener una depreciación de 50 años.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



Capítulo V. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de una incineradora



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se va a analizar el impacto de la construcción de una planta incineradora en la Comunidad de Madrid a partir de una cantidad fija de RSU. Se estudiará la dimensión y la mejor ubicación de la planta, así como el coste de dicha construcción y el rendimiento obtenido de la misma.

Descripción

La incineración es un proceso de tratamiento térmico de residuos que consiste en la transformación de los residuos sólidos en cenizas, gases y calor, con el principal objetivo de la reducción del volumen y peso de los mismos.

Al finalizar un proceso de incineración, el único **elemento útil que se obtiene es el calor** que se desprende en la combustión de los residuos, que hace que el agua que circula por las tuberías de la caldera se transforme en vapor a gran presión. Este vapor se transporta a una turbina que hace que se mueva un generador eléctrico transformando la energía mecánica rotatoria en electricidad.

El principal problema que se encuentra en las incineradoras es que la combustión de los residuos no sea completa y, por tanto, se desprendan a la atmósfera compuestos orgánicos tóxicos como dioxinas y furanos. Sin embargo, con las medidas adecuadas como la utilización de filtros específicos puede tratarse de un mecanismo perfectamente útil.

Los hornos de lecho fluidizado presentan grandes ventajas en comparación con la tecnología de parrillas ya que se consigue mantener una temperatura de combustión de 850°C, temperatura a la cual no se forman los compuestos tóxicos mencionados anteriormente.

Las principales ventajas de esta técnica son las siguientes:

- Reducción en peso (75%) y volumen (90%) de los residuos
- Alta disponibilidad y fiabilidad
- Valorización de escorias y cenizas

Los principales inconvenientes se muestran a continuación:

- Altos costes de explotación (250.000.000€ para una planta capaz de tratar 450.000 toneladas al año)
- Sistema de tratamiento de gases complejo
- Tiempos largos de preparación del proyecto y de construcción



- Rechazo social ya que existen grandes cuestionamientos con respecto a los impactos ambientales

Actualmente existen 11 incineradoras en España cuyas características y ubicación se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Plantas incineradoras en España

Fuente: [16]

CCAA	Provincia/Municipio	Titular	Capacidad unitaria (t/h)	Cantidad de residuos incinerados (t/año)
Baleares	Palma de Mallorca	Tirme SA	18,75	298.485
Canarias	Tenerife	Vamex Servicios SL	2	10.051
Cataluña	Girona	Ayto.Girona	3	28.905
Cataluña	Lleida-Viella	C.G.d'Arán	0,9	-
Cataluña	Tarragona	SIRUSA	9,6	146.527
Cataluña	Barcelona-S.Adriá	Ayto. Barcelona	11,7	360.192
Cataluña	Barcelona-Mataró	Consorcio Maresme	11	161.299
Galicia	Coruña-Cerceda	SOGAMA	46,76	245.353
Madrid	Madrid	TIRMADRID	9,17	296.525
Melilla	Melilla	REMESA	4,5	39.737
País Vasco	Bilbao	Zabalgarbi	30	228.000

Descripción de equipos

En el presente apartado se va a proceder a describir detalladamente los equipos principales para la construcción de una planta incineradora.

Se va a suponer que la planta trabaja 6 días cada semana, haciendo un total de aproximadamente 313 días al año, considerando así posibles paradas de la planta debido a desperfectos y averías.

$$\text{Capacidad de la planta} = \frac{300.000\text{ton}}{\text{año}} * \frac{1\text{año}}{7512\text{horas}} = 39,93\text{ton/hora}$$



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

La instalación de la planta incineradora se va a realizar con solo una línea de proceso cuya capacidad se va a aproximar a 40ton/hora para tener capacidad de procesamiento en picos de entrada de RSU.

$$\text{Capacidad total} = \frac{40\text{ton}}{\text{hora}} * \frac{7512\text{horas}}{\text{año}} = 300.480 \text{ ton/año}$$

Capacidad total de la planta 300.480 ton/año

Zona de vertido de residuos

El proceso de incineración comienza con el vertido de residuos a partir de grandes camiones en grandes fosos construidos en la planta incineradora. A partir de ahí, los residuos son movidos a la zona de selección de los mismos.

A continuación se va a diseñar el volumen que debe tener el foso, suponiendo que tenga capacidad para almacenar los residuos durante 1 día. Se va a considerar que en 1m³ hay 250kg de residuos aproximadamente.

$$\text{Volumen del foso} = \frac{40.000\text{kg}}{\text{hora}} * \frac{1\text{m}^3}{250\text{kg}} * \frac{24\text{horas}}{\text{día}} * 1\text{día} = 3.840\text{m}^3$$

Volumen del foso inicial de vertido de residuos3.840 m³

Para dimensionar los pulpos de las grúas se va a considerar que están formados por cucharas de 6 m³, cuya capacidad de carga es de 1,5 toneladas.

$$\text{Cargas requeridas cada hora} = \frac{40 \text{ ton/hora}}{1,5 \text{ ton/carga}} * 1 \text{ hora} = 27 \text{ cargas/hora}$$

Cargas requeridas cada hora.....27 cargas/hora



Zona de selección y clasificación de residuos

En la zona de selección se produce la clasificación de los residuos que llegan a la planta de incineración. Para comenzar, gracias a la acción de un separador magnético se eliminan todos los materiales férricos presentes. Por otro lado se separa toda la materia orgánica, dejándola fermentar en unas playas en las que permanecerá largas temporadas hasta obtener finalmente el compost. También se clasifican aquellos residuos que puedan ser reciclados y finalmente aquellos que puedan ser útiles por algún motivo.



Figura. 20: Clasificación de residuos

Fuente: [17]

Chimenea

Los gases obtenidos de la combustión, tras ser limpiados para poder cumplir con toda normativa vigente, son expulsados por la chimenea de la planta incineradora.



Figura. 21: Chimenea

Fuente: [18]



Caldera de combustión

La caldera de combustión es el lugar en el que se produce la combustión de los residuos. En este proyecto dicha caldera tiene que tener una potencia de 57.130,8kW, por lo que a continuación se muestran las características principales de la caldera de recuperación elegida para este caso de estudio.

Tabla 20. Características principales de la caldera de recuperación elegida

Fuente: [19]

Fabricante	Bono Energía
Modelo	SM, SG series
Producción de vapor mínima	1 t/h
Producción de vapor máxima	25 t/h
Potencia mínima	15MW
Potencia máxima	75MW



Figura. 22: Caldera de combustión elegida

Fuente: [19]

Ciclo Rankine

El vapor obtenido del proceso de combustión se transporta hasta la turbina cuyo movimiento hace que se mueva solidariamente un generador eléctrico que se



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

encarga de transformar la energía mecánica del rotor de la turbina en eléctrica. Finalmente, el vapor resultante de la turbina se condensa en un aerocondensador y el agua extraída se devuelve al ciclo térmico para repetir el proceso.

A continuación se muestran los modelos elegidos de las maquinarias más importantes del ciclo Rankine.

Para la elección de la turbina de vapor se debe tener en cuenta que debe ser capaz de generar una potencia de salida de 20.255,9kW. Tras la comparación de varios modelos y fabricantes se ha elegido finalmente la mostrada en la Tabla 21.

Tabla 21. Principales características de la turbina de vapor elegida

Fuente: [20]

Fabricante	Siemens
Modelo	D-R B steam turbine series
Potencia de salida	Hasta 25.000kW
Velocidad de la turbina	$\leq 9.500\text{rpm}$
Frecuencia	50/60 Hz
Presión del vapor	$\leq 65\text{ bar}$
Temperatura del vapor	$\leq 500^{\circ}\text{C}$



Figura. 23: Turbina de vapor elegida

Fuente: [20]

Transformador

Finalmente es necesaria la utilización de un transformador para elevar la tensión de la corriente eléctrica generada y así evitar mayores pérdidas en el transporte de la misma. Estará formado por dos devanados, el primario y el secundario. En el primario se encontrará la energía que se desea transformar, mientras que en el secundario sale la energía eléctrica transformada con un alto voltaje y baja intensidad.

Esta energía generada se conecta a la red de transporte consiguiendo así inyectar electricidad en la misma a partir de una fuente renovable como son los RSU.

[21]

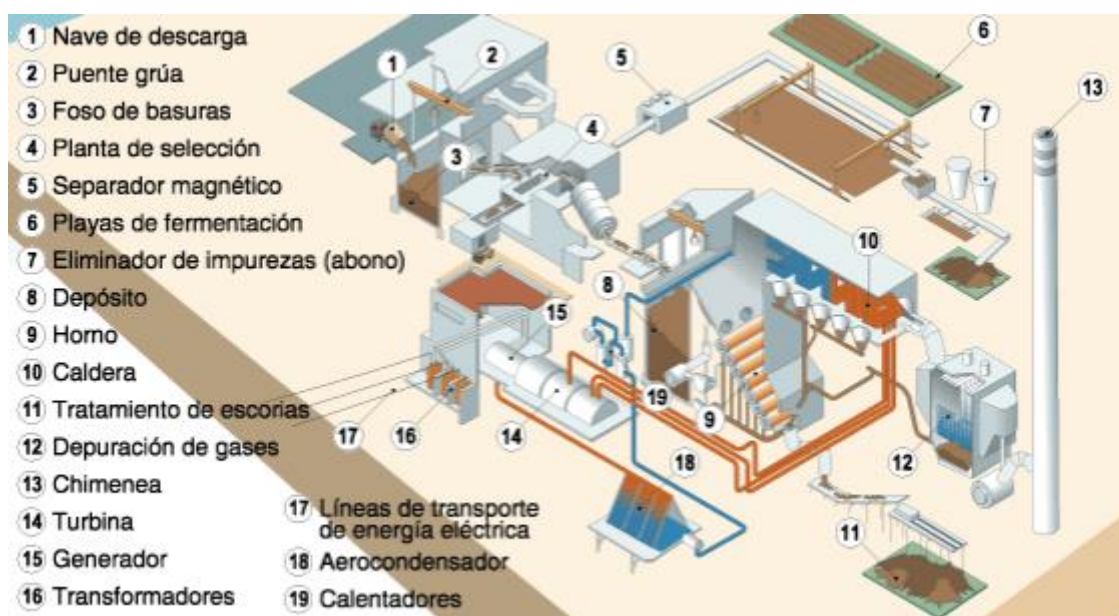


Figura. 24: Esquema de una planta de incineración con valorización energética

Fuente: [22]



Localización

En la actualidad, las plantas incineradoras de residuos urbanos se localizan en los siguientes puntos en España:



Figura. 25: Mapa con las plantas incineradoras de valorización energética en España

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura. 25, en la Comunidad de Madrid sólo existe una planta incineradora, la de Valdemingómez, que procesa 300.000 toneladas de RSU al año. A continuación se va a proceder a la construcción de una nueva planta incineradora en dicha comunidad con la misma capacidad que la ya existente, en la cual se va a aprovechar el calor desprendido para la producción de electricidad a través de un ciclo Rankine.

Se ha decidido que la ubicación de la planta incineradora se realice en el municipio de Leganés ya que a partir de la sede electrónica del catastro se ha encontrado un terreno óptimo para dicha construcción.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

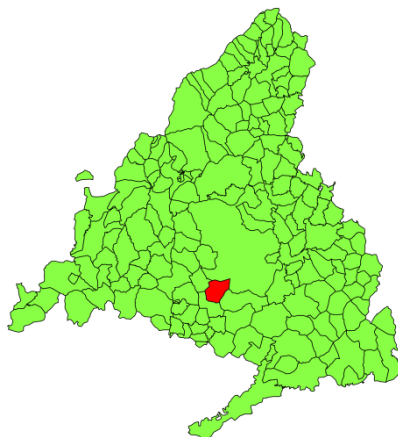


Figura. 26: Municipio de Leganés donde se ubicará la planta de incineración

Fuente: [23]

En las Figura. 27 y Figura. 28 se puede observar la situación exacta del terreno elegido.

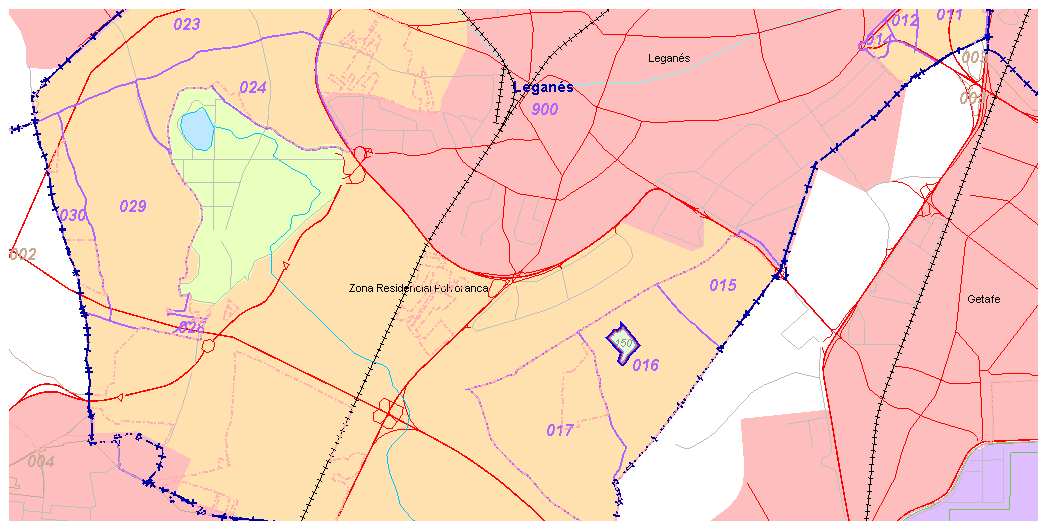


Figura. 27: Situación geográfica de la planta incineradora

Fuente: Elaboración propia

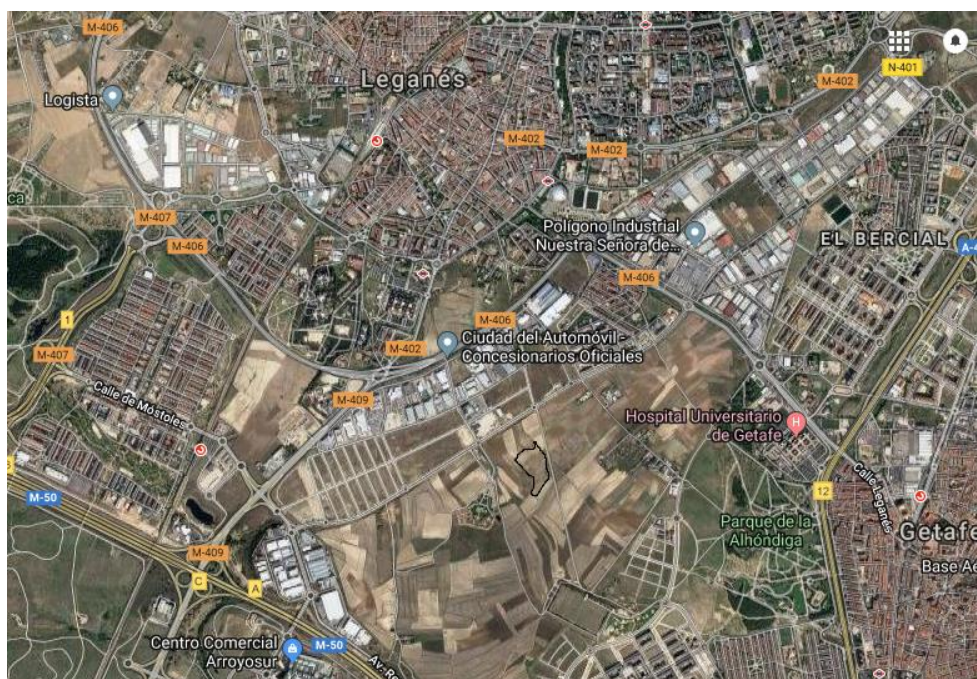


Figura. 28: Ubicación en el mapa de la planta incineradora

Fuente: Elaboración propia

En la Figura. 29 se puede observar como las dimensiones son las apropiadas según las utilizadas en los planos adjuntados en este proyecto de la planta de incineración (212x167m).

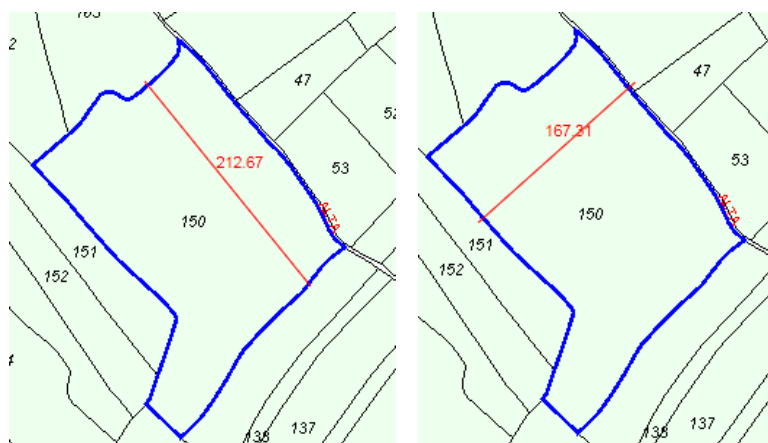


Figura. 29: Dimensiones de la parcela para la planta de incineración

Fuente: Elaboración propia a partir de los planos del catastro



Rendimiento

A continuación se va a proceder a realizar el análisis del ciclo Rankine de la planta incineradora para la obtención de energía eléctrica. En la Figura. 30 se observa un esquema del mismo.

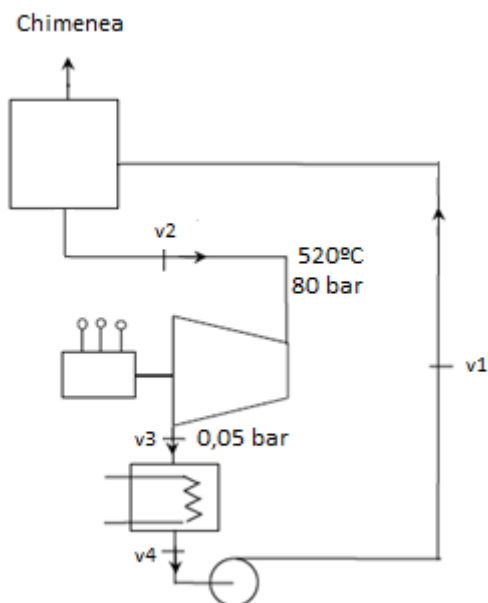


Figura. 30: Esquema ciclo Rankine

Fuente: [24]

Para comenzar, se van a realizar los cálculos necesarios de la combustión de los residuos que tiene lugar en la caldera. Para ello, se va a considerar que el análisis másico dado en la Tabla 22 es dato de partida para 100kg de residuos, y a partir de estas proporciones y conociendo los pesos moleculares, se obtiene el análisis molar.

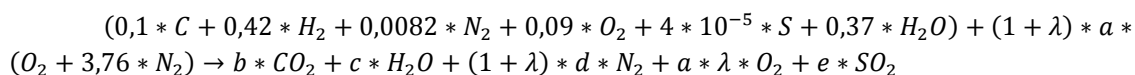
Tabla 22. Composición química de los residuos sólidos urbanos

Elemento	Análisis másico	Análisis molar
C	10	0,83
H ₂	7	3,50
N ₂	2	0,07
O ₂	25	0,78
S	0,01	0,00031
H ₂ O	55,99	3,11
TOTAL	100kg	8,29 kmol



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Una vez que se tiene el análisis molar, se procede al cálculo de los coeficientes de la reacción química de combustión que surge entre residuos (el combustible) y aire (el comburente) considerando una combustión completa, con el resultado que se muestra a continuación.



Procediendo a igualar cada elemento a ambos lado de la ecuación, se obtienen los coeficientes restantes mostrados en la Tabla 23.

Tabla 23. Coeficientes de los términos de la reacción química entre residuos y aire

a	0,22
b	0,1
c	0,79
e	$4 * 10^{-5}$

Para calcular el PCI de los residuos se calcula la entalpía molar estándar de combustión (considerando el agua de los productos en estado gaseoso), a partir de las entalpías de formación, sabiendo que los elementos puros tienen una entalpía de formación nula. Se obtiene así una entalpía de combustión de valor -125.047,07 kJ/kmol.

$$PCI = \frac{125.047,07 \text{ kJ}}{\text{kmol}} * \frac{8,29 \text{ kmol}}{100 \text{ kg}} = \frac{10,3 \text{ MJ}}{\text{kg}} = \frac{2.464,11 \text{ Kcal}}{\text{kg}}$$

Poder calorífico inferior de los residuos.....2.464,11 Kcal/kg

A partir de este poder calorífico se calcula la potencia de la caldera de combustión. Se debe tener en cuenta que de las 300.000 toneladas de RSU que entran en la incineradora sólo se queman el 10,8%, (porcentaje obtenido de la Figura. 16).



$$\frac{10.300 \text{ KJ}}{\text{kg}} * \frac{32.400.000 \text{ kg}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{7.512 \text{ horas}} * \frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ seg}} = 12.340 \text{ kW}$$

Potencia de la caldera de combustión.....12.340 kW

En el punto v2 sale de la caldera vapor sobrecalentado, por lo que su entalpía será la obtenida a partir de las tablas de vapor sobrecalentado a 80bar y 520°C (3447,7kJ/kg).

En el punto hv4 hay líquido saturado y por tanto su entalpía se obtiene de las tablas de agua saturada a una presión de 0,05bar (137,8kJ/kg). El cálculo de la entalpía del punto hv1 se realiza a partir del punto hv8 debido a que desconocemos la temperatura del primero.

$$h_{v1} = h_{v4} + V_{v4} * (P_{v1} - P_{v4}) = 145,8 \text{ kJ/kg}$$

Conociendo las entalpías de los puntos hv2 y hv1, así como la potencia de la caldera es posible conocer el caudal de vapor necesario.

$$Q_{caldera} = m_v * (h_{v2} - h_{v1}) \quad \rightarrow \quad m_v = 3,73 \text{ kg/seg}$$

Caudal de vapor.....3,73kg/seg

También es posible calcular la potencia de la bomba ya que se conocen todas las entalpías necesarias.

$$W_{bomba} = m_v * (h_{v1} - h_{v4}) = 29,84 \text{ kW}$$

Trabajo de la bomba.....29,84kW



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

A partir de los datos del punto hv2 se va a calcular el punto hv3, ya que la entropía del punto hv2 es igual a la del punto hv3s. Sabiendo que la presión del punto hv3 es 0,05 bar se comprueba si se tiene mezcla bifásica de la siguiente manera:

$$S_f < S_5 < S_g \rightarrow 0,5022 < 6,7871 < 8,4060$$

Por tanto, sí hay mezcla bifásica en el punto hv3s. Se procede a calcular el título y la entalpía del mismo.

$$s = s_f + X * (s_g - s_f) \rightarrow X = 0,8$$

$$hv3s = hf + X * (hg - hf) = 2070 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Rendimiento isentrópico de la turbina} = \frac{hv2 - hv3}{hv2 - hv3s} \rightarrow hv3 = 2.277 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo de la turbina por tanto tendrá el siguiente valor:

$$W_{\text{turbina de vapor}} = m_v * (hv2 - hv3) = 4.375,19 \text{ kW}$$

Trabajo de la turbina de vapor.....4.375,19kW

Finalmente se obtiene el valor del rendimiento del ciclo vapor:

$$\text{Rendimiento ciclo vapor} = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}}}{Q_{\text{caldera}}} = 35,21\%$$

Rendimiento ciclo vapor.....35,21 %

Eso significa que el 35,21% de la energía contenida en los residuos que se procesan en este ciclo combinado se transforma en energía eléctrica.



Desde un principio sabemos que la potencia que nos entregan los residuos es de 12.340kW en la planta incineradora. Sabiendo el rendimiento del ciclo combinado se concluye que la potencia eléctrica generada es 4.345kW y la potencia disipada 7.995,1kW.

Energía eléctrica generada.....32,64GWh

El 60% de la potencia eléctrica (2.607kW) será destinado a las necesidades de la planta de incineración y el resto se exportará a la red (1.738kW).

La situación final del ciclo vapor se observa en la Figura. 31.

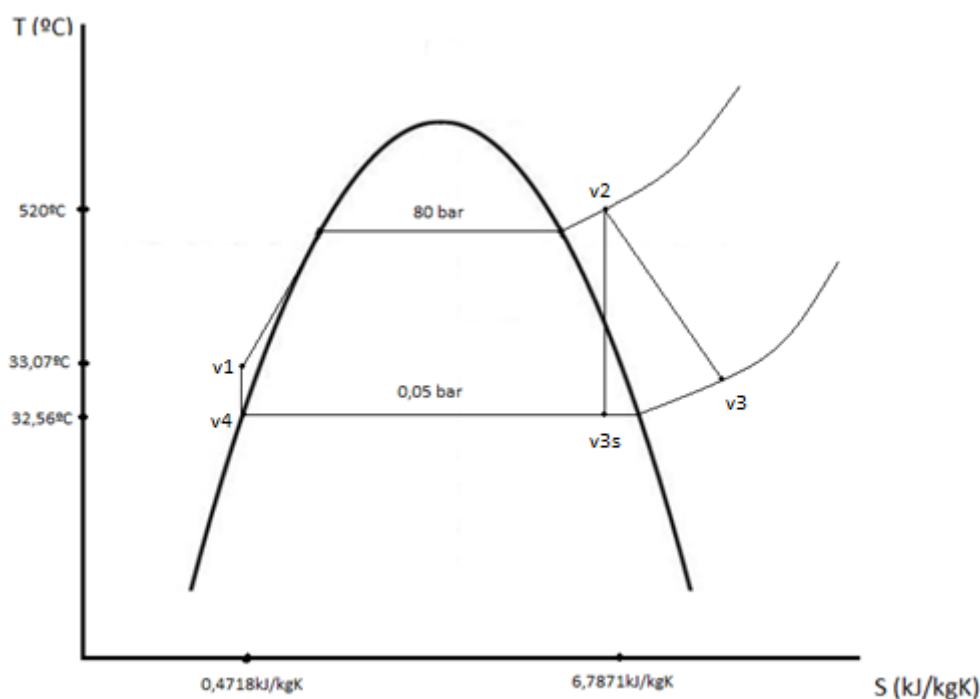


Figura. 31: Diagrama TS del ciclo vapor

Fuente: Elaboración propia

La energía generada en esta planta de incineración resulta muy escasa, tan sólo se generan 4.345kW.



Se ha observado que lo que sucede en la mayoría de las plantas incineradoras es que se inserta una cantidad mayor de residuos de desecho destinados a su incineración. Por ello, en este proyecto se va a considerar que el 50% de los residuos entrantes son destinados a incineración, en lugar de tan sólo el 10,8%. Los resultados obtenidos teniendo esto en cuenta se muestran a continuación.

Potencia de la caldera de combustión.....	57.130,8kW
Caudal de vapor.....	17,3kg/seg
Trabajo de la turbina de vapor.....	20.255,9kW
Trabajo de la bomba.....	138,4kW
Rendimiento del ciclo vapor.....	35,21%

Así se consigue una potencia generada de 20.115,76kW, de los cuales un 15% se destina a la propia planta (3.017,36kW) y un 85% se inserta en la red (17.098,4kW).

Además se produce una generación anual de 6.500t de escorias y 20.700t de cenizas aproximadamente.

Diagrama de Sankey

Para el mejor entendimiento de lo que sucede en la planta de incineración que se está desarrollando en este proyecto, se incluye a continuación el diagrama de Sankey de la misma.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

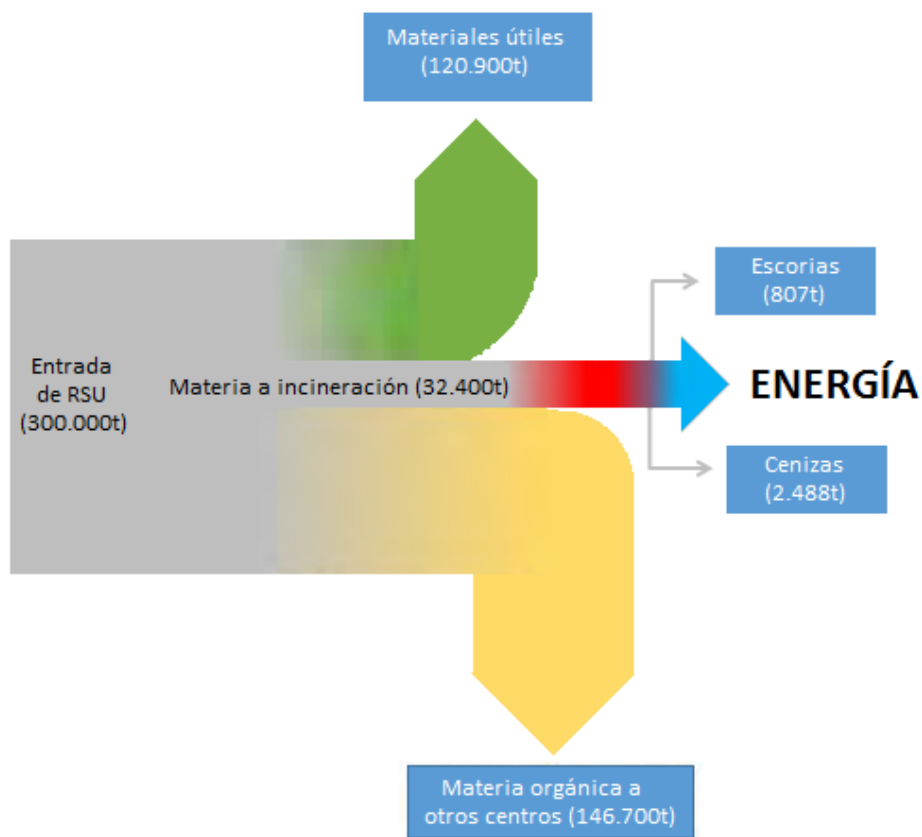


Figura. 32: Diagrama de Sankey de la planta de incineración con un 10,8% de residuos desechables

Fuente: Elaboración propia

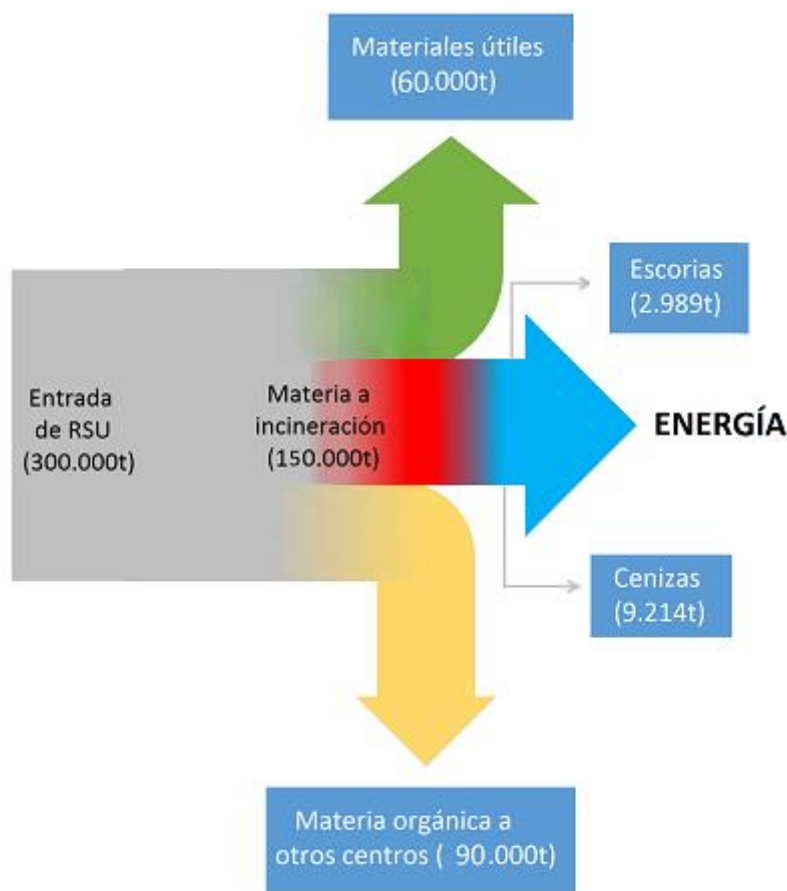


Figura. 33: Diagrama de Sankey de la planta de incineración con un 50% de residuos desechables

Fuente: Elaboración propia

Viabilidad económica

Para el estudio de la viabilidad económica se van a analizar todos los costes e ingresos que habrá cada año a lo largo de la vida útil de la planta incineradora (15 años) considerando en ambos casos una inflación anual de un 2%. Se estudiarán también las depreciaciones a tener en cuenta y finalmente se analizarán los resultados obtenidos para concretar si el proyecto resulta rentable.

El motivo por el cual la planta de incineración genera tan poca potencia, es que se ha considerado que de las 300.000 toneladas de RSU entrantes al año en dicha planta solo el 10,8% son usados para valorización energética. Esto no sucede así en la



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

realidad, si no que se intenta, en la medida de lo posible, que los residuos que entren en las plantas de incineración sean residuos no aprovechables para que en su totalidad sean destinados a la obtención de energía eléctrica mediante su combustión.

Si en la planta analizada en este proyecto se considera que el 50% de las 300.000 toneladas de residuos entrantes son no útiles, se generaría una energía eléctrica de 20.115,76kw y los resultados económicos tendrán mucho más sentido, ya que con la potencia anterior (4.345kw) la viabilidad económica sólo presenta número negativos.

Inversión inicial

En primer lugar se va a considerar un coste de un millón de euros debido a la compra o expropiación del terreno en el cual se ubicará la planta incineradora.

Para la construcción de la planta es necesario comenzar teniendo en cuenta todos los costes asociados a la urbanización del terreno. Dentro de dichos costes se encuentran el movimiento de tierras, la construcción del cerramiento, todos los costes asociados a la jardinería de la planta, las señalizaciones necesarias para que la planta sea fácilmente identificable y los accesos y viales que abastecerán a la planta una vez se ponga en funcionamiento.

Tabla 24. Presupuesto de urbanización de la planta incineradora

PRESUPUESTO DE URBANIZACIÓN	
Expropiaciones/compra terrenos	1.000.000
Movimiento de tierras	1.300.000
Cerramiento	950.000
Parking	600.000
Jardinería	189.000
Señalización	200.000
Accesos y viales	800.000
TOTAL	5.039.000 €



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

A continuación, se procede a evaluar el presupuesto que supone la obra civil y las instalaciones necesarias. En obra civil se incluyen los costes de la construcción de la planta propiamente dicha. Dentro de las instalaciones necesarias se estudia el presupuesto necesario para cada una de ellas: instalación eléctrica, de climatización, de megafonía, contraincendios, de telefonía y de agua.

Tabla 25. Presupuesto de obra civil e instalaciones de la planta incineradora

PRESUPUESTO DE OBRA CIVIL E INSTALACIONES	
Obra civil	11.123.000
Instalación eléctrica	989.000
Instalación de climatización	995.000
Instalación de megafonía	732.000
Instalación contraincendios	850.000
Instalación de telefonía	777.000
Instalación de agua	991.000
TOTAL	16.457.000 €

Por último, para finalizar los costes asociados a la construcción de la planta se añade el precio de la maquinaria necesaria.

Tabla 26. Presupuesto de maquinaria de la planta incineradora

PRESUPUESTO DE MAQUINARIA	
Horno	4.300.000
Caldera de recuperación	7.110.000
Turbina de vapor	900.000
Alternador	1.100.000
Cintas de transporte	500.000
Bomba	900.000
Aerocondensador	1.300.000
Transformador	4.560.000
Varios	1.000.000
TOTAL	21.670.000 €



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

La inversión inicial de una planta de incineración con capacidad de 300.000 toneladas anuales es de 43.166.000€.

Costes fijos y variables

Dentro del presupuesto necesario para el mantenimiento de la planta se pueden diferenciar los costes fijos de los variables.

Dentro de los costes fijos cabe destacar la comprobación de emisiones para verificar el cumplimiento de la ley actual, así como la eliminación y retirada de cenizas y escorias. Los salarios de los trabajadores de la planta que se han diferenciado en función de su papel en la empresa. Se consideran los siguientes trabajadores:

- 1 jefe de mantenimiento con un salario de 59.500€ anuales.
- 1 jefe de operación con un salario de 59.500€ anuales.
- 1 jefe de turno con un salario de 55.200€ anuales.
- 30 operadores en la planta con un salario cada uno de 23.250€ anuales.
- 1 operador de mantenimiento con un salario de 23.250€ anuales.
- 1 operador de limpieza con un salario de 21.500€ anuales.

Dentro de los costes variables cabe destacar la necesidad de piezas de recambio, las reparaciones, el consumo de agua necesaria en la planta, los aditivos químicos para la limpieza de gases extraídos por la chimenea y el tratamiento de escorias y cenizas y su traslado a un vertedero.

Tabla 27. Costes variables de la planta incineradora

COSTES VARIABLES	
Eliminación de cenizas y escorias	125.000
Salario jefe mantenimiento	59.500
Salario jefe de operación	59.500
Salario jefe de turno	55.200
Salario operario	697.500
Salario operador mantenimiento	23.250
Salario operador limpieza	21.500
Piezas de recambio	190.000
Reparaciones	500.000
Consumo de agua	450.000
Consumo de electricidad	2.543.550
Aditivos químicos para limpieza de gases	175.000
Tratamiento de escorias, cenizas y transporte a vertedero	1.100.000
Transporte de RSU a la planta incineradora	1.000.000
TOTAL	7.000.000 €/año



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Dentro de los costes fijos se encuentran los impuestos a los que debe hacer frente la planta que forman un 0,5% de la inversión inicial y los seguros un 1% de la misma. También se añade el coste de mantenimiento del material utilizado en la planta.

Tabla 28. Costes fijos de la planta incineradora

COSTES FIJOS DE LA PLANTA	
Impuestos	215.830
Seguros	431.660
Mantenimiento material	1.781.840
TOTAL	2.429.330 €/año

Depreciación

Una vez analizados todos los costes (inversión inicial y costes anuales), es necesario analizar la depreciación lineal que se va a llevar a cabo. Por un lado, la maquinaria se va a considerar que tiene una vida útil de 15 años y posteriormente su valor será nulo. Mientras que se va a considerar una vida útil de la edificación de 50 años, tras los cuales su valor también será nulo.

$$\text{Depreciación maquinaria} = \frac{21.670.000 - 0}{15} = 1.444.666,67\text{€}$$



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 29. Depreciación maquinaria planta incineradora

Año	Valor residual
0	21.670.000,00
1	20.225.333,33
2	18.780.666,67
3	17.336.000,00
4	15.891.333,33
5	14.446.666,67
6	13.002.000,00
7	11.557.333,33
8	10.112.666,67
9	8.668.000,00
10	7.223.333,33
11	5.778.666,67
12	4.334.000,00
13	2.889.333,33
14	1.444.666,67
15	0,00

$$\text{Depreciación edificación} = \frac{21.496.000 - 0}{50} = 429.920\text{€}$$

Tabla 30. Depreciación edificación planta incineradora

Año	Valor residual
0	21.496.000
1	21.066.080
2	20.636.160
3	20.206.240
4	19.776.320
5	19.346.400
6	18.916.480
7	18.486.560
8	18.056.640
9	17.626.720
10	17.196.800
11	16.766.880
12	16.336.960
13	15.907.040
14	15.477.120
15	15.047.200



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

El valor residual de la edificación en el último año se añadirá como un ingreso al finalizar el periodo.

Ingresos

Los ingresos que se reciben a partir de la energía producida en la planta incineradora son los mismos que los mencionados en el Capítulo II:

- Una prima debido a que se produce energía a partir de una fuente renovable y la potencia instalada es menor de 50MW.
- El precio de la energía que se inyecta en la red que es comprada por las compañías eléctricas.
- Un canon que da el ayuntamiento gracias a que este tipo de instalaciones tratan los residuos de su municipio y permiten así cumplir con las leyes establecidas.
- Una compensación por los materiales reciclables, los férreos y la materia orgánica vendida.

Para poder realizar una correcta comparación de cada tecnología en las Conclusiones se van a considerar los mismos valores de prima, precio de la energía y canon que en el caso de la planta de biometanización. Dichos valores son 0,01€/kWh, 0,05€/kWh y 15€/ton respectivamente.

Por los materiales reciclables vendidos se va a recibir 9€/ton, por los materiales férreos 20€/ton y por la materia orgánica para hacer compost 10€/ton.

Resultados

Para comprobar la viabilidad económica de este proyecto se van a analizar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial realizada.

En la Figura. 34 se muestran los resultados del VAN para distintos valores de tasa de retorno o WACC. En aquellos casos en los que el valor del VAN sea positivo el proyecto se aceptará, mientras que cuando sea negativo será rechazado y por tanto no se llevará a cabo.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

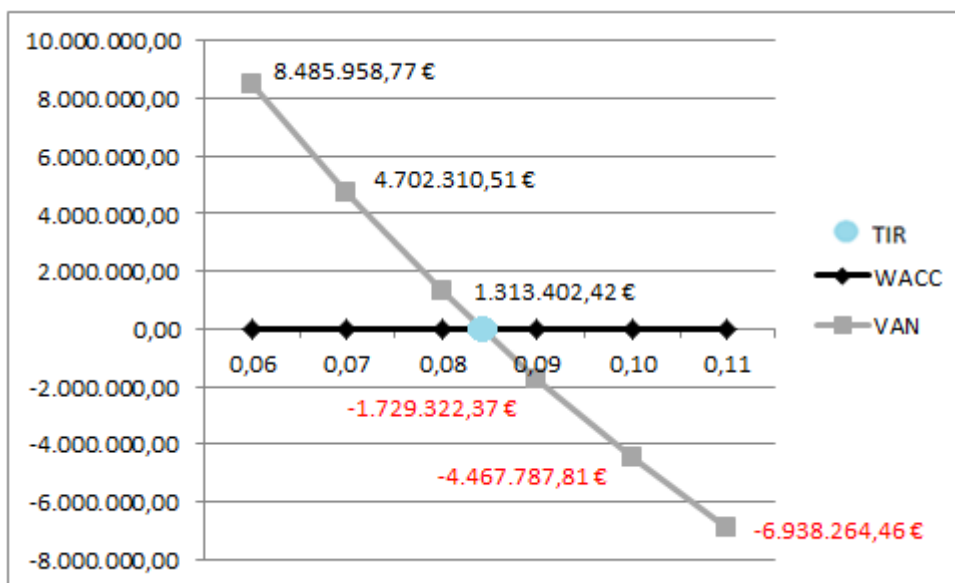


Figura. 34: Valores del VAN de la planta incineradora para distintos WACC

Fuente: Elaboración propia

Para los flujos de caja de este proyecto se obtiene un TIR del 8,42%, como se observa en azul en la Figura. 34. El proyecto se aceptaría si el valor del TIR es mayor que el del WACC utilizado, por tanto si se utiliza un WACC inferior al 8,42% el proyecto sería aceptado, mientras que si utilizamos un WACC mayor, el proyecto sería rechazado.

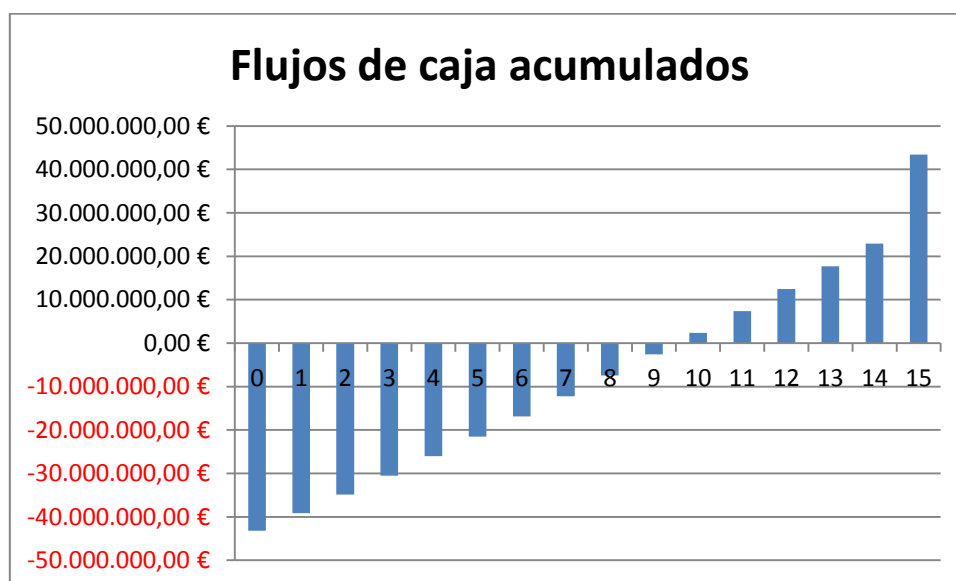


Figura. 35: Flujos de caja acumulados en la planta incineradora

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Como se observa en la Figura. 35, el período que se tardaría en recuperar toda la inversión inicial realizada es de 9,53 años. También se aprecia con claridad el ingreso que hay en el último año debido al valor residual del edificio por causa de tener una depreciación de 50 años.



Capítulo VI. Valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid a partir de una planta de gasificación por plasma



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se va a analizar el impacto de la construcción de una planta de gasificación por plasma en la Comunidad de Madrid a partir de una cantidad fija de RSU. Se estudiará la dimensión y la mejor ubicación de la planta, así como el coste de dicha construcción y el rendimiento obtenido de la misma.

Descripción

La técnica de gasificación por plasma se ha desarrollado en los últimos 25 años como una alternativa evolucionada de la incineración. Consiste en un sistema en el cual los residuos sólidos urbanos son sometidos a unas temperaturas muy elevadas, más de 3000°C, consiguiendo así la completa destrucción de las partículas complejas de la materia prima en otras más sencillas, además de impedir la formación de dioxinas y furanos. En el gasificador la presencia de oxígeno se encuentra por debajo de la relación estequiométrica, principal diferencia con la incineración, por lo que no llega a producirse la combustión completa de los residuos en su interior y además se evita la formación de toxinas. La finalidad de la gasificación es la misma que la de la incineración: generar suficiente calor para evaporar el agua contenida en los tubos y que posteriormente dicho vapor mueva la turbina que producirá energía eléctrica.

En la gasificación se pueden utilizar casi todo tipo de residuos ya que aquellos que contengan más componentes orgánicos servirán para la formación de **gas de síntesis** (compuesto fundamentalmente por H_2 y CO , con un poder calorífico de 20.900kJ/kg) y los inorgánicos para la formación de un vitrificado altamente inerte que también pueden ser aprovechados en la construcción, de relleno sanitario o como aislante.

El gas de síntesis obtenido en la gasificación debe ser limpiado para posteriormente aprovecharlo en turbinas de gas o motores de combustión interna para producir energía eléctrica.

El rendimiento de la gasificación para los residuos comúnmente generados es aproximadamente 42%.

Las principales ventajas del tratamiento de residuos por plasma son:

- Se trata de una técnica eficaz aunque la naturaleza de los RSU sea muy distinta
- Se lleva a cabo una eliminación segura de residuos



- Bajas emisiones atmosféricas
- Se trata de una tecnología modular, lo que facilita su implantación
- No se obtiene ningún residuo

Las principales desventajas son:

- Al comienzo es necesaria una gran inversión
- Es necesario un mantenimiento permanente [25]

Descripción de equipos

A continuación se va a explicar detalladamente los principales equipos necesarios en la construcción de una planta de gasificación por plasma.

Foso de entrada

Al comienzo de la planta se va a disponer de un foso que permita el almacenamiento de residuos durante varios días.

Además, en una planta de gasificación es necesaria también la entrada de coque y caliza. El primero se utiliza para aumentar la temperatura al consumirse en el interior del gasificador y el segundo sirve para controlar las características de los materiales de “deshecho” asegurándose de que estén totalmente vitrificados.

Trituradora/Secadora

Los residuos son transportados mediante cintas a la trituradora para conseguir un diámetro máximo de 15cm y evitar así futuros deterioros en el reactor gasificador. Una vez los RSU tienen un tamaño aceptable son secados para reducir la cantidad de humedad en ellos antes de introducirlos en el gasificador ya que sino el rendimiento de la planta sería inferior porque en lugar de producir calor aprovechable, se usaría ese calor para secar los residuos. Se ha elegido un secador de tipo Trommel que consiste en un sencillo cilindro donde se introducen los residuos que se desean secar.



Figura. 36: Trituradora de RSU

Fuente: [26]

Reactor gasificador

En el reactor gasificador se introducen los residuos, un 4% de coque y un 7% de caliza respecto a los residuos, llevándose a cabo el proceso más importante de la planta gasificadora dividido en las siguientes fases:

- Pirólisis. Aquí se desprenden los elementos más volátiles de los residuos en una atmósfera con poco oxígeno. Se trata de un proceso endotérmico entre 1.000 y 1.200°C.
- Combustión parcial. En esta etapa se lleva a cabo la oxidación de parte del carbono que queda tras la pirolisis. Se trata de un proceso exotérmico cediendo en torno a 1.100°C.
- Generación del syngas rico en hidrógeno. Este gas se produce a partir de los componentes orgánicos de los residuos y abandona el gasificador a una temperatura cercana a los 1.000°C.

A continuación se lleva a cabo la limpieza del gas de síntesis eliminando las partículas en suspensión que queden en el mismo, separación del azufre y mercurio y eliminación de metales pesados.

Los componentes inorgánicos dan como resultado lodos y metales que pueden resultar útiles en la construcción de carreteras.

El tipo de reactor utilizado en este proyecto es un **reactor gasificador de lecho fijo de tipo updraft**, ya que los residuos son introducidos por la parte superior del

reactor mientras que el agente gasificante (aire en este caso) es introducido por la parte inferior. A medida que los RSU descenden por el reactor, se van calentando debido a la corriente ascendente de aire caliente que hay en el interior del mismo. La máxima temperatura la alcanzan cuando llegan a la parte más inferior donde se encuentran las antorchas de plasma.



Figura. 37: Gasificador

Fuente: [27]

De nuevo se va a considerar que la cantidad de residuos introducida en la planta de gasificación es de 300.000 toneladas al año. Teniendo en cuenta que la planta va a estar en funcionamiento 313 días al año, se obtiene la siguiente cantidad diaria de RSU:

$$\frac{300.000 \text{ ton}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{313 \text{ días}} = 958,47 \text{ toneladas/día}$$

Por tanto, el reactor que se va a utilizar en este proyecto es el **modelo G65** del fabricante WPC (Westinghouse Plasma Corporation) mostrado en la Tabla 31.

Tabla 31. Características de los tipos de gasificadores existentes

Fuente: [28]



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Modelo gasificador	Capacidad (T/día)	Syngas producido (m^3/h)	Pot. Ciclo combinado (MW gross/net)	FT Liquids BPD/BPY	Combustibles fósiles equivalentes (barriles/año)
G65	1.000	65.000	58/39	785/287.000	670.000
W15	290	15.000	14/9	188/68.000	160.000
P5	100	5.000	4.5/3	62/23.000	50.000

Tabla 32. Características modelo gasificador elegido

	Diámetro exterior (m)	Diámetro interior (m)	Altura (m)	Capacidad aire alimentado (T/día)		Capacidad oxígeno soplado (T/día)	
G65	9	4	24	540	620	1.000	1.000

En el gasificador se lleva a cabo la disociación molecular de sólidos, líquidos y gases bajo unas condiciones de temperatura altísimas conseguidas gracias a las antorchas que generan plasma. Dichas antorchas están formadas por dos electrodos (cátodo y ánodo) enfriados por agua para conseguir la temperatura deseada y reducir su desgaste, entre los cuales ocurre un arco eléctrico que rota magnéticamente a 1000 revoluciones por segundo. Este campo magnético es creado por una bobina que se encuentra alrededor de ambos electrodos. Así se consigue ionizar el gas entrante (aire) obteniendo finalmente plasma. Se alcanzan entre 2.000°C y 4.000°C consiguiendo eliminar la fracción orgánica y vitrificar las cenizas. Los productos obtenidos son el gas de síntesis y una lava fundida que cuando se enfría forma un producto vítreo inerte.

El agua necesaria para el correcto funcionamiento de los electrodos proviene de un circuito cerrado formado por una bomba y un intercambiador de calor. En caso de fallo de este sistema, existe uno de emergencia.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

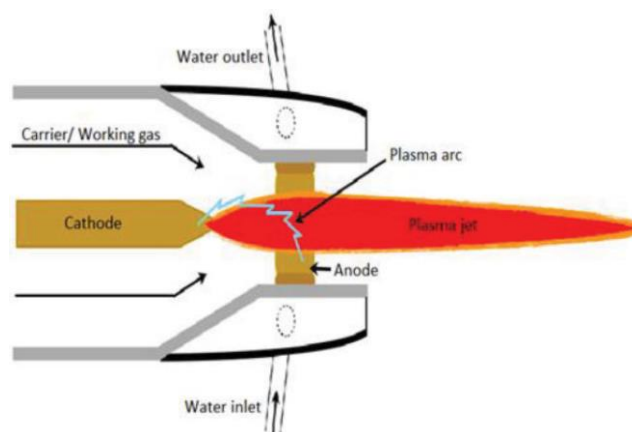


Figura. 38: Antorcha de plasma

Fuente: [29]

Por lo general son necesarias seis antorchas para conseguir una correcta gasificación. La antorcha que se va a utilizar en este proyecto es la Marc 3A, del fabricante WPC (Westinghouse Plasma Corporation) ya que es el modelo que se recomienda utilizar con el reactor elegido anteriormente. En la Tabla 33 se pueden observar las principales características de la antorcha elegida que trabajará alrededor de 130kW para dotar al proceso de gasificación de la potencia recomendada por el fabricante (en torno a 780kW).

Tabla 33. Características de los modelos de antorchas de plasma existentes

Modelo:	MARC 3A	MACR 11L	MARC 11H
Pot. Mínima (kW)	80	350	860
Pot. Máxima (kW)	300	800	2400
Corriente máxima (A)	400	1000	2000
Máx. Voltaje del arco	860	950	1200
Caudal aire (kg/h)	42	197	415
Eficiencia térmica	70%	85%	85%
Diámetro (mm)	89	45.7	45.7
Longitud (mm)	18	35	35



Figura. 39: Antorcha de plasma elegida

Fuente: [30]

Tratamiento de escorias

Los residuos de la gasificación eliminados por un orificio en el fondo del reactor salen del mismo a una temperatura de 1.650°C formando una mezcla derretida llamada material vitrificable (slag). A continuación se inserta la caliza necesaria para controlar la viscosidad de la mezcla. Finalmente se separan los materiales férricos con ayuda de separadores magnéticos de los restos minerales.

La finalidad de este proceso es que el material vitrificable vitrificado pueda ser útil en distintos procesos, así como la obtención y reutilización de metales.

Turbina de gas

En este proyecto se utiliza la tecnología de una turbina de gas para la obtención de electricidad. El mecanismo consiste en la combustión del gas de síntesis o syngas, produciendo unos gases calientes que circulan a través de la turbina y hacen mover el eje que tienen en común el compresor de la turbina de gas, la turbina y el alternador. Este último al ser accionado produce electricidad. El calor generado puede utilizarse para secar los residuos antes de entrar en el gasificador.

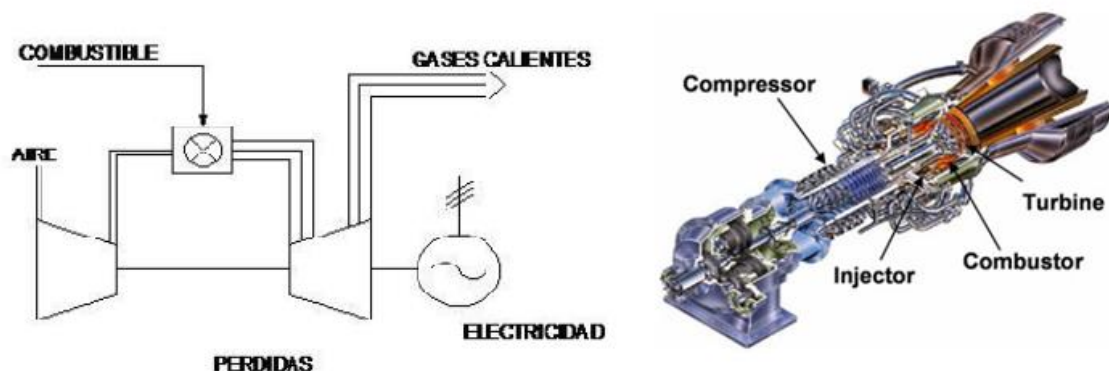


Figura. 40: Turbina de gas

Fuente: [31]

Una vez elegido el tipo de gasificador que se va a utilizar en este proyecto, se debe elegir una turbina de gas que funcione correctamente con el mismo. En este caso se ha decidido utilizar la turbina de **General Electrics GE Frame 6581B**, ya que no tiene ningún inconveniente en trabajar con el gas de síntesis de la planta de gasificación por plasma.

Tabla 34. Características de la Turbina GE6581B

Características	Turbina GE6581B
Generador (Hz)	50/60
Velocidad de rotación (rpm)	5163
Rendimiento	40%
Potencia de salida (MW)	42
Tiempo de encendido (min)	<15
Intervalo de combustión	24.000h/800 encendidos
Vida del rotor	200.000h/5000 encendidos

Al ser la potencia de salida de 42MW, van a ser necesarias dos turbinas ya que la potencia de salida total es de 79MW, teniendo finalmente 84MW. Además se tiene cierto margen para picos de potencia que pudieran surgir.

Transformador

Finalmente es necesaria la utilización de un transformador para elevar la tensión de la corriente eléctrica generada y así evitar mayores pérdidas en el transporte de la misma. Estará formado por dos devanados, el primario y el



secundario. En el primario se encontrará la energía que se desea transformar, mientras que en el secundario sale la energía eléctrica transformada con un alto voltaje y baja intensidad.

Esta energía generada se conecta a la red de transporte consiguiendo así inyectar electricidad en la misma a partir de una fuente renovable como son los RSU.

Localización

En la actualidad no existe ninguna planta de gasificación por plasma en España, a pesar de que en algunas comunidades, como en Alcalá de Henares, se intentó llevar a cabo la construcción de una planta de estas características. Finalmente, debido a la negativa de los vecinos se canceló el proyecto. Por lo tanto, a continuación se va a proceder al emplazamiento de la primera planta de estas características en la Comunidad de Madrid.

Se ha decidido que la planta de gasificación esté ubicada en el municipio de Villanueva del Pardillo por dos motivos, por un lado porque se ha encontrado un terreno muy propicio para su ubicación y por otro para ubicar alguna planta de este proyecto en la parte oeste de la Comunidad de Madrid.



Figura. 41: Municipio de Villanueva del Pardillo donde se ubicará la planta de gasificación

Fuente: [32]



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

En las Figura. 42 y Figura. 43 se puede apreciar la ubicación exacta de la planta en el plano del catastro y en el mapa geográfico.

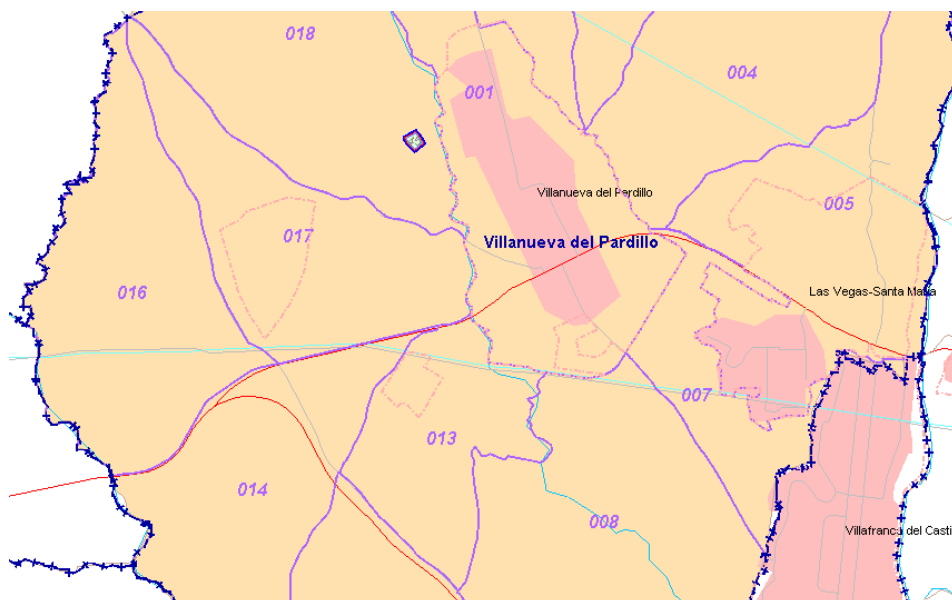


Figura. 42: Situación geográfica de la planta de gasificación

Fuente: Elaboración propia



Figura. 43: Ubicación en el mapa de la planta de gasificación

Fuente: Elaboración propia



En la Figura. 44 se puede observar que las dimensiones de la parcela elegida para la construcción de la planta de gasificación por plasma coinciden con las utilizadas en los planos de este proyecto (85x94m).

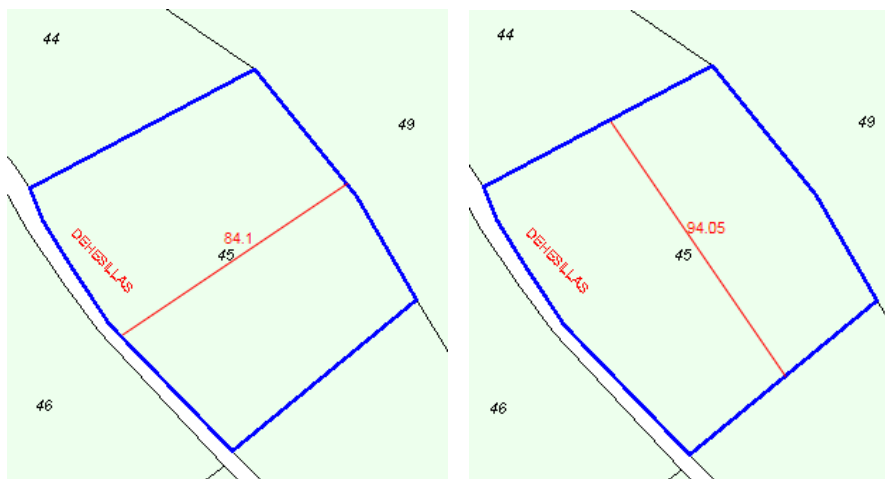


Figura. 44: Dimensiones de la parcela para la planta de gasificación

Fuente: Elaboración propia

Rendimiento

Para calcular el rendimiento de esta planta de gasificación por plasma, lo primera que se ha de calcular es el poder calorífico inferior del gas de síntesis obtenido en la misma. Para ello, igual que se ha realizado en los casos anteriores se va a partir de la composición química del mismo que se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35. Composición química del syngas

Elemento	Análisis volumétrico
CO	60%
H ₂	30%
CO ₂	0,7%
H ₂ O	9,3%
TOTAL	100%



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Sabiendo la composición molar del gas de síntesis se puede proceder a realizar la combustión teniendo especial precaución ya que en este caso la combustión que sucede es incompleta.

$$(0,6 * CO + 0,3 * H_2 + 0,007 * CO_2 + 0,093 * H_2O) + (1 + \lambda) * a * (O_2 + 3,76 * N_2) \\ \rightarrow (b - c) * CO_2 + c * CO + d * H_2O + (1 + \lambda) * e * N_2 + (a * \lambda + \frac{c}{2}) * O_2$$

Procediendo a igualar cada elemento a ambos lado de la ecuación, y dando un valor a “c” de 0 se obtienen los coeficientes restantes mostrados en la Tabla 36.

Tabla 36. Coeficientes de los términos de la reacción química entre syngas y aire

a	0,45
b	0,61
d	0,39
e	1,69

Para calcular el PCI del gas de síntesis se calcula la entalpía molar estándar de combustión (considerando el agua de los productos en estado gaseoso), a partir de las entalpías de formación, sabiendo que los elementos puros tienen una entalpía de formación nula. Se obtiene así una entalpía de combustión de valor -242.340kJ/kmol.

$$V_n = \frac{R * T}{P} = \frac{83,4 * 273,15}{101,325} = 22,4m^3/kmol$$

$$PCI = \frac{242.340kJ/kmol}{22,4m^3/kmol} = 11.000 kJ/m^3 = 2.631,58kcal/m^3$$

Poder calorífico inferior del gas de síntesis.....2.631,58kcal/m³

Partiendo de que se genera una cantidad de syngas en el reactor de gasificación de 1.630m³por tonelada de RSU entrante se obtiene la siguiente energía primaria.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

$$\frac{1.630m^3}{ton} * \frac{300.000ton}{año} * \frac{1año}{7.500h} = \frac{65.095,85m^3}{h}$$
$$E_{primaria} = \frac{11.000kJ}{m^3} * \frac{65.095,85m^3}{h} * \frac{1h}{3600s} = 198.903,98kW$$

Por tanto, la energía primaria que entra en la turbina de gas es de 198.903,98kW. Suponiendo un rendimiento en la turbina de 40% se obtiene una energía eléctrica generada de 79.561,59kW.

Energía eléctrica generada.....597,67GWh

Además se produce una cantidad de metales y material vitrificable que puede ser aprovechado en distintos procesos.

$$Cantidad\ slag\ generado = \frac{0,35ton\ slag}{tonRSU} * \frac{300.000tonRSU}{año} = 105.000\ ton/año$$

$$Cantidad\ metal\ generado = \frac{0,1ton\ metal}{tonRSU} * \frac{300.000tonRSU}{año} = 30.000\ ton/año$$

Cantidad de material vitrificable generado.....105.000 ton/año

Cantidad de metales generada.....30.000 ton/año



Diagrama de Sankey

Para el mejor entendimiento de lo que sucede en la planta de gasificación que se está desarrollando en este proyecto, se incluye a continuación el diagrama de Sankey de la misma.

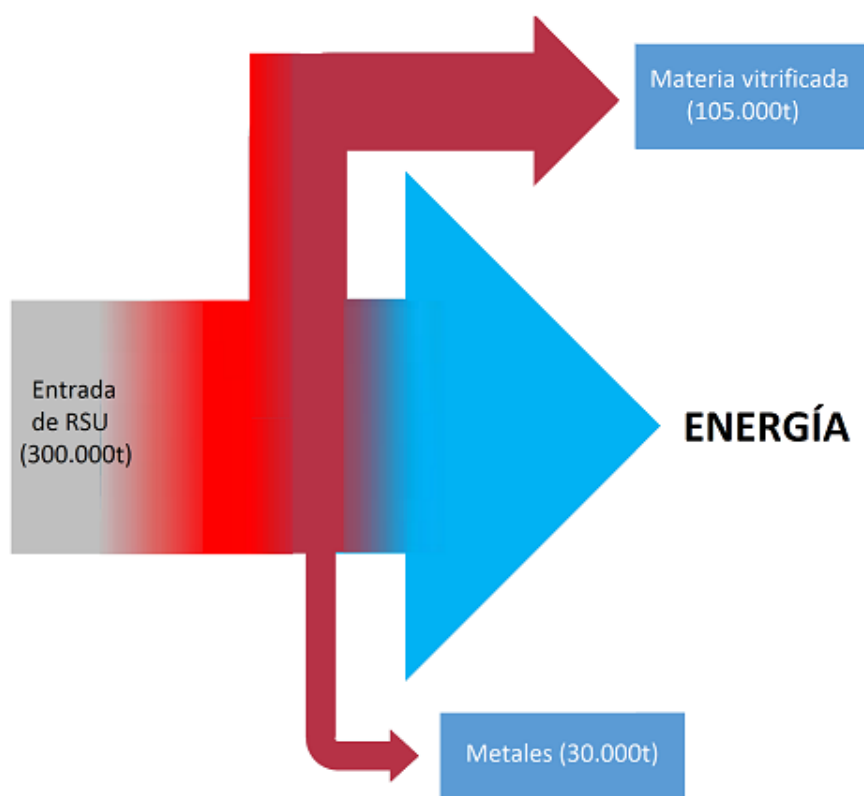


Figura. 45: Diagrama de Sankey de la planta de gasificación por plasma

Fuente: Elaboración propia

Viabilidad económica

Para el estudio de la viabilidad económica se van a analizar todos los costes e ingresos que habrá cada año a lo largo de la vida útil de la planta de gasificación (15 años) considerando en ambos casos una inflación anual de un 2%. Se estudiarán también las depreciaciones a tener en cuenta y finalmente se analizarán los resultados obtenidos para concretar si el proyecto resulta rentable.



Inversión inicial

En primer lugar se va a considerar un coste de un millón de euros debido a la compra o expropiación del terreno en el cual se ubicará la planta gasificadora.

Para la construcción de la planta es necesario comenzar teniendo en cuenta todos los costes asociados a la urbanización del terreno. Dentro de dichos costes se encuentran el movimiento de tierras, la construcción del cerramiento, todos los costes asociados a la jardinería de la planta, las señalizaciones necesarias para que la planta sea fácilmente identificable y los accesos y viales que abastecerán a la planta una vez se ponga en funcionamiento.

Tabla 37. Presupuesto de urbanización de la planta de gasificación por plasma

PRESUPUESTO DE URBANIZACIÓN	
Expropiaciones/compra terrenos	1.000.000
Movimiento de tierras	400.000
Cerramiento	300.000
Parking	350.000
Jardinería	180.000
Señalización	200.000
Accesos y viales	800.000
TOTAL	3.230.000 €

A continuación, se procede a evaluar el presupuesto que supone la obra civil y las instalaciones necesarias. En obra civil se incluyen los costes de la construcción de la planta propiamente dicha. Dentro de las instalaciones necesarias se estudia el presupuesto necesario para cada una de ellas: instalación eléctrica, de climatización, de megafonía, contra incendios, de telefonía y de agua.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 38. Presupuesto de obra civil e instalaciones de la planta de gasificación por plasma

PRESUPUESTO DE OBRA CIVIL E INSTALACIONES	
Obra civil	7.123.000
Instalación eléctrica	989.000
Instalación de climatización	995.000
Instalación de megafonía	732.000
Instalación contraincendios	850.000
Instalación de telefonía	777.000
Instalación de agua	991.000
TOTAL	12.457.000 €

Por último, para finalizar los costes asociados a la construcción de la planta se añade el precio de la maquinaria necesaria.

Tabla 39. Presupuesto de maquinaria de la planta de gasificación por plasma

PRESUPUESTO DE MAQUINARIA	
Cintas de transporte	400.000
Tolva de almacenamiento	1.200.000
Trituradora/Secadora	4.000.000
Sist. Almacenamiento coque	1.000.000
Sist. Almacenamiento caliza	1.800.000
Reactor gasificador	50.000.000
Antorchas arco de plasma	30.872.000
Separador ferromagnético	6.192.000
Foso de recogida material vitrificable	4.200.000
Foso recogida metales	3.800.000
Limpieza del syngas	35.550.000
Turbina de gas	22.000.000
Transformador/Alternador	8.500.000
Varios	14.799.000
TOTAL	184.313.000 €

La inversión inicial de una planta de gasificación por plasma con capacidad de 300.000 toneladas anuales es de 200.000.000€.



Costes fijos y variables

Dentro del presupuesto necesario para el mantenimiento de la planta se pueden diferenciar los costes fijos de los variables.

Dentro de los costes fijos cabe destacar la comprobación de emisiones para verificar el cumplimiento de la ley actual, así como la eliminación y retirada de cenizas y escorias. Los salarios de los trabajadores de la planta que se han diferenciado en función de su papel en la empresa. Se consideran los siguientes trabajadores:

- 1 jefe de mantenimiento con un salario de 59.500€ anuales.
- 1 jefe de operación con un salario de 59.500€ anuales.
- 1 jefe de turno con un salario de 55.200€ anuales.
- 10 operadores en la planta con un salario cada uno de 23.250€ anuales.
- 1 operador de mantenimiento con un salario de 23.250€ anuales.
- 1 operador de limpieza con un salario de 21.500€ anuales.

Dentro de los costes variables cabe destacar la necesidad de piezas de recambio, las reparaciones, el consumo de agua necesaria en la planta, los aditivos químicos para la limpieza del syngas, el tratamiento del material vitrificable y de los metales y su transporte a plantas donde pueda ser utilizado de nuevo, la compra del coque metalúrgico y del polvo de caliza y finalmente el transporte de los RSU a la planta de gasificación.

Tabla 40. Costes variables de la planta de gasificación por plasma

COSTES VARIABLES	
Salario jefe mantenimiento	59.500
Salario jefe de operación	59.500
Salario jefe de turno	55.200
Salario operario	232.500
Salario operador mantenimiento	23.250
Salario operador limpieza	21.500
Piezas de recambio	648.550
Reparaciones	780.000
Consumo de agua	850.000
Consumo de electricidad	4.200.000
Aditivos químicos para limpieza del syngas	2.200.000
Tratamiento del material vitrificable y metales	850.000
Coste coque metalúrgico	1.960.000
Coste de polvo de caliza	2.260.000
Transporte de RSU a la planta de gasificación	800.000
TOTAL	15.000.000 €/año



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Dentro de los costes fijos se encuentran los impuestos a los que debe hacer frente la planta que forman un 0,5% de la inversión inicial y los seguros un 1% de la misma. También se añade el coste de mantenimiento del material utilizado en la planta.

Tabla 41. Costes fijos de la planta de gasificación por plasma

COSTES FIJOS DE LA PLANTA	
Impuestos	1.000.000
Seguros	2.000.000
Mantenimiento material	2.000.000
TOTAL	5.000.000 €/año

Depreciación

Una vez analizados todos los costes (inversión inicial y costes anuales), es necesario analizar la depreciación lineal que se va a llevar a cabo. Por un lado, la maquinaria se va a considerar que tiene una vida útil de 15 años y posteriormente su valor será nulo. Mientras que se va a considerar una vida útil de la edificación de 50 años, tras los cuales su valor también será nulo.

$$\text{Depreciación maquinaria} = \frac{184.313.000 - 0}{15} = 12.287.533,33 \text{ €}$$



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 42. Depreciación maquinaria planta de gasificación por plasma

Año	Valor residual
0	184.313.000 €
1	172.025.467 €
2	159.737.933 €
3	147.450.400 €
4	135.162.867 €
5	122.875.333 €
6	110.587.800 €
7	98.300.267 €
8	86.012.733 €
9	73.725.200 €
10	61.437.667 €
11	49.150.133 €
12	36.862.600 €
13	24.575.067 €
14	12.287.533 €
15	0

$$\text{Depreciación edificación} = \frac{15.687.000 - 0}{50} = 313.740 \text{ €}$$

Tabla 43. Depreciación edificación planta de gasificación por plasma

Año	Valor residual
0	15.687.000
1	15.373.260
2	15.059.520
3	14.745.780
4	14.432.040
5	14.118.300
6	13.804.560
7	13.490.820
8	13.177.080
9	12.863.340
10	12.549.600
11	12.235.860
12	11.922.120
13	11.608.380
14	11.294.640
15	10.980.900



El valor residual de la edificación en el último año se añadirá como un ingreso al finalizar el periodo.

Ingresos

Los ingresos que se reciben a partir de la energía producida en la planta de gasificación son los mismos que los mencionados en el Capítulo II:

- Una prima debido a que se produce energía a partir de una fuente renovable y la potencia instalada es menor de 50MW.
- El precio de la energía que se inyecta en la red que es comprada por las compañías eléctricas.
- Un canon que da el ayuntamiento gracias a que este tipo de instalaciones tratan los residuos de su municipio y permiten así cumplir con las leyes establecidas.
- El precio del material vitrificable vendido.
- El precio de los metales vendidos.

Para poder realizar una correcta comparación de cada tecnología en las Conclusiones se van a considerar los mismos valores de prima, precio de la energía y canon que en los casos anteriores. Dichos valores son 0,01€/kWh, 0,05€/kWh y 15€/ton respectivamente.

El precio del material vitrificable es de 5€/tonelada y el de los metales es de 50€/tonelada.

Resultados

Para comprobar la viabilidad económica de este proyecto se van a analizar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial realizada.

En la Figura. 46 se muestran los resultados del VAN para distintos valores de tasa de retorno o WACC. En aquellos casos en los que el valor del VAN sea positivo el proyecto se aceptará, mientras que cuando sea negativo será rechazado y por tanto no se llevará a cabo.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

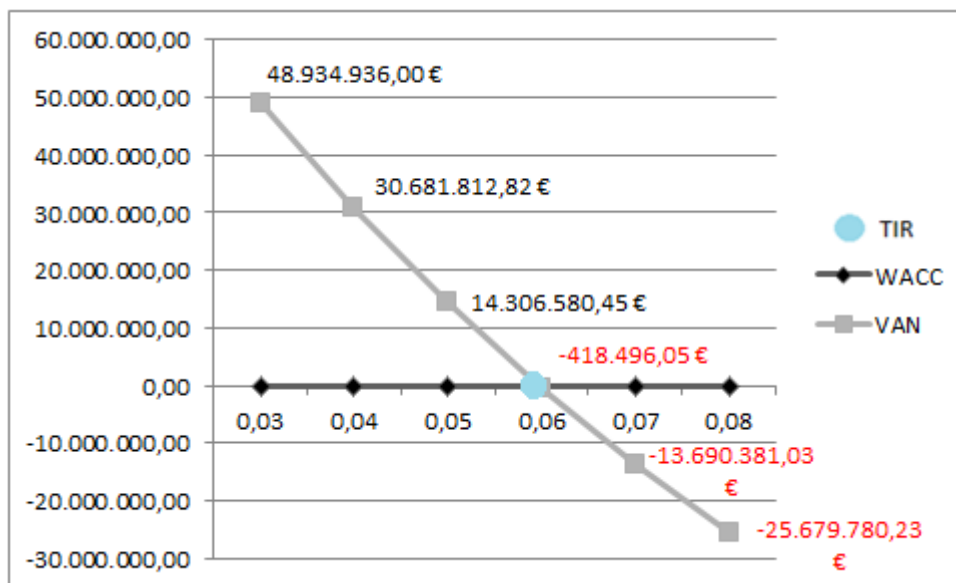


Figura. 46: Valores del VAN de la planta de gasificación por plasma para distintos WACC

Fuente: Elaboración propia

Para los flujos de caja de este proyecto se obtiene un TIR del 5,97%, como se observa en azul en la Figura. 46. El proyecto se aceptaría si el valor del TIR es mayor que el del WACC utilizado, por tanto si se utiliza un WACC inferior al 5,97% el proyecto sería aceptado, mientras que si utilizamos un WACC mayor, el proyecto sería rechazado.

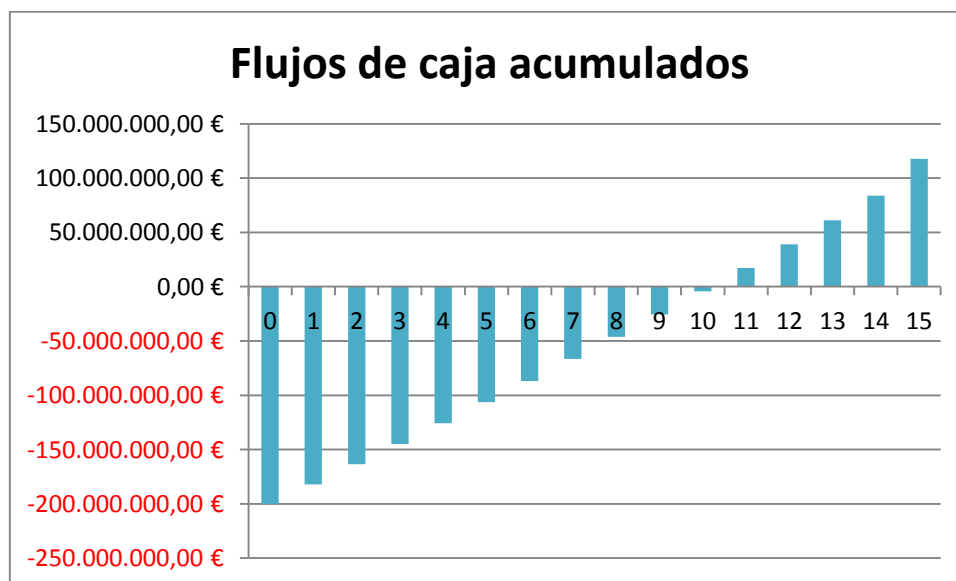


Figura. 47: Flujos de caja acumulados en la planta de gasificación por plasma

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Como se observa en la Figura. 47, el período que se tardaría en recuperar toda la inversión inicial realizada es de 10,25 años. También se aprecia con claridad el ingreso que hay en el último año debido al valor residual del edificio por causa de tener una depreciación de 50 años.



Capítulo VII. Conclusiones



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se va a llevar a cabo una comparación de las cuatro tecnologías de tratamiento de residuos analizadas en este proyecto (vertedero, planta de biometanización, planta de incineración y planta de gasificación) estableciendo ciertas conclusiones al respecto.

Comparativa de RSU utilizados en cada tecnología

La primera comparativa que se va a llevar a cabo surge de los distintos tipos de RSU existentes: residuos reciclables, materia orgánica, deshechos, materiales férricos... No todas las tecnologías pueden tratar cualquier tipo de residuos, por lo que a continuación se va a analizar qué residuo debe ser tratado en cada tecnología.

En una planta de biometanización con valorización energética se genera electricidad a partir del biogás obtenido de la materia orgánica. Por tanto, en la entrada de este tipo de plantas se debe llevar a cabo una minuciosa separación y clasificación de residuos eliminando aquellos que no sean orgánicos. Este hecho hace que se necesite una superficie mayor del terreno, además de mayor cantidad de trabajadores y más maquinaria.

En las plantas incineradoras también es necesaria esta clasificación previa para separar todos aquellos residuos que puedan ser útiles por algún motivo, como son los materiales reciclables, por ejemplo. Finalmente se incinerarán el resto de residuos no provechosos calentándolos a altas temperaturas y reduciéndolos a cenizas. El calor obtenido en esta combustión es aprovechado en la valorización energética de esta planta.

Finalmente, en las plantas de gasificación por plasma no se tiene que realizar una separación previa ya que cualquier tipo de residuos puede ser utilizado en esta técnica. Una vez que los residuos entran en la planta simplemente se secan y trituran para, a continuación, introducirlos en el reactor gasificador, obteniendo gas de síntesis, metales y material vitrificable (todas las sustancias aprovechables).



Tamaño de terreno necesario

A partir de lo analizado en el apartado anterior, es fácilmente deducible que los terrenos necesarios para la construcción de plantas de biometanización e incineración van a ser mayores que el de la planta de gasificación. En este proyecto, se han utilizado las dimensiones mostradas en la

Tabla 44: Superficie necesaria para cada planta de valorización energética

Fuente: Elaboración propia

	Biometanización	Incineración	Gasificación
Superficie necesaria	$49.600m^2$	$35.070m^2$	$7.350m^2$

En la Figura. 48 se puede apreciar gráficamente la diferencia entre los terrenos necesarios para cada planta de valorización energética de residuos.

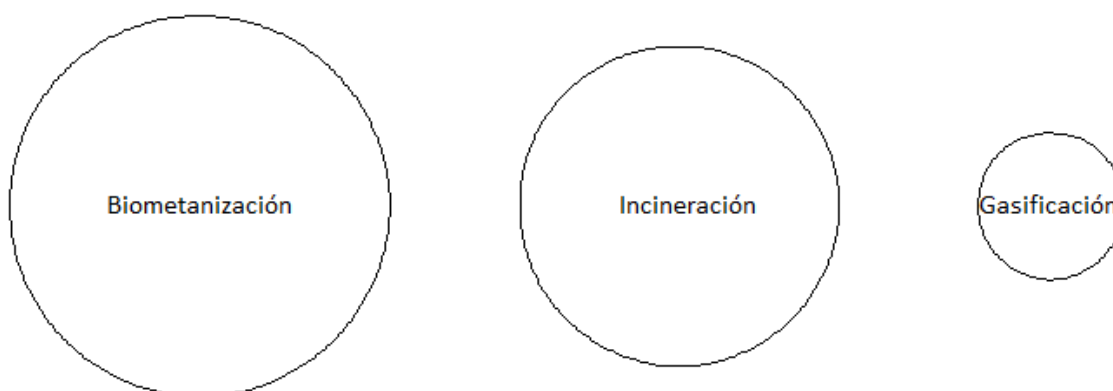


Figura. 48: Comparativa del tamaño del terreno necesario para cada caso de estudio

Fuente: Elaboración propia



Emisión de gases de efecto invernadero (GEI) – Contaminación atmosférica

La emisión a la atmósfera de GEI, dióxido de carbono y metano principalmente, tiene causas nocivas ya que estos gases son los principales responsables del cambio climático. Por ello, a continuación se va a realizar un análisis de qué técnicas de valorización energética a partir de RSU pueden emitir este tipo de gases a la atmósfera.

En los vertederos controlados se producen grandes cantidades de CH_4 y CO_2 , que se deben absorber gracias a unas tuberías ubicadas entre las toneladas de residuos acumuladas evitando así su emisión a la atmósfera. Lo mismo sucede en las plantas de biometanización con la generación del biogás a partir de la materia orgánica. Sin embargo, es posible que existan fugas de estos gases a la atmósfera en ambos casos, colaborando así en el perjudicial cambio climático mencionado.

En las plantas de incineración se puede producir también una contaminación atmosférica debido a la mala limpieza de los gases expulsados por la chimenea emitiendo GEI y gases que propician la lluvia ácida.

Por otro lado, las plantas de gasificación por plasma tiene como producto gaseoso el gas de síntesis o syngas formado principalmente por hidrógeno y vapor de agua, por lo que aunque hubiera fugas de dicho gas no supondría ningún peligro ambiental ya que las concentraciones de sustancias tóxicas son inocuas para los seres humanos.

Comparativa de la generación de energía eléctrica de cada planta

A continuación se va a realizar una comparación entre la cantidad de energía eléctrica generada en cada planta de valorización energética estudiada en este proyecto. En la Tabla 45 se puede ver un resumen de dicha generación.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 45: Kw eléctricos generados en cada planta de valorización energética

Fuente: Elaboración propia

Biom+Verte	Biometanización	Incineración (10,8%)	Incineración (50%)	Gasificación
17.279,68kW	8.786,28kW	4.345kW	20.115,76kW	79.561,59kW

Como se puede apreciar en la Tabla 45, el uso de una planta de biometanización sin un vertedero cercano no resulta muy provechoso ya que cuando trabajan juntos se consigue aproximadamente el doble de potencia. Por tanto, siempre que sea posible es preferible que la construcción de ambas instalaciones sea una al lado de la otra.

Como se mencionó anteriormente, el motivo por el cual la planta de incineración genera tan poca potencia en comparación con el resto de tecnologías, es que se ha considerado que de las 300.000 toneladas de RSU entrantes al año en dicha planta solo el 10,8% son usados para valorización energética. Esto no sucede así en la realidad, si no que se intenta, en la medida de lo posible, que los residuos que entren en las plantas de incineración sean residuos no aprovechables para que en su totalidad sean destinados a la obtención de energía eléctrica mediante su combustión.

En la Figura. 49 se puede observar gráficamente esta comparativa.

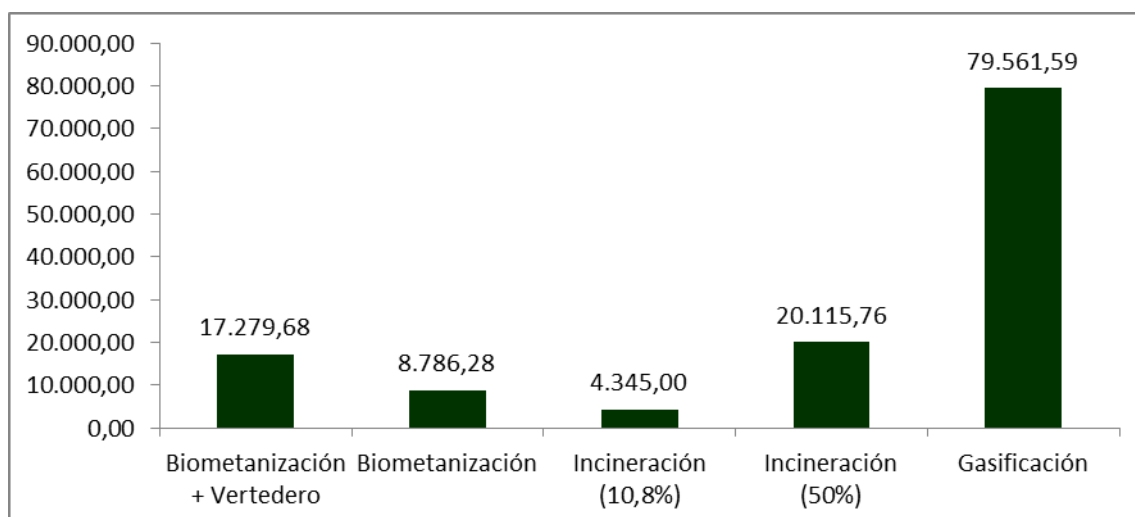


Figura. 49: Comparación de la potencia generada en cada caso de estudio (kW)

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

En la Tabla 46 se puede observar la energía que se inyecta en la red en cada planta, así como una aproximación de a cuántas viviendas se podría abastecer en un año con dicha potencia suponiendo que una casa consume al año 9.922kWh aproximadamente (una vivienda unifamiliar 15.513kWh y un piso 7.544kWh).

Tabla 46. Potencia inyectada en la red anualmente y cuántas viviendas se abastecen con dicha potencia

Biom+Verte	Incineración	Gasificación
103,85 GWh	128,44 GWh	537,9 GWh
10.466 viviendas	12.945 viviendas	54.212 viviendas

Por lo tanto, se podría abastecer una población total de 77.623 viviendas a partir sólo de tecnologías basadas en la recuperación energética de residuos. En la Figura. 50 se puede analizar cómo sería el reparto de las viviendas entre las distintas tecnologías.

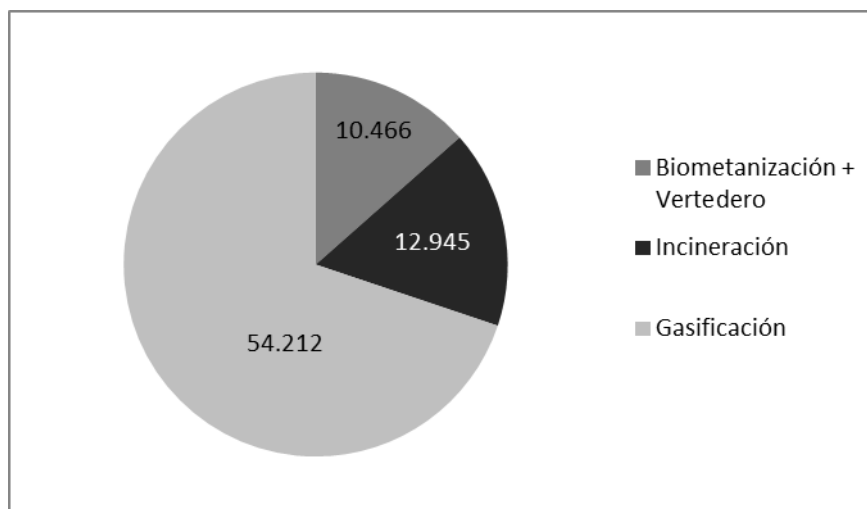


Figura. 50: Reparto de viviendas suministradas por tecnologías de valorización energética de residuos

Fuente: Elaboración propia



Comparativa del rendimiento de cada planta de valorización energética

Un parámetro realmente importante a la hora de comparar las plantas analizadas en este proyecto es el rendimiento que tiene cada una de ellas.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{output}}{\text{input}}$$

El output en este proyecto es la energía eléctrica que se genera y el input es el PCI de los residuos utilizados para valorización energética.

En el caso de la planta de biometanización el cálculo del rendimiento sería el siguiente.

$$\frac{10.300 \text{ KJ}}{\text{kg}} * \frac{300.000.000 \text{ kg}}{\text{año}} * 0,489 * \frac{1 \text{ año}}{7.512 \text{ horas}} * \frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ seg}} = 55.873,94 \text{ kW}$$

Durante los 7 primeros años la energía eléctrica generada es de 17.279,68kW, por lo tanto se obtiene el siguiente rendimiento.

$$\text{Rendimiento} = \frac{17.279,68}{55.873,94} = 30,93\%$$

Rendimiento planta biometanización + vertedero.....30,93%

Durante los 8 últimos años la energía eléctrica generada es de 8.786,28kW, por lo tanto se obtiene el siguiente rendimiento.

$$\text{Rendimiento} = \frac{8.786,28}{55.873,94} = 15,73\%$$

Rendimiento planta biometanización.....15,73%



En el caso de la planta de incineración el cálculo del rendimiento coincide con el rendimiento del ciclo Rankine.

Rendimiento planta incineración.....35,21%

En el caso de la planta de gasificación el cálculo del rendimiento sería el siguiente.

$$\frac{10.300 \text{ KJ}}{\text{kg}} * \frac{300.000.000 \text{ kg}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{7.512 \text{ horas}} * \frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ seg}} = 114.261,63 \text{ kW}$$

La energía eléctrica generada es de 79.444,44kw, por lo tanto se obtiene el siguiente rendimiento.

$$\text{Rendimiento} = \frac{79.444,44}{114.261,63} = 69,53\%$$

Rendimiento planta gasificación.....69,53%

Por tanto se puede concluir que la planta con mejor rendimiento es la planta de gasificación por plasma a pesar de que el PCI del gas de síntesis no sea muy elevado.

Reducción volumétrica de los RSU

Las tecnologías de incineración y gasificación de residuos sólidos urbanos consiguen una reducción volumétrica muy notable de los residuos entrantes en dichas plantas.



En las plantas incineradoras esta reducción es de 5 a 1, mientras que en las de gasificación es de 300 a 1.

Por tanto, se observa que con la gasificación se consigue una mayor reducción volumétrica de los residuos entrantes.

Generación de dioxinas y furanos/cenizas y escombros

Las dioxinas y furanos son sustancias tóxicas para los seres humanos que se generan cuando se produce una combustión incompleta de los residuos.

En las plantas de incineración esto puede suceder, emitiendo a la atmósfera dichas sustancias nocivas. Para evitar la generación de estos elementos se debe controlar la temperatura de combustión, así como utilizar sistemas filtrantes que impidan que esto suceda.

Por otro lado, en las plantas de gasificación, donde también se produce la combustión de RSU, esto no sucede gracias a las altas temperaturas que se utilizan en este caso.

Además en las incineradoras, en el fondo de los hornos utilizados para la combustión de residuos se precipitan restos de cenizas y escombros que deben ser tratados y trasladados a vertederos con el aumento de coste que esto implica. En las plantas de gasificación por plasma esto no sucede, ya que todos los productos obtenidos en este caso son aprovechables, como son el material vitrificable, los metales y el gas de síntesis.

Generación de malos olores

Las plantas de compostaje tienen una mala acogida social debido a los malos olores desprendidos. Estos olores se producen debido a la maduración incompleta del compost, que es un abono procedente del digestato que se origina en los digestores a partir de la materia orgánica.

En las plantas de gasificación no sucede esto debido a que todos los residuos son introducidos en el reactor gasificador y por tanto, no es necesario separar previamente la materia orgánica para generar dicho material.

La primera alternativa para llevar a cabo la fermentación del compost es hacerla en grandes hileras al aire libre, con todos los malestares que esto conlleva. Una posible solución para este inconveniente es realizar la fermentación del mismo en unos reactores cerrados. Esta acción presenta la ventaja de que los olores no se difunden por el aire llegando a núcleos urbanos donde puedan producir grandes molestias a los habitantes.

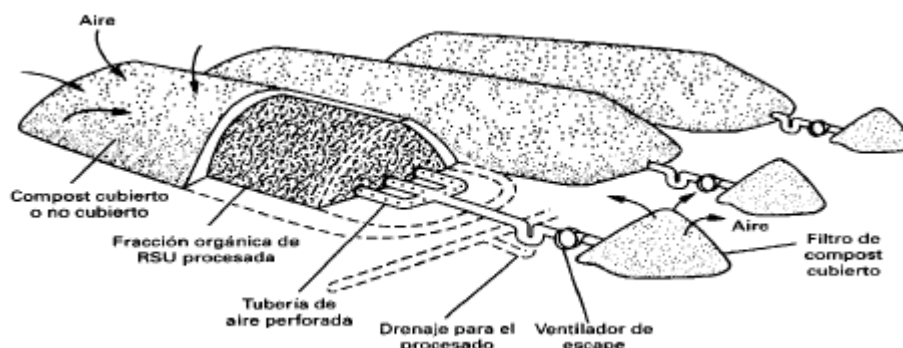


Figura. 51: Compostaje en hileras aireadas

Fuente: [33]

Otros problemas que puede conllevar el compost son la presencia de patógenos en el mismo y el hecho de que contenga metales, lo que hace que se trate de un abono de mala calidad.

Comparativa económica

A nivel económico se pueden realizar muchas comparaciones de las plantas estudiadas en este proyecto. A continuación se van a llevar a cabo las más relevantes.

En todas las comparativas económicas se va a considerar que el 40% de los residuos entrantes en la planta de incineración son utilizados para la valorización energética como se mencionó anteriormente.



Período de retorno

El período de retorno es el tiempo que debe pasar desde que se realiza la inversión inicial hasta que se empieza a conseguir beneficios de la planta en cuestión. Por tanto, es razonable que se desee que sea lo menor posible. En la Tabla 47 se muestra los períodos de retorno de las distintas plantas estudiadas.

Tabla 47: Comparativa de los períodos de retorno de cada planta de valorización energética

	Biomet + Vertede	Incineración	Gasificación
Período de retorno	9,86 años	9,53 años	10,25 años

Como se podía observar en el punto anterior, la planta de biometanización es la planta que genera menos energía eléctrica. A pesar de ello, los ingresos recibidos por el compost generado hacen que el período de retorno sea similar al de la planta incineradora.

Por otro lado, en el caso de la planta de gasificación la inversión inicial es muy grande así como los costes de mantenimiento, por ello también es coherente que sea el caso más desfavorable en este aspecto.

En la Figura. 52 se puede analizar la diferencia entre los período de retorno de los tres casos de estudio de este proyecto.

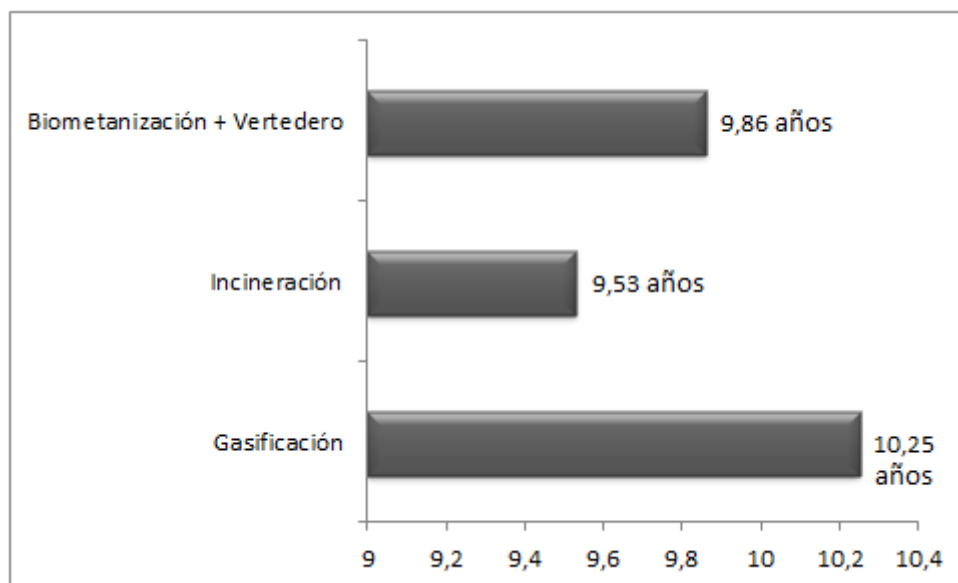


Figura. 52: Comparativa del período de retorno de las distintas tecnologías en años

Fuente: Elaboración propia

Inversión inicial y costes de operación

En cuanto a la inversión inicial, en la Tabla 48 se puede observar una comparativa de los tres casos de estudio.

Tabla 48: Inversiones iniciales de cada planta de valorización energética

	Biomet + Vertede	Incineración	Gasificación
Inversión inicial	41.661.00€	43.166.000€	200.000.000€

Como era de esperar, la mayor inversión inicial se realiza para el caso de la planta de gasificación debido al alto coste que tiene la maquinaria necesaria.

Las inversiones iniciales de la planta de biometanización y de incineración son bastante similares rondando los 42M€.

En la Figura. 53 se puede apreciar la diferencia entre las inversiones iniciales necesarias de manera gráfica.

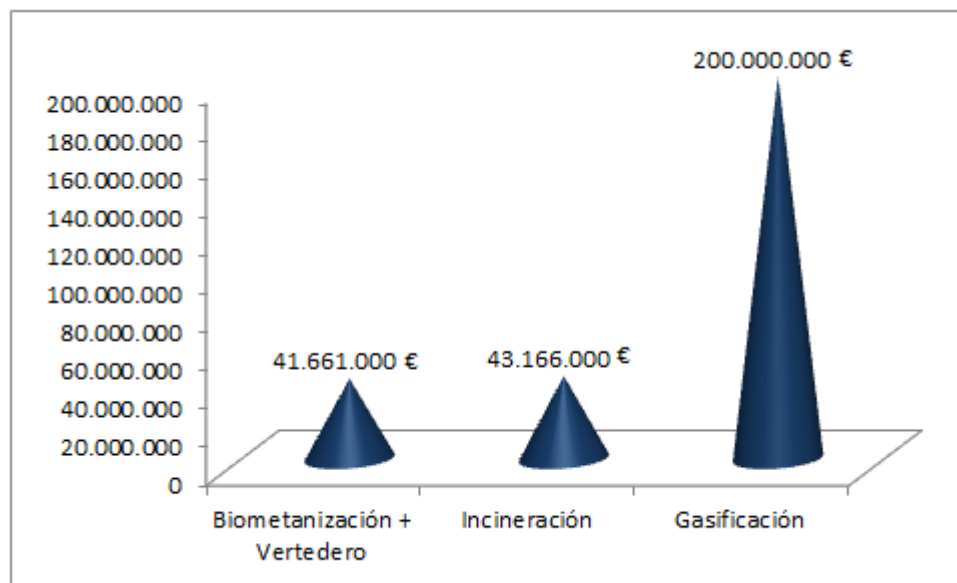


Figura. 53: Comparativa de las inversiones iniciales necesarias en los tres casos de estudio (€)

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 49 se pueden analizar los costes de operación del año 1 de cada caso de estudio. Estos costes anuales, al igual que los ingresos, son aumentados cada año por la inflación un 2%.

Tabla 49: Costes de operación y mantenimiento de cada planta de valorización energética

	Biomet + Vertede	Incineración	Gasificación
Costes de O & M	6.500.450€/año	9.429.330€/año	20.000.000€/año
	21,67€/ton	31,43€/ton	66,6€/ton

Los mayores costes de operación se tienen una vez más en la planta de gasificación debido a las altas cantidades de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del reactor gasificador, el coste del coque o el de la caliza.

En la Figura. 54 se puede observar la diferencia entre los costes de operación y mantenimiento de las tres plantas de valorización energética de residuos.

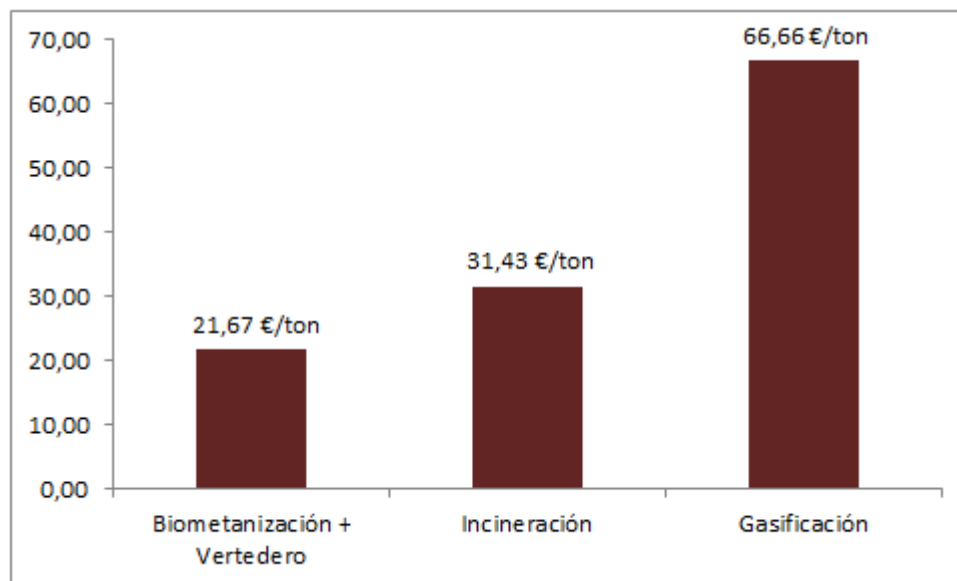


Figura. 54: Comparativa entre los costes de operación y mantenimiento (€/ton)

Fuente: Elaboración propia

TIR y VAN

La Tasa Interna de Retorno es la rentabilidad que ofrece una inversión. Para establecer si un proyecto es rentable o no, se debe comparar el TIR con el WACC (que es la tasa de descuento elegida), y en caso de que el TIR sea mayor que el WACC sí es aconsejable lanzar el proyecto.

Al ser el TIR una medida relativa de la rentabilidad se mide en % y será mejor cuanto mayor sea su valor. En la Tabla 50 se presentan los distintos TIR para los casos de estudio y se puede apreciar que una vez más la planta de gasificación a nivel económico es la más perjudicada.

Tabla 50: TIR de cada planta de valorización energética

	Biomat + Vertedero	Incineración	Gasificación
TIR	6,97%	8,42%	5,97%

Ya que gráficamente se analiza de una manera más rápida y fácil las comparaciones entre los tres casos de estudio, en la Figura. 55 se pueden observar los distintos TIR de cada caso mencionado.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

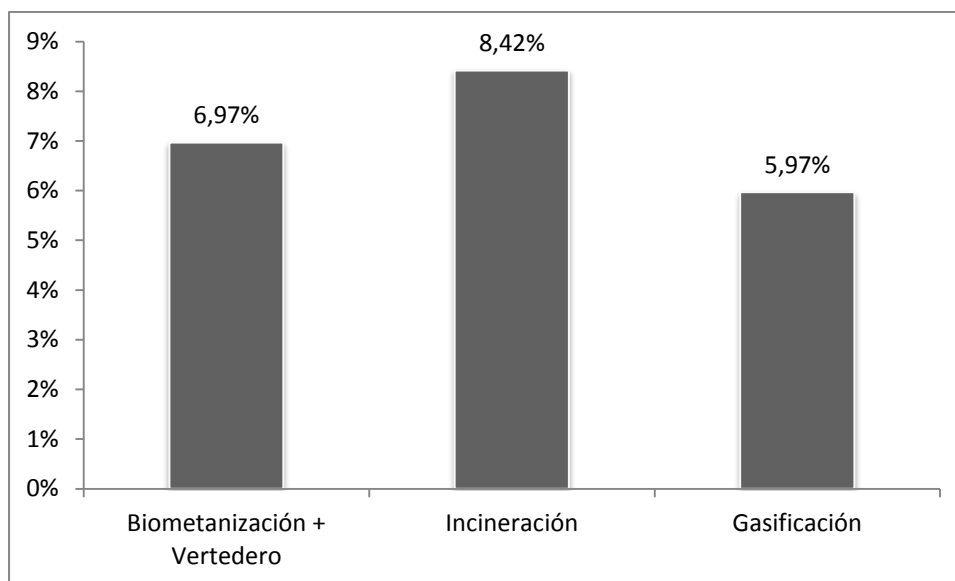


Figura. 55: Comparativa entre los distintos TIR de los tres casos de estudio

Fuente: Elaboración propia

El Valor Actual Neto es una medida que consiste en traer al presente todos los flujos de caja que existan en un proyecto, afectados por la tasa de descuento utilizada (el WACC mencionado anteriormente).

- Si el $VAN > 0$, el proyecto en cuestión aportará beneficios.
- Si el $VAN = 0$, el proyecto no generará ni beneficios ni pérdidas.
- Si el $VAN < 0$, el proyecto en cuestión generará pérdidas.

En este proyecto, se ha realizado para cada planta de valorización energética un estudio a partir de distintos valores de WACC. Sin embargo, para poder comparar los VAN de cada caso se ha establecido un valor del WACC de 6% obteniendo los Valores Actuales Netos mostrados en la Tabla 51.

Tabla 51: VAN de cada planta de valorización energética para un WACC del 6%

	Biomat + Vertede	Incineración	Gasificación
VAN	2.647.869,01 €	8.485.958,77 €	-418.496,05 €

Cuanto mayor sea el VAN de un proyecto más rentable resulta, por lo que en este caso la planta de gasificación sería el caso menos rentable y la planta de



incineración el más rentable de todos, como se puede observar de manera rápida en la Figura. 56.

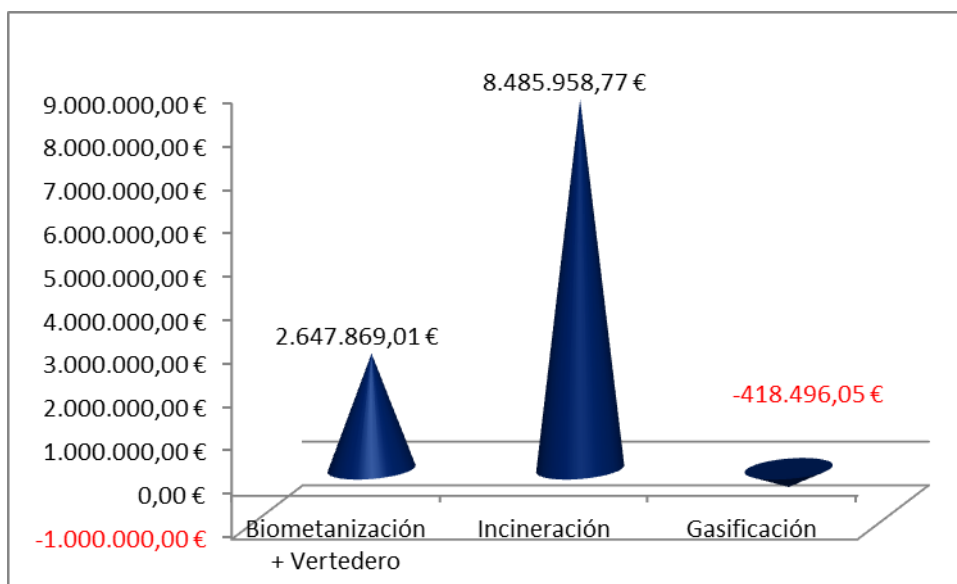


Figura. 56: VAN de cada planta de valorización energética de residuos para una tasa de retorno de 6%

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Capítulo VIII. Análisis de sostenibilidad



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se va a desarrollar un análisis de sostenibilidad en cuanto a valorización energética de residuos se refiere, así como se va a establecer qué tecnología es la óptima según este criterio.

Análisis de sostenibilidad

A la hora de estudiar cualquier técnica de valorización energética de residuos sólidos urbanos, se debe conceder un papel protagonista a la sostenibilidad, definida como la *capacidad de satisfacer las necesidades presentes, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas*.

A lo largo de los últimos años se han llevado a cabo técnicas en el tratamiento de residuos muy poco sostenibles ya sea por producir contaminación atmosférica, de aguas, de suelos o introducir sustancias tóxicas en cadenas tróficas. Esta contaminación va creando una situación muy perjudicial a lo largo de un proceso largo y lento en el tiempo, por lo que se debe atajar cuanto antes y buscar medidas que impidan que el tratamiento de residuos realizado en la actualidad, perjudique de ninguna manera a las generaciones futuras.

Los conceptos de eficiencia y sostenibilidad están estrechamente relacionados, ya que utilizando un símil, se podría considerar que la primera es “aumentar el tamaño del pastel” y la segunda “distribuirlo de forma más justa”.

Se pueden definir dos tipos de sostenibilidad: la sostenibilidad débil y la sostenibilidad fuerte. La primera se basa en que todos los tipos de capital son sustituibles y por tanto, permite que unos se agoten siempre que otros crezcan en la misma proporción. La sostenibilidad fuerte, sin embargo, establece que los capitales son complementarios y se basa en los siguientes principios de Daly:

- Las tasas de usos de renovables no pueden exceder a sus tasas de regeneración.
- Las tasas de uso de los recursos no renovables no pueden exceder al desarrollo de sustitutos renovables.
- Las tasas de emisión de contaminantes no pueden exceder la capacidad de absorción del medio.

El último punto se puede relacionar con la contaminación atmosférica que se puede generar cuando no se limpian correctamente los gases desprendidos por las chimeneas de las plantas de incineración o cuando suceden fugas en plantas de



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

biometanización. En los vertederos pueden ocurrir diversos tipos de contaminación, ya sea atmosférica debido a los gases expulsados, contaminación de los suelos debido a infiltraciones de lixiviados por una mala impermeabilización del terreno o intoxicación de animales que logren llegar al interior del vertedero. Por tanto, se debe prestar especial atención al hecho de que las tasas de emisión de contaminantes que se expulsan al medio sean inferiores a la capacidad de absorción del mismo. En caso contrario, estaremos provocando una situación perjudicial en las generaciones futuras.

La sostenibilidad ecológica se basa precisamente en mantener la naturaleza impoluta, y esto es algo que no solo debe preocupar a las grandes plantas que se encargan del tratamiento de residuos, sino también a cada ciudadano en su vida diaria.

Es por esto por lo que se debe concienciar de que es importante mantener limpia la naturaleza y recoger todos los residuos que se generen. Se debe reciclar todo lo posible en cada domicilio para hacer un poco más sencillo el tratamiento posterior de cada residuo y alargar la vida de aquellos que puedan ser utilizados de nuevo. Generar la menor cantidad de residuos posible y así intentar que las generaciones futuras puedan disfrutar también de un mundo limpio y cuidado. Esta preocupación por la naturaleza es algo que se debe inculcar desde pequeños, pues solo así se crece con este compromiso interiorizado y bien aprendido.

Dentro de los países europeos, Austria, Alemania y Bélgica son los países más concienciados y sus cifras de residuos reciclados y cantidad de basuras tratadas envidiables. Mientras tanto España va por buen camino aunque todavía queda mucho por hacer.

Dentro de las cuatro técnicas analizadas en este proyecto, se puede concluir que la planta de gasificación por plasma es la más sostenible. Esto se debe a que no se genera ninguna sustancia contaminante, sino que los residuos son utilizados en su totalidad en la entrada de la planta para finalmente generar metales, una sustancia vitrificable que puede ser útil en la construcción de carreteras y un gas de síntesis que no posee sustancias nocivas en cantidades perjudiciales.

Es cierto que esta técnica todavía es muy incipiente, por lo que resulta muy costosa y falta tener más experiencia de la misma, pero se espera que sea la técnica que se utilice en un futuro cercano para el tratamiento de residuos, pues presenta múltiples ventajas en comparación con el resto de opciones de tratamiento de residuos sólidos urbanos analizadas en este proyecto.



Capítulo IX. Análisis de sensibilidad



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



En este capítulo se va a realizar un análisis tras variar algunos datos que han sido considerados, hasta ahora, fijos en este proyecto.

Análisis de sensibilidad

En el funcionamiento diario de las plantas de valorización energética de residuos hay muchos parámetros que varían constantemente debido a su propia naturaleza. Cualquier estudio económico posee un grado de incertidumbre, debido a que están basados en hechos futuros, que se puede mitigar realizando un análisis de sensibilidad.

En este proyecto existen ciertas variables que se han considerado fijas, pero resultaría muy interesante comprobar el impacto de la variación de dichos parámetros en el resultado final.

Se ha considerado el estudio de las siguientes variables:

- Variación en la cantidad de residuos sólidos urbanos entrantes en las plantas de tratamiento.
- Variación del canon cedido por el ayuntamiento a este tipo de instalaciones por tonelada de residuo.
- Variación del precio de la potencia entregada a la red.
- Variación de la prima recibida

Variación en la cantidad de RSU entrantes en las plantas de tratamiento

En el presente proyecto, para la realización de todos los cálculos pertinentes, se ha considerado una cantidad total de entrada de RSU de 300.000 toneladas anuales. A continuación se va a comprobar cómo variaría el VAN en cada caso de estudio, considerando una tasa de retorno de un 6%, al variar la cantidad de RSU entrantes.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

En el caso de la planta de biometanización, al variar las toneladas de RSU entrantes también se modifican los costes variables, así como las cantidades generadas de compost, materiales reciclados y materiales férreos. Todo esto concluye con un gran cambio en los ingresos a la planta. Se puede comprobar cómo varían estos parámetros al modificar las toneladas de RSU entrantes en la Tabla 52.

Tabla 52. Variaciones de algunos parámetros de la planta de biometanización intrínsecos a la modificación de la cantidad de toneladas de RSU entrantes anualmente

	220	240	260	280	300
Compost (T)	30.122,4	31.491,6	35.599,2	38.337,6	41.076
Mat.reciclado (T)	83.160	86.940	98.280	105.840	113.400
Mat.férreos (T)	5.500	5.750	6.500	7.000	7.500
CV (€)	2.317.663,3	2.423.011,6	2.739.056,6	2.949.753,3	3.160.450

Las variaciones del VAN frente a la cantidad de RSU entrantes en la planta se observa en la Figura. 57. Resulta interesante observar que la cantidad de toneladas mínima para que el proyecto resulte rentable con una tasa de retorno de 6% es de 287,4 miles de toneladas.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

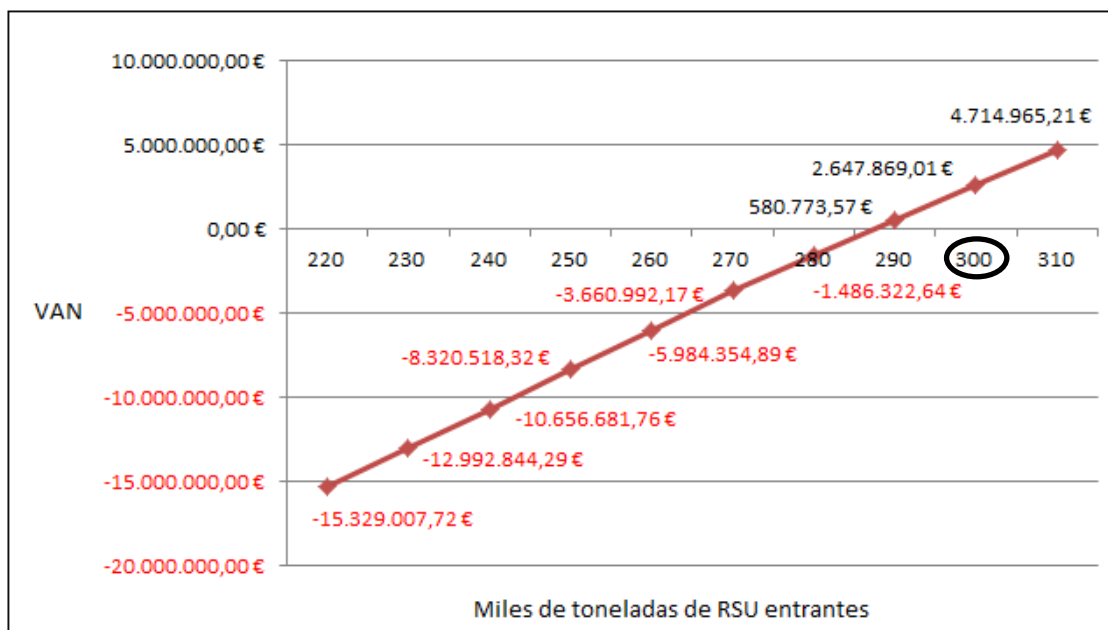


Figura. 57: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar las toneladas de RSU entrantes

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la planta de incineración, al variar las toneladas de RSU entrantes también se han modificado los costes variables, así como las cantidades de materia orgánica, materiales reciclados y materiales férreos generados. Todo esto concluye con un gran cambio en los ingresos a la planta. Se puede comprobar cómo varían estos parámetros al modificar las toneladas de RSU entrantes en la Tabla 53.

Tabla 53. Variaciones de algunos parámetros de la planta incineradora intrínsecos a la modificación de la cantidad de toneladas de RSU entrantes anualmente

	220	240	260	280	300
Mat.reciclado (T)	83.160	86.940	98.280	105.840	113.400
Mat.férreos (T)	5.500	5.750	6.500	7.000	7.500
Mat.orgánica	30.122,4	31.491,6	35.599,2	38.337,6	41.076
CV (€)	5.133.333,3	5.600.000	6.066.666,6	6.533.333,3	7.000.000



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Las variaciones del VAN frente a la cantidad de RSU entrantes en la planta se observa en la Figura. 58. Resulta interesante observar que la cantidad de toneladas mínima para que el proyecto resulte rentable con una tasa de retorno de 6% es de 258,2 miles de toneladas.

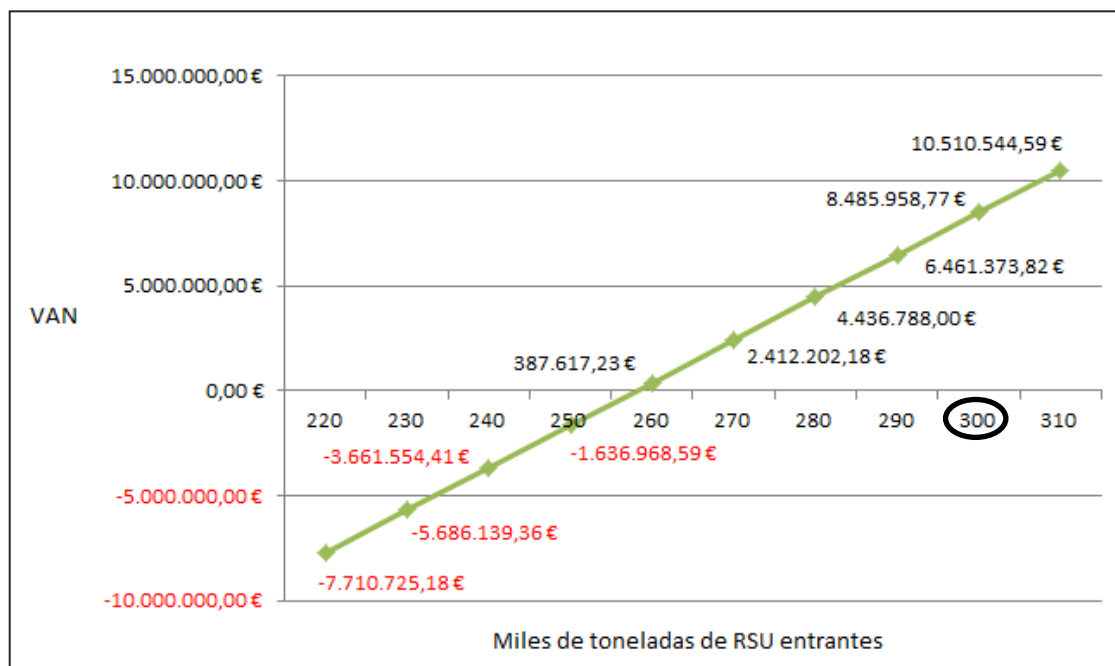


Figura. 58: Variación del VAN en la planta de incineración al variar las toneladas de RSU entrantes

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la planta de gasificación, al variar las toneladas de RSU entrantes también se han modificado los costes variables, así como las cantidades de material vitrificado y metales generados. Todo esto concluye con un gran cambio en los ingresos a la planta. Se puede comprobar cómo varían estos parámetros al modificar las toneladas de RSU entrantes en la Tabla 54.

Tabla 54. Variaciones de algunos parámetros de la planta de gasificación intrínsecos a la modificación de la cantidad de toneladas de RSU entrantes anualmente

	260	280	300	320	340
Mat.vitrificado (T)	91.000	98.000	105.000	112.000	119.000
Metales (T)	26.000	28.000	30.000	32.000	34.000
CV (€)	13.000.000	14.000.000	15.000.000	16.000.000	17.000.000



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Las variaciones del VAN frente a la cantidad de RSU entrantes en la planta se observa en la Figura. 59. Resulta interesante observar que la cantidad de toneladas mínima para que el proyecto resulte rentable con una tasa de retorno de 6% es de 300,7 miles de toneladas.

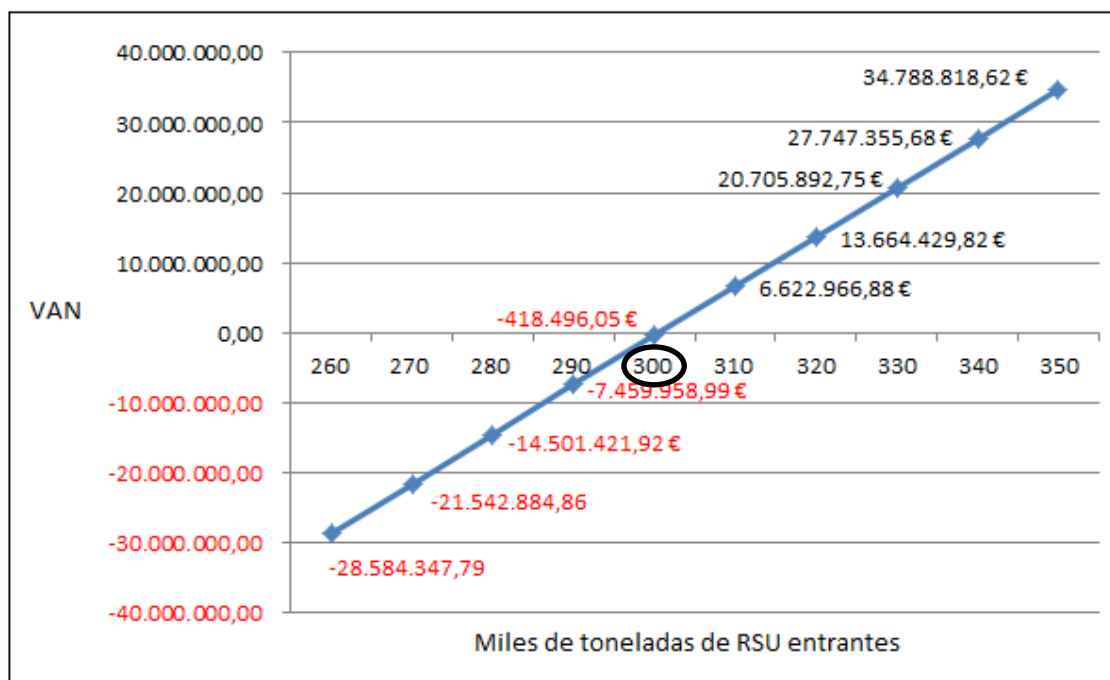


Figura. 59: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar las toneladas de RSU entrantes

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, en los tres casos de estudio se produce un fuerte cambio en el valor del VAN dependiendo de la cantidad de RSU que se introduce. Se puede concluir que esta variable es determinante para comprobar si el proyecto resulta rentable o no. En la Figura. 60 se muestra una gráfica en la que se pueden analizar las tres plantas conjuntamente para realizar una mejor comparación.

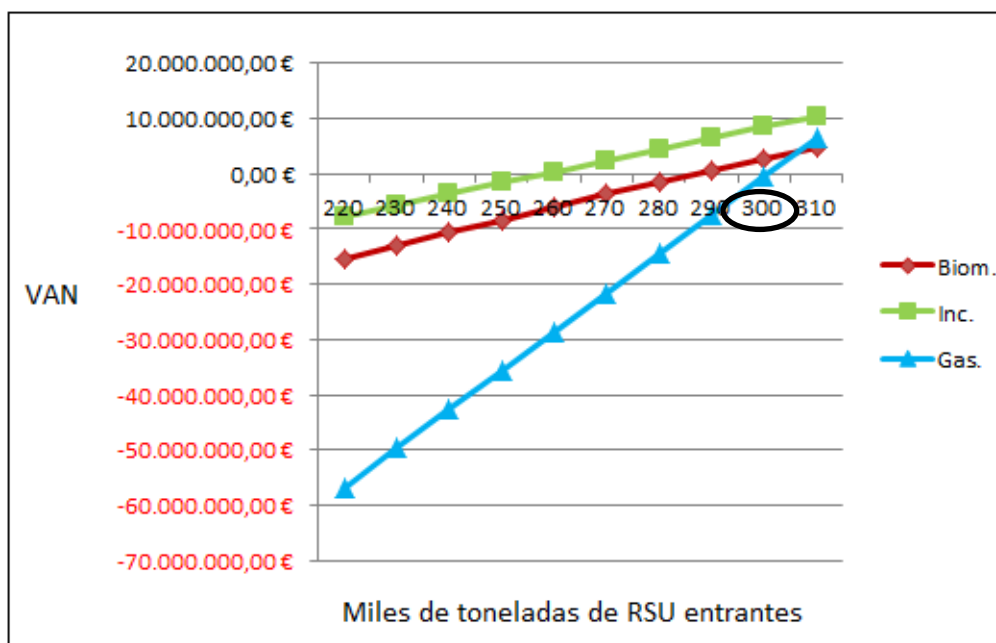


Figura. 60. Comparativa de las tres plantas al modificar la cantidad de RSU entrantes en las mismas

Fuente: Elaboración propia

Variación del canon cedido por el ayuntamiento

El canon que cede el ayuntamiento a las plantas de tratamiento de RSU depende principalmente de aspectos políticos, por lo que en la realidad es un factor que sufre bastantes cambios. En el presente proyecto se ha considerado un canon fijo de 15€/ton de RSU tratada, sin embargo, a continuación se va a comprobar qué sucede cuando dicho ingreso varía.

En todos los casos mostrados a continuación, el único cambio realizado ha sido el valor del canon a partir de una cantidad de RSU entrantes de 300.000 toneladas anuales y una tasa de retorno de un 6%.

En la Figura. 61 se puede observar cómo varía el VAN en función de la variación del canon en la planta de biometanización. Es interesante remarcar que el valor mínimo de dicho canon para que el proyecto resulte rentable es de 13,9€/ton de RSU.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

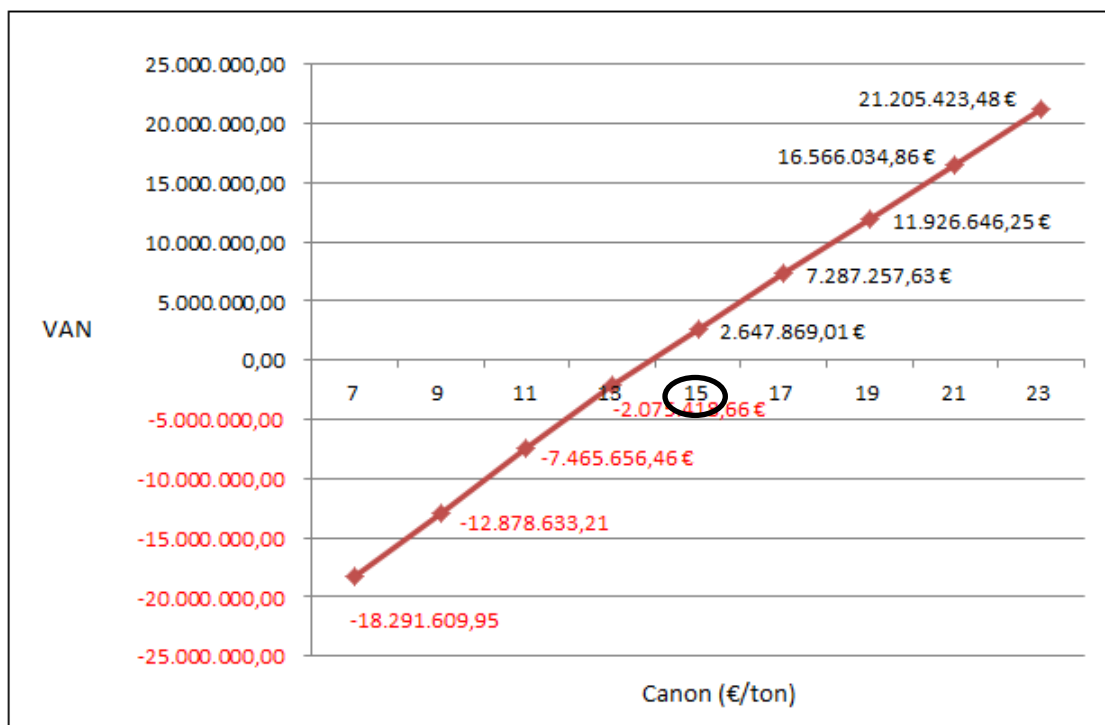


Figura. 61: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar el canon cedido por el ayuntamiento

Fuente: Elaboración propia

En la Figura. 62 se puede observar cómo varía el VAN en función de la variación del canon en la planta de incineración. Es interesante remarcar que el valor mínimo de dicho canon para que el proyecto resulte rentable es de 11,8€/ton de RSU.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

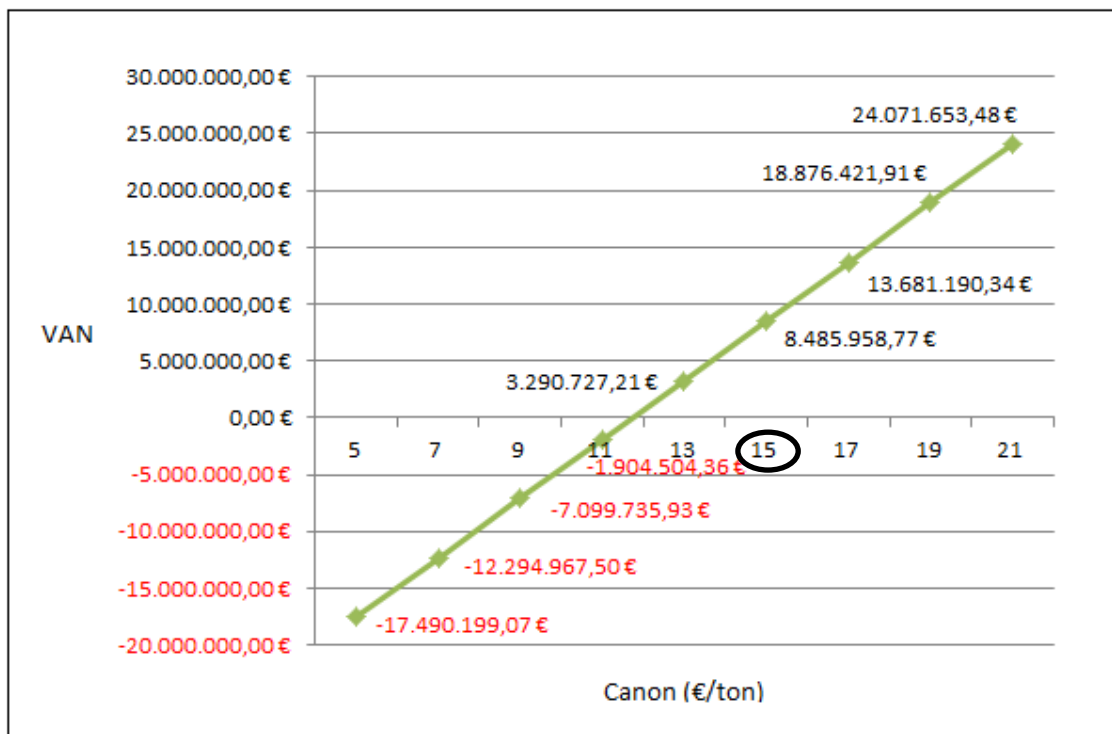


Figura. 62: Variación del VAN en la planta de incineración al variar el canon cedido por el ayuntamiento

Fuente: Elaboración propia

En la Figura. 63 se puede observar cómo varía el VAN en función de la variación del canon en la planta de gasificación. Es interesante remarcar que el valor mínimo de dicho canon para que el proyecto resulte rentable es de 15,1€/ton de RSU.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

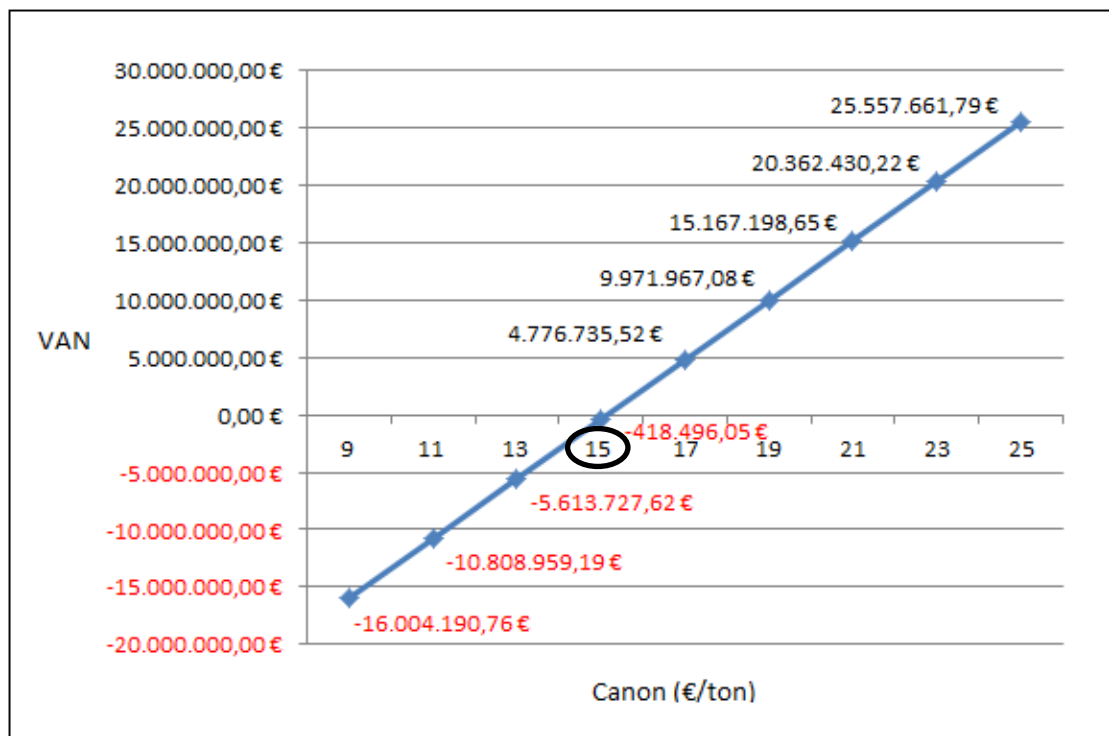


Figura. 63: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar el canon cedido por el ayuntamiento

Fuente: Elaboración propia

Como se puede comprobar en todos los casos la variación del canon produce un gran cambio en la rentabilidad de las plantas. Se puede concluir que esta variable es determinante para comprobar si el proyecto resulta rentable o no.

Este hecho era esperable ya que se trata de uno de los ingresos más importantes en cada escenario junto con el de la potencia entregada a la red. En la Figura. 64 se muestra una gráfica en la que se pueden analizar las tres plantas conjuntamente para realizar una mejor comparación.

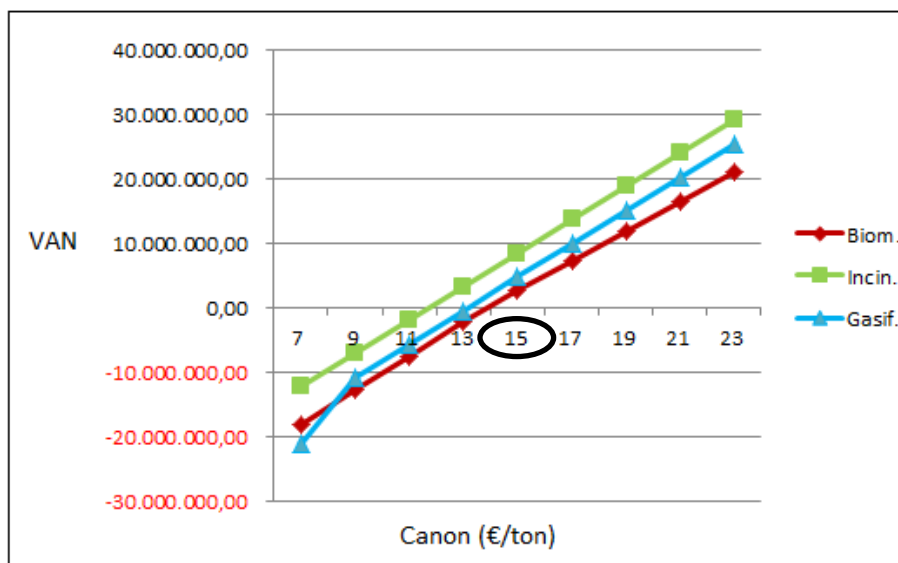


Figura. 64: Comparativa de las tres plantas al modificar el canon cedido por el ayuntamiento

Fuente: Elaboración propia

Variación del precio de la potencia entregada a red

En el presente proyecto se han realizado todos los cálculos pertinentes considerando el precio de la potencia entregada a la red fijo con un valor de 0,05€/kWh. Sin embargo, en la vida real este parámetro puede variar, por lo que resulta interesante comprobar qué sucede al modificarlo.

En este caso, de nuevo sólo se ha modificado el valor del precio de la potencia entregada a la red, por lo que variarán los ingresos en cada una de las plantas analizadas.

En la Figura. 65 se puede comprobar cómo varía el VAN de la planta de biometanización al modificar el precio de la potencia entregada a la red. Resulta interesante mencionar que el valor mínimo de dicho precio con el cual el proyecto resulta rentable es de 0,045.

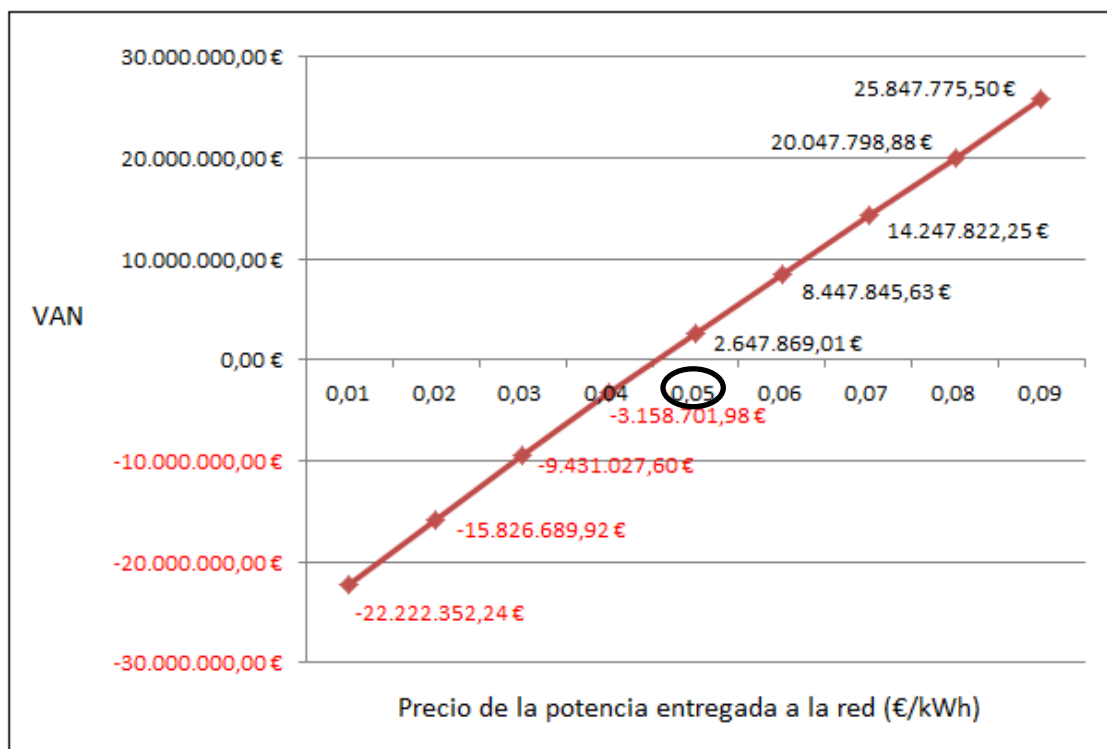


Figura. 65: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar el precio de la potencia entregada a la red

Fuente: Elaboración propia

En la Figura. 66 se puede comprobar cómo varía el VAN de la planta de incineración al modificar el precio de la potencia entregada a la red. Resulta interesante mencionar que el valor mínimo de dicho precio con el cual el proyecto resulta rentable es de 0,042.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

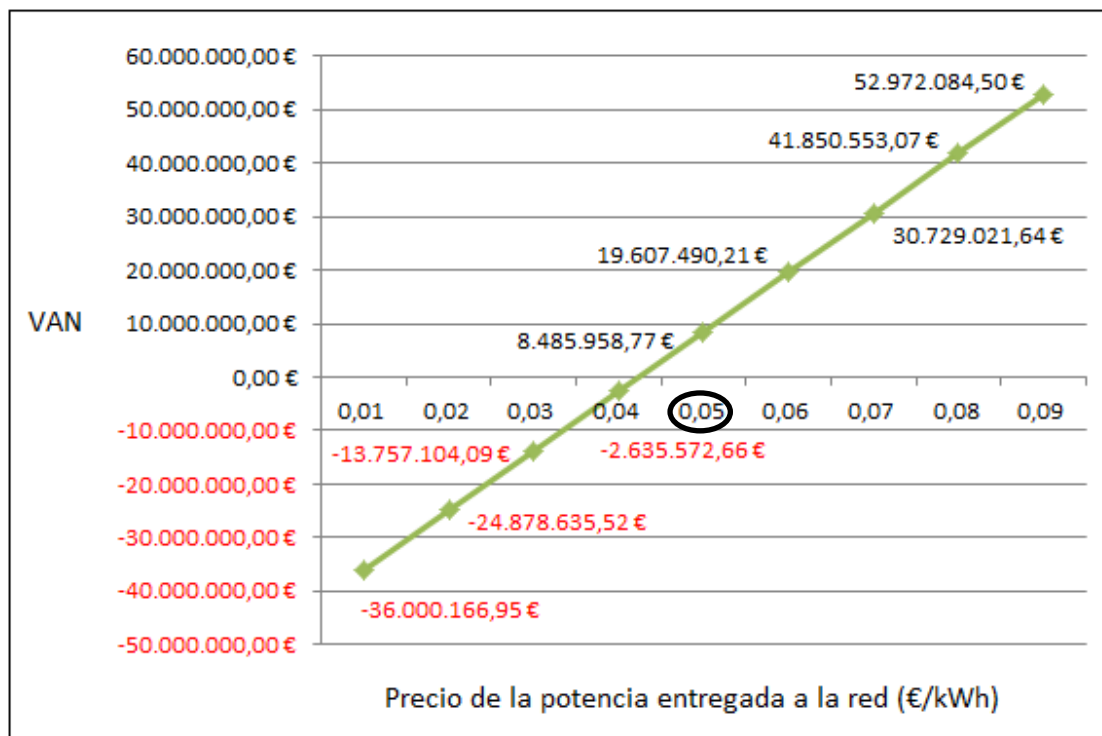


Figura. 66: Variación del VAN en la planta de incineración al variar el precio de la potencia entregada a la red

Fuente: Elaboración propia

En la Figura. 67 se puede comprobar cómo varía el VAN de la planta de gasificación al modificar el precio de la potencia entregada a la red. Resulta interesante mencionar que el valor mínimo de dicho precio con el cual el proyecto resulta rentable es de 0,051.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

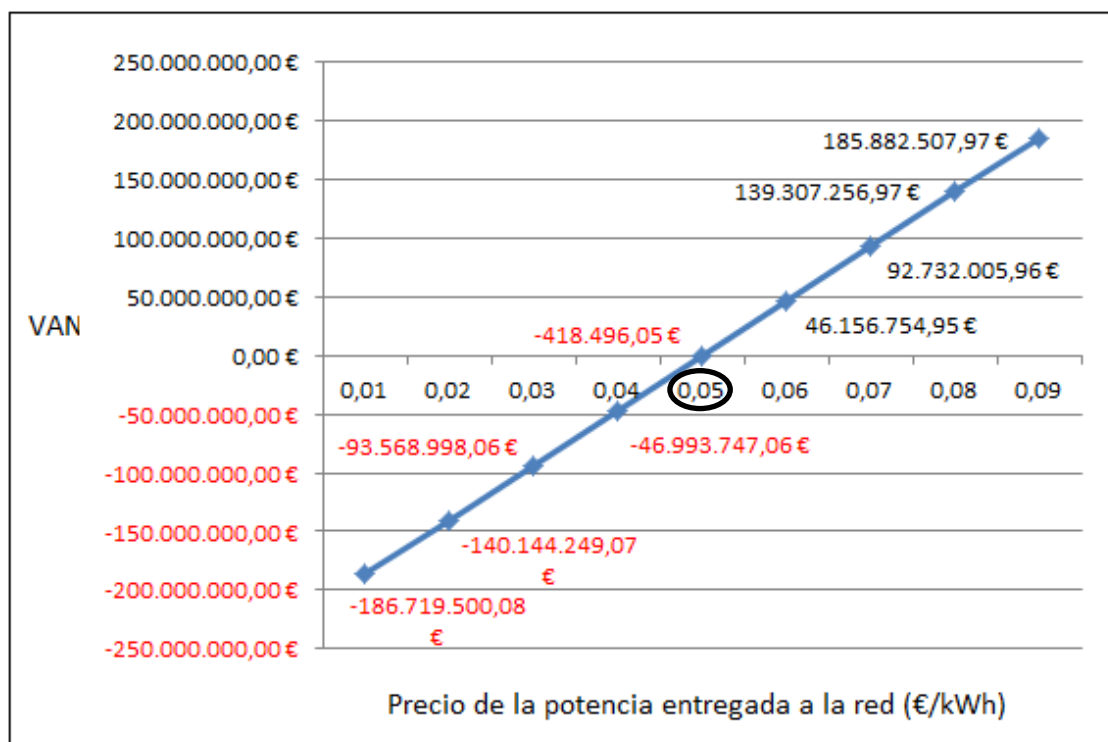


Figura. 67: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar el precio de la potencia entregada a la red

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, en los tres casos de estudio se produce un fuerte cambio en el valor del VAN dependiendo del precio de la potencia entregada a la red que se utilice. Se puede concluir que esta variable es determinante para comprobar si el proyecto resulta rentable o no.

También es importante recalcar que el escenario de la planta de gasificación es el que más sufre los cambios en el precio de la potencia entregada a la red, pues es la planta que más potencia entrega. A continuación se encuentra la planta de incineración y finalmente la de biometanización. En la Figura. 68 se muestra una gráfica en la que se pueden analizar las tres plantas conjuntamente para realizar una mejor comparación.

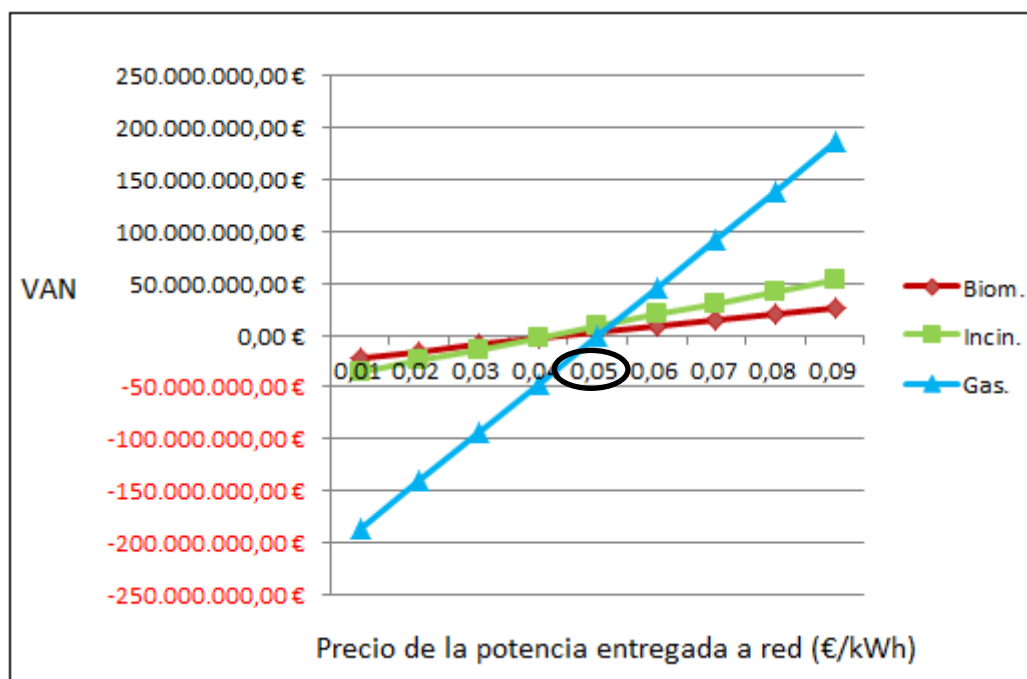


Figura. 68: Comparativa de las tres plantas al modificar el precio de la potencia entregada a red

Fuente: Elaboración propia

Variación de la prima

En el presente proyecto se ha considerado una prima fija de valor 0,01€/kWh sobre la potencia total generada. En los últimos años se han producido grandes cambios en cuanto a las primas a las renovables se refiere, disminuyéndolas sucesivamente tras el boom que hubo en la generación de energías renovables en el año 2007.

Es por esto, que se considera de gran interés comprobar cómo varía la rentabilidad del proyecto en el caso de que dicha prima sea modificada.

En la Figura. 69 se puede comprobar cómo varía el VAN de la planta de biometanización al modificar la prima recibida. Resulta interesante mencionar que el valor mínimo de dicha prima con el cual el proyecto resulta rentable es de 0,0065€/kWh.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

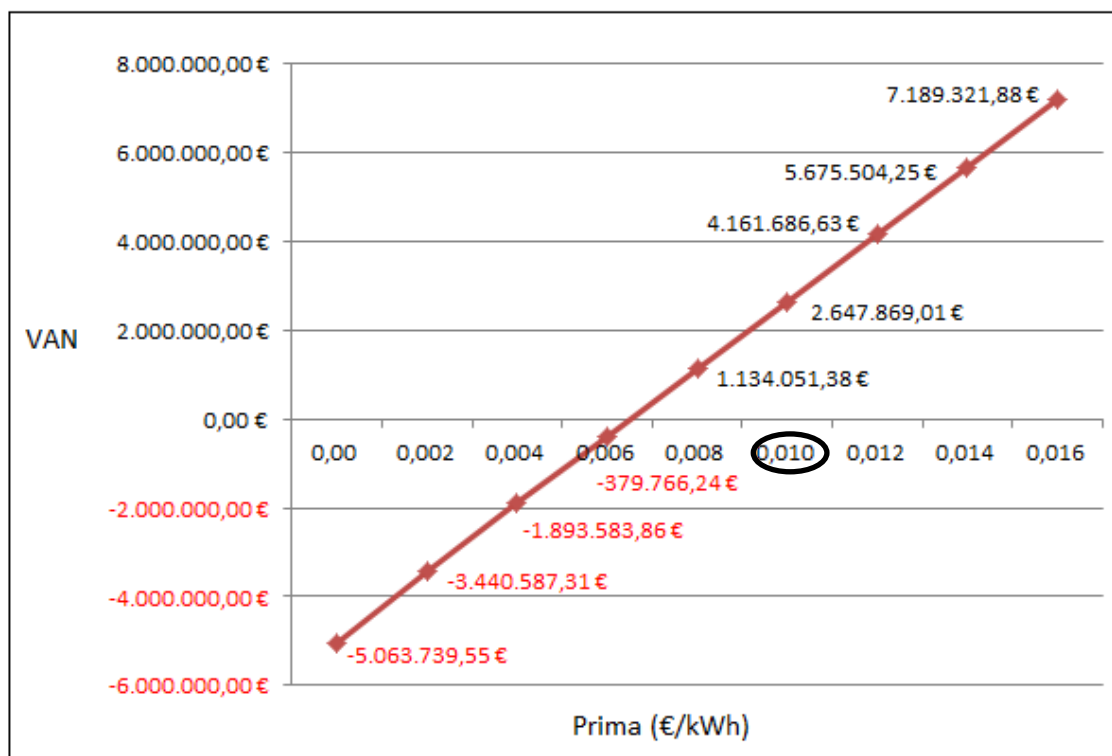


Figura. 69: Variación del VAN en la planta de biometanización al variar la prima recibida

Fuente: Elaboración propia

En la Figura. 70 se puede comprobar cómo varía el VAN de la planta de incineración al modificar la prima recibida. Resulta interesante mencionar que el valor mínimo de dicha prima con el cual el proyecto resulta rentable es de 0,0035€/kWh.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

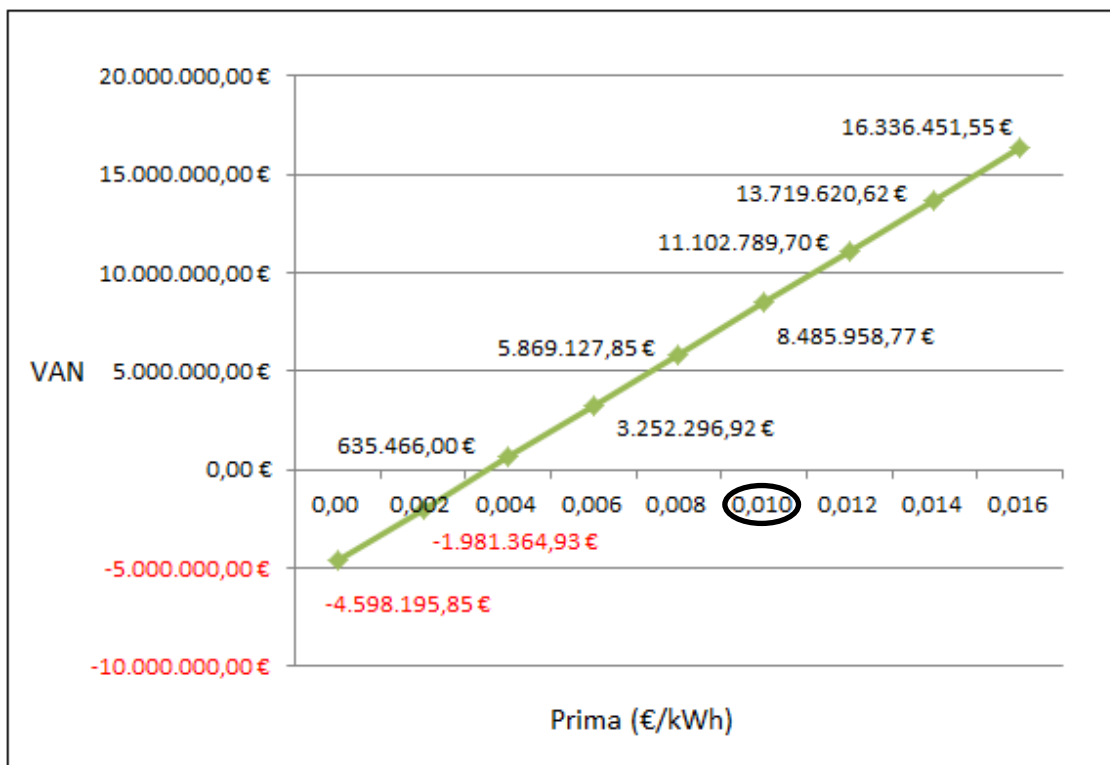


Figura. 70: Variación del VAN en la planta de incineración al variar la prima recibida

Fuente: Elaboración propia

En la Figura. 71 se puede comprobar cómo varía el VAN de la planta de gasificación al modificar la prima recibida. Resulta interesante mencionar que el valor mínimo de dicha prima con el cual el proyecto resulta rentable es de 0,0101€/kWh.

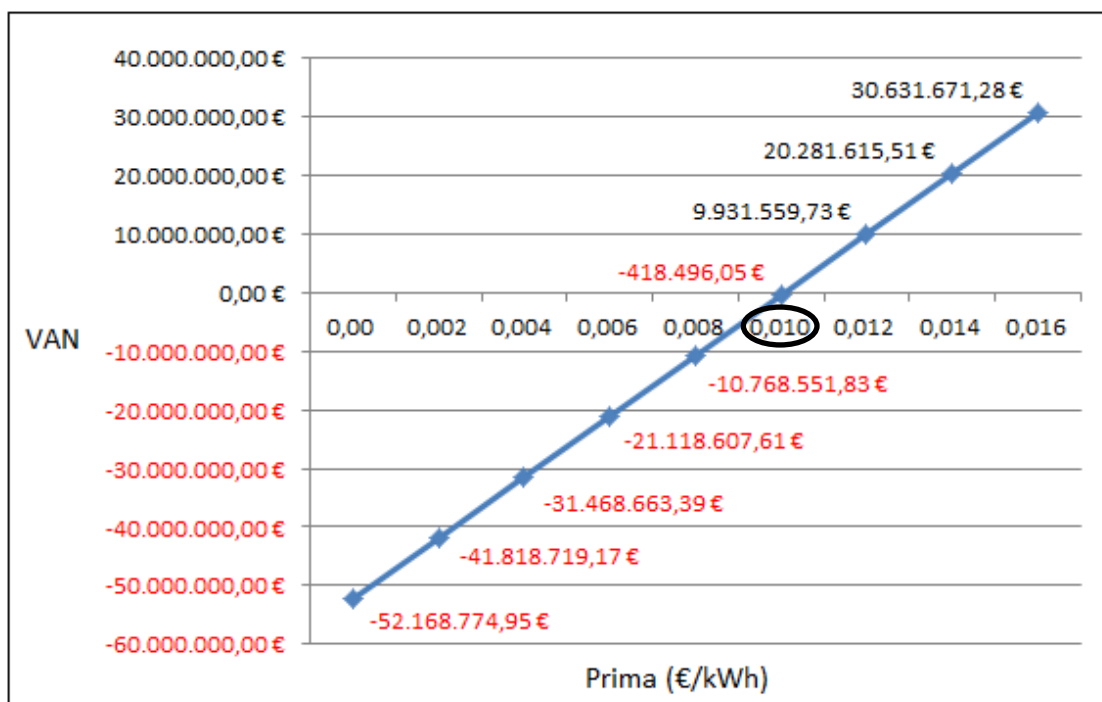


Figura. 71: Variación del VAN en la planta de gasificación al variar la prima recibida

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, en los tres casos de estudio se produce un fuerte cambio en el valor del VAN dependiendo de la prima recibida. Se puede concluir que esta variable es determinante para comprobar si el proyecto resulta rentable o no.

También es importante recalcar que, al igual que en el caso anterior, el escenario de la planta de gasificación es el que más sufre los cambios en la prima recibida, pues es la planta que más potencia genera. A continuación se encuentra la planta de incineración y finalmente la de biometanización. En la Figura. 72 se muestra una gráfica en la que se pueden analizar las tres plantas conjuntamente para realizar una mejor comparación.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

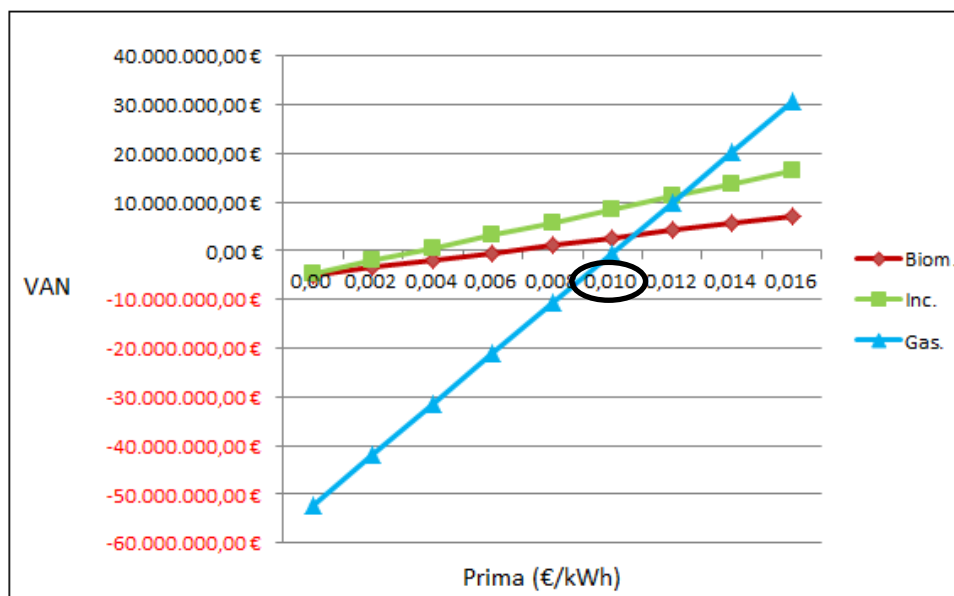


Figura. 72: Comparativa de las tres plantas al modificar la prima recibida

Fuente: Elaboración propia

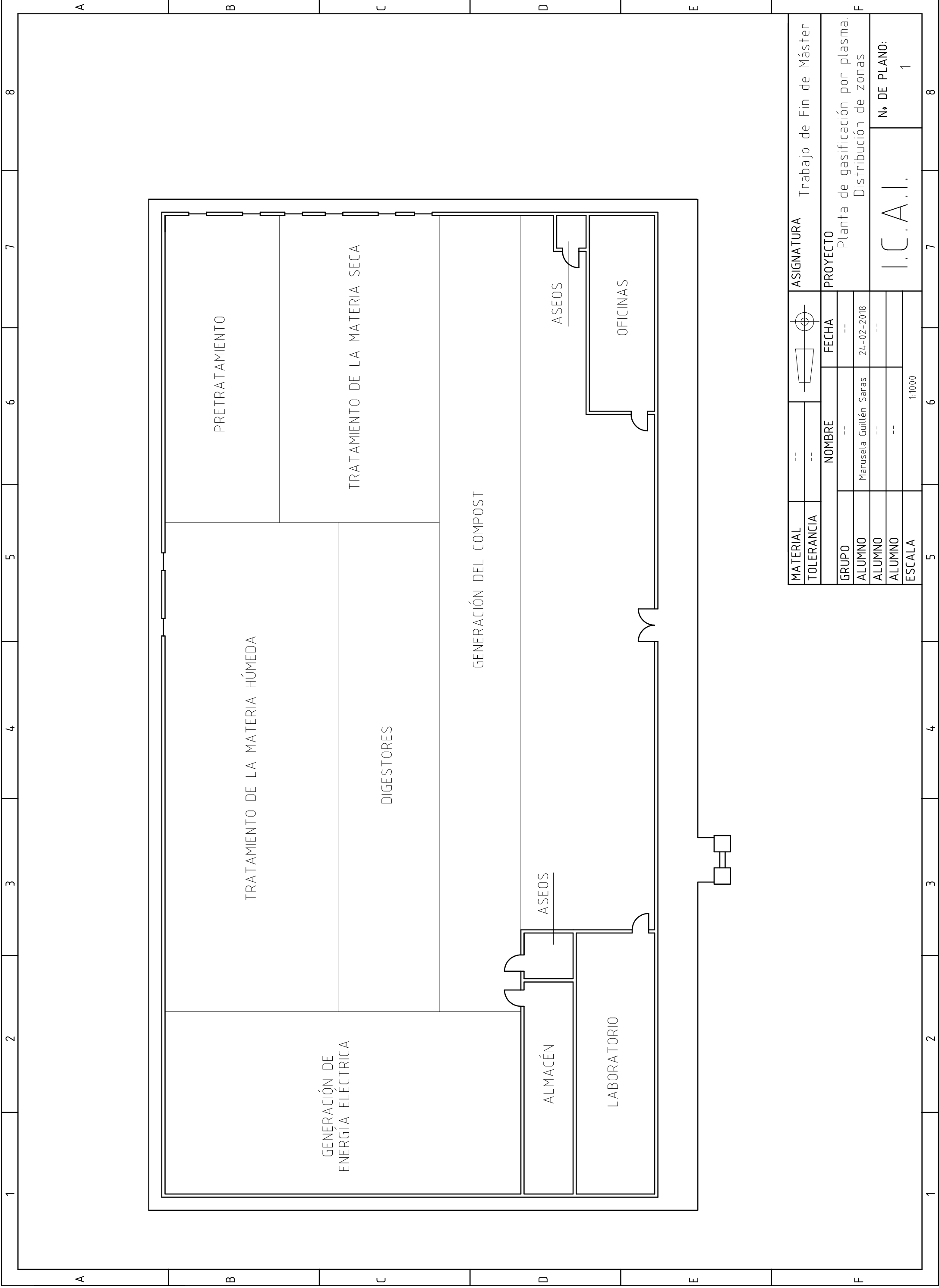


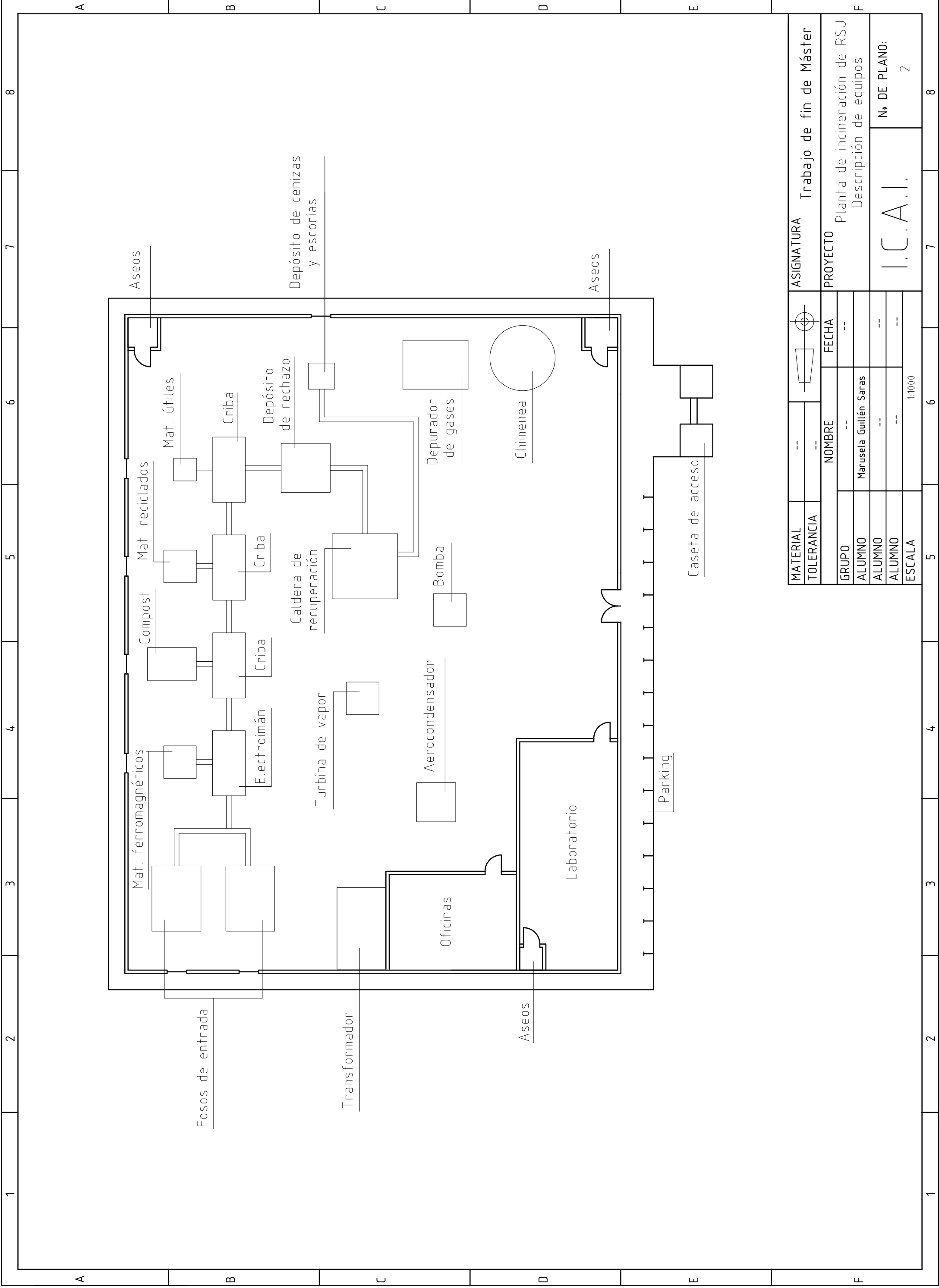
UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Capítulo X. Planos



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL





MATERIAL	--			ASIGNATURA		Trabajo de fin de Máster	
TOLERANCIA	--			PROYECTO		Planta de incineración de RSU. Descripción de equipos	
GRUPO	--			FECHA		--	
ALUMNO	Marusela Guillén Saras						
ALUMNO	--						
ALUMNO	--					N.º DE PLANO: 2	
ESCALA	1:1000					I.C.A.I.	



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Capítulo XI. Anexos



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Desglose del Excel de viabilidad económica de la planta de biometanización

	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos		12.941.292,83	13.200.118,69	13.464.121,06	13.733.403,48	14.008.071,55	14.288.232,98	9.421.157,87
Costes		6.500.450,00	6.630.459,00	6763068,18	6898329,544	7.036.296,13	7.177.022,06	7.170.450,00
Depreciación		1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67
EBIT		4.614.378,17	4.743.195,02	4.874.588,22	5.008.609,27	5.145.310,75	5.284.746,26	424.243,21
Tax (25%)		1.153.594,54	1.185.798,76	1.218.647,05	1.252.152,32	1.286.327,69	1.321.186,57	106.060,80
OCF		5.287.248,29	5.383.860,93	5.482.405,83	5.582.921,62	5.685.447,73	5.790.024,36	2.144.647,07
CS	-41.661.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FCF	-41.661.000,00	5.287.248,29	5.383.860,93	5.482.405,83	5.582.921,62	5.685.447,73	5.790.024,36	2.144.647,07

8	9	10	11	12	13	14	15
9.609.581,03	9.801.772,65	9.997.808,10	10.197.764,27	10.401.719,55	10.609.753,94	10.821.949,02	11.038.388,00
7.313.859,00	7.460.136,18	7.609.338,90	7.761.525,68	7.916.756,20	8.075.091,32	8.236.593,15	8.401.325,01
1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67	1.826.464,67
469.257,36	515.171,80	562.004,53	609.773,92	658.498,69	708.197,96	758.891,21	810.598,33
117.314,34	128.792,95	140.501,13	152.443,48	164.624,67	177.049,49	189.722,80	202.649,58
2.178.407,69	2.212.843,52	2.247.968,07	2.283.795,10	2.320.338,68	2.357.613,13	2.395.633,07	2.434.413,41
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15.047.200,00
2.178.407,69	2.212.843,52	2.247.968,07	2.283.795,10	2.320.338,68	2.357.613,13	2.395.633,07	17.481.613,41



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Desglose del Excel de viabilidad económica de la planta de incineración

	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos		14.014.613,13	14.294.905,39	14.580.803,50	14.872.419,57	15.169.867,96	15.473.265,32	15.782.730,62
Costes		9.429.330,00	9.617.916,60	9.810.274,93	10.006.480,43	10.206.610,04	10.410.742,24	10.618.957,08
Depreciación		1.874.586,67	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33
EBIT		2.710.696,46	1.799.255,45	1.892.795,23	1.988.205,80	2.085.524,58	2.184.789,74	2.286.040,20
Tax (21%)		569.246,26	377.843,65	397.487,00	417.523,22	437.960,16	458.805,85	480.068,44
OCF		4.016.036,87	4.299.145,14	4.373.041,56	4.448.415,92	4.525.297,75	4.603.717,23	4.683.705,09
CS		-43.166.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FCF		-43.166.000,00	4.016.036,87	4.299.145,14	4.373.041,56	4.448.415,92	4.525.297,75	4.603.717,23

8	9	10	11	12	13	14	15
16.098.385,23	16.420.352,94	16.748.760,00	17.083.735,20	17.425.409,90	17.773.918,10	18.129.396,46	18.491.984,39
10.831.336,23	11.047.962,95	11.268.922,21	11.494.300,65	11.724.186,67	11.958.670,40	12.197.843,81	12.441.800,68
2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33	2.877.733,33
2.389.315,67	2.494.656,65	2.602.104,45	2.711.701,21	2.823.489,90	2.937.514,37	3.053.819,32	3.172.450,37
501.756,29	523.877,90	546.441,94	569.457,25	592.932,88	616.878,02	641.302,06	666.214,58
4.765.292,72	4.848.512,09	4.933.395,85	5.019.977,29	5.108.290,36	5.198.369,68	5.290.250,60	5.383.969,13
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15.047.200,00
4.765.292,72	4.848.512,09	4.933.395,85	5.019.977,29	5.108.290,36	5.198.369,68	5.290.250,60	20.431.169,13



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Desglose del Excel de viabilidad económica de la planta de gasificación

	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos		39.396.666,67	40.184.600,00	40.988.292,00	41.808.057,84	42.644.219,00	43.497.103,38	44.367.045,44
Costes		20.000.000,00	20.400.000,00	20.808.000,00	21.224.160,00	21.648.643,20	22.081.616,06	22.523.248,39
Depreciación		12.601.273,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33
EBIT		6.795.393,33	6.451.266,67	6.846.958,67	7.250.564,51	7.662.242,46	8.082.153,98	8.510.463,73
Tax (21%)		1.427.032,60	1.354.766,00	1.437.861,32	1.522.618,55	1.609.070,92	1.697.252,34	1.787.197,38
OCF		17.969.634,07	18.429.834,00	19.061.279,29	19.386.504,88	19.718.234,98	20.056.599,68	
CS	-200.000.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FCF	-200.000.000,00	17.969.634,07	18.429.834,00	18.742.430,68	19.061.279,29	19.386.504,88	19.718.234,98	20.056.599,68

8	9	10	11	12	13	14	15
45.254.386,35	46.159.474,08	47.082.663,56	48.024.316,83	48.984.803,17	49.964.499,23	50.963.789,22	51.983.065,00
22.973.713,35	23.433.187,62	23.901.851,37	24.379.888,40	24.867.486,17	25.364.835,89	25.872.132,61	26.389.575,26
13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33	13.333.333,33
8.947.339,67	9.392.953,13	9.847.478,86	10.311.095,10	10.783.983,67	11.266.330,01	11.758.323,28	12.260.156,41
1.878.941,33	1.972.520,16	2.067.970,56	2.165.329,97	2.264.636,57	2.365.929,30	2.469.247,89	2.574.632,85
20.401.731,67	20.753.766,30	21.112.841,63	21.479.098,46	21.852.680,43	22.233.734,04	22.622.408,72	23.018.856,90
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10.980.900,00
20.401.731,67	20.753.766,30	21.112.841,63	21.479.098,46	21.852.680,43	22.233.734,04	22.622.408,72	23.018.856,90



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Capítulo XII. Bibliografía



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL



Bibliografía

- [1] C. d. M. A. y. O. d. T. e. I. N. d. Estadística, «Evolución en la generación de residuos».
- [2] M. interesante, «<https://www.muyinteresante.es/curiosidades/preguntas-respuestas/en-que-paises-se-recicla-mas>,» [En línea].
- [3] Leonardo, «<https://www.leonardo-gr.com/es/blog/objetivos-de-reciclaje-2030-en-la-ue>,» [En línea].
- [4] F. Crana, «http://www.crana.org/es/residuos/mas-informacion_6/tipos-clasificacion,» [En línea].
- [5] «<http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/vertederos-controlados/>,» [En línea].
- [6] C. M. Miguel, *Eficiencia de la estrategia de gestión y localización de residuos de la Comunidad de Madrid*.
- [7] M. d. P. Manrique, *Selección de emplazamientos para vertederos controlados*.
- [8] «http://lluvia.dihma.upv.es/ES/publi/tfm_pfc_docs/PFC_andres_cuenca.pdf,» [En línea].
- [9] «<http://www.emison.com/metanizacion.htm>,» [En línea].
- [10] L. verdad, «<http://www.laverdad.es/murcia/ciudad-murcia/201406/07/sofisticado-gestion-residuos-20140607003226-v.html>,» [En línea].
- [11] C. I. Romero, «<https://claraisabelromero.wordpress.com/2014/08/18/biometanizacion-con-tecnologia-barcelona/>,» [En línea].
- [12] d. V. Universidad Politécnica, «<http://victoryepes.blogs.upv.es/2016/12/12/motores-endotermicos-o-de-combustion-interna/>,» [En línea].
- [13] Fenercom, «<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-valorizacion>



energetica-de-residuos-fenercom-2010.pdf,» [En línea].

[14] esacademic, «<http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/80102>,» [En línea].

[15] C. Naturales, «<http://www.areaciencias.com/biologia/rsu.html>,» [En línea].

[16] E. e. Acción, «<https://www.ecologistasenaccion.org/article9000.html>,» [En línea].

[17] F. d. noticias, «<http://frentedenoticias.com.ar/2016/07/recicladores-de-residuos-comenzaron-con-medidas-de-fuerzaa/>,» [En línea].

[18] D. photos, «<https://mx.depositphotos.com/14219387/stock-photo-chimney-exhaust-waste-amount-of.html>,» [En línea].

[19] B. Energía, «<http://www.directindustry.com/prod/bono-energia/product-38355-279181.html>,» [En línea].

[20] Siemens, «<https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/power-generation/steam-turbines/d-r-steam-turbines.html>,» [En línea].

[21] UNESA, «<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1348-central-rsu>,» [En línea].

[22] UNESA. [En línea].

[23] wikimedia,
«[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Legan%C3%A9s_\(Madrid\)_mapa.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Legan%C3%A9s_(Madrid)_mapa.svg),»
[En línea].

[24] A. d. I. a. d. I. Energética, «Esquema ciclo combinado».

[25] «https://www.ambientum.com/revista/2003_05/GASIFICACION.htm,» [En línea].

[26] Lippel, «<http://www.lippel.com.br/es/categorias/processamento/trituradores-para-reciclagem/trituradores-de-residuos/triturador-de-residuos-shredder-tm-05-80.html>,» [En línea].

[27] WPC, «http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy-Evolved_Brochure_Sp.pdf,» [En línea].

[28] WPC, «http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2013/09/WPC-SoQ-August-2013-NDA-Not-Required-Final_Spanish.pdf,» [En línea].



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

- [29] M. Fernández García, «Análisis tecno-económico de la gasificación de residuos sólidos urbanos mediante plasma térmico».
- [30] D. Magallón, «Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma».
- [31] T. d. gas, «<http://termodinamicaymtg.blogspot.cz/2013/06/turbinas-de-gas-gas-turbine.html>,» [En línea].
- [32] wikipedia, «https://es.wikipedia.org/wiki/Villanueva_del_Pardillo,» [En línea].
- [33] «Apuntes de la asignatura de Medio Ambiente de la Universidad Pontificia ICAI».
- [34] «<http://www.emison.com/metanizacion.htm>,» [En línea].
- [35] *Plan Regional de Residuos urbanos (2006 - 2016)*.
- [36] «www.mapama.gob.es,» [En línea].
- [37] a. y. m. a. Ministerio de agricultura y pesca, «Calidad y evaluación ambiental».
- [38] Siemens, «<https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt-400.html>,» [En línea].
- [39] Siemens, «<https://w5.siemens.com/spain/web/es/energia-sostenible/power-and-gas/turbinas%20de%20vapor/hasta%2012%20mw/pages/turbina-sst-060.aspx>,» [En línea].
- [40] Siemen, «<https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt-750.html#!/>,» [En línea].