

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***VALORIZACIÓN ENERGÉTICA  
DE RSU***

**Alumno:** *Mancebo Fernández, Pablo*

**Director:** *de la Peña Aranguren, Víctor*

**Departamento de Máquinas y motores térmicos**

**Curso académico:** *2018/2019*

*Bilbao, 10 de junio de 2019*

## RESUMEN

Mediante el presente proyecto, se ha llevado a cabo el diseño y el dimensionamiento de una planta de combustión controlada de residuos sólidos urbanos (RSU), la cual se ubicará en la comunidad de Madrid. La instalación aprovechará el calor desprendido por la incineración para producir energía eléctrica mediante un ciclo de "Rankine". Al mismo tiempo, se ha procedido a la realización de los estudios económicos, medioambientales y de riesgos pertinentes para analizar su viabilidad.

- Palabras clave:
  - Valorización energética
  - Residuos
  - Incineración
  - Economía circular
  - Medio ambiente
  - Sostenibilidad

## LABURPENA

Proiektu honen bitartez, hiri hondakin solidoen (HHS) kontrolatutako errekuntza instalazio bat diseinatu da, Madrilgo komunitatean egongo dena. Instalazioak erraustegiak emandako beroa aprobetxatuko du "Rankine" zikloaren bidez energia elektrikoa ekoizteko. Aldi berean, azterketa ekonomiko, ingurumeneko eta arriskuei buruzko azterlanak egin dira beren bideragarritasuna aztertzeko.

- Gako-hitz:
  - Balorizazio energetikoa
  - Hondakinak
  - Errausketa
  - Ekonomia zirkular
  - Ingurumen
  - Iraunkortasun



## ABSTRACT

By mean of this project the design and dimensioning of a controlled combustion plant for municipal solid waste (MSW) has been carried out, which will be located in the community of Madrid. The installation will take advantage of the heat emitted by the incineration to produce electrical energy through a "Rankine" cycle. Concurrently, the necessary economic, environmental and risk studies have been carried out to analyse its viability.

- Keywords:

- Energy recovery
- Waste
- Incineration
- Circular economy
- Environment
- Sustainability

## ÍNDICE

<b>MEMORIA</b> .....	<b>1</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. CONTEXTO .....	5
2.1 TIPOS DE RESIDUOS .....	6
2.2 TIPOS DE RESIDUOS INCINERABLES .....	8
2.3 GESTIÓN DE LOS RESIDUOS .....	10
2.4 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE LOS DIFERENTES PLANES DE GESTIÓN DE RESIDUOS.....	12
2.5 EMPLAZAMIENTO .....	12
2.6 ANTECEDENTES.....	15
2.6.1 SITUACIÓN EN EUROPA .....	15
2.6.2 SITUACIÓN A NIVEL NACIONAL .....	16
2.6.3 SITUACIÓN EN LA COMUNIDAD DE MADRID .....	17
3. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	18
3.1 OBJETIVOS .....	18
3.2 ALCANCE.....	19
4. BENEFICIOS.....	20
5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN .....	22
5.1 VALORIZACIÓN Y RECICLAJE MATERIAL .....	23
5.1.1 PREPARACIÓN PARA LA REUTILIZACIÓN .....	23
5.1.2 TRATAMIENTO MECÁNICO.....	23
5.1.3 TRATAMIENTO BIOLÓGICO .....	25
5.1.4 TRATAMIENTO MECÁNICO-BIOLÓGICO (TMB) .....	29
5.2 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA .....	32
5.2.1 PIRÓLISIS.....	32
5.2.2 GASIFICACIÓN.....	34
5.2.3 PLASMA .....	37
5.2.4 INCINERACIÓN .....	39
5.3 DEPÓSITO EN VERTEDERO .....	41
6. ALTERNATIVA SELECCIONADA .....	44
7. ANÁLISIS DE RIESGOS Y GESTIÓN DE STAKEHOLDERS.....	47
7.1 ANÁLISIS DE RIESGOS.....	47
7.2 GESTIÓN DE STAKEHOLDERS .....	49

8.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	51
8.1	DESCRIPCIÓN GENERAL .....	51
8.2	SUBSISTEMAS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE RSU .....	52
8.2.1	ÁREA DE RECEPCIÓN, ALMACENAMIENTO Y ALIMENTACIÓN DE RSU .....	52
8.2.2	SISTEMA DE INCINERACIÓN. ....	54
8.2.3	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	56
8.2.4	TRATAMIENTO DE GASES .....	61
9.	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES .....	68
9.1	HORNO.....	68
9.2	CALDERA .....	79
9.3	TURBINA .....	83
9.4	OTROS EQUIPOS QUE FORMAN EL CICLO RANKINE .....	86
9.4.1	BOMBAS .....	86
9.4.2	AEROCONDENSADOR .....	88
9.4.3	DESGASIFICADOR.....	89
9.5	FILTROS DE MANGAS .....	90
10.	DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA Y DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES.....	93
10.1	DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA .....	93
10.2	DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES .....	94
	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>97</b>
1.	DESCRIPCIÓN DE TAREAS, EQUIPOS Y DURACIONES .....	98
2.	DIAGRAMA DE GANTT .....	100
3.	CÁLCULOS.....	101
3.1.	DIMENSIONAMIENTO GENERAL.....	101
3.2.	CÁLCULO DEL PCI.....	104
3.3.	DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN DEL HORNO .....	105
3.4.	CICLO RANKINE DE LA INSTALACIÓN.....	109
3.4.1.	DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DEL CICLO .....	109
3.4.2.	RESOLUCIÓN DEL CICLO .....	117
3.4.3.	OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA INSTALACIÓN .....	124
3.5.	ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL.....	126
3.5.1.	CÁLCULO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN .....	126
3.5.2.	ANÁLISIS DE LOS GASES DE SALIDA.....	129



3.5.3.	ANÁLISIS DE SÓLIDOS .....	133
3.5.4.	CÁLCULO DE LA CHIMENEA .....	135
4.	DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS .....	139
	<b>ASPECTOS ECONÓMICOS .....</b>	<b>140</b>
1.	PRESUPUESTO .....	141
2.	ANÁLISIS DE RENTABILIDAD .....	143
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>154</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>157</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>160</b>
	<b>ANEXO I: Normativa aplicable .....</b>	<b>161</b>
	<b>ANEXO II: Planos y esquemas .....</b>	<b>165</b>
	<b>ANEXO III: Código para la resolución mediante el software EES .....</b>	<b>167</b>
	<b>ANEXO IV: Estrategia de gestión sostenible de los residuos de la comunidad de Madrid 2017-2024 .....</b>	<b>171</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Jerarquía del modelo económico actual vs. modelo economía circular</i>	10
<i>Ilustración 2. Municipios de la Mancomunidad noroeste de Madrid</i>	13
<i>Ilustración 3. Incineradora de Valdemingómez</i>	14
<i>Ilustración 4. Futura localización de la planta de tratamiento</i>	14
<i>Ilustración 5. Parcela en la que se ubicará la planta</i>	15
<i>Ilustración 6. Generación eléctrica en España mediante la incineración de RSU</i>	16
<i>Ilustración 7. Sistemas de valorización RSU</i>	22
<i>Ilustración 8. Reutilización de residuos sólidos</i>	23
<i>Ilustración 9. Tratamiento mecánico (manual) de residuos</i>	24
<i>Ilustración 10. Ciclo del compostaje</i>	26
<i>Ilustración 11. Compost producido a partir de residuos</i>	26
<i>Ilustración 12. Biometanización en digestor anaerobio</i>	28
<i>Ilustración 13. Diagrama de una planta de biometanización</i>	29
<i>Ilustración 14. Diagrama de flujo planta TMB</i>	30
<i>Ilustración 15. Planta de tratamiento TMB</i>	31
<i>Ilustración 16. Diagrama de bloques de la pirólisis</i>	33
<i>Ilustración 17. Diagrama de procesos planta de pirólisis</i>	34
<i>Ilustración 18. Gasificación</i>	35
<i>Ilustración 19. Diagrama de bloques gasificación</i>	36
<i>Ilustración 20. Fundamentos de la tecnología de plasma</i>	37
<i>Ilustración 21. Vasija de plasma</i>	38
<i>Ilustración 22. Diagrama de bloques incineración</i>	39
<i>Ilustración 23. Diagrama de una planta de incineración</i>	40
<i>Ilustración 24. Depósito en vertedero</i>	42
<i>Ilustración 25. Matriz de consecuencias-impacto del proyecto</i>	48
<i>Ilustración 26. Matriz de poder-interés</i>	49
<i>Ilustración 27. Clasificación de los stakeholders en la matriz de poder-interés</i>	50
<i>Ilustración 28. Esquema general planta incineradora de RSU</i>	51
<i>Ilustración 29. Zona de pesaje y arco de detección de materiales radiactivos</i>	53
<i>Ilustración 30. Foso de almacenamiento de residuos</i>	53
<i>Ilustración 31. Puente grúa-pulpo</i>	54
<i>Ilustración 32. Aportes y salidas del horno</i>	55
<i>Ilustración 33. Ciclo Rankine simple y diagrama T-s</i>	56
<i>Ilustración 34. Ciclo Rankine de la planta</i>	59
<i>Ilustración 35. Sistema semi-seco de tratamiento de gases</i>	62
<i>Ilustración 36. Sistema desnitrificación "SNCR"</i>	63
<i>Ilustración 37. Interior de un filtro de mangas</i>	65
<i>Ilustración 38. Ventilador de tiro inducido</i>	66
<i>Ilustración 39. Chimeneas con plataforma para el análisis y control de emisiones</i>	67
<i>Ilustración 40. Esquema del tratamiento de gases</i>	67
<i>Ilustración 41. Horno de inyección líquida horizontal</i>	69
<i>Ilustración 42. Horno de inyección líquida vertical</i>	70

<i>Ilustración 43. Detalle del horno rotatorio</i> .....	71
<i>Ilustración 44. Horno de lecho fluidizado</i> .....	73
<i>Ilustración 45. Planta con horno de parrilla y horno de parrillas</i> .....	75
<i>Ilustración 46. Hornos de parrilla</i> .....	76
<i>Ilustración 47. Parrillas móviles (izquierda) y parrillas de rodillos (derecha)</i> .....	77
<i>Ilustración 48. horno de parrillas. (seleccionado para nuestro proyecto)</i> .....	79
<i>Ilustración 49. Caldera de recuperación</i> .....	80
<i>Ilustración 50. Disposición de calderas acuotubulares</i> .....	82
<i>Ilustración 51. Turbina de vapor</i> .....	84
<i>Ilustración 52. Esquema de una turbina de vapor</i> .....	85
<i>Ilustración 53. Ejemplo de algunos tipos de bombas volumétricas</i> .....	87
<i>Ilustración 54. Bomba volumétrica</i> .....	88
<i>Ilustración 55. Aerocondensador</i> .....	88
<i>Ilustración 56. Desgasificador</i> .....	90
<i>Ilustración 57. Circulación de los gases por el filtro</i> .....	91
<i>Ilustración 58. Filtro de mangas y cenizas volantes retenidas</i> .....	92
<i>Ilustración 59. Diagrama de Gantt del proyecto</i> .....	100
<i>Ilustración 60. Ciclo Rankine de la planta</i> .....	109
<i>Ilustración 61. Simplificación ciclo Rankine de la planta</i> .....	109
<i>Ilustración 62. Balance de energía en el horno-caldera</i> .....	118
<i>Ilustración 63. Flujos de entrada y salida del desgasificador</i> .....	121
<i>Ilustración 64. Flujos de entrada y salida del precalentador</i> .....	121
<i>Ilustración 65. Esquema del sistema de lavado de gases</i> .....	132
<i>Ilustración 66. Plano de implantación general de la planta (elaboración propia)</i> .....	165
<i>Ilustración 67. Esquema de funcionamiento de la planta (elaboración propia)</i> .....	166

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Valoración de alternativas</i> .....	12
<i>Tabla 2. Tratamiento de residuos en España en el 2015</i> .....	16
<i>Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de la reutilización</i> .....	23
<i>Tabla 4. Ventajas e inconvenientes del tratamiento mecánico</i> .....	25
<i>Tabla 5. Ventajas e inconvenientes del compostaje</i> .....	27
<i>Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de la biometanización</i> .....	29
<i>Tabla 7. Ventajas e inconvenientes del TMB</i> .....	31
<i>Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de la pirólisis</i> .....	34
<i>Tabla 9. Ventajas e inconvenientes de la gasificación</i> .....	36
<i>Tabla 10. Ventajas e inconvenientes del plasma</i> .....	38
<i>Tabla 11. Ventajas e inconvenientes de la incineración</i> .....	41
<i>Tabla 12. Ventajas e inconvenientes del depósito en vertedero</i> .....	43
<i>Tabla 13. Ventajas e inconvenientes del horno de inyección líquida</i> .....	70
<i>Tabla 14. Ventajas e inconvenientes del horno rotatorio</i> .....	72

<i>Tabla 15. Ventajas e inconvenientes del horno de lecho fluidizado</i> .....	74
<i>Tabla 16. Ventajas e inconvenientes del horno de parrilla</i> .....	77
<i>Tabla 17. Tipos de residuos incinerados por cada tipo de horno</i> .....	78
<i>Tabla 18. Información operativa sobre distintos materiales de filtros de mangas</i> .....	91
<i>Tabla 19. Principales datos de la planta</i> .....	94
<i>Tabla 20. Dimensionamiento del conjunto horno-caldera</i> .....	94
<i>Tabla 21. Dimensionamiento de la turbina</i> .....	95
<i>Tabla 22. Dimensionamiento aerocondensador</i> .....	95
<i>Tabla 23. Dimensionamiento bomba 1</i> .....	95
<i>Tabla 24. Dimensionamiento desgasificador</i> .....	96
<i>Tabla 25. Dimensionamiento bomba 2</i> .....	96
<i>Tabla 26. Características de la grúa pulpo</i> .....	103
<i>Tabla 27. Composición química de los RSU de Madrid</i> .....	105
<i>Tabla 28. Estado 1</i> .....	111
<i>Tabla 29. Estado 2s</i> .....	111
<i>Tabla 30. Estado 2</i> .....	112
<i>Tabla 31. Estado 3s</i> .....	112
<i>Tabla 32. Estado 3</i> .....	112
<i>Tabla 33. Estado 4s</i> .....	113
<i>Tabla 34. Estado 4</i> .....	113
<i>Tabla 35. Estado 5</i> .....	113
<i>Tabla 36. Estado 6</i> .....	114
<i>Tabla 37. Estado 7</i> .....	114
<i>Tabla 38. Estado 8</i> .....	115
<i>Tabla 39. Estado 9</i> .....	115
<i>Tabla 40. Estado 10</i> .....	115
<i>Tabla 41. Estado 11</i> .....	116
<i>Tabla 42. Resumen de todos los estados del ciclo Rankine</i> .....	116
<i>Tabla 43. Compuestos presentes en la combustión</i> .....	127
<i>Tabla 44. Límite de emisiones según el RD 815/2013</i> .....	130
<i>Tabla 45. Contenido en metales pesados de los RSU de la Comunidad de Madrid</i> .....	134
<i>Tabla 46. Límite de emisiones de metales pesados según el RD 815/2013</i> .....	135
<i>Tabla 47. Presupuesto del proyecto</i> .....	141
<i>Tabla 48. Flujo de caja del proyecto</i> .....	145
<i>Tabla 49. Variación de la potencia de la planta en función de la cantidad de RSU</i> .....	148
<i>Tabla 50. Variación del PAYBACK, VAN y TIR en función de la cantidad de RSU</i> .....	148
<i>Tabla 51. Variación del PAYBACK, VAN y TIR en función del canon</i> .....	150
<i>Tabla 52. Variación del PAYBACK, VAN y TIR en función del precio de venta de la electricidad</i> .....	152
<i>Tabla 53. Tabla de resultado de los estados obtenida mediante el EES</i> .....	169
<i>Tabla 54. Principios de sostenibilidad para favorecer la protección y conservación de la fauna y la flora</i> .....	172
<i>Tabla 55. Principios de sostenibilidad para desarrollar eficazmente la gestión de residuos</i> .....	172
<i>Tabla 56. Principios de sostenibilidad para maximizar la eficiencia energética en la gestión de residuos</i> .....	172

## LISTA DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Tratamiento de residuos en Europa 2004-2014</i> .....	15
<i>Gráfica 2. Generación de residuos de la Comunidad de Madrid 2004-2015</i> .....	17
<i>Gráfica 3. Gráfico comparativo de emisiones de dioxinas</i> .....	46
<i>Gráfica 4. Variación del diagrama T-s al aumentar la P en la caldera</i> .....	57
<i>Gráfica 5. Variación del diagrama T-s al disminuir la presión del condensador</i> .....	58
<i>Gráfica 6. Variación del diagrama T-s al aumentar la T a la salida de la caldera</i> .....	58
<i>Gráfica 7. Diagrama T-s del ciclo Rankine de nuestra planta</i> .....	60
<i>Gráfica 8. Composición bruta de los RSU en Madrid (2016)</i> .....	104
<i>Gráfica 9. Diagrama de combustión</i> .....	106
<i>Gráfica 10. Diagrama de combustión de nuestro horno</i> .....	108
<i>Gráfica 11. Diagrama T-s del ciclo Rankine</i> .....	117
<i>Gráfica 12. Variación de temperaturas en el aerocondensador</i> .....	123
<i>Gráfica 13. Porcentaje de peso de cada concepto</i> .....	142
<i>Gráfica 14. Variación del VAN</i> .....	146
<i>Gráfica 15. Variación de la potencia de la planta en función de la cantidad de RSU</i> .....	148
<i>Gráfica 16. Variación del PAYBACK en función de la cantidad de RSU</i> .....	149
<i>Gráfica 17. Variación del VAN en función de la cantidad de RSU</i> .....	149
<i>Gráfica 18. Variación del TIR en función de la cantidad de RSU</i> .....	149
<i>Gráfica 19. Variación del PAYBACK en función del canon</i> .....	150
<i>Gráfica 20. Variación del VAN en función del canon</i> .....	151
<i>Gráfica 21. Variación del TIR en función del canon</i> .....	151
<i>Gráfica 22. Variación del PAYBACK en función del precio de venta de la electricidad</i> .....	152
<i>Gráfica 23. Variación del VAN en función del precio de venta de la electricidad</i> .....	152
<i>Gráfica 24. Variación del TIR en función del precio de venta de la electricidad</i> .....	153
<i>Gráfica 25. Estados del ciclo Rankine</i> .....	170

## LISTA DE ACRÓNIMOS

CE – Comisión Europea.

INE – Instituto Nacional de Estadística.

EES – Engineering Equation Eolver.

NPSH – Altura Neta Positiva en la Aspiración (Net Positive Suction Head).

OMS – Organización Mundial de la Salud.

PCB – Policloruro de bifenilo.

PCI – Poder calorífico inferior.

PEMAR – Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos.

PNIR – Plan Nacional de Investigación de Residuos.

RDF – Fuel Derivado de Residuos (Refuse Derived Fuel).

RI – Residuo Industrial.

RSU – Residuo Sólido Urbano.

SCR – Reducción Selectiva Catalítica (Selective Catalytic Reduction).

SNCR – Reducción Selectiva No Catalítica (Selective Non Catalytic Reduction).

SV – Sólidos Volátiles.

TIR – Tasa Interna de Rendimiento.

TMB – Tratamiento Mecánico-Biológico.

TV – Turbina de Vapor.

VAN – Valor Actual Neto.

## **FORMULAS**

$\text{Ca(OH)}_2$  – Lechada de cal.

$\text{CaCl}_2$  – Cloruro de calcio.

$\text{CaF}_2$  – Fluoruro de calcio.

$\text{Ca(HSO}_3)_2$  – Sulfito ácido de calcio.



$\text{CaSO}_4$  – Sulfato de calcio.

$\text{CH}_4$ – Metano.

$\text{C}_2\text{H}_6$  – Etano.

$\text{CO}$  – Monóxido de carbono.

$\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono.

$\text{H}_2$  – Hidrógeno.

$\text{H}_2\text{O}$  – Agua.

$\text{HCl}$  – Ácido clorhídrico.

$\text{HF}$  – Ácido fluorhídrico.

$\text{N}_2$  – Nitrógeno.

$\text{NO}_x$  – Óxidos de nitrógeno.

$\text{O}_2$  – Oxígeno.

$\text{SO}_2$  – Dióxido de azufre.

$\text{SO}_3$  – Trióxido de azufre.



# MEMORIA

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de los residuos se ha convertido en uno de los principales retos a los que se debe enfrentar la sociedad actual, dada su generación creciente y su gran impacto ambiental, social y económico. En España, cada ciudadano genera un promedio de kilo y medio de basura al día aproximadamente (RSU); a lo que habría que sumar los residuos asociados a la actividad industrial (RI).

Los residuos representan una pérdida enorme de recursos, tanto materiales como energéticos. Además de los residuos generados por actividades industriales y domésticas, actualmente también se originan otro tipo de residuos, como consecuencia de los intentos de sanear medios contaminados, como por ejemplo, los lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales, los suelos contaminados, etc.

Hoy en día, el destino mayoritario de todos estos residuos, es su vertido, opción que representa la vía de gestión menos recomendable a nivel ambiental. Otras vías posibles de gestión son el reciclaje o la valorización material o energética. Si bien su implantación ha ido creciendo en los últimos años, en España representan aún unos niveles muy por debajo de la media de la Unión Europea, con tan solo un 10% de aprovechamiento energético de los residuos urbanos y, por tanto, tiene por delante un amplio margen de desarrollo. Dicha mejora, no solamente podría contribuir de forma significativa a una más apropiada gestión de los residuos, sino que también podría constituir una aportación relevante al panorama energético español, dado su alto grado de dependencia externa.

Los procesos térmicos fueron de los primeros tratamientos empleados para la gestión de las basuras por los municipios y particulares. Los problemas ambientales surgidos como consecuencia del uso de sistemas sin contar con los medios de protección adecuados, han sido objeto de críticas desde el punto de vista medioambiental, debido a la formación de contaminantes que pueden ser emitidos por estas instalaciones, creando una mala imagen a estos procesos.

En Europa, desde hace más de cien años, se viene practicando la incineración de estos residuos, lo que ha permitido acumular una amplia experiencia, mejorando las

tecnologías existentes hasta conseguir instalaciones totalmente controladas, limpias y seguras, llegando estas a estar ubicadas en el centro de las principales ciudades europeas, incluidas las de mayores exigencias ambientales. Actualmente, en la Unión Europea, una legislación exigente, acompañada de estas tecnologías avanzadas, favorece la recuperación energética de los residuos descartados para el reciclaje potenciando la “termovalorización” (waste to energy).

Esta alternativa ofrece grandes aprovechamientos energéticos, debido a que poseen PCIs de entre 1.500 kCal/kg y 2.500 kCal/kg. Esto favorece además un nuevo modelo de economía, denominada “economía circular”, en la que reside el éxito de estos procedimientos, los cuales son capaces de transformar un problema, como es la generación de residuos en algo de gran valor, como es la producción de energía.

Las últimas directrices europeas aconsejan una economía circular en la que se reciclen los productos de la manera más económica posible respetando el medio ambiente. Esta apuesta de Europa ambiciona generar una economía que establezca beneficios mediante acciones ambientales positivas. En lo que se refiere a nuestro país, la nueva “estrategia española de economía circular” no contempla únicamente la gestión de los residuos, sino la gestión de los recursos en su conjunto.

En el presente proyecto se llevará a cabo el diseño y dimensionamiento de una planta de valorización de RSU, teniendo en cuenta el cálculo y la selección de las instalaciones para la generación de electricidad, con el objetivo de tratar una parte importante de los residuos generados por la población de un núcleo de municipios del Noreste de la Comunidad de Madrid.

Se presenta el contexto del proyecto, la oportunidad del mismo y los beneficios (técnicos, económicos, sociales) que se esperan conseguir. Para ello, se estudiarán varias alternativas que se valorarán en función de la tipología de los residuos a tratar. Una vez seleccionada la alternativa más adecuada, se realiza una descripción en la que se muestran las diferentes partes de la instalación proporcionando una breve explicación de cada una de ellas y de los equipos principales.

Se ha seguido una metodología basada en analizar el tipo de residuos, dimensionar la planta en función de la cantidad de los mismos a tratar, sin olvidarse, en ningún



momento del punto de vista económico, para lo que se realizarán todos los estudios necesarios con el objeto de examinar su viabilidad (el estudio cuenta con un presupuesto, con un análisis de rentabilidad y otro de sensibilidad), determinando, así mismo, las emisiones que la planta genera, para asegurar, de este modo, que sea respetuosa con el medio ambiente, cumpliendo de forma estricta con la normativa y la legislación vigente.

## 2. CONTEXTO

Para comprender el contexto de este documento es importante, primeramente, explicar el concepto de residuo sólido urbano, dado que la aplicación de la legislación sobre residuos depende en su totalidad de la noción de «residuo» existente, al igual que, es esencial definir su campo de aplicación. Según la Ley 22/2011, del 28 de julio de residuos y suelos contaminados, se entiende por residuo *“cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar”*.

La clasificación de los residuos según su origen la encontramos en el artículo 3 de la citada Ley 22/2011:

- “Residuos domésticos”: residuos generados en los hogares como consecuencia de actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias. Se incluyen también en esta categoría los residuos que se generan en los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres. Tendrán la consideración de residuos domésticos los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados.
- “Residuos comerciales”: residuos generados por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios.
- “Residuos industriales”: residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre.

Las dos primeras definiciones son de vital importancia, debido a que serán dichos residuos los que se incinerarán en la planta. Por esta razón, en la directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y el Consejo, unifican ambos residuos con una única definición: *«Residuos municipales mezclados»*, los residuos domésticos, así como los

*residuos comerciales, industriales e institucionales que, debido a su naturaleza y composición, son similares a los residuos domésticos.*

En dicha directiva se proporciona, además, una definición para una instalación de incineración de residuos: «*Instalación de incineración*»: *cualquier unidad técnica o equipo, fijo o móvil, dedicado al tratamiento térmico de residuos con o sin recuperación del calor producido por la combustión, incluida la incineración por oxidación de residuos, así como la pirólisis, la gasificación u otros procesos de tratamiento térmico, por ejemplo, el proceso de plasma, en la medida en que las sustancias resultantes del tratamiento se incineren a continuación.*

Esta definición comprende tanto el emplazamiento como la instalación completa, incluidas todas las líneas de incineración y las instalaciones de recepción, almacenamiento y pretratamiento “in situ” de los residuos; los sistemas de alimentación de residuos, combustible y aire; la caldera; las instalaciones de tratamiento de los gases de combustión; las instalaciones de tratamiento o almacenamiento “in situ” de los residuos de la incineración y de las aguas residuales; la chimenea; así como los dispositivos y sistemas de control de las operaciones de incineración, de registro y de seguimiento de las condiciones de incineración.

## 2.1 TIPOS DE RESIDUOS

Como ya hemos referido, actualmente toda actividad llevada a cabo por el ser humano comporta la generación de residuos, en mayor o menor medida. Para tratar de mantener cierto orden, la Comisión Europea ha englobado los diferentes tipos de residuos en función de su procedencia, creando incluso subcategorías más específicas.

Según la CE, tal y como lo indica en la directiva 2000/532/CE, los residuos se pueden clasificar en 20 categorías diferentes, tal y como se muestra a continuación:

01 Residuos de la prospección, extracción, preparación y otros tratamientos de minerales y canteras.

02 Residuos de la producción primaria agraria, hortícola, de la caza, de la pesca y de la acuicultura; residuos de la preparación y elaboración de alimentos.

03 Residuos de la transformación de la madera y de la producción de papel, cartón, pasta de papel tableros y muebles.

04 Residuos de las industrias textiles, del cuero y de la piel.

05 Residuos del refinado de petróleo, purificación del gas natural y tratamiento pirolítico del carbón.

06 Residuos de procesos químicos inorgánicos.

07 Residuos de procesos químicos orgánicos.

08 Residuos de la formulación, fabricación, distribución y utilización (FEDU) de revestimientos (pinturas, barnices y esmaltes vítreos), pegamentos, sellantes y tintas de impresión.

09 Residuos de la industria fotográfica.

10 Residuos inorgánicos de procesos térmicos.

11 Residuos inorgánicos que contienen metales procedentes del tratamiento y revestimiento de metales y de la hidrometalurgia no férrea.

12 Residuos del moldeo y tratamiento de superficie de metales y plásticos.

13 Residuos de aceite (excepto aceites comestibles y los capítulos 05 y 12).

14 Residuos de sustancias orgánicas utilizadas como disolventes (excepto los capítulos 07 y 08).

15 Residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza, materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría.

16 Residuos no especificados en otro capítulo de la lista.

17 Residuos de la construcción y demolición (incluyendo la construcción de carreteras).

18 Residuos de servicios médicos o veterinarios y/o de investigación asociada (salvo los residuos de cocina y de restaurante no procedentes directamente de los servicios médicos).

19 Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la industria del agua.

## **20 Residuos municipales y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones, incluyendo las fracciones recogidas selectivamente.**

Para la ejecución de nuestro proyecto de planta incineradora de RSU, nos vamos a centrar en los residuos que constituyen la categoría 20. Trataremos de implementar, para ello, la mejor opción de valorización energética posible.

### 2.2 TIPOS DE RESIDUOS INCINERABLES

La característica fundamental de los residuos, que permite su incineración, es el poder calorífico de los mismos junto con la presencia de algunos contaminantes que condicionan la forma de tratamiento por incineración.

Pueden distinguirse diferentes tipos de residuos urbanos, atendiendo a la forma de recogida y al tratamiento posterior, en relación con la incineración:

**RSU:** Residuos sólidos urbanos en general: Suelen referirse a residuos recogidos sin separación en origen, en masa. Una gran parte de los mismos (casi el 50%) está constituida por residuos no combustibles, con una cantidad importante de agua, lo que resta eficacia al proceso de valorización energética.

**RDF:** Fracción combustible de los residuos urbanos procedente de la separación mecánica de los residuos recogidos en masa. Esta fracción es aproximadamente la mitad de la cantidad total de residuos urbanos recogidos, su poder calorífico es del orden de 2,500 kcal/kg, aunque éste depende de la coexistencia con otros sistemas de recogida selectiva.

Otras fracciones, menos trascendentes para los procesos de incineración, son las procedentes de la recogida separada en origen:

- La fracción húmeda separada de los RSU procedente de recogidas en masa. Aunque suele dedicarse a la producción de compost, la calidad del mismo no suele ser adecuada. La forma más apropiada de gestión es mediante un tratamiento mecánico biológico, que permita una metanización. La fracción no digerible puede ser depositada en vertedero, porque su estabilidad será alta.
- Fracciones secas de residuos, procedentes de diferentes sistemas de recogida separada (envases, papel y cartón, etc.). Aunque este grupo de residuos tiene un poder calorífico elevado, si la recogida selectiva está bien realizada este grupo de residuos podrá ser destinado al reciclado de forma preferente.
- Fracciones húmedas de residuos procedentes de recogida separada. En general, cuando se recoge esta fracción se debe a que el modelo de gestión considera la producción de cantidades importantes de compost de calidad. En cualquier caso, como cualquier otra fracción húmeda, la mejor forma de valorización energética es por vía biológica, y no por tratamiento térmico.

En definitiva, dependiendo de la estructura de recogida de residuos, separada en origen o en masa, se obtendrán diferentes flujos de residuos y se propiciarán determinadas formas de gestión

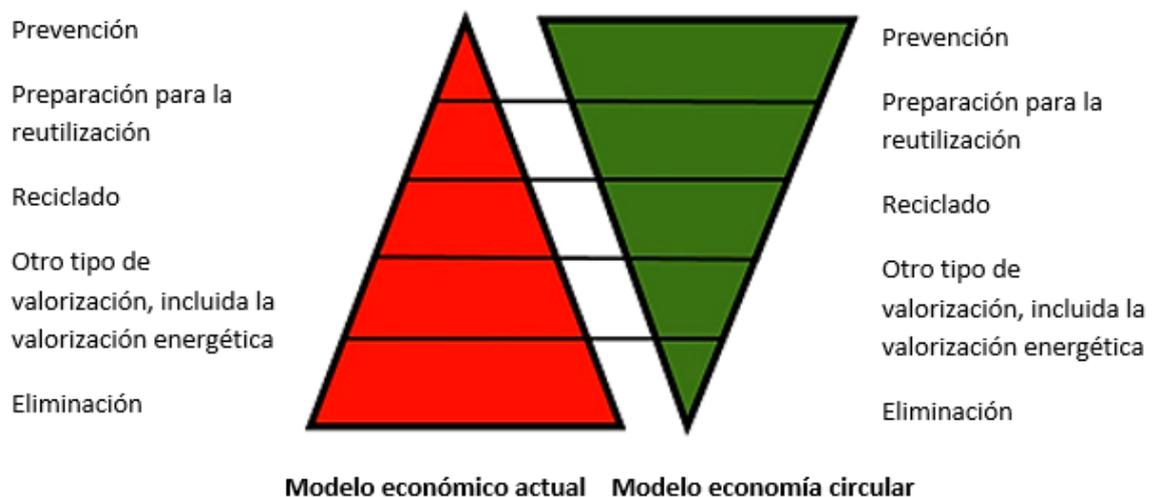
En general, la recogida separada de fracciones no combustibles está orientada a la producción de compost y al reciclado de materiales plásticos; en todo caso, los rechazos combustibles de ambas fracciones suponen un porcentaje muy elevado de los residuos recogidos.

Las plantas de incineración se diseñan de forma bastante específica en función del tipo de residuos a tratar. Desde principios de los años 1990 predominan las plantas diseñadas para fracciones secas, (o rechazos combustibles), porque junto con el avance de la recogida selectiva de residuos urbanos, se desarrollaron los procesos de separación mecánica, por el incremento en la eficacia energética, al aumentar considerablemente el poder calorífico de los residuos y disminuir la carga de agua. No obstante, un número muy elevado de plantas de incineración funcionan con residuos recogidos en masa, con o sin pretratamiento mecánico previo.

### 2.3 GESTIÓN DE LOS RESIDUOS

Afortunadamente, la sociedad se ha percatado de la importancia de una gestión eficiente de los residuos desde un punto de vista ambiental, sanitario y económico. Esta gestión debe diseñarse de forma específica, de acuerdo al tipo de residuo que se persiga tratar, por lo que existen numerosas técnicas de tratamiento y aprovechamiento de los residuos. En la actualidad, se establece una jerarquía de principios que da la máxima prioridad a la reducción de la generación de residuos, seguida por la reutilización y el reciclado de materiales de desecho, la recuperación de energía y, en último lugar, a la eliminación final de los residuos.

No es hasta año 1971, cuando el problema de los residuos se trata por primera vez en una reunión de expertos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), concluyendo que, desde el punto de vista sanitario, existe la necesidad imperiosa de tener en cuenta las fases sólidas, líquidas y gaseosas de la disposición de desechos, para lograr que tengan el mínimo efecto perjudicial sobre el hombre y su entorno. Por lo que se pasó a dar otro enfoque a la gestión de residuos, comenzando a emplearse la definición de economía circular, introduciendo la siguiente jerarquía, en la que se pretende invertir la pirámide actual de la gestión de residuos.



*Ilustración 1. Jerarquía del modelo económico actual vs. modelo economía circular*

Para llevar a cabo esta inversión, la economía circular se vale de estos “5 niveles”:

- **Prevención:** mediante campañas de sensibilización e información se pretende minimizar la generación de residuos, ya que el mejor residuo es aquel que no se genera.
- **Preparación para la reutilización:** utilizar de manera reiterada el objeto para el mismo fin para el que fue concebido, evitando de esta forma la generación de residuos, alargando la vida útil de los productos.
- **Reciclado:** toda operación de valorización mediante la cual los residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad inicial o con otra. De esta forma se genera un ahorro en el consumo de materias primas y un beneficio para el planeta.
- **Valorización:** cualquier operación con una finalidad útil en la que se pueda emplear los residuos como una sustitución de otros materiales. En este caso no se aprovechan los materiales que componen los residuos, si no la energía contenida en ellos.
- **Eliminación:** como última opción, aquella menos ecológica y que, por tanto, se deberá emplear cuando no existe otra alternativa. Se entiende por eliminación, cuando hablamos de vertido, pero sin embargo existe también una segunda modalidad de eliminación: la “incineración sin recuperación de energía”. Esta última práctica, habitualmente en desaparición, solo se aplica para la eliminación de ciertos residuos peligrosos muy concretos.

Se entiende por gestión de residuos, tal y como se indica en la Ley 22/2011, la recogida, el transporte y tratamiento de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.

La recogida y el transporte, dependen del tipo de residuo. Por ejemplo, los RSU se recogen en contenedores y son trasladados en camiones, mientras que las aguas residuales son conducidas mediante tuberías hasta la estación de tratamiento o el punto de vertido.

En cuanto al tratamiento de los residuos, se puede diferenciar entre tratamiento previo y tratamiento final. El primero de ellos, consiste en modificar las propiedades físicas, químicas o biológicas para reducir su peligrosidad, facilitar su aprovechamiento

energético o prepararlo para su destrucción. En cuanto a los tratamientos finales, siempre se tendrá que priorizar el reciclaje, si bien es cierto que un producto tiene limitados los ciclos de reciclaje, debido a que va perdiendo calidad en el proceso. En ese instante, habrá que plantear otro tratamiento distinto para el residuo y la selección de este estará ligada a sus propiedades: PCI, cantidad, peligrosidad, estado físico...

## 2.4 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE LOS DIFERENTES PLANES DE GESTIÓN DE RESIDUOS

Dentro de este particular contexto de gestión y de regulación indicado anteriormente, se ha normalizado la formulación de los previsible escenarios de futuro de cada Plan de gestión de Residuos en función de tres escenarios de referencia:

- Alternativa “cero”: mantenimiento de los modelos de gestión actualmente existentes y su probable evolución en caso de no aplicarse un nuevo instrumento de planificación.
- Alternativa “uno”: aplicar las medidas y actuaciones contempladas en los instrumentos de planificación y legislación vigente para dar cumplimiento a los objetivos normativos establecidos.
- Alternativa “dos”: definir objetivos más exigentes que los establecidos en la normativa y en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022 (PEMAR) y/o aplicar medidas y actuaciones adicionales o complementarias a las contempladas en los instrumentos de planificación y legislación vigente, que se consideran estratégicas para avanzar hacia el modelo de economía circular.

Alternativas	Preparación para reutilización	Reciclado	Otras formas de valorización	Depósito en vertedero
“Cero” (A0)	0	0	0	0
“Uno” (A1)	++	++	++	-
“Dos” (A2)	+++	+++	++	--

*Tabla 1. Valoración de alternativas*

## 2.5 EMPLAZAMIENTO

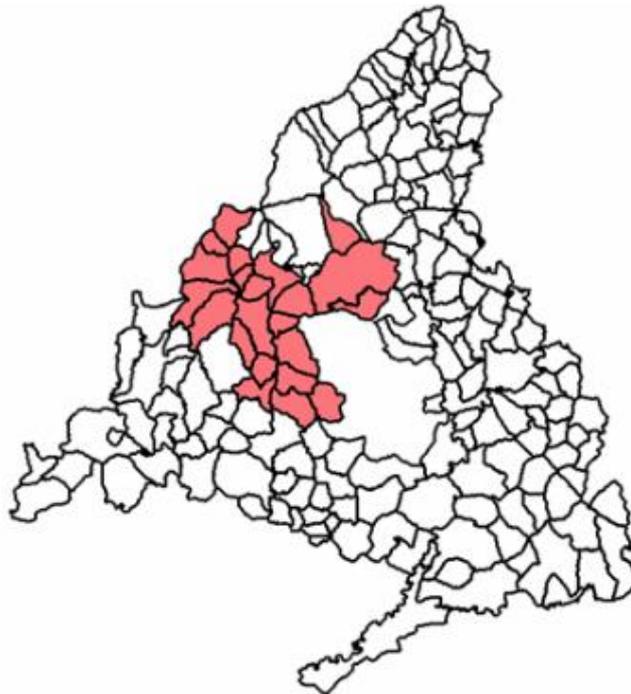
Las características del emplazamiento son factores importantes a considerar. Se debe tener en cuenta la climatología, el entorno, las actividades económicas, la

disponibilidad de terreno, etc. Asimismo, las características de los residuos vendrán determinadas por su origen, lo que tendrá consecuencias en la composición y propiedades de los mismos.

La planta de valorización de RSU se situará en el noroeste de Madrid y recogerá los residuos urbanos de dicha Mancomunidad.

## MANCOMUNIDAD NOROESTE

Actualmente, está constituida por un total de 33 municipios, entre los que se destacan: Alcobendas, Algete, Collado Villalba, El Molar, Galapagar, San Agustín de Guadalix, San Sebastián de los Reyes, Soto del Real, Tres Cantos y Valdeolmos-Alalpardo. Estos fueron los primeros en constituir la Mancomunidad destinada a la gestión y tratamiento de residuos. Esta Mancomunidad abarca a más de 400.000 habitantes.



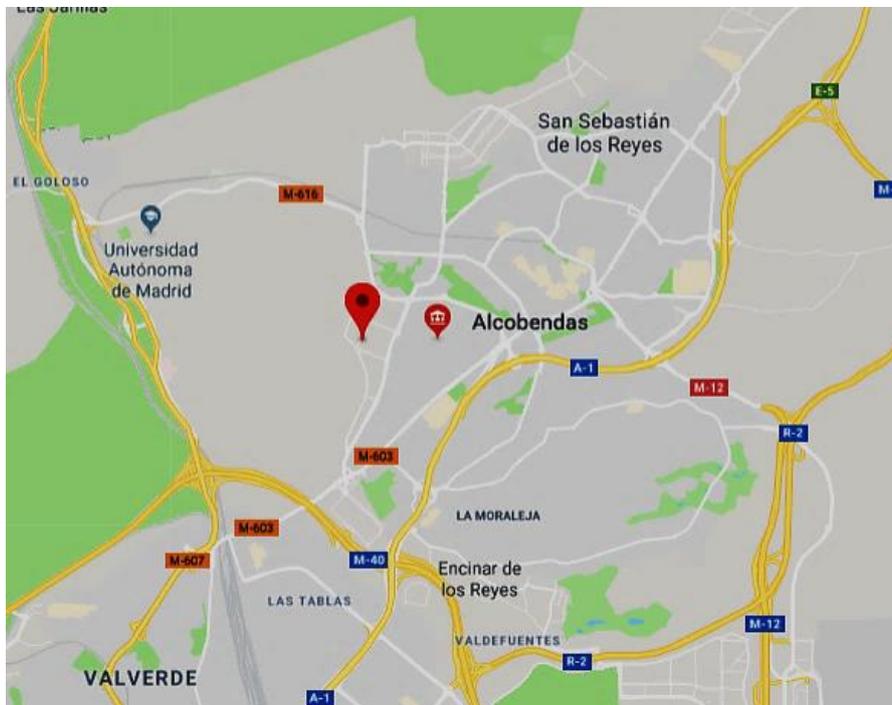
*Ilustración 2. Municipios de la Mancomunidad noroeste de Madrid*

La Comunidad de Madrid, en la actualidad, solo cuenta con la incineradora de Valdemingómez, situada en la zona sureste de la misma. Importante destacar que, según un reciente estudio del ayuntamiento de Madrid, publicado el 15 de enero de 2019, la incineradora de Valdemingómez no tiene incidencia en la salud de la población.



*Ilustración 3. Incineradora de Valdemingómez*

La Mancomunidad Noroeste, en cambio, gestiona sus residuos por medio del Depósito Controlado situado en el municipio de Colmenar Viejo. Por tanto, nuestro objetivo es optimizar esta situación, localizando la nueva planta de tratamiento de residuos en el municipio de Alcobendas.



*Ilustración 4. Futura localización de la planta de tratamiento*

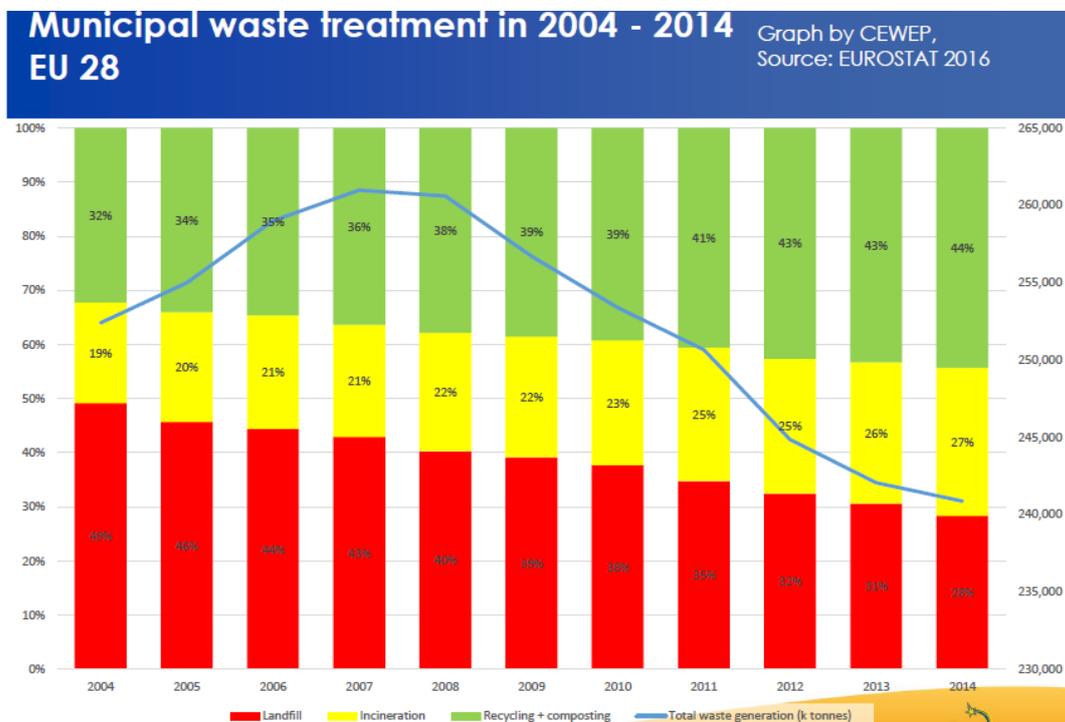


Ilustración 5. Parcela en la que se ubicará la planta

## 2.6 ANTECEDENTES

### 2.6.1 SITUACIÓN EN EUROPA

En el año 2016, la media europea de almacenamiento de residuos en vertederos fue del 25%, mientras que la proporción de reciclaje y compostaje alcanzó un 47%. Obviamente hay aún mucho por hacer.



Gráfica 1. Tratamiento de residuos en Europa 2004-2014

## 2.6.2 SITUACIÓN A NIVEL NACIONAL

Los datos más recientes recopilados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) indican que en 2015 se recogieron 466,4 kilogramos de residuos urbanos por habitante, un 1,6% más que en el año anterior. El tratamiento final de residuos alcanzó los 47,5 millones de toneladas, un 4,6% menos que en 2014. El 53,3% de los residuos tratados se destinó al reciclado.

Los métodos de tratamiento empleados se resumen en la tabla mostrada a continuación:

Tratamiento	Cantidad (t)	Porcentaje (%)	Variación respecto a 2014 (%)
<b>Reciclaje y compostaje</b>	25.301.300	53,3	-6,4
<b>Vertido</b>	18.677.100	39,3	-3,6
<b>Incineración</b>	3.509.900	7,4	+4,5
<b>TOTAL</b>	<b>47.488.300</b>	<b>100,0</b>	<b>-4,6</b>

Tabla 2. Tratamiento de residuos en España en el 2015

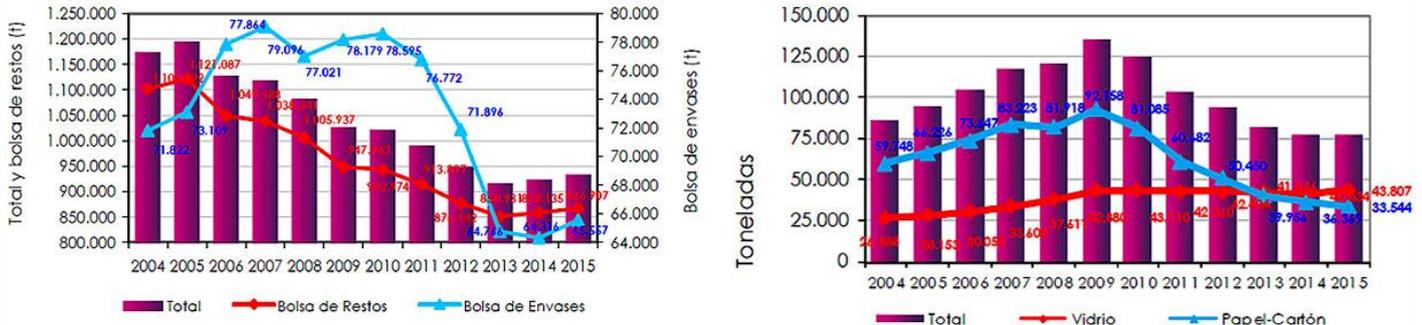
Actualmente, la generación de electricidad a partir de RSU en España se lleva a cabo en 10 instalaciones.



Ilustración 6. Generación eléctrica en España mediante la incineración de RSU

### 2.6.3 SITUACIÓN EN LA COMUNIDAD DE MADRID

En primer lugar, se muestra la generación de residuos de la Comunidad de Madrid.



Gráfica 2. Generación de residuos de la Comunidad de Madrid 2004-2015

La situación en la Comunidad de Madrid, es, por lo general, muy similar a la situación nacional. Sin embargo, centrándonos en la Mancomunidad Noroeste de Madrid, cabe destacar los siguientes datos:

- Trece municipios del noroeste de Madrid demandan un plan estratégico de residuos urgente. Estos trece municipios recuerdan que en 2020 deberían estar recuperando o reciclando el 50% de los residuos domésticos, en este momento, afirman: la zona noroeste “siendo muy optimistas” estará en el 20% de reciclaje. El resto se entierra en el vertedero de Colmenar Viejo.
- La Mancomunidad está lejos de cumplir el objetivo europeo 2020.

Esto es debido, como se ha explicado anteriormente, a que dicha Mancomunidad en estos momentos gestiona sus residuos solo mediante el depósito controlado de Colmenar Viejo, no permitiéndose la valorización energética de estos, siendo esta la razón fundamental, como ya se ha indicado, de la elaboración de este proyecto.

Con el fin de proteger el medio ambiente y la salud de las personas, la comunidad de Madrid ha aprobado la “Estrategia de residuos 2017-2024”, esta se muestra, de forma abreviada, en el ANEXO IV del presente proyecto.

## 3. OBJETIVOS Y ALCANCE

### 3.1 OBJETIVOS

Con el desarrollo de este proyecto se pretende incidir en los siguientes objetivos.

#### OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis energético a una planta térmica que opera bajo el ciclo Rankine, mediante la quema directa de residuos sólidos urbanos (RSU).

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir conocimientos básicos sobre el sector de los residuos, la gestión y el tratamiento de los mismos.
- Analizar los residuos que se van a tratar en el trabajo, evaluando sus propiedades.
- Disminuir el impacto ambiental que generan los residuos sólidos urbanos mal manejados.
- Comparar los diferentes métodos de tratamiento de residuos, estudiando las ventajas e inconvenientes implícitos en cada uno de ellos.
- Seleccionar la mejor alternativa de tratamiento de residuos, teniendo en cuenta las características que presentan los mismos.
- Realizar un análisis de riesgos y de gestión de stakeholders del proyecto.
- Desarrollar el método seleccionado:
  - Comparar los diferentes equipos de incineración de residuos.
  - Seleccionar la tecnología óptima considerando las propiedades del residuo.
  - Diseñar la planta de valorización de residuos para el tratamiento térmico de los mismos mediante el horno seleccionado.
  - Proponer el ciclo termodinámico y desarrollar una metodología de diseño para determinar las condiciones de operación de la planta. El modelo termodinámico será realizado en el software EES.
  - Dimensionar los equipos que forman la planta en función de los resultados obtenidos.

- Realizar un estudio económico para evaluar la viabilidad del proyecto y compararlo con el estado actual.
- Mediante la implementación de estas tecnologías de vanguardia, contribuir a un desarrollo sostenible.
- Realizar análisis de resultados y proponer recomendaciones.

### 3.2 ALCANCE

Parte fundamental del proyecto, sobre la que se va a incidir en mayor medida, es el ciclo de potencia -ciclo Rankine-. El trabajo consiste en el diseño y resolución del ciclo junto con el proyecto y dimensionamiento de los equipos principales.

Por tanto, sobre otras cuestiones se realizará un análisis menos exhaustivo:

- Línea de residuos (tratamiento de residuos, lavado de gases, tratamiento de cenizas, etc.).
- Equipos secundarios.

No se tratarán o se hará en menor medida:

- Sistema eléctrico.
- Servicios (Sistema de agua, de agua desmineralizada, de agua de refrigeración, sistema de aire comprimido, sistemas de ventilación y climatización, sistema de protección contra incendios).
- Condiciones particulares y técnicas- (Materiales generales de construcción, ejecución y control de obras).
- Etc.

## 4. BENEFICIOS

Si bien los argumentos en contra de este tipo de instalaciones son medioambientales, concretamente debidos a la producción de dioxinas y furanos, como producto contaminante resultante de numerosos procesos de combustión, los argumentos a favor de la incineración se pueden resumir, a grandes rasgos, de la siguiente manera:

1. Reducción del volumen de residuos (espacio disponible limitado para sistemas de vertido).

El objetivo y ventaja principal de la incineración, consiste en la reducción drástica de la cantidad de residuos generados (reducidos hasta un 95%). Al realizarse la combustión, pasa a estado gaseoso que, tras ser tratado de forma adecuada, puede ser vertido a la atmósfera. Tras la incineración, también se obtienen desechos sólidos (cenizas, escorias y chatarras), que tras ser tratados podrán ser eliminados o empleados en otros procesos.

2. Contribución a la conservación del medio ambiente (Beneficios medioambientales).

Reduce de forma notable los efectos contaminantes de los RSU. Si la composición del residuo es favorable y el diseño de la planta es correcto, se pueden evitar o reducir las emisiones contaminantes procedentes de la combustión. Constituye una alternativa mucho más efectiva que el vertido de residuos.

Reduce la emisión de gases de efecto invernadero, ya que:

- Produce electricidad generando menos cantidad de CO<sub>2</sub> que la combustión de carbón, petróleo o gas.
- Evita la emisión incontrolada de CH<sub>4</sub> y otros gases procedentes de la descomposición de la fracción biodegradable de los vertidos de residuos.

Las nuevas generaciones de incineradoras tienen una producción de dioxinas asumible para el medio ambiente, menor comparativamente que la producción de otras fuentes como, por ejemplo, las calefacciones urbanas domésticas.

Reducción del impacto causado por el sector de la construcción al disminuir la demanda de árido natural (recurso no renovable), sustituyéndolo por los residuos generados en la incineración.

### 3. Aprovechamiento energético (Valorización energética).

La posibilidad de producción de energía eléctrica a partir de la combustión de los residuos, contribuye a un menor coste y, medioambientalmente, a diversificar la producción nacional energética, ayudando al cumplimiento del Protocolo de Kioto y las Directivas comunitarias al respecto.

Si las propiedades del residuo son adecuadas, se puede alcanzar un aprovechamiento energético elevado al extraer la energía contenida en el mismo y hacer un uso posterior de la misma, lo que genera independencia energética.

### 4. Ventajas económicas.

Estas instalaciones permiten la valorización energética de los RSU, constituyendo de esta forma una fuente de energía alternativa. En relación con el punto anterior, la producción de energía de cualquier tipo (en nuestro caso eléctrica) conlleva beneficios económicos, ya que es un producto de alto valor financiero en el mercado.

Reduce las necesidades de importación de combustibles fósiles, Además, la reutilización de materiales podría causar una reducción en los costes de la compra de materia prima. Por otro lado, la escoria generada durante la valorización energética adquiere un valor como producto aplicable en el sector de la construcción.

Importante tener en cuenta que, gestionar nuestros propios residuos permite prescindir del gestor externo, lo cual se traduce en ahorro económico.

## 5. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN

A continuación, se muestran las diferentes tecnologías de tratamiento de residuos de las que se dispone hoy en día, según la clasificación proporcionada por el Ministerio para la Transición Ecológica:

1. Valorización y reciclaje material:
  - Preparación para la reutilización.
  - Procesos mecánicos.
  - Procesos biológicos de conversión:
    - Digestión anaerobia.
    - Compostaje.
  - Procesos mecánico-biológicos (TMB).
2. Valorización energética:
  - Pirólisis.
  - Gasificación.
  - Plasma.
  - Incineración.
3. Depósito en vertedero.



Ilustración 7. Sistemas de valorización RSU

## 5.1 VALORIZACIÓN Y RECICLAJE MATERIAL

### 5.1.1 PREPARACIÓN PARA LA REUTILIZACIÓN

Esta operación está recogida en la normativa de la prevención, constituyendo la segunda etapa en la jerarquía de gestión, formando parte de las estrategias de reducción de residuos. Comprende las operaciones de valorización consistentes en la comprobación, limpieza o reparación. Mediante estas los productos o sus componentes que se hayan convertido en residuos son preparados para poder reutilizarse de nuevo sin realizar ninguna transformación previa o anterior.



*Ilustración 8. Reutilización de residuos sólidos*

Las ventajas e inconvenientes de la reutilización son:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>La principal ventaja de este proceso, es la reducción de residuos generados, por lo que deberá de ser la opción elegida (jerárquicamente superior) que cualquier otro proceso de valorización si es posible su empleo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No siempre resulta posible, dado el ciclo de vida de los productos, no son reutilizables ilimitadamente.</li> </ul>

*Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de la reutilización*

### 5.1.2 TRATAMIENTO MECÁNICO

Las instalaciones de clasificación tienen la función de seleccionar el contenido del material entrante mediante la combinación de procesos de separación mecánicos, tanto automatizados como manuales, con el objetivo de recuperar las fracciones valorizables, preparándolas para su posterior comercialización. Los materiales que no

han sido separados se disponen para ser procesados, bien mediante tratamiento térmico o depósito en vertedero.

Este patrón de tratamiento se aplica principalmente para proceder a la clasificación de los residuos de envases ligeros que han sido recogidos de forma separada, aunque también puede ser utilizado para la selección de estos mismos materiales que se hallan contenidos en la fracción resto en las instalaciones de TMB.

Dependiendo del grado de automatización las instalaciones de clasificación de residuos de envases se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Manuales.
- Semiautomáticas.
- Automáticas.

En España las más comunes son las plantas de tamaño medio, con una capacidad de 2-3 t/h. Suele optarse por instalaciones semiautomáticas en las que con el tiempo se puede incrementar el grado de automatización, con el fin de pasar posteriormente a instalaciones automatizadas con elevada capacidad de 4,5 t/h e incluso superiores.



*Ilustración 9. Tratamiento mecánico (manual) de residuos*

Una instalación semiautomática de selección de residuos de envases ligeros comprende las siguientes áreas principales:

1. Zona de recepción de los residuos.
2. Área de alimentación de estos residuos y sistema de apertura de bolsas (abrebolsas).

3. Preclasificación manual.
4. Preclasificación mecánica.
5. Clasificación automática de materiales que son reciclables.
6. Clasificación manual de materiales reciclables.
7. Preparación -prensado y embalaje-, almacenamiento y expedición de los materiales.

Las ventajas e inconvenientes del tratamiento mecánico son:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducción de residuos enviados a vertedero, recuperando materiales reutilizables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aplicable a muy poca cantidad de residuos, como por ejemplo, envases separados en origen.</li> </ul>

*Tabla 4. Ventajas e inconvenientes del tratamiento mecánico*

### 5.1.3 TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Los tratamientos biológicos utilizan microorganismos para la descomposición de la materia orgánica, es decir, son tratamientos por biodegradación de la materia orgánica contenida en el residuo.

Pueden ser de tipo aerobio, el cual se utiliza para producir “compost” o bioestabilizar el residuo (compostaje parcial), o anaerobio, enfocado a la producción de biogás. De acuerdo con el cómo se realice el compost, podría o no ser apto para el mejoramiento de suelos. No obstante, se debe tomar en cuenta que hay compuestos en los residuos que son nocivos tanto para la salud como para el ambiente, por ejemplo, baterías alcalinas, componentes electrónicos y otro tipo de residuos comunes en viviendas.

### **COMPOSTAJE**

Consiste en la descomposición biológica de residuos orgánicos degradables como lodos de depuradora, estiércol, residuos agrícolas o forestales, etc. por medio de microorganismos (hongos, bacterias...).

Este proceso, que puede tener una duración de varias semanas, se lleva a cabo en presencia de oxígeno (aerobio) y en condiciones de ventilación, humedad y

temperatura controladas. Las características finales que presenta el compost dependen tanto de la duración como del método empleado.

El material orgánico resultante de esta transformación, llamado “compost”, se puede emplear como abono para agricultura, jardinería, recuperación de suelos o propósitos similares.

Para corregir alguna de sus propiedades, por ejemplo, relación Carbono/Nitrógeno, humedad, contenido en nitrógeno, etc., es necesario combinar el compost con otro tipo de residuos. Habitualmente en estos casos se añaden desechos vegetales, como son restos de poda, broza, etc.



Ilustración 10. Ciclo del compostaje



Ilustración 11. Compost producido a partir de residuos

Las ventajas e inconvenientes del compostaje:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aprovechamiento de un gran porcentaje de los residuos.</li> <li>▪ Prácticamente nulo impacto ambiental.</li> <li>▪ Reducción de residuos destinados a vertedero.</li> <li>▪ Compleción del ciclo biológico, donde los residuos vuelven a su origen.</li> <li>▪ A diferencia de otros fertilizantes, el compost producido es de alta calidad y características óptimas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo aprovechamiento de la energía contenida en el residuo.</li> <li>▪ Es un proceso largo, más aún si la climatología del lugar no es la adecuada (frío, humedad...).</li> <li>▪ Requiere una preparación previa para evitar impurezas y sustancias dañinas contenidas en el compost.</li> <li>▪ Incapacidad para aprovechar ciertos residuos (aquellos con alto contenido en metales pesados u otras características).</li> <li>▪ Altos costes de transporte para movilizar los desechos hasta la zona de aplicación.</li> <li>▪ Complicación a la hora de la venta, dada la competencia de los fertilizantes químicos.</li> </ul>

*Tabla 5. Ventajas e inconvenientes del compostaje*

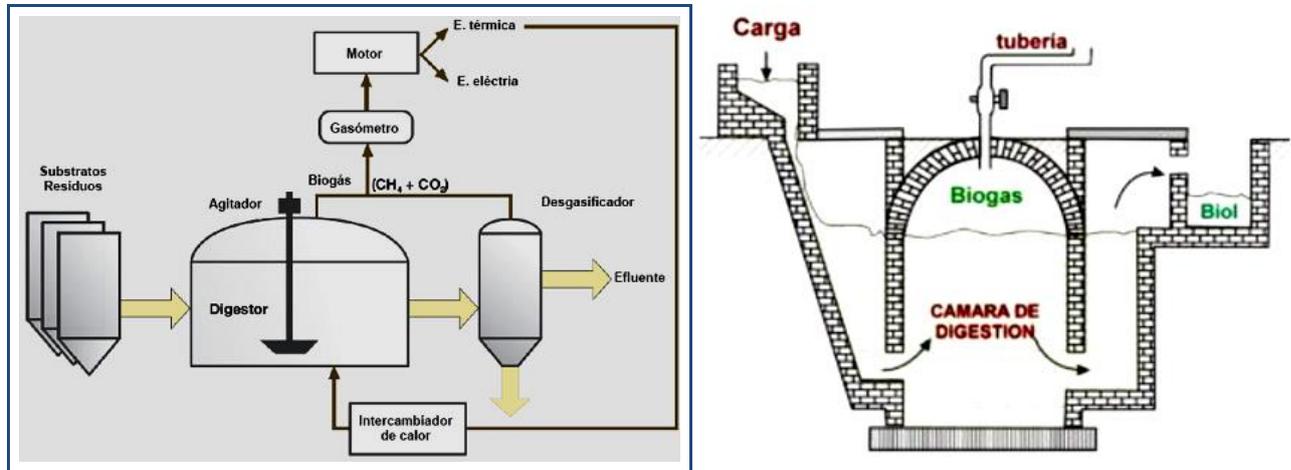
## **BIOMETANIZACIÓN**

La biometanización, también llamada digestión anaerobia, es un proceso en el que una selección natural de microorganismos descompone en ausencia de oxígeno la materia orgánica, en biogás y un residuo sólido estabilizado (aproximadamente, la mitad en peso que el residuo de partida). El biogás, que es una mezcla de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases minoritarios (vapor de agua, CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>...). Puede ser utilizado como combustible puesto que, si bien su composición depende de la materia orgánica digerida, la riqueza en metano suele estar entorno al 60%.

El biogás cuenta con un elevado poder calorífico (cerca de las 4.800 kcal/kg habitualmente), por lo que el resultado de la operación es un combustible de alto valor energético. Sin embargo, esta característica depende en gran medida del residuo empleado para la formación del mismo.

Por ello, es importante llevar a cabo un proceso de selección y separación efectivo de forma que sólo se empleen residuos óptimos para la producción del gas, ya que el uso

y los costes de las instalaciones de biometanización sólo se justifican con buenos rendimientos.



*Ilustración 12. Biometanización en digestor anaerobio*

Las tecnologías disponibles se clasifican en dos grupos, dependiendo del contenido en sólidos del residuo:

- Digestión anaerobia vía húmeda (contenido en materia seca del residuo por debajo del 20%).
- Digestión anaerobia vía seca (contenido en materia seca entre 20-40%).

El proceso se ejecuta en las siguientes etapas:

1. Selección de residuos.
2. Acondicionamiento del material para su digestión.
3. Digestión anaerobia.
4. Deshidratación (separación de fases sólida y líquida).
5. Tratamiento de la fracción líquida y otras aguas residuales generadas.
6. Estabilización de la fracción sólida.
7. Recogida y aprovechamiento del biogás.

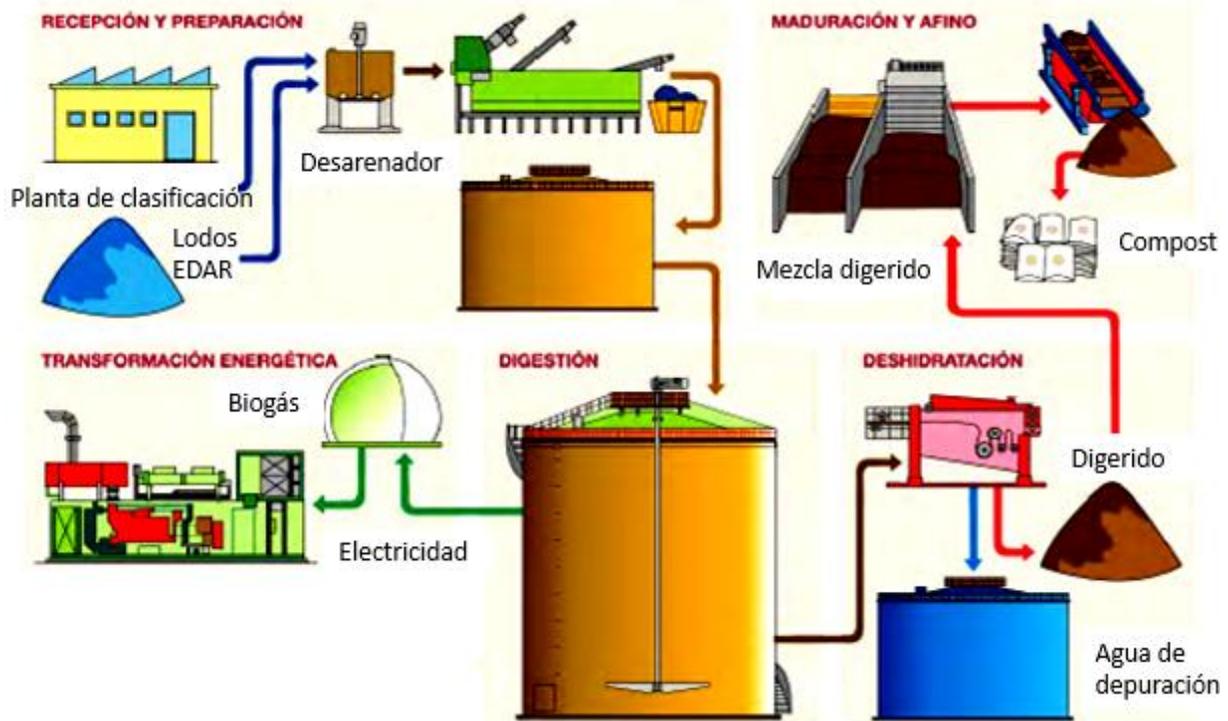


Ilustración 13. Diagrama de una planta de biometanización

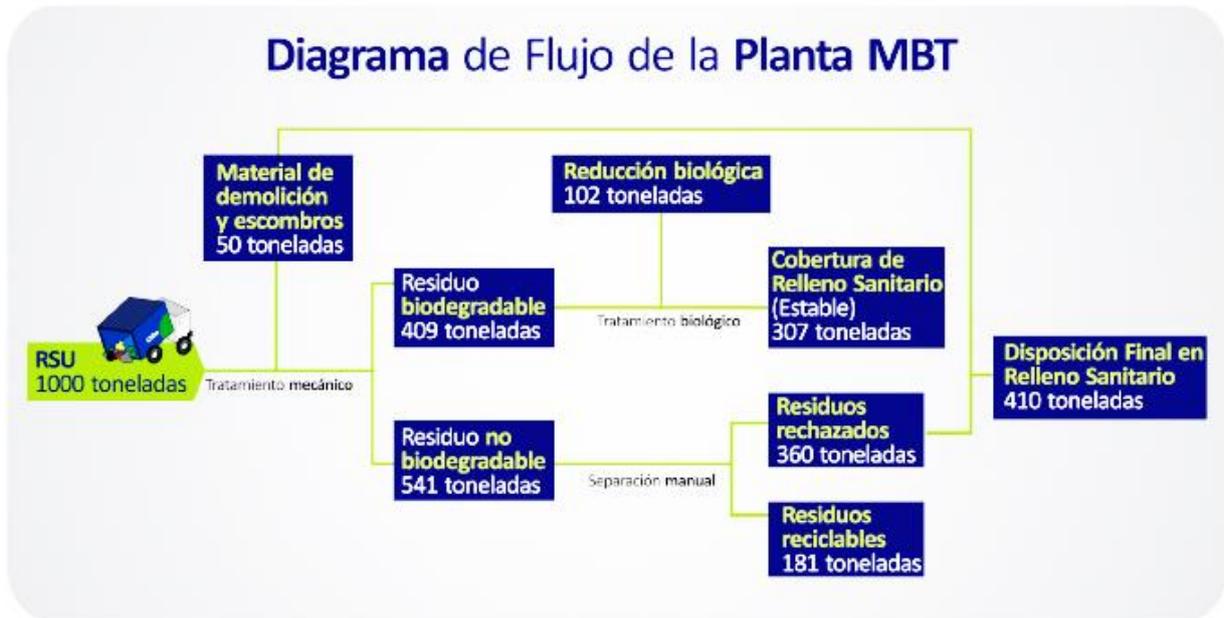
Las ventajas e inconvenientes de la biometanización:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite la valorización material del digestato además de la energética.</li> <li>Aceptado socialmente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alto coste de inversiones.</li> <li>Riesgo tecnológico (toxicidad, estabilidad).</li> <li>Selección rigurosa de la fracción orgánica.</li> <li>Dependencia de primas eléctrica para alcanzar rentabilidad.</li> </ul>

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de la biometanización

#### 5.1.4 TRATAMIENTO MECÁNICO-BIOLÓGICO (TMB)

Los tratamientos mecánico-biológicos, TMB, (o biológico-mecánicos, TBM) para el tratamiento de los residuos o fracciones de estos con contenido significativo de materia orgánica, están constituidos por la combinación de procesos físicos y biológicos. La materia orgánica procede de la fracción resto o la fracción inorgánica/seca, es decir fracción resto y envases ligeros recogidos conjuntamente.



*Ilustración 14. Diagrama de flujo planta TMB*

El tratamiento mecánico-biológico llevado a cabo en las instalaciones de procesamiento de residuos municipales pretende lograr los siguientes objetivos:

- Extraer de los residuos que entran los materiales impropios voluminosos o que pueden originar problemas en los procesos posteriores de tratamiento.
- La separación y recuperación de materiales valorizables.
- Preparar y organizar los residuos para un posterior tratamiento biológico y, finalmente, estabilizar la materia orgánica. En el caso de la biometanización, obtener biogás para conseguir su aprovechamiento energético.
- Acondicionar los flujos de salida de los procesos para su destino final o valorización.
- Como resultado de los dos puntos anteriores, lograr disminuir el rechazo saliente de planta y alcanzar su biodegradabilidad.

En función de las necesidades las instalaciones TMB pueden trabajar con diferentes líneas y tecnologías. En las instalaciones más usuales, la primera etapa está constituida por el tratamiento mecánico, si bien algunas instalaciones pueden invertir los procesos. Estas incluyen además de la recuperación de materiales valorizables, la separación de la materia orgánica contenida en la fracción de entrada.



*Ilustración 15. Planta de tratamiento TMB*

El proceso llevado a cabo en las instalaciones de TMB comprende las siguientes fases:

1. Zona de recepción de residuos.
2. Separación de voluminosos.
3. Apertura de bolsas.
4. Separación y acondicionamiento de la parte orgánica.
5. Proceso de tratamiento biológico según tecnología escogida.
6. Clasificación de los materiales reciclables.
7. Preparación (prensado y embalaje), almacenamiento y expedición de materiales.

Las ventajas e inconvenientes del TMB son las siguientes:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mezcla las ventajas del tratamiento mecánico y del biológico, ya que se recuperan los materiales reutilizables y se estabilizan los biodegradables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ De la misma forma, acumula los inconvenientes de ambos tratamientos, sin permitir un gran aprovechamiento de los residuos.</li> </ul>

*Tabla 7. Ventajas e inconvenientes del TMB*

## 5.2 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

La valorización energética comprende cualquier proceso de transformación de residuos mediante la aplicación de energía calorífica. La mayor ventaja de estos procesos radica, por una parte, en la reducción del volumen y, por otra, en el aprovechamiento energético. Los principales métodos de este tipo de tratamientos son la incineración, pirólisis, gasificación y el plasma.

### 5.2.1 PIRÓLISIS

Proceso de descomposición térmica (calentamiento) del residuo entre 500 y 900 °C en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante, generándose gases, líquidos y un sólido carbonoso “char”. Esta descomposición se produce a través de una serie de complejas reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. La pirólisis también constituye un paso previo a la gasificación y la incineración.

Esta tecnología es aplicable a la biomasa, pero más dificultosa para los residuos urbanos por la aparición de compuestos orgánicos complejos en las diferentes fases, dificultando el aprovechamiento energético.

Según la temperatura y el tiempo de reacción, el producto final se desplaza preferentemente hacia una u otra de las fases (sólida, líquida o gaseosa). Otros parámetros que pueden influir son el tipo de residuo, el estado de disgregación del residuo, la presión o la presencia de un catalizador.

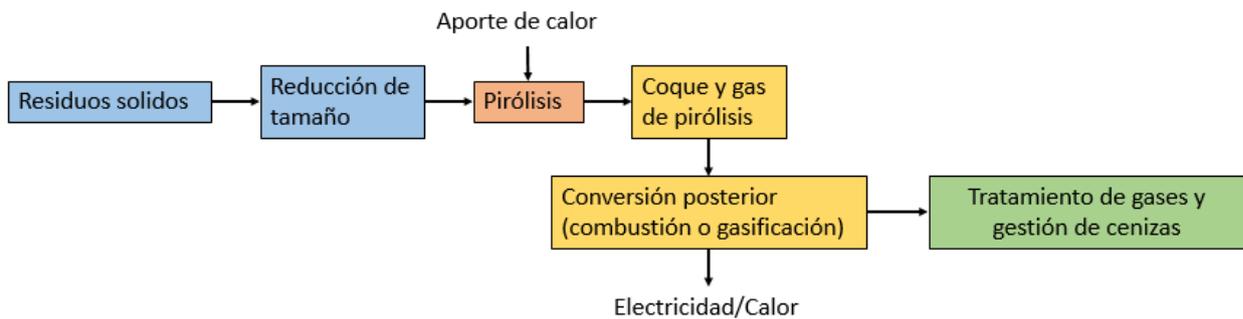
Se puede considerar que la pirólisis se inicia en torno a los 250 °C, llegando a ser prácticamente completa en torno a los 500°C, aunque esto está en función del tiempo de residencia del residuo en el reactor. A partir de la pirólisis pueden obtenerse diferentes productos secundarios útiles en función de la tecnología de tratamiento que se utilice:

- Gases (gas de síntesis): Compuestos principalmente de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros.
- Líquidos: Compuesto por una gran mezcla de distintos productos como pueden ser: cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos, y otras fracciones más pesadas.

- Sólidos: El producto sólido de la pirólisis es un residuo carbonoso “char” que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo.

Debido a su elevado poder calorífico, los gases y residuos líquidos pueden emplearse como combustible en la producción de electricidad.

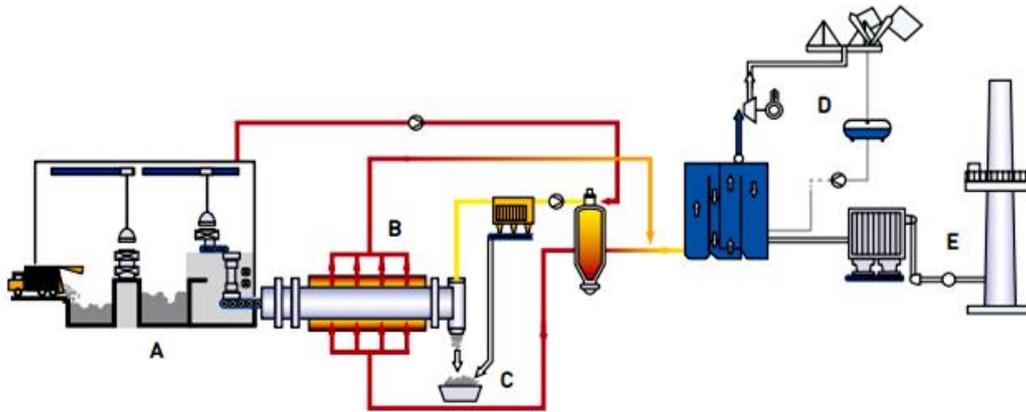
La pirólisis aplicada al tratamiento de residuos ha ganado aceptación en la industria junto a otras tecnologías avanzadas de tratamiento. No elimina los residuos sino que los transforma en carbón, agua, residuos líquidos, partículas, metales pesados, cenizas o tóxicos (en algunos casos), entre otros, vertiendo al aire desde sustancias relativamente inocuas hasta muy tóxicas, reduciendo así su volumen. Esta destilación destructiva obviamente imposibilita el reciclado o la reutilización. La pirólisis se puede utilizar también como una forma de tratamiento termal para reducir el volumen de los residuos y producir combustibles como subproductos.



*Ilustración 16. Diagrama de bloques de la pirólisis*

Al ser, probablemente, una de las técnicas de conversión energética menos investigadas su potencial de desarrollo es mayor.

A diferencia de la incineración, se lleva a cabo en ausencia total de oxígeno, por tanto, no se alcanza la combustión. Únicamente si el proceso es autotérmico se introduce una pequeña cantidad de oxígeno con el fin de lograr una combustión parcial que aporte calor al proceso.



- A - Zona de descarga y trituración
- B - Pirólisis
- C - Recogida y selección de residuos procedentes del sistema
- D - Recuperación de energía
- E - Depuración de gases

Ilustración 17. Diagrama de procesos planta de pirólisis

La tendencia actual en el tratamiento de residuos por pirólisis se enfoca al tratamiento de mezclas de residuos, debido a que estos no suelen estar limpios ni proceder de una sola fuente. Por otro lado, tratar diversos residuos-combustibles permite un mejor diseño del punto medio de funcionamiento de la instalación, además existe la posibilidad de adición, en determinadas circunstancias, de combustibles convencionales.

Las ventajas e inconvenientes de la pirólisis son las siguientes:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Recuperación de energía del gas.</li> <li>▪ Generación de combustible.</li> <li>▪ Reducción de volumen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tecnología poco extendida / poco probada.</li> <li>▪ Mezcla de gases compleja.</li> <li>▪ El producto residual "char" se destina a vertedero o incineración, y los residuos líquidos deben ser gestionados en plantas especiales.</li> </ul>

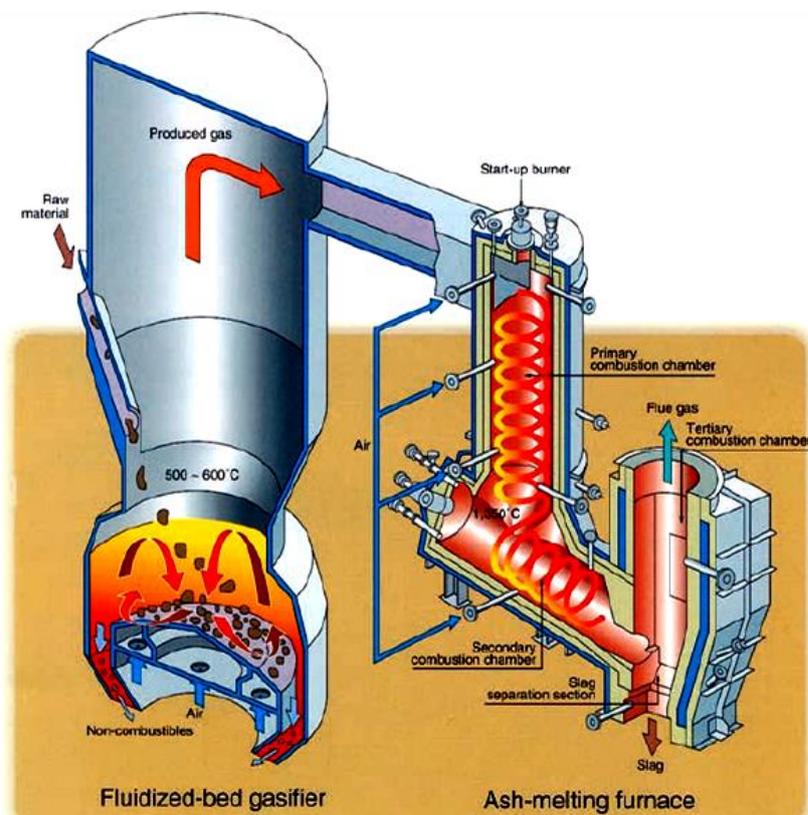
Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de la pirólisis

### 5.2.2 GASIFICACIÓN

Proceso termodinámico mediante el cual toda sustancia sólida o líquida a la que, en una atmósfera reductora, se le aporta una cantidad de energía suficiente para romper los enlaces moleculares, se transforma o bien en un gas de síntesis orgánico de bajo

poder calorífico o bien en una lava fundida, que al enfriarse se convierte en un producto vítreo inerte. La gasificación es un proceso de oxidación parcial de la materia en defecto de oxígeno, normalmente a una temperatura de unos 750°C.

La gasificación convencional, al trabajar a temperaturas que en ningún caso superan los 1.700 °C, es incompleta y da lugar a subproductos residuales (alquitranes, escorias cenizas). Bastante utilizado para biomasa. El gas de síntesis, obtenido por la gasificación de los compuestos orgánicos, está formado mayoritariamente por CO y H<sub>2</sub>. El gas de síntesis se aprovecha como combustible o para síntesis de productos.



*Ilustración 18. Gasificación*

Productos de la reacción:

- Gas de síntesis: Producto principal de la gasificación, es un gas combustible llamado gas de síntesis, más conocido como “Syngas”, que contiene productos de oxidación parcial del combustible (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en menor proporción). El objetivo es obtener gases combustibles que puedan ser posteriormente utilizados para valorización energética o química. Debido a la

temperatura, la fracción de gases condensables, de alto peso molecular, es muy reducida. El equipo que normalmente se emplea en la gasificación es un reactor de tipo “lecho fluidizado”.

- **Escorias:** Residuos sólidos no combustibles (inertes): Como en el caso de la incineración, no suelen tener valor energético, porque la fracción combustible ha sido gasificada. Como la temperatura suele ser inferior a la de incineración el grado de “inquemados” en las escorias suele ser superior a los procesos de combustión completa.

Igual que en los casos anteriores, el gas es empleado como combustible y las partículas sólidas carecen de valor energético.

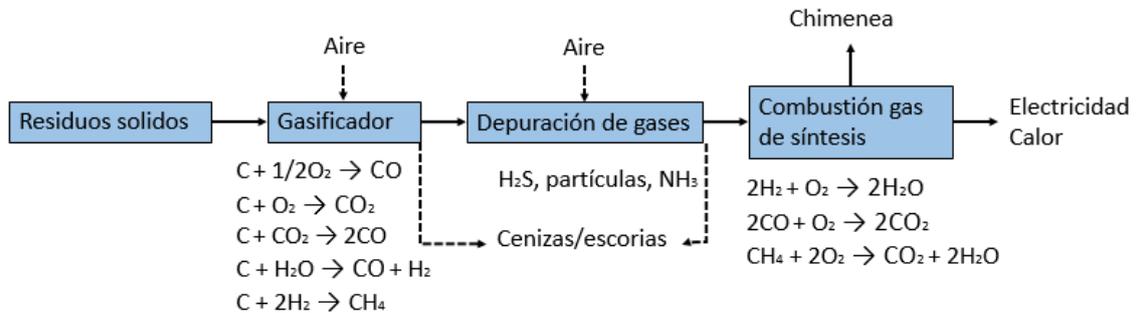


Ilustración 19. Diagrama de bloques gasificación

Es una tecnología finalista de tratamiento de los residuos. Permite su tratamiento integral y es compatible con otras tecnologías.

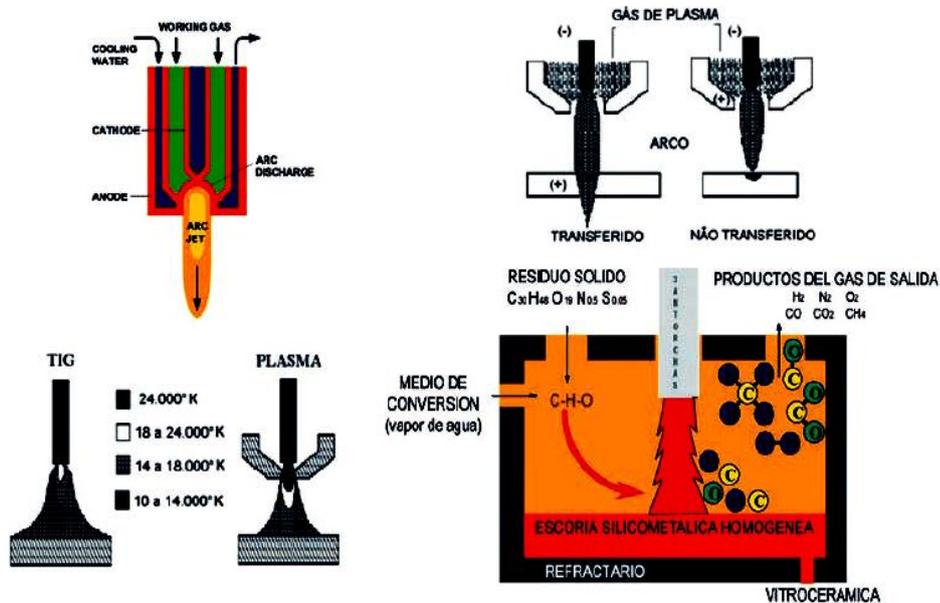
Las ventajas e inconvenientes de la gasificación son:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducción impacto ambiental.</li> <li>▪ Buena eficiencia energética.</li> <li>▪ Buena disponibilidad y flexibilidad para las capacidades alcanzadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos específicos.</li> <li>▪ Preparación previa.</li> <li>▪ A nivel industrial su desarrollo es para plantas pequeñas.</li> <li>▪ Inversión elevada.</li> <li>▪ Subproductos residuales.</li> <li>▪ Dificultad de escalación para plantas grandes.</li> </ul>

Tabla 9. Ventajas e inconvenientes de la gasificación

### 5.2.3 PLASMA

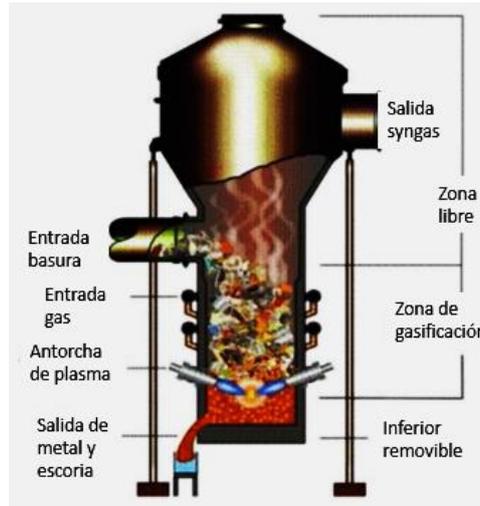
Consiste en un reactor con antorchas en las que se inyecta energía eléctrica de alto voltaje y algún tipo de gas como oxígeno, nitrógeno o argón. El proceso permite alcanzar temperaturas cercanas a los 4.500 °C y obtener el estado de plasma.



*Ilustración 20. Fundamentos de la tecnología de plasma*

La materia orgánica del residuo se convierte en un gas de síntesis (syngas) compuesto preferentemente por hidrógeno y monóxido de carbono que puede utilizarse posteriormente como combustible.

Los residuos inorgánicos se funden en el fondo del reactor obteniéndose un producto vitrocerámico que se puede destinar a diferentes usos, fabricación de aislante mineral, rellenos de bases de carreteras.



*Ilustración 21. Vasija de plasma*

Este proceso debe ser analizado cuidadosamente en función del tipo de residuo tratado, pues la relación coste/beneficio es muy variable dependiendo tanto del tipo de residuo como del resultado de la operación y del coste de la limpieza del syngás.

Las referencias de la utilización de plasma para tratar RSU están a nivel de plantas piloto o preindustriales y será, por tanto, necesario esperar algunos años hasta comprobar los resultados comerciales de estas primeras plantas de plasma aplicadas a los RSU.

Hasta ahora se ha aplicado a cierto tipo de residuos peligrosos y bastante homogéneos, como cenizas volantes, armas químicas, hospitalarios, etc., que permiten unos costes mayores que los normales aplicados a RSU.

Las ventajas e inconvenientes del plasma son:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rendimiento energético elevado.</li> <li>▪ Inmovilización de metales en roca vítrea. Descomposición de compuestos tóxicos en elementos básicos.</li> <li>▪ No requiere tratamiento previo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tecnología incipiente y poco probada para grandes instalaciones.</li> <li>▪ Elevados costes de inversión.</li> <li>▪ Mercados para los productos vitrocerámicos</li> </ul>

*Tabla 10. Ventajas e inconvenientes del plasma*

## 5.2.4 INCINERACIÓN

Proceso térmico ( $T^a > 850^{\circ}\text{C}$ , entre  $900\text{-}1.200^{\circ}\text{C}$ ) mediante oxidación química de los residuos con cantidades estequiométricas o en exceso de oxígeno, llevada a cabo en un horno incinerador. Los productos finales contienen gases calientes de combustión, compuestos principalmente nitrógeno, dióxido de carbono, y vapor de agua, así como subproductos no combustibles constituidos por las escorias y las cenizas.

Las operaciones llevadas a cabo en una planta incineradora de residuos se resumen en el siguiente gráfico:

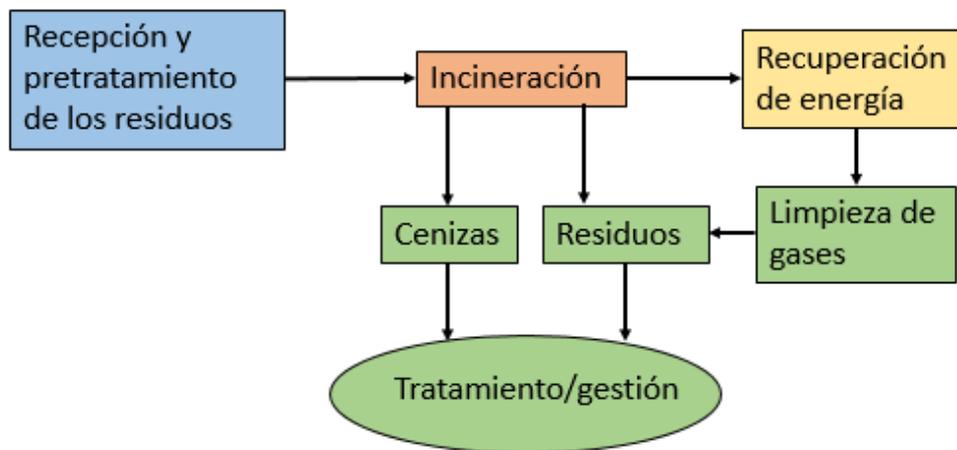


Ilustración 22. Diagrama de bloques incineración

En él se distinguen cuatro subsistemas que componen una planta de incineración:

- Recepción y pretratamiento de los residuos.
- Cámaras de combustión.
- Recuperación energía.
- Tratamiento de gases y residuos resultantes (cenizas, escorias y chatarras).

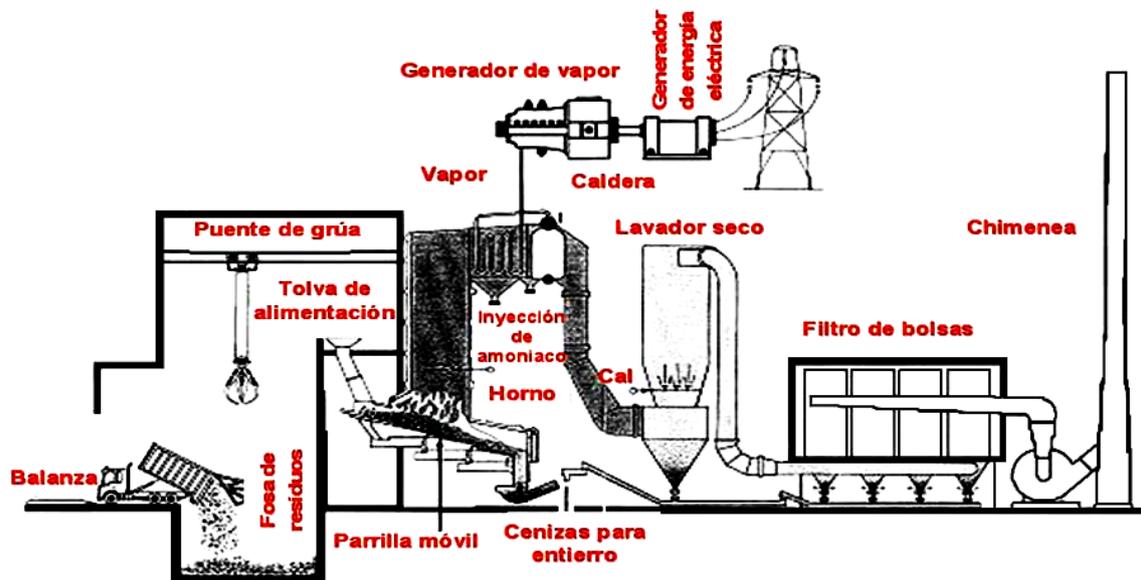
Los productos resultantes del proceso de incineración, se pueden clasificar de la siguiente manera:

### 1. Gases:

- $\text{CO}_2$  como resultado de la reacción.
- $\text{H}_2\text{O}$  como resultado de la reacción.

- O<sub>2</sub> no reaccionado debido al exceso.
  - N<sub>2</sub> del aire (teóricamente inerte).
  - SO<sub>2</sub> a partir del azufre contenido en el residuo.
  - NO<sub>x</sub> (a altas temperaturas el N<sub>2</sub> deja de comportarse como inerte).
  - CO como resultado de una combustión incompleta.
  - Ácidos formados a partir del agua y otros elementos, como compuestos orgánicos volátiles, PCBs, dioxinas y furanos y metales.
2. Partículas sólidas no combustibles (inertes):
- Cenizas, escorias, etc. recogido del fondo del equipo, procedente de la fracción inorgánica del residuo.
  - Sólidos volátiles arrastrados por los gases de salida.
3. Calor: Reacción fuertemente exotérmica.

El calor liberado en este proceso se emplea a su vez para producir vapor en un “ciclo Rankine”. Finalmente, se aprovecha el vapor para generar electricidad mediante una turbina.



*Ilustración 23. Diagrama de una planta de incineración*

La incineración es un proceso complejo que debe ser cuidadosamente diseñado y operado, requiere de altos costos de inversión, operación y mantenimiento, así como mano de obra cualificada. Sin embargo, se trata de una tecnología demostrada y

disponible comercialmente para el tratamiento de residuos peligrosos. De hecho, es claramente aceptada como la mejor alternativa disponible para la destrucción de la mayoría de los residuos orgánicos peligrosos.

Las ventajas e inconvenientes de la incineración se resumen en la siguiente tabla:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No requiere pretratamiento.</li> <li>▪ Legislación muy estricta y definida.</li> <li>▪ Tecnología robusta y altamente probada a diferentes escalas.</li> <li>▪ Baja sensibilidad a la variabilidad en la composición de los residuos.</li> <li>▪ Reducción significativa del volumen de los residuos.</li> <li>▪ Alta Fiabilidad y disponibilidad.</li> <li>▪ Flexible y Modular.</li> <li>▪ Segura.</li> <li>▪ Emisiones muy contraladas y límites estrictos.</li> <li>▪ Resultados medibles y contrastados.</li> <li>▪ Se rige y utiliza las mejores tecnologías disponibles.</li> <li>▪ Control directo de emisiones por el organismo ambiental.</li> <li>▪ Posible reutilización de escorias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inversión elevada.</li> <li>▪ Humedad alta de los residuos penaliza el rendimiento.</li> <li>▪ Rechazo social.</li> <li>▪ Subproductos (escorias y cenizas).</li> </ul>

*Tabla 11. Ventajas e inconvenientes de la incineración*

### 5.3 DEPÓSITO EN VERTEDERO

Los vertederos o depósitos controlados son instalaciones para la eliminación de residuos. Estos se pueden depositar tanto subterráneamente como en superficie, por períodos de tiempo superiores a los considerados para el almacenamiento temporal (instalación permanente). Se incluyen también las instalaciones internas de

eliminación de residuos, es decir, los vertederos en que un productor elimina sus residuos en el lugar donde estos se producen.



*Ilustración 24. Depósito en vertedero*

El vertido es la última posibilidad contemplada dentro de la jerarquía de gestión de residuos de competencia municipal, por lo que solamente se deberían destinar a estas instalaciones aquellos residuos que no pueden ser dispuestos para su reutilización, reciclados, o valorizados después de haber sido sometidos a un tratamiento previo (exceptuando los inertes) para reducir tanto su volumen como su peligrosidad, generando de esta manera las mínimas aportaciones posibles.

Los vertederos controlados son depósitos que deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Impermeabilización total del suelo.
- Contar con sistemas de canalización de lixiviados y tuberías que recojan el biogás que se forma en su interior (pudiendo realizar un aprovechamiento energético del mismo).

En la actualidad está totalmente prohibido el vertido de residuos de manera no controlada en todo el territorio nacional, según lo establecido en la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados (que sustituye a la Ley 10/1998 de residuos), con el objetivo de evitar problemas como la contaminación de aguas, la generación de sustancias peligrosas, la transmisión de enfermedades o ser un potencial foco de incendio.

El reto es el depósito controlado eficiente y ambientalmente compatible, que reinicie el ciclo de la materia sin alterar el equilibrio ecológico del entorno (recuperación del agua, recuperación del gas, etc.).

Para seleccionar el emplazamiento más adecuado para un depósito controlado o vertedero se debe tener en cuenta, que no debe suponer un daño ambiental actual ni futuro, no ocasionar la degradación inmediata de valores ambientales y socioeconómicos y, de igual manera, no interferir con el desarrollo y las expectativas de la comunidad.

Según la tipología de residuos que se depositen en los vertederos se pueden clasificar en:

- Vertedero para residuos peligrosos.
- Vertedero para residuos no peligrosos, entre los que se encuentran los residuos de competencia municipal.
- Vertedero para residuos inertes. Residuos no peligrosos y que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas.

Las ventajas e inconvenientes del vertido de RSU son:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fácil implantación.</li> <li>▪ Costes reducidos de instalación y operación.</li> <li>▪ Capacidad de absorber variaciones de producción.</li> <li>▪ Posibilidad de reutilización del terreno tras la clausura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Proliferación de agentes transmisores de enfermedades, como ratas e insectos.</li> <li>▪ Olores desagradables.</li> <li>▪ Filtración de los productos contaminantes hasta las capas subterráneas de agua.</li> <li>▪ Requiere de grandes extensiones de terreno.</li> <li>▪ Acumulación de compuestos tóxicos en el suelo.</li> <li>▪ Rechazo social.</li> </ul>

*Tabla 12. Ventajas e inconvenientes del depósito en vertedero*

## 6. ALTERNATIVA SELECCIONADA

Tal y como hemos visto con anterioridad, la jerarquía establecida indica que la primera opción debe de ser siempre la reutilización, seguida del reciclaje o su aplicación al suelo (compostaje), la valorización energética y como última opción el vertido. Dado que la legislación estatal establece que se debe de seguir dicha jerarquía, analizaremos en dicho orden las posibles alternativas.

En primera instancia, se descartará la reutilización, dado que los residuos que se tratan se supone que no permiten dicho tratamiento. También se descartarán el tratamiento mecánico y el tratamiento mecánico-biológico, dado que estos procesos se encuentran enfocados para materiales reutilizables y reciclables, mayormente envases, y en nuestro caso, dado que se trata de residuos recogidos en masa, sin una recogida selectiva, no tiene mucho sentido la aplicación de estos tratamientos.

Posteriormente, se procede a analizar si el residuo es apto para su deposición en el suelo. Si bien es cierto, que una parte de estos residuos es de origen orgánico, también lo es, que contienen una gran parte de materiales inorgánicos, como es el caso de plásticos, papeles o metales, lo que imposibilita su empleo para la fabricación de compost. Por tanto, debemos descender un escalón más para llegar a la valorización energética.

Como ya se ha expuesto, existe una amplia variedad de tratamientos térmicos de los residuos. Aunque todos los tratamientos indicados son conocidos tanto a nivel teórico como de laboratorio, no sucede lo mismo en cuanto a desarrollos comerciales. Hay procesos bien desarrollados con gran flexibilidad, fiabilidad, disponibilidad, robustez y eficiencia energética, como es la incineración, que responden adecuadamente para tratar un material tan especial como los RSU (heterogeneidad, variabilidad térmica, producción continua y en crecimiento, etc.), otros, en cambio, sólo disponen de plantas piloto y deben demostrar que cumplen tres condiciones esenciales:

- Disponibilidad en cuanto que, son capaces de tratar un material que se genera continuamente y que, si no se trata a diario, debe ir a vertedero.
- Disponer de referencias reales que demuestren esa disponibilidad al tratar el RSU de cada lugar.

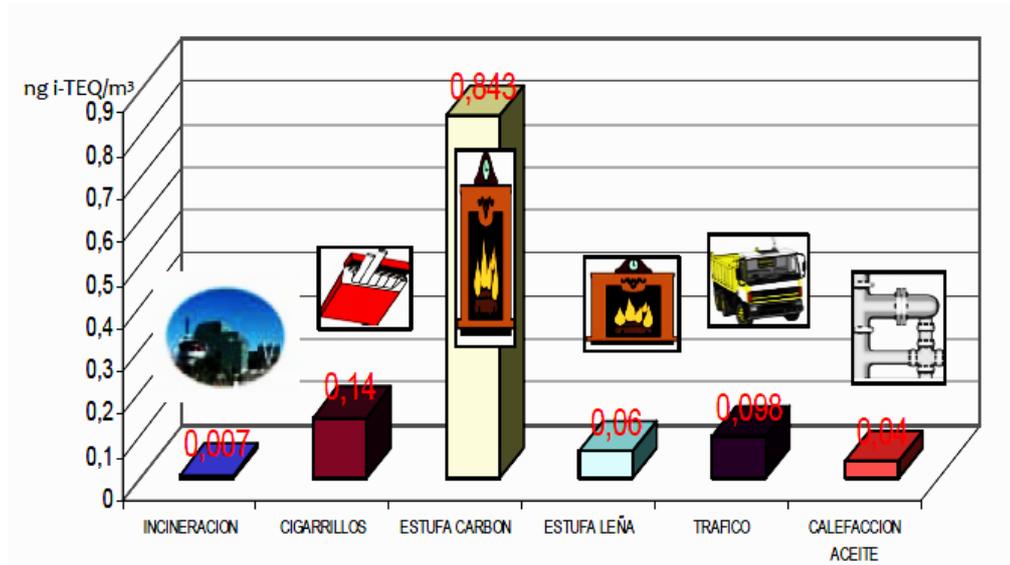
- Que el coste total (inversión y operación) sea adecuado al precio del mercado local donde se trata de instalar y sustituir o complementar a otros procesos (vertedero, plantas de pretratamiento, tratamientos mecánico–biológicos, etc.).

Se puede concluir que, si bien la incineración es un proceso complejo que debe ser cuidadosamente diseñado y operado, requiere de altos costos de inversión, operación y mantenimiento, así como mano de obra cualificada, sin embargo, se trata de una tecnología demostrada y disponible comercialmente para el tratamiento de residuos y es claramente aceptada como la mejor alternativa disponible para la destrucción de estos, siempre que se cumpla con la legislación vigente.

Dado que, como se ha mencionado con anterioridad, la incineración de RSU aún genera controversia entre la población, se presentan a continuación, una serie de datos que muestran el impacto de estas instalaciones, en comparación con otras fuentes de emisión de contaminantes, que evidencian que las plantas de valorización energética mediante sistemas de incineración de vanguardia NO suponen riesgo para la salud de las personas y contribuyen a reforzar nuestra elección.

- Según un estudio de la Universidad de Oviedo, el impacto sobre la salud de una incineradora moderna equivale a fumarse un cigarro al año.
- La Agencia de Protección de la Salud de Gran Bretaña ha recomendado no seguir estudiando el impacto de las incineradoras sobre la salud de las personas pues considera probado la no peligrosidad de las mismas.
- Según un estudio del Ministerio de Medio Ambiente Británico, las emisiones de las dioxinas y furanos de las incineradoras representan el 1% del total, mientras que las emisiones en fuentes domésticas (cocinas y quema de carbón) representan el 18%.
- Datos del inventario Nacional del Reino Unido: En una sola noche de hogueras en 2004 se liberaron más de 24 veces las dioxinas emitidas en un año por todas las plantas que tratan combustible.
- La Agencia Ambiental del Reino Unido estima que las dioxinas emitidas en 15 minutos de los fuegos artificiales para la celebración del nuevo milenio equivalen a 120 años de emisión de la planta incineradora del sudeste de Londres.

- Los países que más incineran son los que más reciclan.



Gráfica 3. Gráfico comparativo de emisiones de dioxinas

Concluyendo, esta opción, teniendo en cuenta los patrones de exigencia europeos, en la actualidad está siendo adoptada en muchos países y recomendada como solución para algunos de los problemas de las grandes aglomeraciones de población.

Por tanto, a partir de este momento, el proyecto se centrará en el diseño y el dimensionamiento de una planta de incineración de residuos, estudiando, así mismo, su viabilidad económica.

## 7. ANÁLISIS DE RIESGOS Y GESTIÓN DE STAKEHOLDERS

Dada la envergadura del proyecto, en el presente epígrafe se realizarán el análisis de riesgos y la gestión de stakeholders, para tratar de reducir los problemas que pudieran surgir, aumentando de este modo las posibilidades de éxito. Este apartado se realizará de forma breve, con el objeto de que pueda resultar de utilidad en el futuro al Project Manager.

### 7.1 ANÁLISIS DE RIESGOS

A continuación, se expondrán los principales riesgos que se podrían llegar a dar en este proyecto, siendo importante tenerlos en cuenta previamente, para así poder atajarlos de forma adecuada y tratar de evitar posibles problemas posteriores.

- A. Retrasos: es muy habitual que en esta clase de proyectos se den retrasos en las distintas tareas del proyecto. Es posible que se den situaciones inesperadas en el momento de ejecutar la obra del proyecto, que obliguen a realizar una serie de cambios en la ejecución de la obra para proceder a solventarlas. Estos cambios suponen, en la mayor parte de los casos, que haya retrasos en las fases principales de la obra.
- B. Sobrecostes: este riesgo se encuentra fuertemente ligado al riesgo anterior, dado que en muchas ocasiones se dan al mismo tiempo, siendo dichas situaciones inesperadas las que generan los sobrecostes.
- C. Menor cantidad de residuos que la de diseño. Los riesgos hasta ahora vistos, se podrían dar durante la construcción de la planta, pero este riesgo, sin embargo, podría darse durante la operación de la misma. Si no se llegase a un acuerdo con los ayuntamientos necesarios, podrían darse dos situaciones negativas. Por un lado, si la cantidad de residuos que se consigue tratar es excesivamente pequeña, el funcionamiento del horno podría no ser el correcto, pudiendo ser necesario un combustible auxiliar o llegando, incluso, a la parada de la planta. Por otro lado, la instalación no alcanzaría los beneficios anuales previstos, dado que disminuirían los ingresos por el canon a los ayuntamientos, así como por la venta de electricidad.

Una vez expuestos los diferentes riesgos del proyecto, se lleva a cabo un estudio de la importancia de cada uno, en función de las consecuencias en caso de suceder y, por otra parte, de la probabilidad de ocurrencia. Para ello se utiliza la matriz de consecuencias-impacto, en la que se sitúa cada una de las complicaciones para poder ser ponderadas. A continuación, se muestra dicha matriz, situando en ella los riesgos del proyecto.

		PROBABILIDAD				
		Raro	Poco probable	Posible	Muy probable	Casi seguro
CONSECUENCIAS	Despreciable	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Menores	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Medio
	Moderadas	Medio	Medio	Medio	Alto <b>A</b>	Alto
	Mayores	Medio	Medio	Alto <b>B</b>	Alto	Muy alto
	Catastróficas	Medio <b>C</b>	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto

Ilustración 25. Matriz de consecuencias-impacto del proyecto

Como puede verse, se debe prestar especial atención a los riesgos A y B, es decir, a los retrasos y sobrecostes, aunque en ningún momento debemos perder de vista el otro riesgo (menor cantidad de residuos), así como otros posibles riesgos que no han sido contemplados en el presente epígrafe.

**Plan de contingencia:**

Una vez analizados los diferentes riesgos, deben tomarse una serie de decisiones en torno a los mismos, para evitar o tratar de disminuir los posibles impactos en el proyecto, en caso de que estos sobrevengan. Se enumeran las soluciones planteadas para cada uno de los riesgos:

- Retrasos: Si estos retrasos se dan en tareas que se encuentran fuera del camino crítico mostrado en el diagrama de Gantt, y no son lo suficientemente largos como para que estas tareas pasen a ser críticas, no supone ningún tipo de problema. Por tanto, debemos de centrarnos en dichas tareas críticas, ya

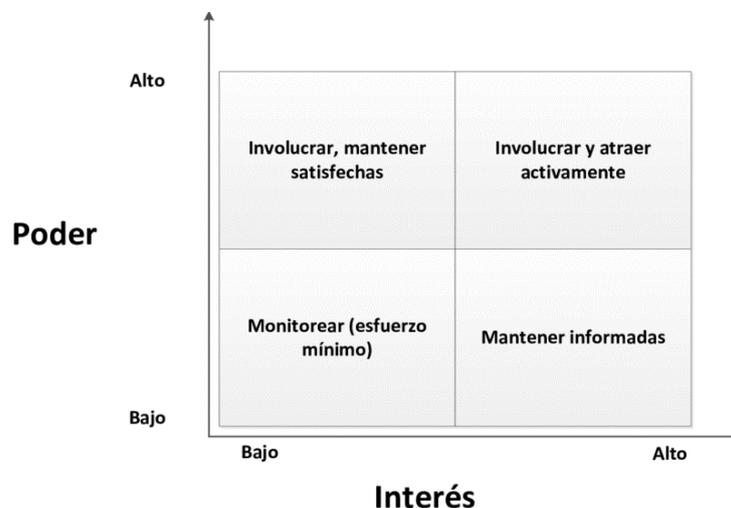
que, en caso de sufrir retrasos, todo el proyecto se vería perjudicado. Estas tareas, a las que deberemos de prestar especial atención son: la ingeniería básica, la obra civil, el montaje, tanto eléctrico como mecánico, y la puesta en marcha de la planta.

- Sobrecostes: como prevención a los posibles sobrecostes, se aconseja la realización de un estudio económico más a fondo en caso de llevarse a cabo el proyecto, previendo siempre un apartado de imprevistos en el presupuesto, para poder suplirlos en caso necesario.
- Cantidad de residuos: para tratar de reducir las posibles incertidumbres en cuanto al número de municipios que se adscribirán para tratar sus residuos en la planta, sería recomendable comenzar las negociaciones antes de llevar a cabo la misma, acordándose el canon impuesto a la gestión de residuos.

## 7.2 GESTIÓN DE STAKEHOLDERS

Se define como stakeholder a las personas o grupos que están interesados en la realización o éxito del proyecto, o que están afectados por el mismo. Es fundamental identificar a los interesados desde el comienzo del proyecto, analizando sus niveles de interés, expectativas, importancia e influencia.

Para la gestión de los stakeholders se emplea generalmente la matriz de poder-interés, la cual clasifica a las partes involucradas en cuatro grupos dependiendo de los mismos, indicando además como se debe de tratar cada una de ellas.



*Ilustración 26. Matriz de poder-interés*

A continuación, se muestran los principales stakeholders de nuestro proyecto, clasificados como actores primarios, si tienen una obligación contractual o legal con el proyecto y actores secundarios, si no tienen dicha obligación.

- Actores primarios:
  - Cliente.
  - Ayuntamientos que tratan sus residuos.
  - Equipo que lleva a cabo el proyecto.
  - Proveedores.
  - Acreedores.
- Actores secundarios:
  - Ayuntamiento de Madrid.
  - Ciudadanos de la zona.
  - Activistas medioambientales.



*Ilustración 27. Clasificación de los stakeholders en la matriz de poder-interés*

Para que todo esto funcione correctamente, se deberán de llevar a cabo un gran número de reuniones con los distintos stakeholders.

## 8. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

### 8.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La incineración de residuos sólidos urbanos es un proceso de combustión controlada que se lleva a cabo en plantas incineradoras, mediante el cual se incinera la fracción combustible de los residuos, dando lugar a diversos productos secundarios, bien sean sólidos (escorias y cenizas) o gaseosos (gases de combustión). La presencia de todos estos productos hace que la incineración no se pueda considerar un sistema de eliminación de los residuos, sino una forma de tratamiento, que conlleva posteriores procesos de depuración de gases, y vertido de escorias.

Mediante la incineración, se consigue una reducción de volumen y peso de los residuos, que puede suponer como máximo el 70% en peso y del 80 al 90% en volumen, en función del contenido en materiales combustibles e inertes presentes en los residuos.

Se muestra a continuación el esquema general de una planta de incineración de RSU.

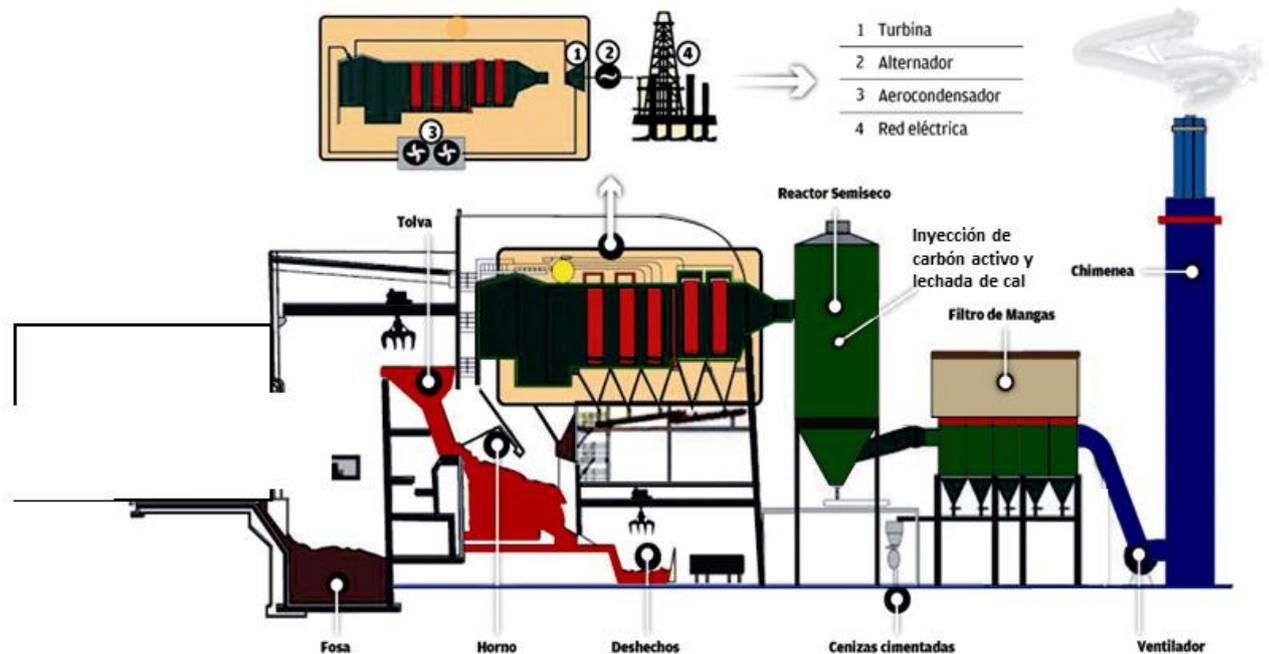


Ilustración 28. Esquema general planta incineradora de RSU

## 8.2 SUBSISTEMAS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE RSU

Se puede subdividir el proceso de tratamiento térmico de RSU en los siguientes subsistemas (áreas funcionales de la planta):

1. Área de recepción, almacenamiento y alimentación de RSU:
  - Recepción de residuos: zona de pesaje y arco de detección de materiales radiactivos.
  - Foso de residuos y nave de descarga de camiones.
  - Puentes grúa y tolvas de alimentación.
2. Sistema de incineración: formado por el conjunto horno-caldera.
3. Generación energía eléctrica:
  - Ciclo Rankine.
  - Tratamiento del agua.
  - Alternador y parque de alta tensión.
4. Tratamiento de gases:
  - Sistema de desnitrificación “SNCR”.
  - Reactor.
  - Filtro de mangas.
  - Evacuación de gases de combustión.

### 8.2.1 ÁREA DE RECEPCIÓN, ALMACENAMIENTO Y ALIMENTACIÓN DE RSU

#### Recepción de residuos:

El proceso comienza con la recepción de los residuos, habitualmente en camiones, los cuales han de pasar por la zona de pesaje (tanto para acceder como para abandonar las instalaciones se deberá de realizar el pesaje del camión) y el arco de detección de materiales radiactivos (para evitar la entrada de estos) situados en la entrada principal de la planta, antes de continuar su camino hacia la zona de descarga del foso de residuos. La importancia de los sistemas de pesaje en la gestión de residuos y el reciclaje no puede ser cuestionada, dado que es crucial mantener un recuento preciso de los residuos, para poder realizar el cálculo de los costos y la eficiencia de la instalación. En esta misma zona se situará la caseta de vigilancia y control de entrada y salida de vehículos.



*Ilustración 29. Zona de pesaje y arco de detección de materiales radiactivos*

### Nave de descarga y foso de residuos:

En el foso se recogen los residuos que llegan a la planta. La nave de descarga dispone del espacio suficiente para que los camiones accedan a ella y efectúen la maniobra de descarga en el interior, reduciendo así el impacto visual y olfativo. Se encuentra construido en depresión para evitar la salida de olores, estando el foso impermeabilizado para evitar filtraciones a la tierra y aguas subterráneas. Los fosos suelen tener una capacidad de almacenamiento equivalente a los residuos recogidos durante tres-cinco días. Además de la función directa de almacenamiento, los fosos también se emplean para la mezcla de RSU, para lograr que los residuos que alimentan a la planta conserven cierta homogeneidad.



*Ilustración 30. Foso de almacenamiento de residuos*

### Puentes grúa y tolvas de alimentación:

Se emplearán grúas-pulpo que, además de emplearse para alimentar el residuo a las tolvas de alimentación de los hornos, también servirán para la mezcla de residuos de la que se ha hablado con anterioridad.



*Ilustración 31. Puente grúa-pulpo*

Los residuos son depositados en la tolva desde la que fluyen hasta la entrada al horno, realizando así la alimentación del mismo. El empleo de tolvas permite una regulación precisa de la cantidad de residuos introducidos.

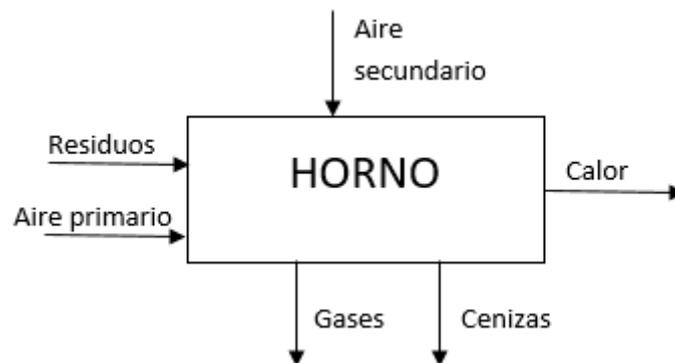
#### 8.2.2 SISTEMA DE INCINERACIÓN.

Se trata de la etapa más importante que se lleva a cabo en la planta de valorización y, tal y como se ha comentado con anterioridad, lo forman el conjunto horno-caldera.

El horno es el dispositivo donde tiene lugar la combustión, es decir, la reacción de oxidación mediante la cual el residuo es quemado para obtener calor. En dicha oxidación se descomponen los residuos, descomposición que en condiciones ideales se daría empleando la cantidad estequiométrica de oxígeno, pero que en la práctica se lleva a cabo con un exceso de este. En nuestro caso, dado que emplearemos un horno de parrillas, se utilizará el doble de oxígeno del estequiométrico, lo cual beneficiará a la instalación para reducir la temperatura del horno por debajo de los

900°C (temperatura a partir de la cual el cloro contenido en los residuos sería mucho más corrosivo para la instalación), pero sí permitiendo alcanzar la temperatura de 850°C en el horno durante al menos dos segundos, tal y como nos exige la legislación. Sin embargo, dicho exceso, ocasiona que el nitrógeno contenido tanto en el aire como en los residuos deje de actuar como inerte y reaccione contribuyendo a la formación de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y gases nocivos que deberán de ser tratados posteriormente. Para que la combustión sea correcta, los principales parámetros a los que se debe de prestar atención son: la temperatura del horno, la cantidad de aire introducido, y el tiempo de residencia de los gases y residuos dentro del horno.

A continuación, se muestra los aportes y salidas del horno.



*Ilustración 32. Aportes y salidas del horno*

El empleo del horno de parrillas es, sin duda, el más indicado para la incineración de RSU, dado que se trata de un horno de gran versatilidad, que permite la incineración de todo tipo de residuos, sin importar su forma ni tamaño ya que dispone de una gran capacidad de carga.

En la caldera, se recupera el calor procedente de la incineración de residuos para su transmisión a un fluido caloportador en fase líquida o vapor (en nuestro caso agua), para su posterior aprovechamiento en el ciclo Rankine. Por tanto, se podría decir que se trata del elemento de unión entre la generación de calor y la generación de electricidad.

En la caldera, además de la recuperación de calor y el enfriamiento de gases -que son efectos simultáneos- se produce una separación importante de las partículas de polvo.

El grado de desempolvado suele ser el suficiente para un adecuado funcionamiento de los sistemas de depuración de gases. Dichos polvos, se recogen junto con las chatarras y cenizas por la parte inferior del horno y la caldera y se acumulan para su posterior envío para tratamiento.

Se facilitará una descripción más detallada de los equipos en el siguiente epígrafe.

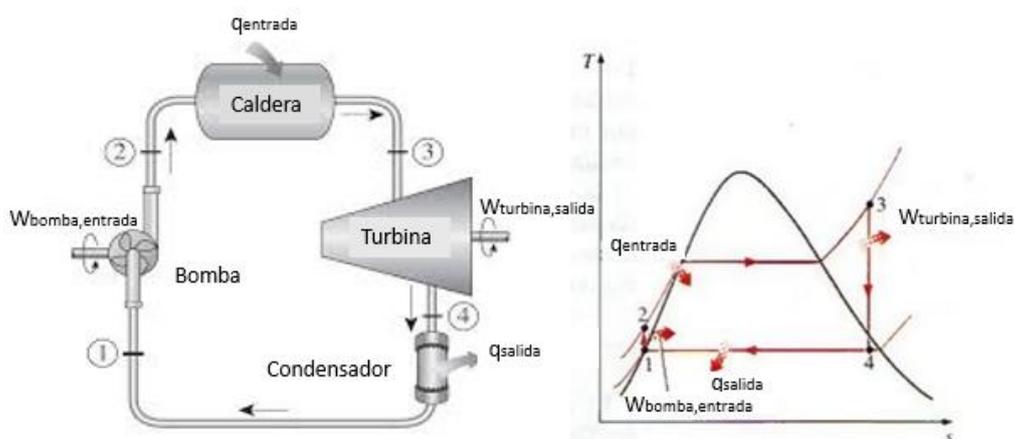
### 8.2.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Hasta ahora hemos descrito la parte del proceso encargada de la eliminación o reducción en gran medida de los residuos. En este punto veremos cómo se aprovecha el calor de los gases de combustión para la generación de energía.

#### Ciclo Rankine:

Se trata del ciclo termodinámico que seguirá la planta para la generación de energía eléctrica a partir de calor. El ciclo tendrá en común con el subsistema de incineración de residuos la caldera, equipo donde se intercambiará el calor entre los gases de combustión obtenidos tras la incineración y el fluido de trabajo del ciclo. Este fluido será el agua, dado su bajo coste, gran disponibilidad, baja peligrosidad y su alto poder específico.

A continuación, se muestra el ciclo simple de Rankine:



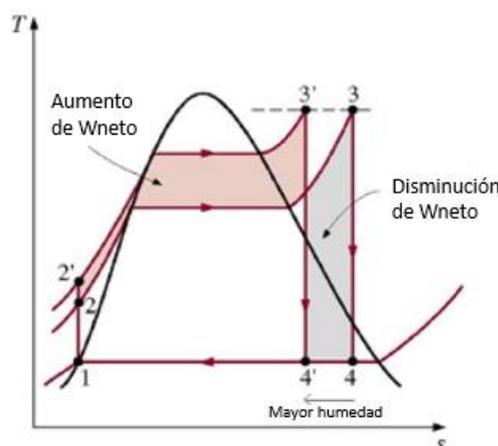
*Ilustración 33. Ciclo Rankine simple y diagrama T-s*

Se puede observar como el ciclo simple está formado por 4 equipos: la caldera, la turbina, condensador y bomba. Los procesos que se llevan a cabo en el ciclo se describen brevemente a continuación:

- En el proceso 1-2 se aumenta la presión del líquido mediante la bomba, a la que se aporta un pequeño trabajo exterior.
- El proceso 2-3 es una transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera. Con este calor se evapora todo el líquido y se calienta el vapor hasta la temperatura máxima.
- El proceso 3-4 se trata de una expansión adiabática en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador, generándose de esta forma energía mecánica.
- El proceso 4-1 consiste en refrigerar el vapor de trabajo a presión constante en el condensador hasta el estado de líquido, para iniciar de nuevo el ciclo.

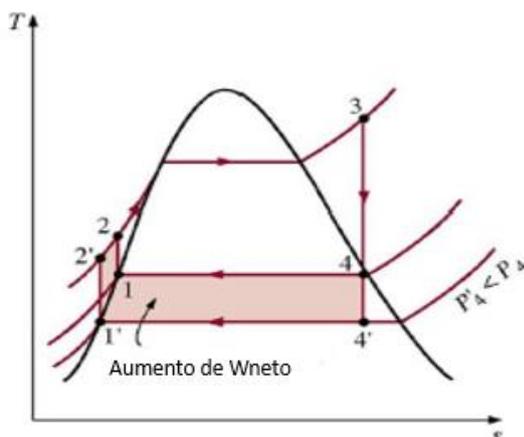
Partiendo del ciclo simple, aplicaremos las siguientes mejoras en nuestro diseño para aumentar la eficiencia de este:

1. Empleo de una presión elevada en la caldera (40 bar). De esta forma aumentamos el trabajo obtenido, dado que aumenta el área contenida en el diagrama T-s, aumentando por tanto el rendimiento del ciclo. Como limitación, debemos tener en cuenta que dicho aumento de la presión, disminuye el título del vapor a la salida de la turbina, lo cual puede llegar a resultar dañino para los alabes si disminuye hasta más de un 0,85.



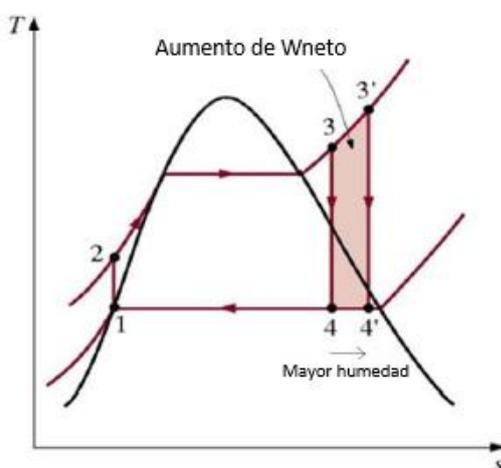
Gráfica 4. Variación del diagrama T-s al aumentar la P en la caldera

- Con el mismo objetivo de aumentar el trabajo (aumentar en mayor medida el área comprendida en el diagrama T-s), se disminuirá la presión del condensador (hasta los 0,1 bar). Igualmente dispondremos de la misma limitación que en el caso anterior.



Gráfica 5. Variación del diagrama T-s al disminuir la presión del condensador

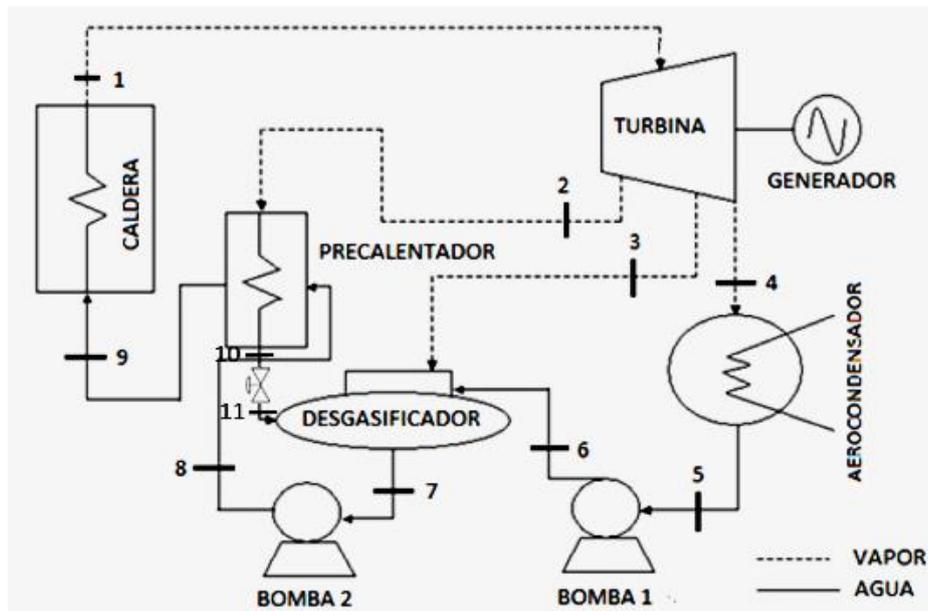
- Obtención de vapor sobrecalentado, aumentando la temperatura del vapor todo lo que nos permita la instalación (400°C en nuestro caso). De esta forma aumentamos la entalpía del vapor que se introducirá en la turbina, generando de esta forma mayor trabajo y aumentando por tanto el rendimiento del ciclo. En este caso, no existen desventajas, dado que, al aumentar la temperatura a la entrada de la turbina, se aumenta también el título del vapor a la salida.



Gráfica 6. Variación del diagrama T-s al aumentar la T a la salida de la caldera

- Realizar dos extracciones intermedias a la turbina. La primera de las extracciones se empleará para calentar directamente el agua de alimentación a la caldera, aumentando así su entalpía, y tras su paso por el intercambiador, se descargará en el desgasificador. A este mismo equipo llegará directamente la segunda extracción de la turbina. El desgasificador consiste básicamente en un intercambiador de calor en el que los flujos entrantes se mezclan antes de continuar hacia la bomba de alimentación a la caldera. El desgasificador se encuentra a una presión de 3 bar en nuestro caso, por lo que la primera extracción tendrá que atravesar una válvula de expansión antes de que el fluido llegue al desgasificador, y en el caso de la extracción final, dado a que se realiza a la presión del condensador, se debe de aumentar su presión mediante una bomba.

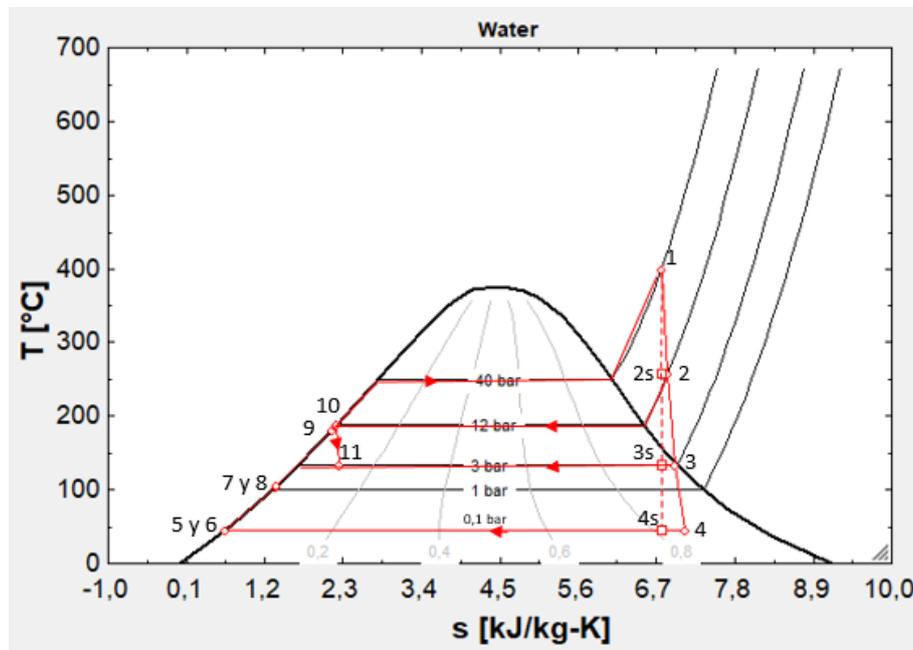
Se muestra a continuación el esquema del ciclo de Rankine que se llevará a cabo en nuestra planta:



*Ilustración 34. Ciclo Rankine de la planta.*

En el próximo epígrafe, se explicarán algunos de los equipos principales que lo componen y en la parte relativa a la metodología del presente proyecto, se llevarán a cabo los cálculos necesarios para la resolución del ciclo. A continuación, se muestra

el diagrama T-s de nuestro ciclo, obtenido tras la resolución de los cálculos empleando el software EES.



Gráfica 7. Diagrama T-s del ciclo Rankine de nuestra planta

### Tratamiento de agua:

La planta contará con un edificio para el tratamiento del agua de alimentación a la caldera. Este abastecerá de agua desmineralizada a la planta, empleando para ello intercambiadores de iones, y dos tanques de almacenamiento de agua, el primero de agua bruta antes de ser tratada (también se empleará como sistema contra incendios). Tras el paso por la desmineralización, el agua se almacena en un tanque de agua tratada, que asegura que la planta dispone siempre del aporte de agua necesario.

### Alternador y parque de alta tensión:

Como ya hemos señalado con anterioridad, uno de los equipos que forman el ciclo Rankine es la TV, la cual aprovechando el vapor de agua genera energía mecánica. Pero dado que lo que nos interesa es la obtención de energía eléctrica, conectaremos un alternador a la salida de la turbina.

Para transformar y distribuir la energía eléctrica producida, la planta cuenta con un parque eléctrico, que con el objetivo de disminuir el impacto ambiental que provocan los tendidos aéreos, se distribuirá hasta una subestación mediante cables soterrados.

#### 8.2.4 TRATAMIENTO DE GASES

Los procesos descritos anteriormente de incineración específica necesitan a continuación una unidad de tratamiento de sus efluentes gaseosos, antes de ser emitidos a la atmósfera.

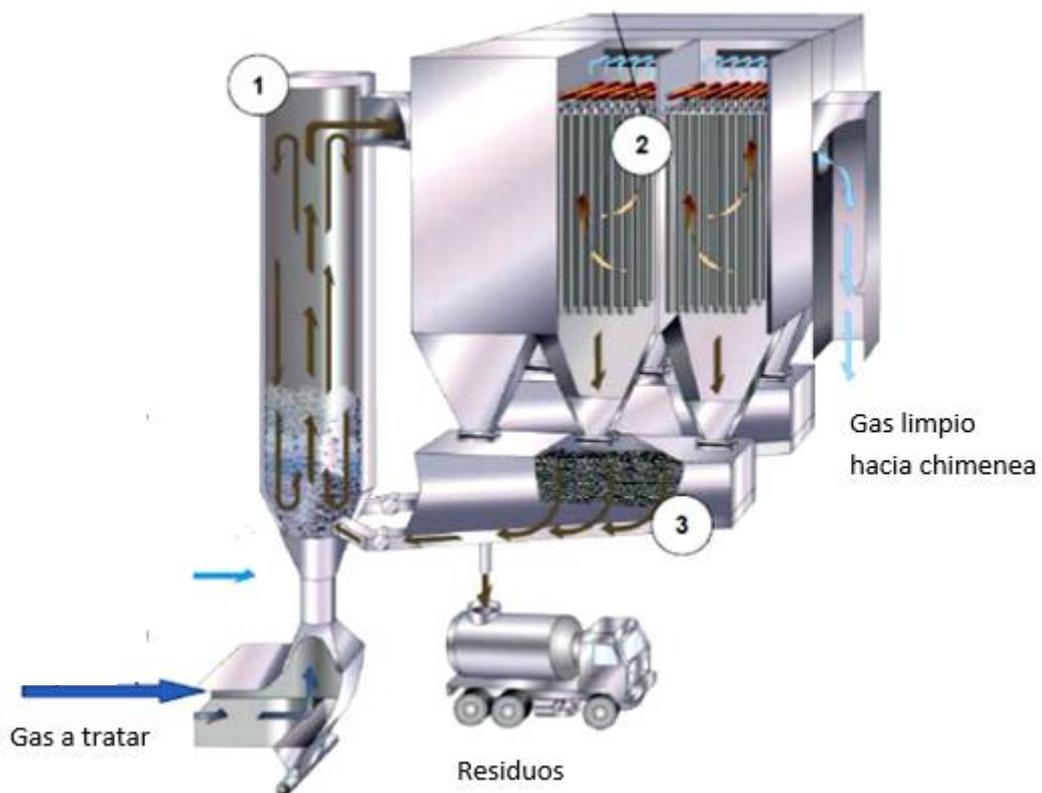
Los contaminantes que se encuentran presentes en el flujo de gases producto de la incineración de los residuos son:

- Óxidos de azufre, como el  $\text{SO}_2$  y el  $\text{SO}_3$ .
- Ácido clorhídrico (HCl).
- Monóxido de carbono (CO), originado por una combustión incompleta.
- Óxidos de nitrógeno (NOx). La procedencia de los óxidos de nitrógeno puede ser de dos tipos:
  - NOx Térmico, originado por la reacción entre el nitrógeno y oxígeno presentes en el aire de combustión a altas temperaturas.
  - NOx Combustible, producto de la reacción entre el oxígeno del aire y el nitrógeno presente en el combustible.
- Compuestos orgánicos tales como dioxinas, furanos, clorobencios, clorofenoles e hidrocarburos poliaromáticos.
- Metales pesados presentes en el flujo de residuos como plomo, cobre, cadmio, mercurio, ...
- Partículas sólidas compuestas de inquemados provocados por combustiones incompletas.

El Real Decreto 1042/2017 establece los límites de emisión para instalaciones de combustión con una potencia térmica nominal superior o igual a 1 MW e inferior a 50 MW, es decir, para instalaciones de combustión medianas. Para llevar a cabo la limpieza de gases de escape cumpliendo la normativa vigente al respecto, existen tres tecnologías diferentes para tratarlos: el sistema seco, el semi-seco y el húmedo. Se descarta el sistema seco dado que, aunque es el que requiere de una menor inversión,

es el que necesita de mayor cantidad de reactivos y mayores residuos genera. Por otra parte, se descarta también el sistema húmedo, dado que es el que necesita de una mayor inversión y tiene unos consumos elevados de agua. Por tanto, se dispondrá un sistema semi-seco de limpieza, siendo este el más adecuado para nuestra planta, compuesto por:

- Sistema de desnitrificación “SNCR”.
- Reactor (indicado con el número 1 en la siguiente imagen).
- Filtro de mangas (indicado con el número 2 en la siguiente imagen).
- Chimenea de evacuación.



*Ilustración 35. Sistema semi-seco de tratamiento de gases*

#### Sistema de desnitrificación “SNCR”:

Para lograr la reducción de los NOx existen varios sistemas que armonizan el mejor diseño de la geometría de los hornos de combustión, para permitir una combustión más homogénea, con la utilización de sistema de reducción de los óxidos de nitrógeno, utilizando urea, amoníaco o con un combustible. Los sistemas más frecuentes para las plantas de residuos urbanos en España son la inyección controlada de NH<sub>3</sub>

directamente en el horno a una temperatura de 850°C, con lo que pueden conseguirse emisiones especialmente bajas de NOx (Sistema SNCR).

Un sistema alternativo, algo más eficiente, pero más costoso y voluminoso, motivos por los que se ha descartado, es por medio de un catalizador selectivo, utilizando un reductor diferente, generalmente gas natural, (sistema SCR).

En nuestro caso, para la eliminación de los NOx se ha previsto la utilización de un sistema de reacción selectiva no catalítica (SNCR), consistente en la inyección de una solución acuosa de amoníaco (25%) en la cámara del incinerador.

El sistema de desnitrificación constará de las siguientes instalaciones:

- Estación de recepción y descarga.
- Tanque de almacenamiento.
- Sistema de dosificación.
- Sistema de inyección.

A continuación, se muestra un esquema de la instalación:

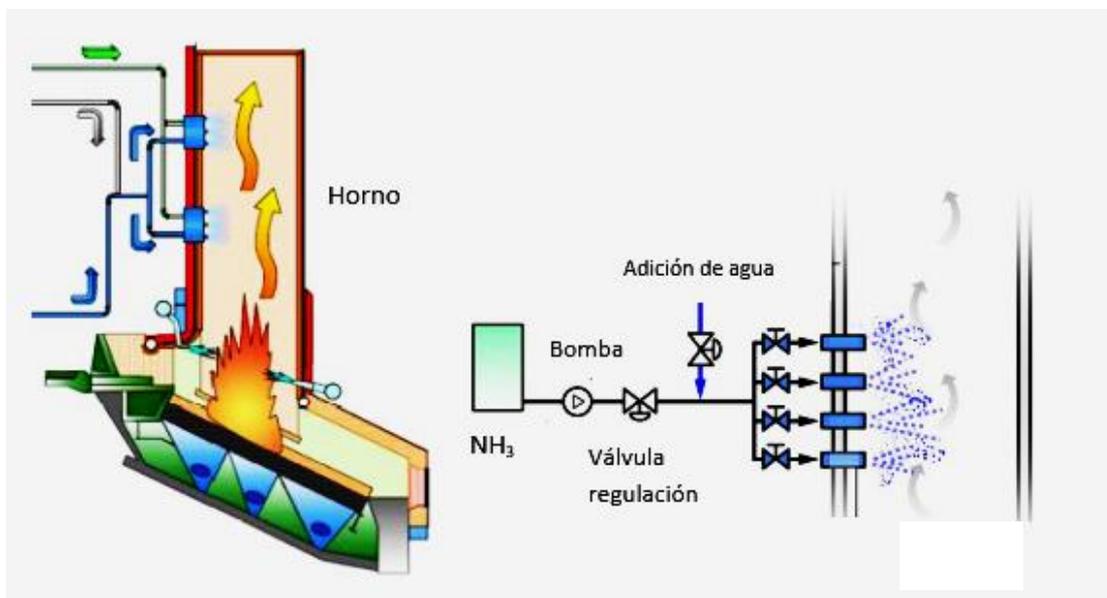
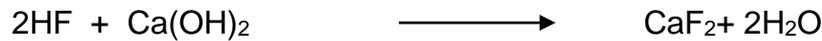
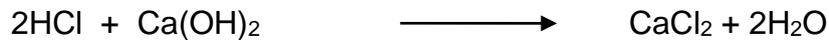


Ilustración 36. Sistema desnitrificación "SNCR"

## Reactor:

En este equipo se llevan a cabo dos procesos de depuración diferentes. Por un lado, se empleará lechada de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para el tratamiento de los gases ácidos, y al mismo tiempo, se llevará a cabo el proceso de adsorción mediante la inyección de carbón activo para la eliminación de los metales pesados, dioxinas y furanos.

En primer lugar, tal y como se ha dicho, para el tratamiento de HCl, HF y  $\text{SO}_x$  (gases ácidos) se inyectará una disolución de lechada de cal, dándose las siguientes reacciones:



El agua de la disolución se evapora y la cal se combina con los ácidos presentes. La sal o sales formadas son posteriormente recuperadas en el filtro de mangas. Es una alternativa cada vez más usada porque no genera penachos ni aguas residuales, ya que toda el agua se evapora con los gases.

Por otro lado, se ha seleccionado carbón activo como reactivo para el tratamiento de los gases dado que se trata de un reactivo simple, económico y de eficiencia comprobada. Será empleado para la eliminación de los metales pesados y para la eliminación de las dioxinas y furanos creados posteriormente de la combustión.

También es un absorbente multifuncional que tiene un impacto positivo sobre los gases ácidos como el HCl, HF o el  $\text{SO}_x$ , como así mismo sobre el  $\text{NO}_x$  y CO.

## Filtro de mangas:

Para la eliminación de las partículas sólidas presentes en los gases de combustión existen diferentes equipos:

- Ciclones.

- Filtros de mangas.
- Precipitadores electrostáticos.
- Scrubbers.

Los equipos han sido listados en orden creciente del coste de los mismos. Aunque algunas instalaciones pueden contar con varios sistemas, por razones económicas y de complejidad técnica se propone el empleo del filtro de mangas para nuestra planta de incineración.

Aunque en el siguiente epígrafe se hablará más a fondo de los filtros de mangas, en resumen, consisten en un sistema de mangas filtrantes, de un material textil que resiste la temperatura y los agentes químicos que pueda haber en los gases y partículas depositadas. Los gases son forzados a atravesar las mangas filtrantes, donde quedan retenidas las partículas sólidas.



*Ilustración 37. Interior de un filtro de mangas*

Las cenizas obtenidas, junto con las retiradas en el horno y caldera, serán almacenadas para su posterior tratamiento. No se ha dado mayor importancia a este punto, ya que del tratamiento de las cenizas se encargará una empresa externa, si bien se ha tenido en cuenta dicho coste en el análisis económico. Destacar, que

existen diferentes métodos de gestión de las mismas, como el vertido o la reutilización, por ejemplo, empleándose en la construcción de carreteras o en la fabricación de hormigón. En España, por el momento, la mayoría son vertidas, previo tratamiento para no suponer una amenaza medioambiental.

### Evacuación de gases de combustión:

Antes de llegar a la chimenea, los gases de combustión pasan por un ventilador de tiro inducido, el cual funciona mediante la instalación de una boquilla que inyecta el aire ambiental ayudando a su evacuación.



*Ilustración 38. Ventilador de tiro inducido*

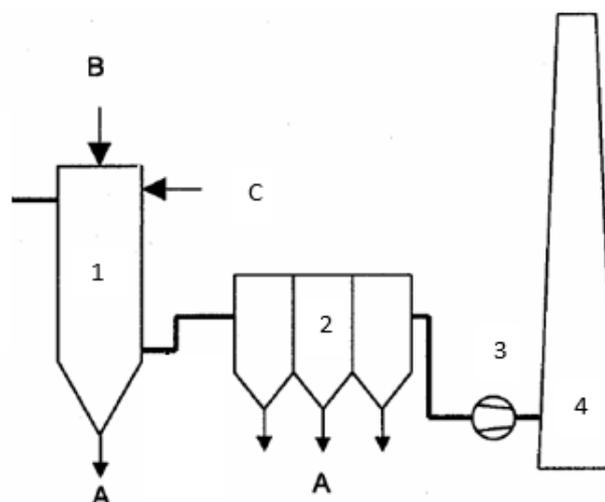
Posteriormente los gases se dirigen a la chimenea, la cual tiene la función fundamental de permitir una adecuada difusión de los contaminantes emitidos, incluso en concentraciones muy reducidas. Habitualmente son metálicas, con alturas en torno a los 50 o 60 metros. Para reducir aún más el impacto ambiental, se recirculará el 20% de los humos generados y depurados para su empleo como aire secundario en el horno. La planta cuenta con un sistema de análisis y control de emisiones que permite la monitorización de los gases antes de su salida. Las nuevas Directivas establecen los parámetros que deben ser controlados de modo directo y permanente. De acuerdo con lo indicado en el Real Decreto Real Decreto 1042/2017, la planta contará con un sistema de medición en continuo de las emisiones en la chimenea.



*Ilustración 39. Chimeneas con plataforma para el análisis y control de emisiones*

Para finalizar, se muestra, de forma simplificada, el sistema de tratamiento completo del tratamiento de gases (exceptuando el proceso SNCR que se da directamente en el horno). Los equipos, reactivos y productos que se numeran son los siguientes:

1. Reactor.
  2. Filtro de mangas.
  3. Ventilador de tiro inducido.
  4. Chimenea.
- A. Cenizas.  
 B. Lechada de cal.  
 C. Carbón activo.



*Ilustración 40. Esquema del tratamiento de gases*

## 9. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

En el presente apartado se describirán los equipos principales de la planta, siendo estos los siguientes:

- Horno.
- Caldera.
- Turbina.
- Otros equipos que forman el ciclo Rankine: bombas, aerocondensador, desgasificador.
- Filtro de mangas.

### 9.1 HORNO

El horno, tal y como ya se ha expuesto, es el dispositivo donde tiene lugar la incineración de residuos, es decir, la reacción de oxidación mediante la cual el residuo es quemado para su eliminación y posterior valorización energética.

Existen diferentes tipos de hornos como se verá a continuación, y su elección es fundamental para el buen funcionamiento de la planta y para el aprovechamiento óptimo del residuo. Cada tipo de horno depende en gran medida tanto de la tipología de los residuos a tratar, como del PCI, tamaño, composición, cantidad de inertes y corrosividad, así como del caudal de residuos.

#### **Tipos de hornos incineradores**

Se han considerado los siguientes tipos de hornos:

1. Horno de inyección líquida.
2. Horno rotatorio.
3. Horno de lecho fluidizado.
4. Horno de parrillas.

#### **Horno de inyección líquida**

Horno con revestimiento interior refractario, que puede ser instalado en disposición vertical u horizontal. Se emplea en la incineración de residuos líquidos (también para

ciertos residuos peligrosos, dado que se bombean directamente al interior del horno evitando el contacto con el ambiente). Si se espera un gran número de inquemados, los modelos verticales son mayormente utilizados, dado que facilitan el mantenimiento.



*Ilustración 41. Horno de inyección líquida horizontal*

Estos equipos pueden estar equipados con uno o más quemadores, siendo por lo general uno de ellos el inyector y atomizador del residuo, mientras que el otro es el quemador del combustible convencional.

Como ya se ha mencionado, la alimentación del horno es llevada a cabo mediante atomizadores que pulverizan el residuo, inyectado gotas de pequeño tamaño. El horno alcanza temperaturas de 700 a 1000°C, temperaturas suficientes para que los líquidos combustionen correctamente. Si bien el atomizador mejora la eficiencia del horno, también limita el tipo de residuos que pueden ser tratados, los cuales tienen que poseer las siguientes características para que no causen inconvenientes o atascos en la boquilla:

- Debe de tratarse de residuos líquidos bombeables.
- Con baja viscosidad.
- Bajo potencial de polimerización.
- Escasa corrosividad.
- Exentos de material en suspensión que pueda obstruir las boquillas.

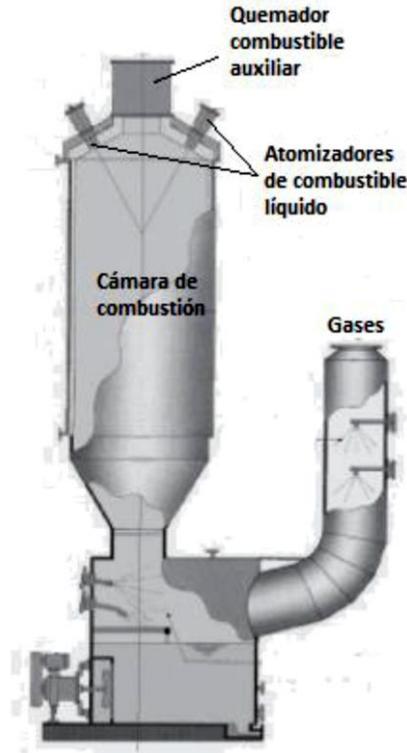


Ilustración 42. Horno de inyección líquida vertical

Las ventajas e inconvenientes del horno de inyección líquida son las siguientes:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo coste de operación, debido a la ausencia de partes móviles.</li> <li>▪ Permiten el tratamiento de residuos peligrosos, bombeándolos directamente al interior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Características muy específicas de los residuos a emplear.</li> <li>▪ Riesgo de atascos en los inyectores, debido a un mal empleo.</li> </ul>

Tabla 13. Ventajas e inconvenientes del horno de inyección líquida

### Horno rotatorio

Es de concepción sencilla y consta de un tambor metálico inclinado que gira sobre sí mismo, a través del cual van pasando los residuos. Debido a su modo de funcionar consiguen un mejor quemado de las basuras, debido fundamentalmente a su volteo.

Formados por un recipiente de acero, prácticamente cilíndrico y recubierto de materiales refractarios, cubiertos mediante un aislante por motivos de eficiencia y

seguridad. El cuerpo cilíndrico del horno tiene una longitud de 10-15m y una relación L/D de 5-10 (para reducir pérdidas por radiación). El eje se sitúa inclinado respecto a la horizontal con una suave pendiente del 1-5%, para facilitar el mezclado, el desplazamiento del residuo y la evacuación de cenizas. El residuo entra por una boca y sale quemado por la otra (escoria).

Se permite que los residuos ocupen un máximo de un 20% del volumen interior. Mediante la variación de la velocidad de rotación, la inclinación o el caudal de alimentación se modifica el tiempo de permanencia de los residuos en el interior, que normalmente suele ser de 30-60 minutos. La temperatura de operación de este tipo de hornos se sitúa a unos 800-1000°C (1500-1600°C en el caso de residuos peligrosos). Si la temperatura cae por debajo de 800°C se activa un quemador auxiliar alimentado por gas natural o algún otro combustible de alto poder calorífico y cuando la temperatura sobrepasa los 1000°C se detiene la carga de residuos. El aire se introduce tanto en equicorriente como en contracorriente.

Se trata del horno más empleado para el tratamiento de residuos peligrosos, ya que se pueden introducir incluso dentro del contenedor.

Sus parámetros principales son:

- La intensidad volumétrica de combustión ( $\text{kcal/m}^3/\text{h}$ ).
- La intensidad de combustión por área ( $\text{kcal/m}^2/\text{h}$ ).

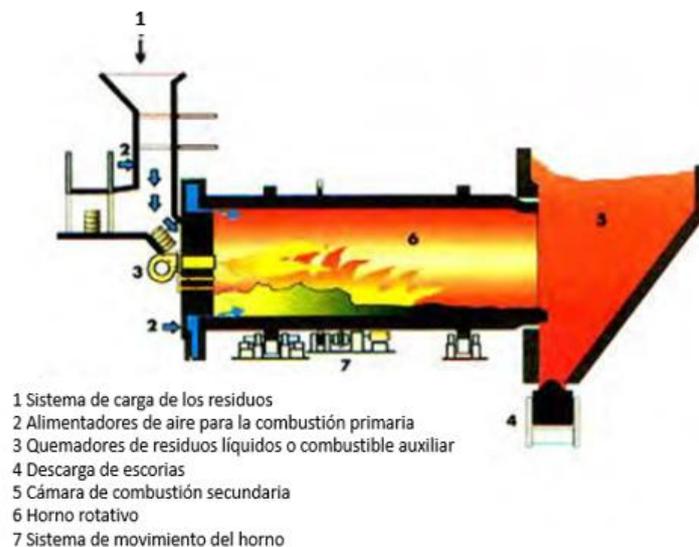


Ilustración 43. Detalle del horno rotatorio

Conectada a la descarga de los gases del horno va la cámara de post-combustión o cámara de combustión secundaria, en la que los gases que sólo alcanzaron la combustión parcial la alcanzan ahora totalmente. Para ello la temperatura en esta cámara es mayor, de 980 a 1200°C. Ambas cámaras pueden recibir combustible auxiliar.

Como inconvenientes tenemos productos de reacciones de combustión parcial, PCI y productos de combustiones secundarias. Como protección ante fugas o pérdidas muy peligrosas se usan presiones negativas.

Las ventajas e inconvenientes del horno rotatorio son las siguientes:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las características constructivas de este le permiten alcanzar altas temperaturas.</li> <li>▪ Elevada versatilidad.</li> <li>▪ Permite la incineración de residuos peligrosos.</li> <li>▪ Menores corrientes de aire, por lo que se arrastran menos partículas en los gases.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Necesidad de una cámara secundaria que eleva el coste de inversión.</li> <li>▪ El empleo de un menor exceso de oxígeno propicia la aparición de inquemados, reacciones secundarias, productos indeseados, etc.</li> </ul>

*Tabla 14. Ventajas e inconvenientes del horno rotatorio*

### Hornos de lecho fluidizado

En su forma más sencilla consiste en un cilindro vertical de acero, normalmente forrado con ladrillos refractarios, un lecho de arena, una placa de rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire.

Cuando se fuerza el aire hacia arriba a través de las toberas, el lecho se fluidiza y se expande hasta dos veces su volumen en reposo. La acción hirviente del lecho fluidizado provoca turbulencias y favorece la mezcla a la vez que transfiere calor al combustible.

Al igual que el resto de hornos, cuando se pone en funcionamiento requiere combustible auxiliar (gas natural o aceite combustible) para subir la temperatura operacional (790 a 950 °C).

Los sistemas de lecho fluidizado son bastante versátiles y pueden operar sobre una amplia variedad de residuos, incluyendo RSU, fangos y numerosos residuos químicos peligrosos. El material del lecho puede ser arena o caliza.

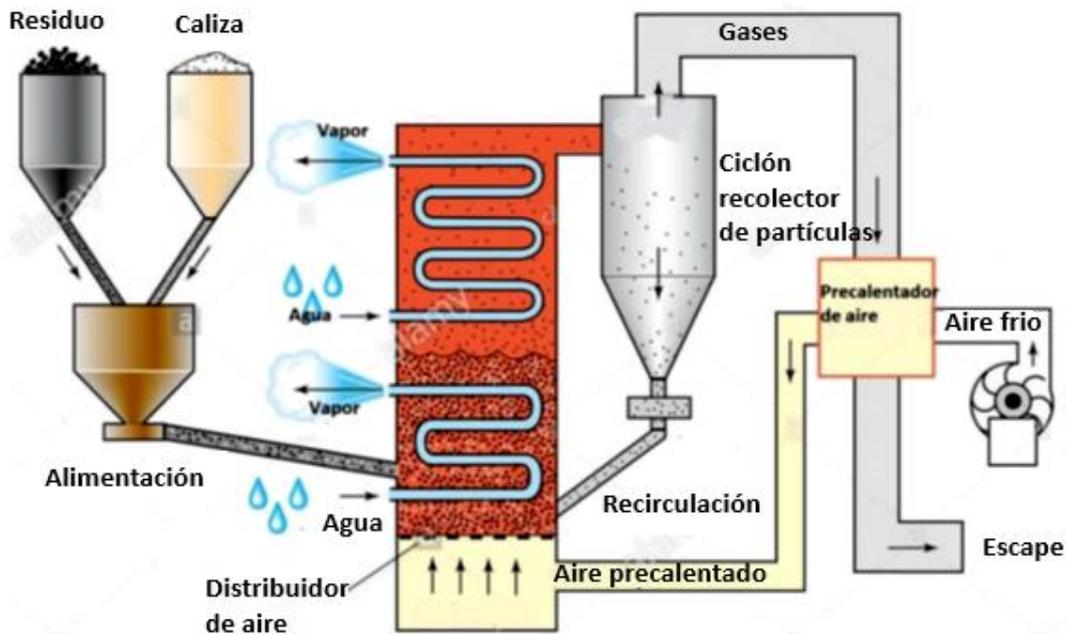


Ilustración 44. Horno de lecho fluidizado

Existen dos tipos de lecho fluidizado, en función de la velocidad y presión a que se inyecta este aire primario y de cómo se mueve la arena en el interior del horno:

1. Lecho burbujeante: Cuando la superficie del lecho está suficientemente definida, con una altura razonablemente constante. Las diferentes partículas de arena de fluidificación están expandidas y se comportan independientemente, pero permaneciendo en el lecho. La pérdida de carga en el lecho es constante a pesar de que aumente la velocidad de paso de aire.
2. Lecho circulante: Cuando la velocidad es lo bastante elevada para sacar parte de los materiales del lecho, provocando el transporte de los mismos al exterior. La pérdida de carga a través del lecho disminuye; en este caso estos materiales deben ser reintegrados al lecho, mediante el uso de ciclones. Tienen mayor

flexibilidad respecto a las características de los residuos que pueden ser tratados; no obstante, tienen un consumo energético más elevado que los de lecho estacionario.

La alimentación de aire de combustión se subdivide en:

- Aire primario: Es el que mantiene la fluidificación del lecho y que se inyecta en la parte inferior del lecho a través de toberas distribuidas uniformemente en la parrilla.
- Aire secundario: Destinado a asegurar la combustión. Se inyecta en la parte superior del lecho.

La alimentación de los residuos suele realizarse mediante tornillos sinfín que introducen los residuos dentro de la masa del lecho expandido.

Las ventajas e inconvenientes del horno de lecho fluidizado son las siguientes:

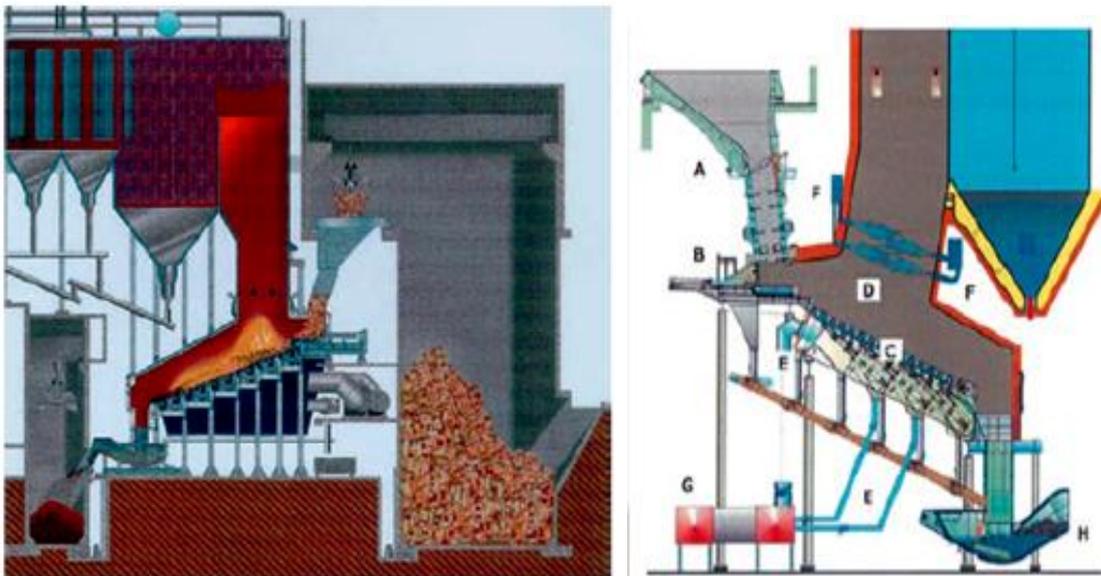
Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rendimientos más altos, ya que la corrosión es menor al añadirse una aditivación en el lecho.</li> <li>▪ Facilidad de operación: debido a la rapidez del proceso de combustión, la inercia del horno es muy reducida, lo que permite paradas y arranques en períodos de tiempo muy cortos.</li> <li>▪ Facilidad de control: teóricamente se pueden ajustar con precisión los ratios para admitir incluso diferentes combustibles.</li> <li>▪ Instalaciones más compactas.</li> <li>▪ Los “inquemados” del horno se pueden enfriar y separar de la arena por procedimientos en seco, evitándose el efluente de apagado de escorias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tecnología de más reciente implantación. Las referencias existentes son menores que las de parrillas.</li> <li>▪ Menor capacidad horaria.</li> <li>▪ Como consecuencia del manejo de arena de sílice, se produce mayor cantidad de polvos en los humos.</li> <li>▪ En la mayoría de los casos se necesita una trituración homogénea de los residuos de la combustión, ya que de otra forma se pueden producir atascos en los sistemas de alimentación y problemas en los hornos.</li> <li>▪ Mayor consumo de energía eléctrica, por la incidencia que representa la soplante del lecho.</li> </ul>

*Tabla 15. Ventajas e inconvenientes del horno de lecho fluidizado*

## Hornos de parrillas

Este tipo de hornos es el más usado y, sin duda, la tecnología mejor consolidada, con gran número de instalaciones que, después de más de cien años y con sus continuas mejoras, demuestra una gran fiabilidad y flexibilidad en su funcionamiento. Presenta una capacidad normal de tratamiento de 3 a 50 t/hora/línea y la posibilidad de trabajar con residuos con un PCI entre 1.400-4.500 Kcal/kg sin añadir combustible auxiliar.

El sistema de alimentación de residuos consiste en una tolva de carga donde se reciben los residuos urbanos en masa o procedentes, como rechazo, de las plantas de pretratamiento. Esta tolva desemboca en la parrilla del horno a través de un conducto aislado térmicamente y dotado de una clapeta de cierre con objeto de poder independizar la tolva de la parrilla. Al final del conducto de alimentación están situados los alimentadores del horno, que son unas placas movidas hidráulicamente, con movimientos alternativos adelante/atrás y que empujan e introducen el residuo en el horno.



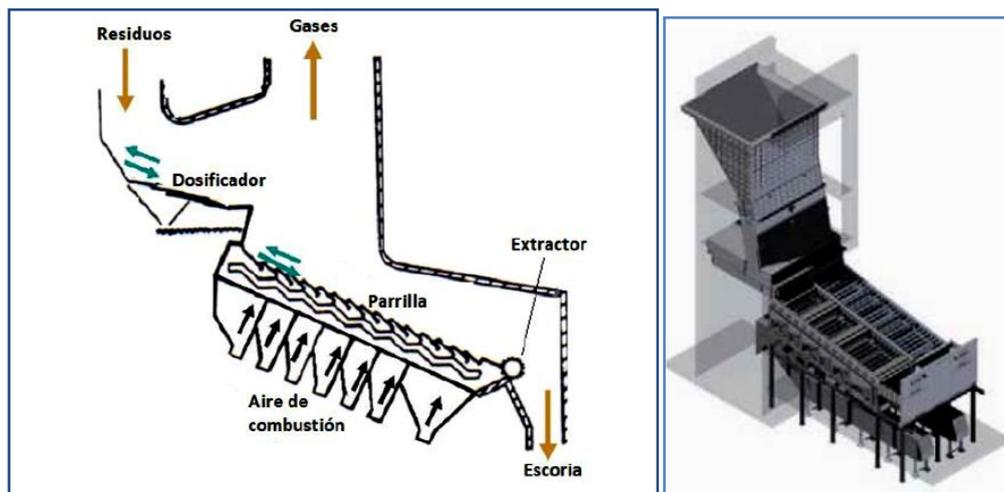
*Ilustración 45. Planta con horno de parrilla y horno de parrillas*

Una vez en las parrillas, el movimiento de las mismas produce un avance del residuo hacia la zona de combustión. Las parrillas están instaladas de forma que presenten una gran pendiente para facilitar el avance de los residuos. Los objetivos fundamentales de las parrillas son:

- Por un lado, producir el volteo y mezclado de los residuos a lo largo de la misma, de forma que todos los residuos sean expuestos al fuego, reduciendo la cantidad de “inquemados”.
- Por otro, conseguir una altura regular de estos residuos sobre la parrilla, para mantener una combustión uniforme.

Los RSU en su avance por la parrilla, pasan por tres etapas consecutivas. En la primera de ellas, se produce un secado del residuo al entrar en un ambiente muy caliente, evaporándose el agua contenida en el material. En la segunda fase, además de la combustión buena parte de la carga piroliza y gasifica. La última fase sirve para completar la combustión en aquellas fracciones de mayor temperatura de ignición.

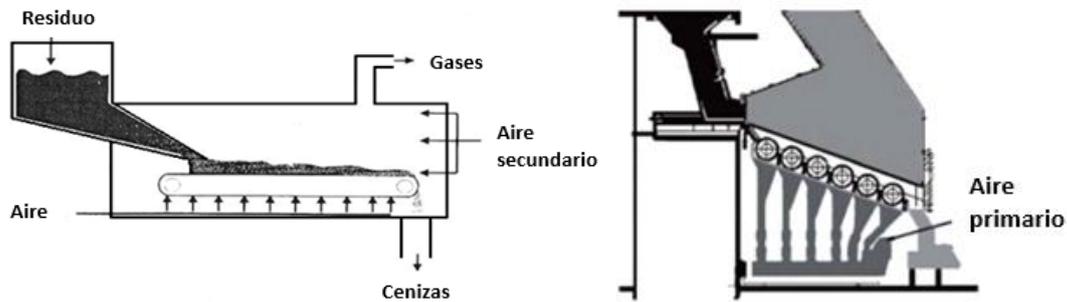
El tiempo de permanencia del residuo dentro del horno de parrilla oscila entre 45 y 90 minutos.



*Ilustración 46. Hornos de parrilla*

Existen diferentes disposiciones básicas de parrillas, pero las más extendidas en el campo de incineración de RSU son:

- Parrillas de barras con movimiento de traslación.
- Parrillas de rodillos.



*Ilustración 47. Parrillas móviles (izquierda) y parrillas de rodillos (derecha)*

Este tipo de hornos precisa de una gran cantidad de exceso de oxígeno (aproximadamente el 100%). El aire de combustión se aporta en dos corrientes diferenciadas:

- Aire primario, que pasa a través de la parrilla. El objetivo fundamental es aportar el oxígeno necesario para la combustión, pero, además, tiene una función de refrigeración de los elementos de la parrilla.
- Aire secundario, que se inyecta en diferentes puntos del horno. Su objetivo es conseguir la combustión completa de los residuos.

Las ventajas e inconvenientes del horno de parrillas son las siguientes:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Es un horno de gran versatilidad, siendo útil para procesar residuos grandes o irregulares y de diferente origen sin tratamiento previo.</li> <li>▪ Válido para la incineración de ciertos residuos peligrosos, aunque generalmente se emplea en el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU).</li> <li>▪ Gran capacidad de carga, apropiado para plantas de gran tamaño</li> <li>▪ No se precisa de cámara secundaria.</li> <li>▪ El movimiento favorece la combustión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Limitación de la potencia del horno, dado que se alcanzan temperaturas más bajas.</li> <li>▪ El movimiento favorece el arrastre de partículas en los gases.</li> <li>▪ Costes de mantenimiento elevados.</li> <li>▪ La combustión se lleva a cabo con un gran exceso de aire (a veces incluso superior al 100%), lo cual reduce la eficacia de la combustión y ocasiona arrastre de partículas con los gases.</li> </ul>

*Tabla 16. Ventajas e inconvenientes del horno de parrilla*

## Comparación de tecnologías.

Una vez expuestos los diferentes tipos de hornos existentes para la valorización energética de residuos, pasamos a analizar cuál es el equipo que mejor encaja en nuestra planta.

En la siguiente tabla se observan los sistemas de incineración más empleados en función del tipo de residuo a tratar:

<b>Tipo de residuos</b>	<b>Inyección líquida</b>	<b>Horno rotatorio</b>	<b>Lecho fluidizado</b>	<b>Parrilla móvil</b>
<b>Sólidos</b>				
Granular		Adecuado	Adecuado	Adecuado
Irregular		Adecuado		Muy adecuado
Bajo punto de fusión		Adecuado	Adecuado	
Compuestos orgánicos		Adecuado		Muy adecuado
Materiales voluminosos		Muy adecuado		
<b>Líquidos</b>				
Orgánicos	Muy adecuado	Adecuado		
Fangos con carga halogenada	Adecuado	Adecuado		
Fangos orgánicos		Adecuado	Adecuado	
<b>Gases</b>				
Vapores orgánicos	Adecuado	Muy adecuado	Adecuado	Adecuado

*Tabla 17. Tipos de residuos incinerados por cada tipo de horno*

Dado el tipo de residuo, descartamos en primera instancia el horno de inyección líquida. También se descarta el uso de un horno rotativo, ya que tienen un uso casi generalizado en las plantas de incineración de residuos peligrosos, y no tienen aplicación para nuestro tipo de residuos.

Los más usados para RSU son los hornos de parrillas y los de lecho fluido. Teniendo en cuenta que el residuo se introducirá sin tratamiento previo, nos podemos encontrar con materiales voluminosos, por lo que decantaremos nuestra elección al empleo de un horno de parrillas, ya que como hemos visto:

- Es una tecnología ampliamente probada. Es la tecnología que tradicionalmente ha venido usándose para la combustión de todo tipo de combustibles, existiendo numerosas referencias en el mercado.
- Admite perfectamente una alta variación en la granulometría del combustible.



*Ilustración 48. horno de parrillas. (seleccionado para nuestro proyecto)*

## 9.2 CALDERA

Una caldera es un aparato a presión, donde el calor procedente de un combustible o de otra fuente de energía se transforma en energía térmica, utilizable a través de un fluido caloportador (en nuestro caso agua). En ellas este se calienta convirtiéndose en vapor, que se utilizara para mover una turbina de vapor y/o como fluido

caloportador que aporta calor a alguna fase del proceso industrial. Son el elemento de unión entre la combustión y la generación de electricidad.

Cuando una caldera se utiliza para producir vapor, se la puede llamar generador de vapor.

Las calderas o generadores de vapor que producen vapor sobrecalentado (que es utilizado en la mayoría de las turbinas de vapor), llevan incorporadas a la misma un sobrecalentador que genera el vapor sobrecalentado a partir del vapor saturado producido en el vaporizador de la caldera.



*Ilustración 49. Caldera de recuperación*

Los parámetros más importantes que definen las características de un generador de vapor son los siguientes:

- Presión efectiva:

En la práctica se suelen clasificar en:

- Baja presión:  $p < 20 \text{ kg/cm}^2$
- Media presión:  $20 \text{ kg/cm}^2 < p < 64 \text{ kg/cm}^2$

- Alta presión:  $p > 64 \text{ kg/cm}^2$
- Capacidad:

Se suele medir por el caudal de vapor (t/h) producido a una presión y temperatura determinadas, para una temperatura dada del agua de alimentación de la caldera. A veces se indica por la potencia térmica aprovechada o del combustible.

- Superficie de calefacción:

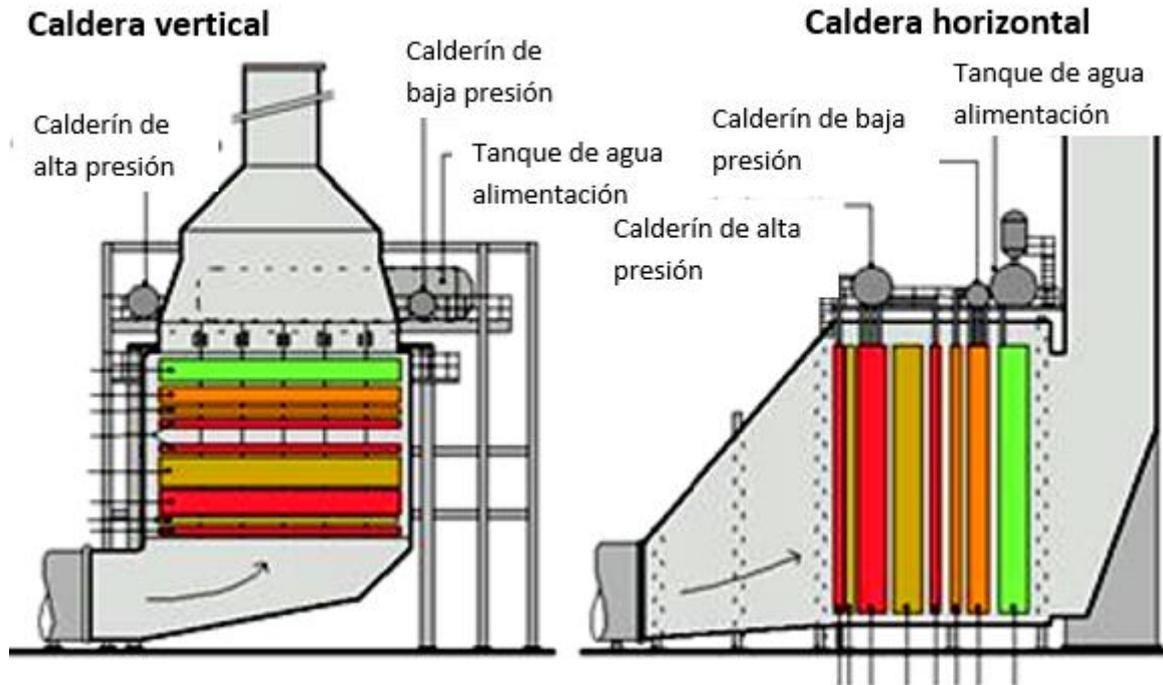
Es la superficie a través de la cual tienen lugar los procesos de transmisión de calor (gases calientes-agua/vapor). Puede dividirse en:

- Superficie de transmisión directa: en ella es dominante la transmisión de calor por radiación.
- Superficie de transmisión indirecta: en ella es dominante la transmisión de calor por convección.

Las calderas pueden clasificarse atendiendo a distintos conceptos:

1. Por la fuente de energía utilizada:
  - Calderas de combustión, en las que el calor proviene directamente de la combustión de un combustible.
  - Calderas de recuperación, en las que el calor procede de un fluido a alta temperatura (gases calientes).
  - Calderas mixtas. En el caso de estar situadas en el escape de turbinas de gas, algunas calderas suelen incorporar también un quemador, con lo que son simultáneamente de recuperación y combustión.
2. Por el fluido caloportador.
3. Por el tipo de tiro: tiro natural (hogar en depresión) y tiro forzado (cámara de combustión presurizada).
4. Por el tipo de circulación: circulación natural y circulación forzada.
5. Por su disposición:
  - Horizontales. La dirección del flujo de gases es horizontal y los haces tubulares se disponen transversalmente, es decir, son verticales.

- Verticales. La dirección del flujo de gases es vertical, mientras que los haces tubulares se disponen transversalmente, es decir, son horizontales o inclinados.



*Ilustración 50. Disposición de calderas acuotubulares*

En la caldera deben diferenciarse varias zonas, en función de la forma preferente de transferencia de calor y del resultado de la transferencia. Por orden decreciente de temperatura se diferencian:

La zona de radiación, de temperatura más elevada, donde la transferencia de calor se realiza por radiación. El contacto entre el flujo de gas caliente y los elementos de la caldera se reducen al mínimo. Por otra parte, los tubos de generación de vapor suelen protegerse por refractarios para evitar su exposición directa al gas, que contiene una gran cantidad de partículas incandescentes, de esta forma se reducen las abrasiones y corrosiones en la caldera.

La zona de convección, constituida por haces tubulares, generalmente verticales. El mecanismo de transferencia, en este caso, es por contacto entre los gases, ya suficientemente fríos -del orden de 600-700°C-, y los elementos del horno; sobre éstos

se depositan cantidades importantes de polvo que deben ser separados periódicamente para evitar la reducción de la capacidad de intercambio de calor. Esta separación se realiza mediante golpeo en los haces tubulares, esto hace que el polvo se desprenda y sea recogido en las tolvas inferiores de cenizas volantes.

Formando parte de la caldera, existen otros haces de recuperación energética en los que no se produce vapor, sino que se calienta el agua de alimentación. Estos son los economizadores, donde la transferencia de calor es, también, por “convección”. Estos haces se diseñan de forma que no se produzca un enfriamiento excesivo de los gases, para evitar la condensación de los componentes ácidos que podrían dar lugar a una corrosión intensa de las superficies metálicas; por esto la temperatura mínima de las calderas se mantiene en torno a 200 –250 °C.

Tal y como ya hemos visto con anterioridad, en la caldera, además de la recuperación de calor y el enfriamiento de gases -que son efectos simultáneos-, se produce una separación importante de las partículas de polvo. El grado de desempolvado suele ser el suficiente para el adecuado funcionamiento de los sistemas de depuración de gases.

### 9.3 TURBINA

Una turbina es un dispositivo que genera potencia mecánica en rotación a partir de la energía contenida en un fluido. Esa energía (potencial, cinética, térmica...) se convierte en energía mecánica al pasar por un sistema de aspas estacionarios y movibles en la turbina, haciendo que el fluido incida tangencialmente sobre las aspas rotatorias y produzca potencia mecánica con la rotación del motor. Posteriormente, dicha energía mecánica se transforma en energía eléctrica a través del acoplamiento posterior del alternador.

Para realizar una primera clasificación de estas, lo primero en lo que nos tenemos que fijar es en el fluido de trabajo, siendo los más comunes el vapor, el aire caliente, los gases de combustión y el agua. En nuestra planta se empleará una turbina de vapor para aprovechar el vapor generado por la caldera. Se trata de un equipo sencillo, bien conocido y muy experimentado, dado su extendido uso para la generación de energía eléctrica.



*Ilustración 51. Turbina de vapor*

Otras clasificaciones de las turbinas además de la anteriormente vista son:

Según el número de etapas o escalonamientos:

- 1) Turbinas monoetapa: turbinas empleadas para pequeñas y medianas potencias.
- 2) Turbinas multietapa: para suplir potencias más elevadas, obteniendo con ellas mayores rendimientos.

Según la presión del vapor de salida:

- 1) Contrapresión: equipos en los que el vapor de escape es utilizado posteriormente en el proceso.
- 2) Escape libre: el vapor de escape va hacia la atmósfera, con la pérdida de energía que ello conlleva.
- 3) Condensación: el vapor de escape es condensado con agua de refrigeración.

Según la forma en que se realiza la transformación de energía térmica en energía mecánica:

- 1) Turbinas de acción: la transformación de energía se realiza en los álabes fijos.
- 2) Turbinas de acción-reacción: la transformación se realiza a la vez en los álabes fijos y en los álabes móviles.

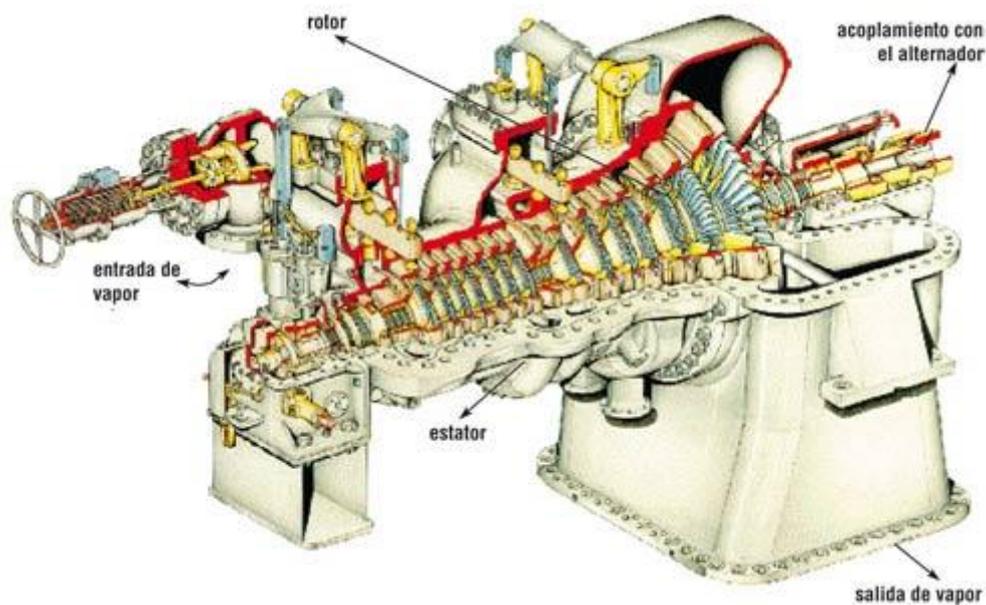
Según la dirección del flujo en el rodete.

- 1) Axiales, el paso de vapor coincide con el eje que la turbina. Es el caso más normal.
- 2) Radiales, el paso de vapor se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje de la turbina.

Turbinas con y sin extracción.

- En las turbinas con extracción se extrae una corriente de vapor de la turbina antes de llegar al escape.

En nuestro caso se tratará de una turbina multietapa, con condensación de vapor a la salida, donde las primeras etapas serán de acción, mientras que las últimas serán de reacción, de flujo axial y con dos extracciones intermedias.



*Ilustración 52. Esquema de una turbina de vapor*

Las diferentes partes que forman una turbina de vapor son las siguientes:

- Rotor: se trata de la parte móvil de la turbina, formado por ruedas de alabes unidas al eje.

- Estator o carcasa: parte fija que aloja el rotor. Formada por dos partes: la parte inferior que permite la unión a la bancada y la parte superior, desmontable, que permite el acceso a la misma.
- Álabes: órganos de la turbina donde tiene lugar la expansión del vapor. Generalmente contruidos en acero inoxidable para reducir su erosión. Igualmente, la humedad del vapor no debe de ser superior al 10-15% para evitar la erosión.
- Álabes fijos: sirven para darle la dirección adecuada al vapor y que empuje sobre los álabes móviles. Van ensamblados en los diagramas que forman parte del estator.
- Diafragmas: discos que van dispuestos en el interior de la carcasa.
- Cojinetes: elementos que soportan los esfuerzos y el peso del eje de la turbina. Los cojinetes pueden ser radiales, que son aquellos que soportan los esfuerzos verticales y el peso del eje, o axiales, soportan el esfuerzo en la dirección longitudinal del eje.
- Sistemas de estanqueidad: sistemas de cierre situados a ambos extremos del eje de la turbina que evitan que escape el vapor de la turbina.
- Estanqueidad interior: mecanismos que evitan la fuga de vapor entre los álabes móviles y fijos en las diferentes etapas de la turbina.

## 9.4 OTROS EQUIPOS QUE FORMAN EL CICLO RANKINE

En este apartado, se describen brevemente otros equipos, de menor importancia, que forman el ciclo Rankine.

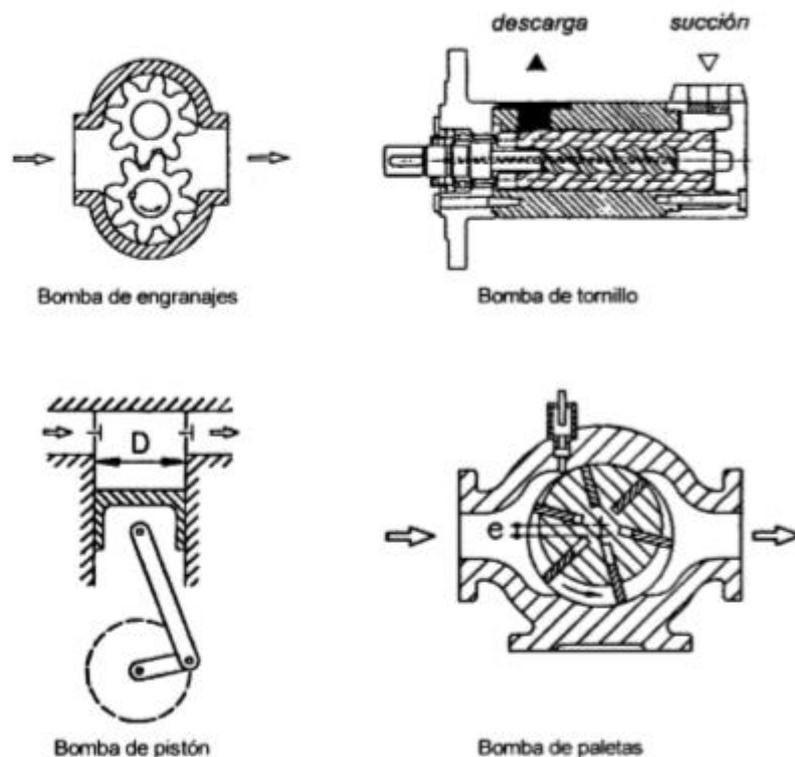
### 9.4.1 BOMBAS

Una bomba hidráulica es un equipo que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía hidráulica del fluido incompresible que mueve. Dicho aumento de energía conlleva un aumento de la presión, velocidad o altura del líquido. En general las bombas se emplean para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

En función del principio de funcionamiento, las bombas pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas:

La energía se cede al fluido mediante volúmenes confinados, llenándose y vaciándose periódicamente una serie de cámaras. Pueden a su vez subdividirse en alternativas y rotativas. Dentro del primer grupo se encuentran las bombas de pistones y émbolos, mientras que al segundo pertenecen las bombas de engranajes, tornillo, lóbulos, paletas, etc.



*Ilustración 53. Ejemplo de algunos tipos de bombas volumétricas*

- Turbobombas:

A diferencia de las volumétricas, en las turbobombas se cede la energía al fluido mediante la variación del momento cinético producido en el impulsor o rodete. Atendiendo a la dirección del flujo a la salida del rodete, pueden a su vez clasificarse en:

- Centrífugas: flujo de salida radial, perpendicular al eje.
- Axiales: flujo de salida axial, paralelo al eje.

- Helicocentrífugas: flujo de salida mixto, entre radial y axial.

Para nuestra instalación seleccionamos las bombas volumétricas, dado que trabajaremos con caudales constantes. Dentro de las bombas volumétricas, la selección del subtipo es indiferente, por lo que basaremos nuestra futura elección en motivos económicos.



*Ilustración 54. Bomba volumétrica*

#### 9.4.2 AEROCONDENSADOR

En cuanto a los condensadores, se pueden clasificar principalmente por el fluido refrigerante empleado en condensadores de agua, aerocondensadores y condensadores mixtos (agua y aire). Dado a que en la zona donde se lleva a cabo el proyecto no se dispone del caudal de agua necesario, se opta por la elección de la instalación de aerocondensadores.



*Ilustración 55. Aerocondensador*

Tal y como se ha dicho, se trata de intercambiadores de calor en los que se utiliza como fluido refrigerante aire atmosférico en lugar de agua u otro refrigerante líquido. Los aerocondensadores están formados por un haz de tubos aleteados, lo que favorece la transferencia de calor, por los que circulan los vapores a condensar. A través del haz de tubos se hace circular una corriente de aire atmosférico impulsado por ventiladores, de modo que se produce el enfriamiento y la condensación de los vapores a costa del calentamiento del aire.

#### 9.4.3 DESGASIFICADOR

La planta dispondrá de un desgasificador para la eliminación de los gases contenidos en el agua, a fin de proteger la instalación de averías.

Existen diferentes tipos de desgasificadores, en función de la tecnología que empleen:

- Por vacío.
- Químico.
- Térmico.
- Por membrana.

En nuestro caso emplearemos un desgasificador térmico, el cual, gracias al aumento de temperatura del agua, elimina los gases disueltos que pueda contener. Aprovecha la solubilidad inversa de los gases, según la cual los gases son menos solubles en agua a alta temperatura.

Para ello precalentará el agua mediante la mezcla con los flujos de las dos extracciones de vapor de la turbina, de manera que se consigue elevar la temperatura. Además, sirve como tanque de almacenamiento de agua a alta temperatura para alimentar las bombas de alta presión. También proporciona la presión hidrostática necesaria (NPSH) para evitar el fenómeno de cavitación de las bombas de alimentación.



*Ilustración 56. Desgasificador*

## 9.5 FILTROS DE MANGAS

Consisten en un sistema de mangas filtrantes, de un material textil que resisten la temperatura y los agentes químicos que pueda haber en los gases y partículas depositadas. Los gases son forzados a atravesar las mangas filtrantes, donde quedan retenidas las partículas sólidas.

El gas a depurar se hace pasar a través de una tela, de forma que las partículas que arrastra quedan retenidas en la superficie de la misma. Las partículas impactan sobre la superficie de la tela, que forma un tupido entramado, y se origina una coagulación de partículas en la superficie cuyo espesor va en aumento, de manera que contribuye a su vez al filtrado, quedando retenidas las partículas con un tamaño inferior a la abertura del tamiz.

La parte más importante de la filtración se produce cuando ya existe una capa de partículas retenidas. Por tanto, el medio filtrante lo constituye el propio filtro y el espesor formado por el polvo captado.

Los filtros de tela suelen tener forma cilíndrica a modo de bolsa o manga. El gas a tratar puede circular de la parte interior a la exterior o de forma inversa, según el tipo. Las dimensiones típicas de una manga son: 15 a 20 cm de diámetro y una longitud de hasta 7m.

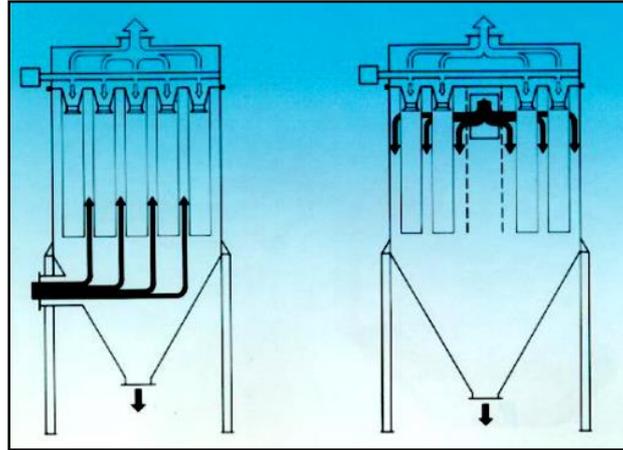


Ilustración 57. Circulación de los gases por el filtro

La eficacia de los filtros de mangas es muy elevada, especialmente para las partículas muy finas a causa de los fenómenos de difusión. Pueden separar partículas de un tamaño inferior a 0,5 mm hasta el tamaño de cientos de micras. La eficacia oscila entre el 99 y el 99,9% (99,5% en  $dp > 1\text{mm}$ ; durante la limpieza: 98 y 90%), aunque para partículas menores de  $5\mu\text{m}$  puede bajar hasta el 95%. La velocidad del paso del gas es muy reducida.

En relación a los materiales filtrantes, el algodón y la lana fueron las primeras fibras utilizadas, aunque en la actualidad se han sustituido por las fibras sintéticas, la fibra de vidrio o de acero inoxidable, etc. A continuación, se muestra una tabla con diferente información acerca de las características de los distintos materiales de los filtros de mangas:

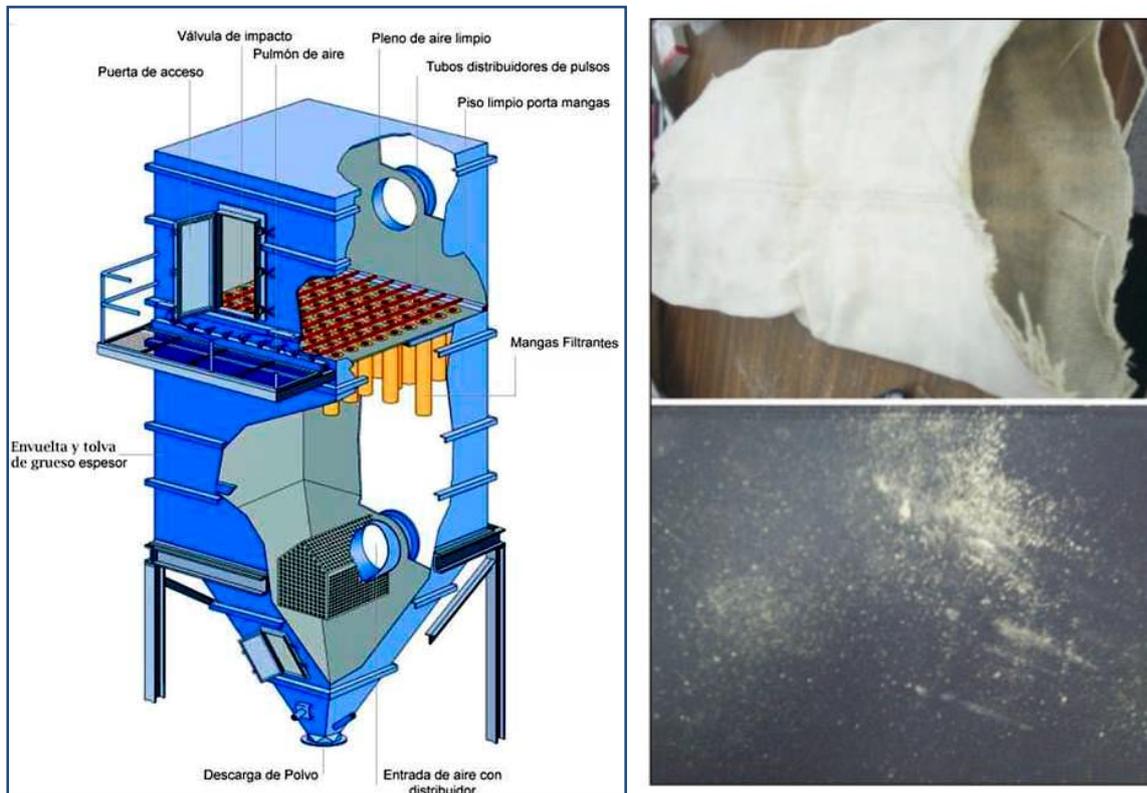
Tejido	Temperatura máxima (°C)	Resistencia		
		Ácidos	Álcalis	Flexibilidad física
Algodón	80	Mala	Buena	Muy buena
Polipropileno	95	Excelente	Excelente	Muy buena
Lana	100	Regular	Mala	Muy buena
Poliéster	135	Buena	Buena	Muy buena
Nylon	205	Mala-regular	Excelente	Excelente
PTFE	235	Excelente	Excelente	Regular
Poliimidias	260	Buena	Buena	Muy buena
Fibra de vidrio	260	Regular-buena	Regular-buena	Regular

Notas:

1. No todos estos materiales son de uso común en incineración –ver datos operativos abajo.
2. Algunas experiencias sugieren una temperatura operativa máxima común de 200°C.

Tabla 18. Información operativa sobre distintos materiales de filtros de mangas

El material a seleccionar depende de la composición química del gas, la concentración de partículas, y las características de las partículas. En nuestro proyecto, el tejido filtrante propuesto estará formado por: soporte en PTFE + fibra P-84 + tratamiento PTFE, composición adecuada para la operación en continuo bajo temperaturas de hasta 250°C.



*Ilustración 58. Filtro de mangas y cenizas volantes retenidas*

Periódicamente se produce un soplado inverso de las mangas, cayendo las partículas depositadas hasta una tolva inferior, desde donde son extraídas al silo de cenizas.

Los filtros de mangas permiten alcanzar sin problemas los niveles de emisión de partículas requeridos por la normativa. Aunque producen una pérdida de carga comparativamente mayor que los precipitadores electrostáticos, presentan la notable ventaja de permitir la formación de una capa de absorbentes no reaccionados que mejora muy sensiblemente los resultados de la depuración de los componentes ácidos y de dioxinas y furanos.

Siempre se colocan al final de la cadena de depuración de gases, justo antes del ventilador de tiro.

## 10. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA Y DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

El presente epígrafe viene determinado por la resolución del apartado METODOLOGÍA del presente proyecto, es decir, por la resolución de los cálculos pertinentes del ciclo Rankine de la planta, que nos proporcionan los datos de caudal y potencia de los equipos, datos necesarios para la compra de equipos.

### 10.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA

Como ya se ha detallado, las tecnologías a emplear en la planta son:

- Combustión: tecnología de parrilla de rodillos rotativos, por su capacidad de incinerar el residuo en bruto según llega a la planta sin necesidad de tratamiento previo, con una alta calidad de combustión (tiempo de residencia de los gases de 2 segundos a temperaturas superiores a 850°C), muy bajo contenido de inquemados y en escorias con un sistema de control automático y con quemadores auxiliares para arranque y mantenimiento de los parámetros de la combustión.
- Caldera: de tiro horizontal, con baja velocidad de los gases, limpieza por golpeo y donde las condiciones de vapor serán moderadas (400°C y 40 bar) para alargar la duración de los haces de superficies calefactoras.
- Limpieza de gases o sistema de depuración semiseco: Consistente en un sistema de desnitrificación SCNR (inyección de una disolución de amoníaco directamente en el horno), un reactor donde se inyectará lechada de cal y carbón activo para los gases ácidos, dioxinas y furanos y, finalmente, el filtro de mangas que se encargará de la eliminación de partículas sólidas, antes de ser emitidos los gases por la chimenea, con su correspondiente equipo de control y medición.
- Sistema de generación eléctrica, formado por el ciclo Rankine (incluyendo TV), alternador y parque de alta tensión para la exportación de la energía.

A continuación, se muestran los principales datos de la instalación:

<b>Planta de tratamiento de RSU Comunidad de Madrid (Alcobendas)</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Capacidad de tratamiento anual.	t/año	188.160
Número de líneas.	-	1
PCI de diseño.	kCal/kg	1.982,25
Tecnología del horno.	-	Parrilla de rodillos rotativos
Flujo másico de residuos.	t/h	24,5
Flujo másico de gases de escape.	m <sup>3</sup> /s	28,56
Potencia entregada a la red.	kW	13.398

*Tabla 19. Principales datos de la planta*

## 10.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

### Horno-caldera

<b>Horno-caldera</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Flujo de residuos ( $m_r$ )	kg/s	6,8
Flujo de vapor ( $m_v$ )	kg/s	20,27
Presión (P)	bar	40

*Tabla 20. Dimensionamiento del conjunto horno-caldera*

## Turbina

Turbina		
Parámetro	Unidades	Valor
Flujo de vapor entrante ( $m_v$ )	kg/s	20,27
Flujo de vapor primera extracción ( $m_1$ )	kg/s	3,01
Flujo de vapor segunda extracción ( $m_2$ )	kg/s	1,27
Flujo de vapor extracción final ( $m_3$ )	kg/s	15,99
Potencia	MW	17

Tabla 21. Dimensionamiento de la turbina

## Aerocondensador

Aerocondensador		
Parámetro	Unidades	Valor
Flujo de vapor aero ( $m_3$ )	kg/s	15,99
Flujo de aire refri. ( $m_a$ )	kg/s	1.628,8
Presión (P)	bar	0,1

Tabla 22. Dimensionamiento aerocondensador

## Bomba 1

Bomba 1		
Parámetro	Unidades	Valor
Flujo de vapor ( $m_3$ )	kg/s	15,99
Presión entrada ( $P_e$ )	bar	0,1
Presión salida ( $P_s$ )	bar	3
Potencia	kW	6,4

Tabla 23. Dimensionamiento bomba 1

## Desgasificador

Desgasificador		
Parámetro	Unidades	Valor
Flujo de vapor ( $m_v$ )	kg/s	20,27
Presión (P)	bar	3

*Tabla 24. Dimensionamiento desgasificador*

## Bomba 2

Bomba 2		
Parámetro	Unidades	Valor
Flujo de vapor ( $m_v$ )	kg/s	20,27
Presión entrada ( $P_e$ )	bar	3
Presión salida ( $P_s$ )	bar	3
Potencia	kW	99,32

*Tabla 25. Dimensionamiento bomba 2*



# METODOLOGÍA

## 1. DESCRIPCIÓN DE TAREAS, EQUIPOS Y DURACIONES

La construcción de la planta, dado su tamaño, se estima en 25 meses, teniendo como fecha de inicio prevista el lunes 02/09/2019 y fecha de finalización prevista el viernes día 01/10/2021.

A continuación, se resumen las tareas a realizar para la construcción y puesta en marcha de la misma:

- Ingeniería básica: partiendo del presente documento (ingeniería de concepto), trata la elaboración del conjunto de documentos de ingeniería con definiciones y cálculos de los procesos principales, seguridad, medio ambiente, estudio de riegos, implantación y especificaciones definitivas para comenzar con la compra de equipos, sobre todo aquellos mayores que requerirán de un mayor tiempo para llegar al lugar de instalación.
  - Equipo: Ingenieros y oficina técnica.
  - Duración: 3 meses.
- Ingeniería de detalle: se trata del conjunto de documentación generada a partir de la ingeniería básica que incluye todos los detalles constructivos, por disciplina (civil, mecánica, procesos, eléctrica, telecomunicaciones, instrumentación y control, sistemas informáticos) que deberán estar aprobados para construcción.
  - Equipo: Ingeniería y oficina técnica.
  - Duración: 18 meses.
- Compra de equipos: tras las especificaciones obtenidas en la ingeniería básica, comienza la adquisición de los equipos. Algunos de estos, necesitaran de un largo periodo de tiempo para su adquisición (por ejemplo, para la compra de la caldera, se estiman 13 meses).
  - Equipo: Técnicos comerciales.
  - Duración: 13 meses.
- Obra civil: comienza la construcción de la infraestructura de la planta.
  - Equipo: Equipo de obra.
  - Duración: 6 meses.

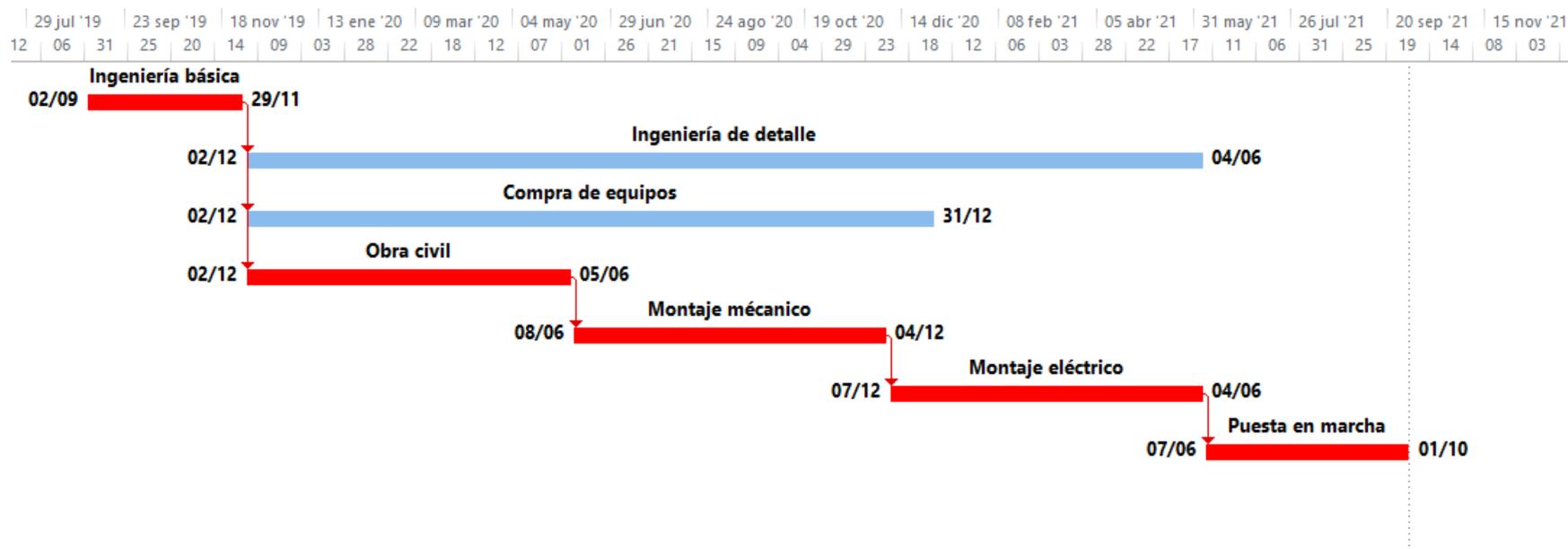
- Montaje mecánico: realizar el montaje e instalación en planta de maquinaria y equipo industrial.
  - Equipo: Equipo de montaje.
  - Duración: 6 meses.
- Montaje eléctrico: instalación de canaletas, acometidas, conexión de equipos, instalación de redes, PLC etc...
  - Equipo: Equipo de montaje.
  - Duración: 6 meses.
- Puesta en marcha: establecer procedimientos operativos y coordinar al equipo de montaje, planificar y coordinar la puesta en marcha, asegurar el funcionamiento de los equipos acorde a especificaciones, establecer y llevar a cabo las pruebas de funcionamiento, diagnóstico y resolución de incidencias y realizar los informes de funcionamiento y documentación técnica.
  - Equipo: Ingeniero de puesta en marcha y equipo de montaje.
  - Duración: 4 meses.

Fácilmente se puede uno percatar que la suma de las duraciones supera la duración total definida al comienzo de 25 meses. Esto es debido a que algunas de las tareas se solaparan en el transcurso del tiempo, ya que no tienen relación una con otra, tal y como se verá en el diagrama de Gantt.

Puede ser que durante el transcurso del proyecto se alargue el tiempo previsto debido a imprevistos que puedan ir surgiendo. En caso de que estos ocurran en el camino crítico, afectaran a la duración total del proyecto, mientras que las tareas fuera de este, permitirán ligeros retrasos.

## 2. DIAGRAMA DE GANTT

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt de la construcción y puesta en marcha del proyecto (empleando la herramienta MS Project), donde se verán las actividades descritas en el párrafo anterior a lo largo del tiempo.



*Ilustración 59. Diagrama de Gantt del proyecto*

En el diagrama, en rojo, se muestran las tareas críticas, las cuales, en caso de sufrir algún retraso debido a imprevistos, retrasarían todo el proyecto. Por otro lado, las dos tareas que más tiempo llevarán, es decir la ingeniería de detalle y la compra de equipos, se hallan fuera del camino crítico. Estas tareas podrán llevarse a cabo al mismo tiempo que las otras, y en caso de sufrir ligeros retrasos, no afectarían a la duración del proyecto.

### 3. CÁLCULOS

#### 3.1. DIMENSIONAMIENTO GENERAL

Comenzaremos diseñando la planta en función del número de habitantes a los que tiene que dar servicio y a los hábitos de estos en lo que a la generación de residuos se refiere. Según el propio Ayuntamiento de Madrid, cada habitante genera de media 395,40 kg de residuos al año. La planta procesará los residuos procedentes de 400.000 habitantes de la Mancomunidad Noroeste. Por tanto, la capacidad total será:

$$Capacidad = 400.000 \text{ hab.} \times 0.3954 \frac{\text{ton}}{\text{hab.} \times \text{año}} = 158.160 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

Este valor sería la capacidad ideal de la planta en el supuesto de que esté en funcionamiento continuo durante todo el año. Realmente, supondremos una disponibilidad de la planta de 320 días, dejando de esta forma mes y medio para labores de mantenimiento o paradas por averías. La disponibilidad de la planta es, por tanto:

$$Disponibilidad \text{ de la planta} = \frac{320 \text{ días en funcionamiento}}{365 \text{ días/año}} \times 100 = 87,67\%$$

Con estos datos, podemos calcular la incineración teórica horaria. Debido a que el acuerdo alcanzado indica que se debe de dar servicio a 400.000 habitantes, los residuos generados por estos a lo largo de un año, se deben de poder eliminar en 320 días.

$$Incineración \text{ teórica horaria} = \frac{158.160 \frac{\text{ton}}{\text{año}}}{320 \frac{\text{días}}{\text{año}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}}} = 20,59 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

Tal y como se puede ver en el cálculo anterior, la planta funcionará 24h al día, divididas en tres turnos de 8 horas para los operarios.

En previsión de futuros aumentos de generación de residuos por habitante o, para si fuese necesario, poder dar servicio a una mayor población, se diseñará la planta con un aumento de aproximadamente un 19% de la capacidad, siendo de esta forma la **capacidad de diseño** elegida igual a **24,5 ton/h** de residuos tratados.

Partiendo de este dato y realizando las operaciones inversas, podríamos calcular la capacidad total de la planta como:

$$Capacidad\ total = 24,5 \frac{ton}{h} \times 320\ dias \times 24 \frac{h}{dia} = 188.160 \frac{ton}{año}$$

Vemos como la capacidad de diseño es 30.000 ton/año mayor que la capacidad teórica para 400.000 habitantes.

Antes de comenzar con el cálculo del PCI y los cálculos de combustión, es necesario gestionar los residuos a su recepción y distribuirlos, por eso a continuación se muestra el dimensionamiento de las fosas de recepción, de los puentes grúa, pulpos y tolva de alimentación.

### FOSA DE RECEPCIÓN DE RESIDUOS

Se diseñará la fosa para que permita la recepción y acumulación de residuos durante 4 días. Según una toma de muestras, se establece la densidad de la basura en 400 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto:

$$Capacidad\ de\ la\ fosa = 4\ dias \times 24 \frac{h}{dia} \times 24,5 \frac{t}{h} \times \frac{1m^3}{0,4\ t} = 5.880\ m^3$$

### PUENTES GRÚA Y PULPOS

La instalación contará con dos pulpos que se colgarán de dos puentes grúa, que serán conducidos sobre la misma estructura. Para calcular la capacidad necesaria de cada pulpo, supondremos que realizarán 10 cargas cada uno. A la hora de efectuar las cargas, supondremos que la fuerza ejercida por el pulpo, tiene como resultado un aumento de la densidad de la basura hasta 0,5 ton/m<sup>3</sup>. Cada uno de los pulpos tendrá que ser capaz de cargar 12,25 ton/h, tratando de esta forma los 24,5 ton/h de capacidad de incineración de diseño establecida. Con estas consideraciones procedemos a calcular la capacidad de los pulpos.

$$Capacidad\ pulpo = \frac{12,25 \frac{ton}{h}}{10 \frac{cargas}{h} \times 0,5 \frac{ton}{m^3} \times 0,75} = 3,27 \frac{m^3}{Carga}$$

Para el cálculo hemos supuesto un factor de llenado del pulpo del 75%. De esta forma, hemos obtenido que la capacidad mínima teórica del pulpo debe de ser de 3,27m<sup>3</sup>.

Modelo	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Grúa mínima SWL (t)	Pulpadas en cada operación manipulando basuras y RSU			Peso del pulpo en vacío con aceite incluido (kg)
			Carga mínima (kg)	Carga media (kg)	Carga máxima (kg)	
PH5-500-0,9	0,5	1,25	170	250	310	890
PH5-750-0,9	0,75	1,5	280	370	490	995
PH5-1000-0,9	1	2	400	540	660	1.290
PH5-1250-0,9	1,25	2,5	490	650	820	1.560
PH5-1600-0,9	1,6	3	670	890	1.120	1.600
PH5-2000-0,9	2	3,2	835	1.100	1.400	1.800
PH5-2500-0,9	2,5	4	1.050	1.390	1.750	2.150
PH6-3000-0,9	3	4,5	1.280	1.680	2.100	2.750
PH6-3500-0,9	3,5	5	1.470	1.950	2.450	2.950
PH6-4000-0,9	4	5,5	1.660	2.240	2.838	3.500
PH6-4500-0,9	4,5	6,3	1.900	2.570	3.240	3.700
PH6-5000-0,9	5	7	2.230	2.958	3.751	3.950
PH6-6300-0,9	6,3	9	2.852	3.803	4.801	5.000
PH6-8000-0,9	8	10	3.307	4.410	5.600	5.340
PH7-10500-0,9	10,5	14	4.286	5.715	7.200	8.170
PH7-12000-0,9	12	16	4.655	6.182	7.810	8.520
PH8-15000-0,9	15	18	5.500	7.350	9.300	9.900

Tabla 26. Características de la grúa pulpo

Como vemos en la tabla anterior suministrada por el proveedor, los pulpos que seleccionaremos serán de 3,5 m<sup>3</sup> y, para cada uno de ellos, los puentes que emplearemos serán de 5 toneladas cada uno como nos indica el fabricante.

### TOLVAS DE ALIMENTACIÓN

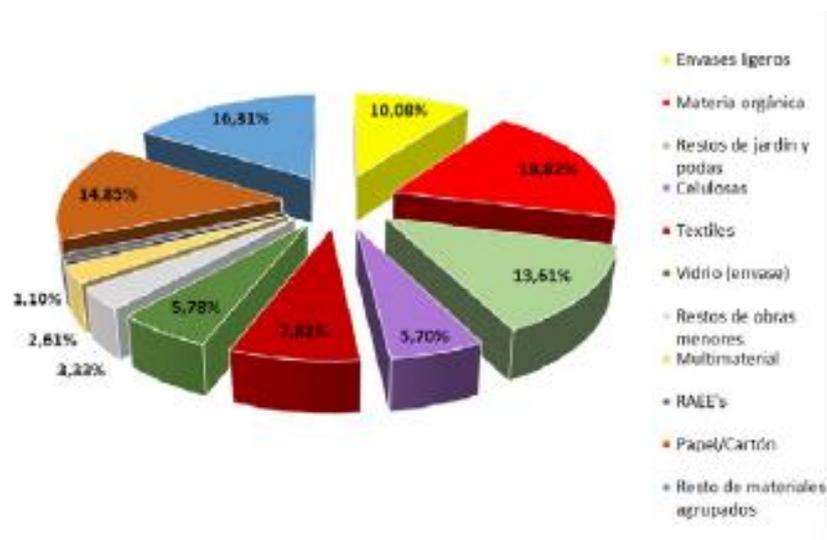
Para el cálculo del volumen de la tolva que se empleará para la alimentación del horno, se tendrá en cuenta que la densidad de los residuos en ella será de 0,45 ton/m<sup>3</sup>, dado que ya no estarán sufriendo la fuerza de compresión realizada por el pulpo. La capacidad de la tolva será:

$$\text{Capacidad tolva} = \frac{24,5 \frac{\text{ton}}{\text{h}}}{0,45 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}} = 54,44 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Seleccionaremos por tanto la tolva con una capacidad de 60 m<sup>3</sup>/h. Tendremos que tener en cuenta para su diseño, el grado de apertura del pulpo, para asegurar que toda la descarga de este se lleva a cabo en el interior de la tolva.

### 3.2. CÁLCULO DEL PCI

Existen diversos métodos para el cálculo del PCI, tanto experimentales (mediante el ensayo de bomba calorimétrica), como teóricos (ecuación de Dulong). Nosotros para el cálculo emplearemos la fórmula de Dulong, partiendo de la composición de los RSU de la comunidad de Madrid.



Gráfica 8. Composición bruta de los RSU en Madrid (2016)

También se dispone de la composición química de los residuos de la zona.

Elemento químico	Porcentaje (%)
C	22,21
H	3,15
S	0,08
O	14,34
N	0,44
Cl	0,37
H <sub>2</sub> O	38,85
Cenizas	20,56
TOTAL	100

Tabla 27. Composición química de los RSU de Madrid

Formula de Dulong:

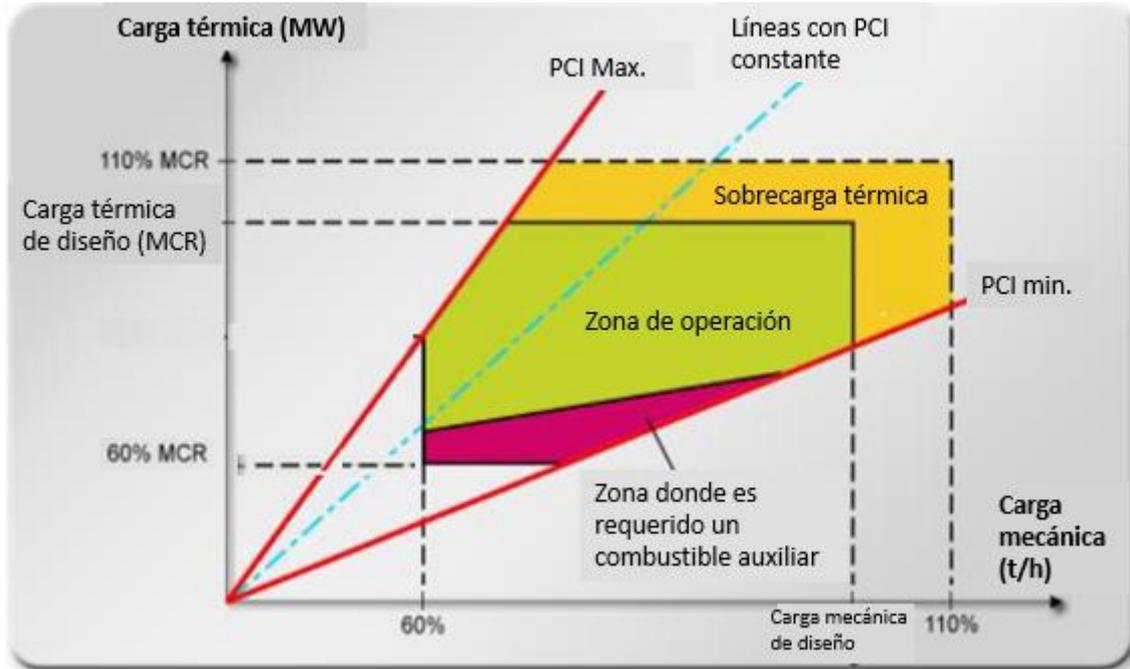
$$PCI \left[ \frac{Kcal}{kg} \right] = 81,4 \times (\%C) + 290 \times \left[ (\%H) - \left( \frac{\%O_2}{8} \right) \right] + 22,2 \times (\%S) - 6(\%H_2O)$$

$$PCI = 81,4 \times 22,21 + 290 \times \left[ (3,15) - \left( \frac{14,34}{8} \right) \right] + 22,2 \times (0,08) - 6 \times (36,85)$$

$$PCI = 1.982,25 \frac{kCal}{kg}$$

### 3.3. DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN DEL HORNO

El diagrama de combustión determina gráficamente la zona de funcionamiento del horno. Para ello, se definirán los límites de funcionamiento en función del PCI, de la carga térmica (potencia térmica) y de la carga mecánica (capacidad de RSU).



Gráfica 9. Diagrama de combustión

Para realizar el diagrama de combustión de nuestro horno, partimos de las condiciones de diseño:

- Carga mecánica = 24,5 ton/h.
- PCI = 1.982,25 kCal/kg.

Con estos datos, se puede obtener la carga térmica de diseño como:

$$Pot. = 24.500 \frac{kg}{h} \times 1.982,25 \frac{kCal}{kg} \times 4,184 \frac{kJ}{kCal} \times \frac{1h}{3600s} = 56.443,46 kW$$

Tanto la carga térmica como la mecánica podrán variar dentro del rango del 60%-110% de la carga de diseño. Fuera de estos límites, no se efectuaría una combustión correcta. Igualmente, para el PCI se define un rango de funcionamiento que permite aumentos y disminuciones de un 20% del valor de diseño. De esta forma quedan definidos los distintos puntos de funcionamiento:

Carga mecánica:

- Carga de diseño = 24,5 ton/h.
- 110% Carga de diseño = 1,1 × 24,5 ton/h = 26,95 ton/h.

- 60% Carga de diseño =  $0,6 \times 24,5 \text{ ton/h} = 14,7 \text{ ton/h}$ .

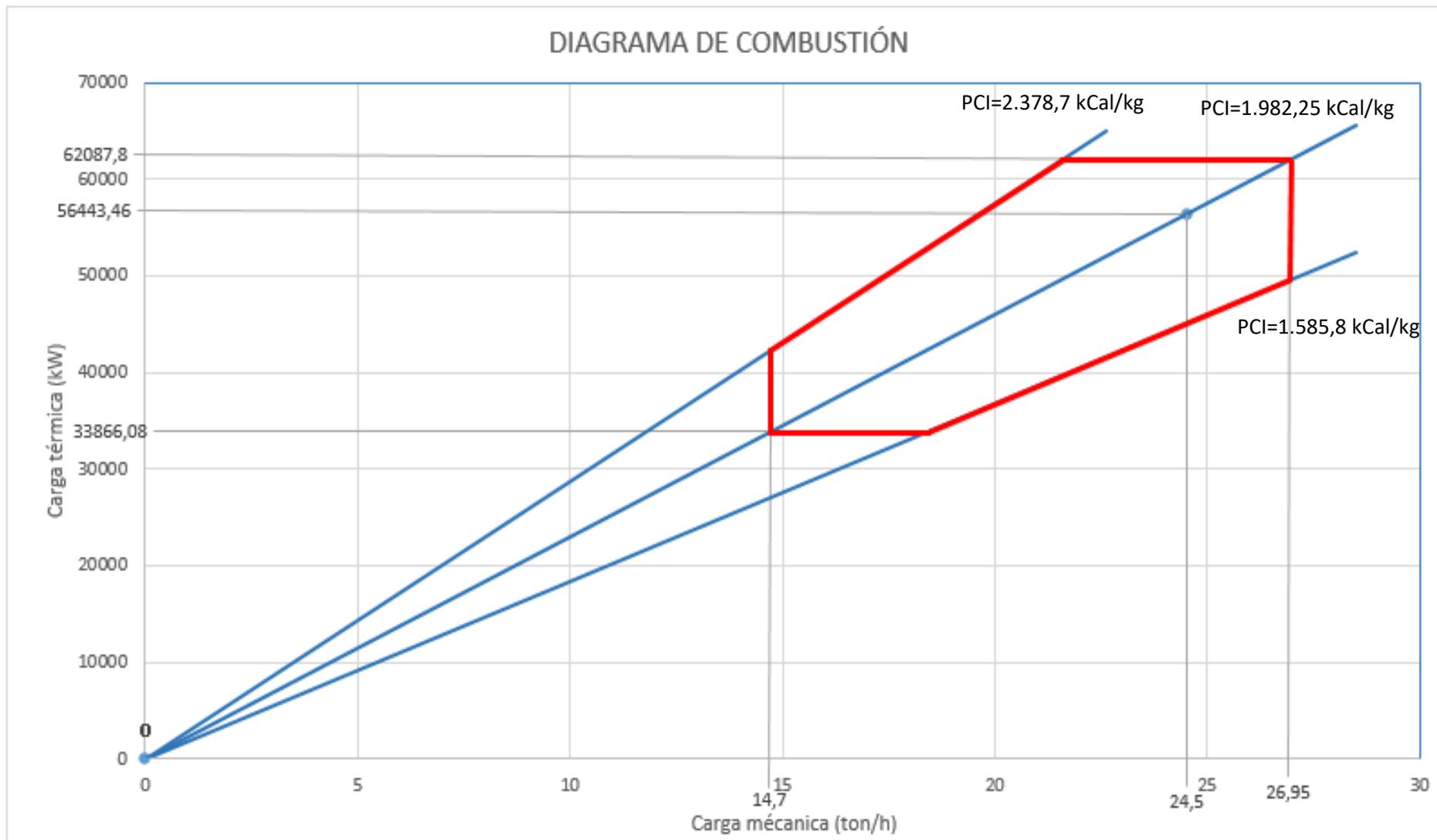
#### PCI:

- PCI de diseño =  $1.982,25 \text{ kCal/kg}$ .
- 120% PCI de diseño =  $1,2 \times 1.982,25 \text{ kCal/kg} = 2.378,7 \text{ kCal/kg}$ .
- 80% PCI de diseño =  $0,8 \times 1.982,25 \text{ kCal/kg} = 1.585,8 \text{ kCal/kg}$ .

#### Carga térmica:

- Carga de diseño =  $56.443,46 \text{ kW}$ .
- 110% Carga de diseño =  $1,1 \times 56.443,46 \text{ kW} = 62.087,8 \text{ kW}$ .
- 60% Carga de diseño =  $0,6 \times 56.443,46 \text{ kW} = 33.866,08 \text{ kW}$ .

En la siguiente página, se muestra en color rojo el área delimitada para el correcto funcionamiento del horno. Evidentemente, cuando se trabaja por encima del 100%, ya sea en relación a la carga térmica o mecánica, la instalación se encuentra en situación de sobrecarga, situación en la que la planta solo debe de funcionar durante pequeños periodos de tiempo, dado que se perdería la garantía del equipo ya que los fabricantes se cubren al indicar los puntos de funcionamiento por seguridad. En periodos en los que la carga térmica se reduzca por debajo de cierto valor, se necesitara de un combustible externo para la incineración. En esos casos habrá que realizar un estudio para ver qué valor de carga hace que deje de ser rentable el continuar incinerando y de esta forma saber el momento de parar la planta. Se muestra, además, mediante un punto, la posición de funcionamiento de diseño de la planta.

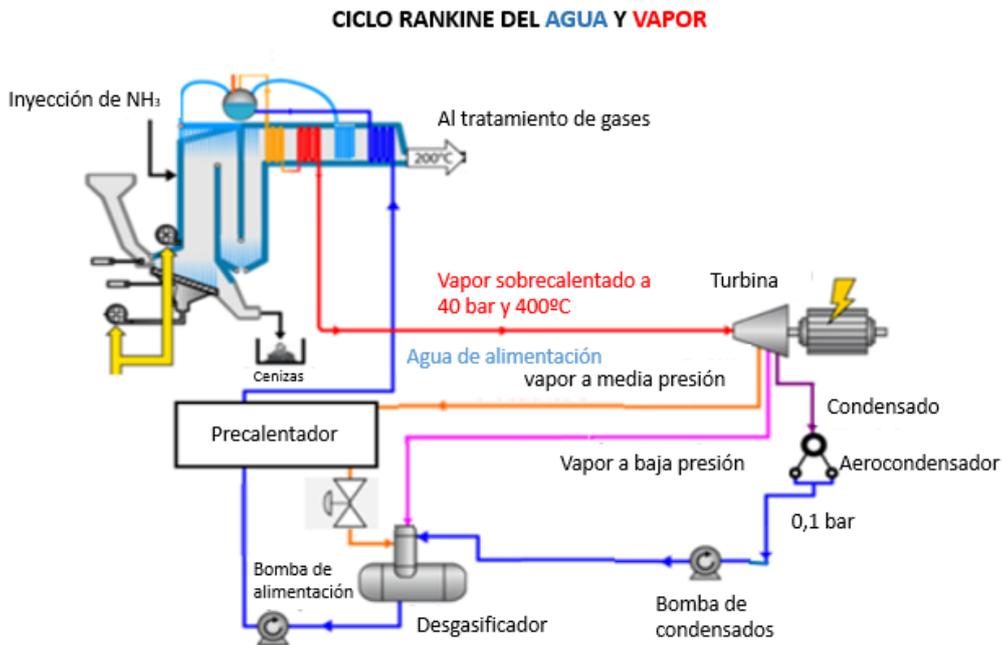


Gráfica 10. Diagrama de combustión de nuestro horno

### 3.4. CICLO RANKINE DE LA INSTALACIÓN

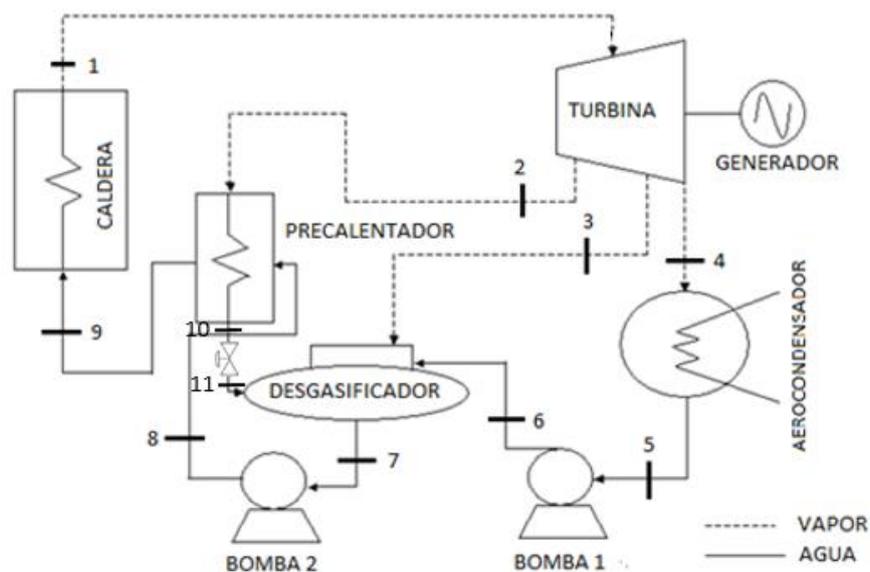
#### 3.4.1. DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DEL CICLO

El ciclo Rankine de la instalación, es el ciclo descrito por el agua (tanto en estado líquido como gaseoso), que en nuestro caso es el siguiente:



*Ilustración 60. Ciclo Rankine de la planta*

Para la realización de los cálculos, realizaremos la siguiente simplificación:



*Ilustración 61. Simplificación ciclo Rankine de la planta*

Para realizar el diseño del ciclo Rankine, se supondrá:

- No existen pérdidas de carga a lo largo de las tuberías.
- Presión a la salida de la caldera (punto 1) = 40 bar.
- Temperatura a la salida de la caldera (punto 1) = 400 °C.
- Presión en la primera extracción de la turbina (punto 2) = 12 bar.
- Temperatura de alimentación a la caldera (punto 9) = 180 °C.
- Presión salida de la turbina (punto 4) = 0,1 bar.
- Presión segunda extracción (punto 3) = 3 bar.
- Condiciones en el desgasificador:
  - $P = 3$  bar y  $T = 105^{\circ}\text{C}$ .
- Los fabricantes nos proporcionan los siguientes rendimientos:
  - $\eta$  primera extracción turbina = 0,85.
  - $\eta$  segunda extracción turbina = 0,87.
  - $\eta$  turbina (extracción final) = 0,90.
  - $\eta$  bombas = 0,8.

Para la elaboración de este apartado, se ha utilizado el software EES, el cual al introducirle dos variables de un estado (por ejemplo, P y T) nos facilita todas las demás incógnitas. El código para la resolución mediante el software se encuentra en el ANEXO III, donde se incluyen, tanto las variables como los comandos introducidos al programa, así como los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran las características principales de cada estado.

- Punto 1: salida de la caldera.

El vapor abandona la caldera como vapor sobrecalentado a 40 bar y 400 °C.

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	40
T	°C	400
h	kJ/kg	3213
s	kJ/kgK	6,769

*Tabla 28. Estado 1*

- Punto 2s: primera extracción isoentrópica.

Sabiendo que el fluido se encuentra a 12 bar y con  $s_{2s}=s_1$  obtenemos  $h_{2s}$ .

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	12
h	kJ/kg	2904
s	kJ/kgK	6,769

*Tabla 29. Estado 2s*

- Punto 2: primera extracción real.

Con  $h_{2s}$  y el rendimiento isoentrópico obtenemos  $h_2$  como:

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Con  $h_2$  y la presión igual a 12 bar, el estado queda totalmente definido.

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	12
T	°C	257
h	kJ/kg	2950
s	kJ/kgK	6,858

*Tabla 30. Estado 2*

- Punto 3s: segunda extracción isoentrópica.

El fluido se encuentra a 3 bar y  $s_{3s}=s_1$  obtenemos  $h_{3s}$ .

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	3
h	kJ/kg	2634
s	kJ/kgK	6,769

*Tabla 31. Estado 3s*

- Punto 3: segunda extracción real.

Igual que en la primera extracción, empleando la misma fórmula, obtenemos  $h_3$ , y con ella y con la presión igual a 3 bar, el estado queda totalmente definido.

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	3
T	°C	133,6
h	kJ/kg	2710
s	kJ/kgK	6,954

*Tabla 32. Estado 3*

- Punto 4s: extracción final isoentrópica.

El fluido se encuentra a 0,1 bar y  $s_{4s}=s_1$  obtenemos  $h_{4s}$ .

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	0,1
h	kJ/kg	2144
s	kJ/kgK	6,769

*Tabla 33. Estado 4s*

- Punto 4: extracción final real.

Sabiendo que la presión a la salida es de 0,1 bar y empleando la fórmula del rendimiento isoentrópico, obtenemos el resto de variables:

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	0,1
T	°C	45,82
h	kJ/kg	2251
s	kJ/kgK	7,104

*Tabla 34. Estado 4*

Además, se realiza el cálculo del título de vapor del estado 4, obteniendo  $x_4=0,86$ , ligeramente superior al límite establecido de 0,85 para asegurar el buen funcionamiento de la turbina, evitando la corrosión de los álabes.

- Punto 5: salida del aerocondensador.

La presión es la misma que a la entrada (0,1 bar) y el fluido se encontrará en condiciones de líquido saturado ( $x=0$ ).

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	0,1
T	°C	45,82
h	kJ/kg	191,8
s	kJ/kgK	0,6493

*Tabla 35. Estado 5*

- Punto 6: salida de la primera bomba.

La presión en dicho punto es de 3 bar.

Empleando la diferencia de presiones entre la salida y la entrada de la bomba y el volumen específico podemos calcular el trabajo realizado por la bomba.

$$W = v \times \Delta P$$

Y utilizando el rendimiento de la bomba, se halla  $h_6$  como:

$$\eta = \frac{W}{h_6 - h_5}$$

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	3
T	°C	45,84
h	kJ/kg	192,2
s	kJ/kgK	0,6495

*Tabla 36. Estado 6*

- Punto 7: salida del desgasificador.

La presión y temperatura es la misma que la que hay en el equipo (3 bar y 105°C).

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	3
T	°C	105
h	kJ/kg	440,3
s	kJ/kgK	1,363

*Tabla 37. Estado 7*

- Punto 8: salida de la segunda bomba.



- Punto 11: salida de la válvula de expansión y entrada al desgasificador.

El fluido se encuentra a 3 bar y el proceso en la válvula se supone isoentálpico.

Parámetro	Unidades	Valor
P	bar	3
T	°C	133,6
h	kJ/kg	798,7
s	kJ/kgK	2,255

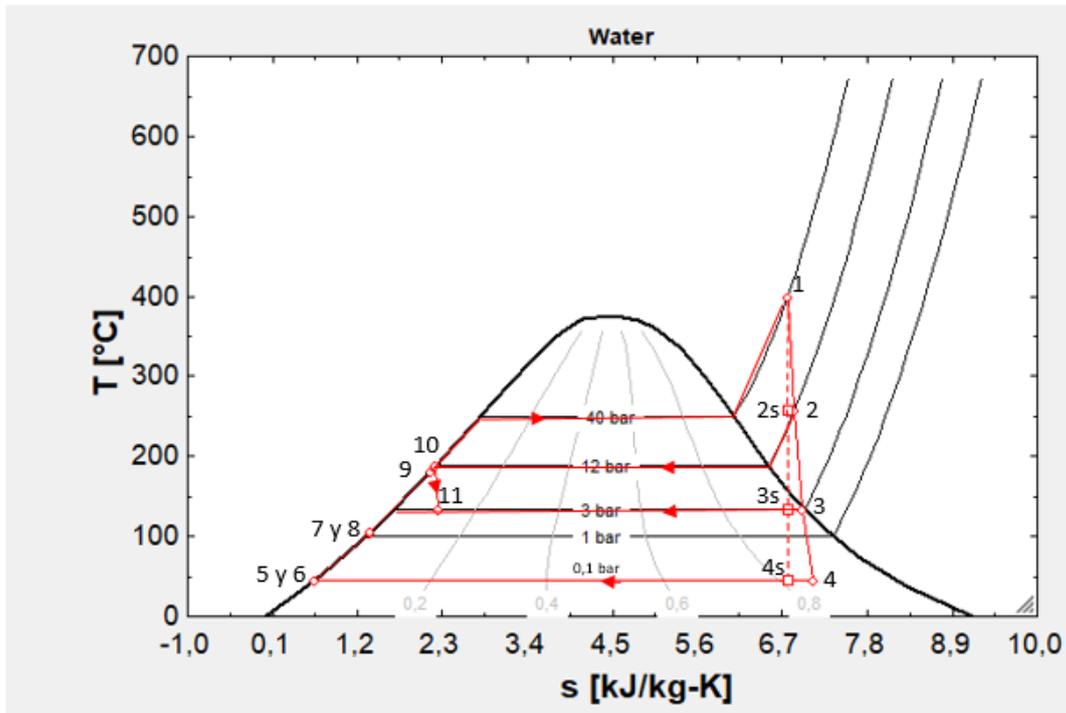
*Tabla 41. Estado 11*

De esta forma, podemos resumir los puntos reales del ciclo de la siguiente forma:

Punto	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
1	40	400	3213	6,769
2	12	257	2950	6,858
3	3	133,6	2710	6,954
4	0,1	45,82	2251	7,104
5	0,1	45,82	191,8	0,6493
6	3	45,84	192,2	0,6495
7	3	105	440,3	1,363
8	40	105,5	445,2	1,365
9	40	180	764,8	2,136
10	12	188	798,7	2,217
11	3	133,6	798,7	2,255

*Tabla 42. Resumen de todos los estados del ciclo Rankine*

Mediante el EES, se grafican los resultados obtenidos en un diagrama T-s.



Gráfica 11. Diagrama T-s del ciclo Rankine

### 3.4.2. RESOLUCIÓN DEL CICLO

Para la resolución del ciclo, plantearemos los balances de masa y potencia a los equipos precisos. Partiremos del conocimiento del caudal másico de RSU y su PCI y de tener cada uno de los estados definidos. El objetivo principal será calcular los diferentes caudales que circulan por cada equipo, ya que esto nos proporcionará una idea bastante precisa del tamaño de los equipos y, por tanto, de la inversión necesaria para adquirirlos. Al mismo tiempo, se podrán calcular los rendimientos de los diferentes equipos.

En primer lugar, la ley de conservación de masa indica que la masa ni se crea ni se destruye, por tanto:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s$$

Por otro lado, la fórmula para el balance de potencia para un volumen de control es la siguiente:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{E}_e - \sum \dot{E}_s$$

Los flujos de energía de entrada y salida tienen una componente potencial, cinética y entálpica. En nuestro caso, ignoraremos las dos primeras, centrándonos en el término entálpico, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \times h_e - \sum \dot{m}_s \times h_s$$

Supondremos que la instalación se encuentra en funcionamiento y, por lo tanto, en estado estacionario, la ecuación se puede escribir como:

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \times h_e - \sum \dot{m}_s \times h_s$$

Los pasos seguidos para realizar los cálculos son los siguientes:

## HORNO CALDERA

En el conjunto horno-caldera es donde se lleva a cabo la incineración de los RSU y, posteriormente, se realiza el intercambio de calor entre los gases de combustión y el agua, para producir el vapor necesario para la posterior generación de energía eléctrica.

Para la realización del balance de energía del horno-caldera, tendremos en cuenta la siguiente figura:



*Ilustración 62. Balance de energía en el horno-caldera*

Para el cálculo del rendimiento existen dos métodos posibles:

- Método directo:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \times (h_1 - h_9)}{APORTES_{Horno-caldera}}$$

- Método indirecto o de pérdidas separadas:

$$\eta = 100\% - P_{gases} - P_{purgas} - P_{inquemados} - P_{radiación}$$

Dado que sabemos que el rendimiento de la caldera es de un 88% (dato proporcionado por el fabricante), procedemos a emplear el método directo tras el análisis de cuáles son los aportes al conjunto.

A continuación, se verán individualmente cada uno de los aportes y aprovechamientos energéticos mostrados en la ilustración anterior.

- APORTES:

Calor sensible combustible:

No se tendrá en cuenta, debido a que no se realiza el precalentamiento de los residuos. Realmente, en ningún caso, sin importar el combustible empleado, se suele tener en cuenta debido a que se trata de un valor insignificante al lado de los demás parámetros.

Calor de combustión:

Para el cálculo del calor de combustión, emplearemos los valores de flujo másico de residuos y del PCI calculados con anterioridad.

$$\dot{Q}_{RSU} = \dot{m}_{RSU} \times PCI_{RSU}$$

$$\dot{Q}_{RSU} = 24.500 \frac{kg}{h} \times 1.982,25 \frac{kCal}{kg} \times \frac{4,18 kJ}{1 kCal} \times \frac{1 h}{3600 s} = 56.389,5 kW$$

### Calor aire combustible:

Se considera que todo el aire introducido en el horno como aire comburente, entra a temperatura ambiente, siendo por tanto su aporte energético nulo. Esto se debe a la prioridad de precalentar el agua de alimentación en lugar del aire, debido a que el calor específico del agua es superior, siendo por tanto más rentable el precalentamiento este.

Por tanto, todo el aporte realizado al horno es función de la cantidad de RSU y de su PCI.

- APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO:

Es la energía útil obtenida tras el proceso de combustión. En ella tendremos en cuenta la diferencia entre la energía del agua a la salida de la caldera y a la entrada.

$$P_{\text{útil}} = \dot{m}_v \times (h_1 - h_9)$$

Conociendo el rendimiento del equipo y mediante el empleo del método directo, podemos obtener el caudal de vapor que circula por la caldera.

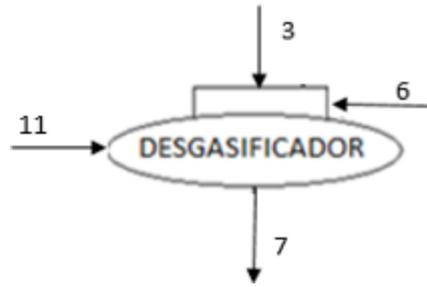
$$\eta = \frac{\dot{m}_v \times (h_1 - h_9)}{(\dot{m}_{RSU} \times PCI)}$$

$$0,88 = \frac{\dot{m}_v \times (3213 \frac{kJ}{kg} - 764,8 \frac{kJ}{kg})}{56.389,5 kW}$$

De esta ecuación obtenemos que  $\dot{m}_v = 20,27 \text{ kg/s}$ .

Para proseguir con la resolución del ciclo, necesitamos conocer cuál es el caudal de las dos extracciones realizadas a la turbina. Para ello, se realizarán los balances pertinentes sobre el precalentador y el desgasificador.

## DESGASIFICADOR



*Ilustración 63. Flujos de entrada y salida del desgasificador*

Realizando un balance de masas obtenemos:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_6 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_7$$

Podemos denominar los subíndices en función de la extracción:

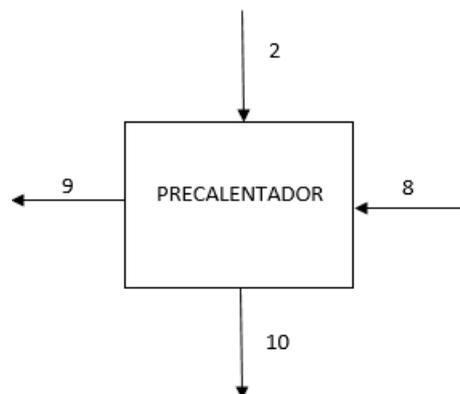
$$\dot{m}_{extrac2} + \dot{m}_{extrac3} + \dot{m}_{extrac1} = \dot{m}_{caldera} = 20,27 \frac{kg}{s}$$

Vemos como por 7 circula el mismo caudal que por la caldera. Esta misma ecuación podríamos haberla obtenido por la lógica, ya que el caudal principal se descompone en 3 dentro de la turbina.

Realizando ahora el balance de potencias sobre el desgasificador:

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_7 h_7$$

## PRECALENTADOR



*Ilustración 64. Flujos de entrada y salida del precalentador*

Al igual que en el desgasificador, se puede realizar un balance de masas, pero en este caso, los flujos no se mezclan, por tanto:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{10}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$$

Realizando ahora el balance de potencias:

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{10} h_{10}$$

Ordenando los términos y aplicando las igualdades expresadas en el balance de masas:

$$\dot{m}_2 (h_2 - h_{10}) = \dot{m}_9 (h_9 - h_8)$$

Por tanto, sumando esta ecuación a las dos obtenidas tras realizar los balances sobre el desgasificador, nos encontramos frente a un problema con 3 incógnitas y tres ecuaciones, por tanto, procedemos a resolverlo:

$$\dot{m}_{extrac1} (h_2 - h_{10}) = \dot{m}_{caldera} (h_9 - h_8)$$

$$\dot{m}_{extrac2} + \dot{m}_{extrac3} + \dot{m}_{extrac1} = \dot{m}_{caldera} = 20,27 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{extrac2} h_3 + \dot{m}_{extrac3} h_6 + \dot{m}_{extrac1} h_{11} = \dot{m}_{caldera} h_7$$

Como puede observarse, las tres ecuaciones se han expresado en función de la extracción a la que pertenecen, o si por el contrario por ella circula el caudal total, se ha denominado con el caudal circulante por la caldera. De esta forma, resolviendo la primera ecuación obtenemos el caudal de la primera extracción.

$$\dot{m}_{extrac1} = \dot{m}_{caldera} \frac{(h_9 - h_8)}{(h_2 - h_{10})} = 20,27 \frac{kg}{s} \times \frac{(764,8 \frac{kJ}{kg} - 445,2 \frac{kJ}{kg})}{(2950 \frac{kJ}{kg} - 798,7 \frac{kJ}{kg})} = 3,01 \frac{kg}{s}$$

Empleando ahora las dos ecuaciones restantes, procedemos a la obtención de la segunda y tercera extracción.

$$\dot{m}_{extrac2} = \dot{m}_{caldera} - \dot{m}_{extrac3} - \dot{m}_{extrac1} = 20,27 \frac{kg}{s} - 3,01 \frac{kg}{s} - \dot{m}_{extrac3}$$

Habiendo despejado  $\dot{m}_{extrac2}$ , pasamos a introducirla en la ecuación restante:

$$\left(20,27 \frac{kg}{s} - 3,01 \frac{kg}{s} - \dot{m}_{extrac3}\right) h_3 + \dot{m}_{extrac3} h_6 + 3,01 \frac{kg}{s} h_{10} = 20,27 \frac{kg}{s} h_7$$

Dando valores a las entalpías, se obtiene:

$$\dot{m}_{extrac3} = 15,99 \frac{kg}{s}$$

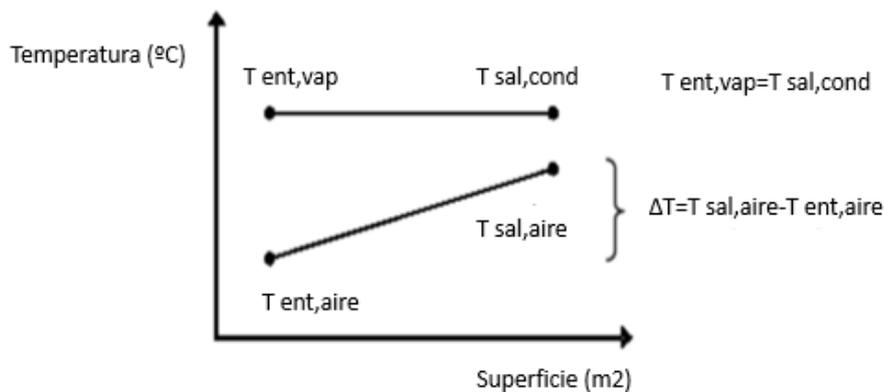
Y, por tanto:

$$\dot{m}_{extrac2} = \dot{m}_{caldera} - \dot{m}_{extrac3} - \dot{m}_{extrac1} = 20,27 \frac{kg}{s} - 3,01 \frac{kg}{s} - 15,99 \frac{kg}{s} = 1,27 \frac{kg}{s}$$

De esta forma, queda totalmente resuelto el ciclo, conociendo a la perfección todos los estados.

## AEROCONDENSADOR

Por otro lado, para realizar el dimensionamiento del aerocondensador, calculamos la cantidad de aire que deberá circular por los aerocondensadores para conseguir que el vapor pase del estado 4 al 5. La gráfica de temperaturas del aerocondensador se muestra a continuación.



Gráfica 12. Variación de temperaturas en el aerocondensador

Para la realización de los cálculos, se supondrá una temperatura ambiente de 20°C y una temperatura de salida del aire de 40°C. También supondremos una eficiencia del condensador del 100%. La fórmula para calcular el caudal de aire necesario es la siguiente:

$$\dot{m}_{extrac3} \times (h_4 - h_5) = m_{aire} \times C_p \times (T_{salida} - T_{entrada})$$

$$15,99 \frac{kg}{s} \times \left( 2251 \frac{kJ}{kg} - 191,8 \frac{kJ}{kg} \right) = m_{aire} \times 1,012 \frac{kJ}{kgK} \times (40 - 20)$$

De donde se obtiene que se necesitan 1.626,8 kg/s de aire en los aerocondensadores.

### 3.4.3. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se procederá a realizar los cálculos acerca de la potencia generada por la turbina, el consumo de las bombas y los rendimientos de la instalación.

La potencia de la turbina será la siguiente:

$$P_{turb} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_2 - h_3) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(h_3 - h_4)$$

$$P_{turb} = 20,27 \frac{kg}{s} (h_1 - h_2) + 17,26 \frac{kg}{s} (h_2 - h_3) + 15,99 \frac{kg}{s} (h_3 - h_4)$$

$$P_{turb} = 16.812,82 \text{ kW}$$

Por ello, se instalará una turbina de 17 MW en la planta.

Supondremos un rendimiento mecánico del conjunto turbina alternador de un 92% y un rendimiento eléctrico del alternador del 97%.

De este modo, la potencia eléctrica producida por la planta es:

$$P_{elec} = 16.812,82 \text{ kW} \times 0,92 \times 0,97 = 15.003,76 \text{ kW}$$

Los consumos de las bombas serán los siguientes:

$$P_{B1} = \dot{m}_5(h_6 - h_5) = 15,99 \frac{kg}{s} \left( 192,2 \frac{kJ}{kg} - 191,8 \frac{kJ}{kg} \right) = 6,4 \text{ kW}$$

$$P_{B2} = \dot{m}_7(h_8 - h_7) = 20,27 \frac{kg}{s} \left( 445,2 \frac{kJ}{kg} - 440,3 \frac{kJ}{kg} \right) = 99,32 kW$$

Antes de calcular el rendimiento de la planta, restaremos a la producción de electricidad, la parte que se empleará para el autoconsumo. Esta se estima en un 10% de la producción total. Es mayor que el consumo de las plantas térmicas convencionales, lo que es debido al movimiento de basuras de la planta.

$$P_{autoc} = 15.003,76 kW \times 0,1 = 1.500 kW$$

La potencia entregada a la red será, por tanto:

$$P_{sum. red} = P_{elec} - P_{B1} - P_{B2} - P_{autoc} = 13.398 kW$$

De esta forma, se puede calcular el rendimiento del ciclo como la potencia eléctrica producida entre la potencia aportada al horno:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{obtenida}}{\dot{m}_c \times PCI} = \frac{P_{elec} - P_{B1} - P_{B2} - P_{autoc}}{\dot{m}_c \times PCI} \\ &= \frac{15.003,76 kW - 6,4 kW - 99,32 kW - 1.500 kW}{56.389,5 kW} = 23,76\% \end{aligned}$$

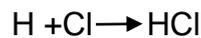
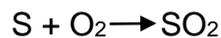
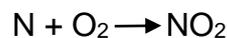
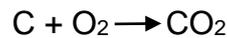
Se considera un buen rendimiento para este tipo de instalaciones, y más, si tenemos en cuenta que ya se ha considerado la electricidad para el autoconsumo.

### 3.5. ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL

En este apartado, se llevarán a cabo los cálculos oportunos para la determinación de las emisiones generadas por la planta. Para ello se establecerán las reacciones que tienen lugar y los compuestos que entran en el horno, así como la cantidad de aire necesario para la combustión. Estos cálculos son aproximados y nos permiten hacernos una idea cercana a la realidad, pero necesitaremos de un análisis experimental si precisamos de más exactitud.

#### 3.5.1. CÁLCULO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN

La combustión de los residuos se llevará a cabo empleando aire como comburente. Dicho aire procederá del aire inyectado como del oxígeno presente en los residuos. Para conocer la cantidad de aire necesario a inyectar en el proceso de combustión, tenemos que determinar primero cuales son las reacciones que se llevan a cabo en el horno, que son las siguientes:



Para la realización de los cálculos hemos supuesto la combustión completa de los elementos. Además de estas reacciones principales, también se dan muchas otras reacciones secundarias, que dan lugar a muchos otros compuestos.

Reacción	Peso (%)	Peso mol. (kg/kmol)	Cantidad (kmol /100kg RSU)	Coef O <sub>2</sub>	Kmol O <sub>2</sub> / 100kg RSU
C + O <sub>2</sub>	22,21	12,01	1,85	1	1,85
2H + ½ O <sub>2</sub>	3,15	1,01	3,12	0,25	0,78
S + O <sub>2</sub>	0,08	32,06	0,0025	1	0,0025
O	14,34	16	0,90	-1	-0,90
N + O <sub>2</sub>	0,44	14,02	0,031	1	0,031
Cl + H	0,37	35,46	0,01	0	0
H <sub>2</sub> O	38,85	18,02	2,16	0	0
Cenizas	20,56				
TOTAL	100				1,7635

*Tabla 43. Compuestos presentes en la combustión*

Por tanto, se necesitan 1,7635 kmol O<sub>2</sub>/100kg de RSU.

Para asegurar la combustión completa se introducirá oxígeno en exceso, pero tampoco podemos introducirlo de forma descontrolada, debido a que disminuiría la temperatura del proceso. Optamos, por tanto, por introducir un 100% de exceso de oxígeno, dado el tipo de horno empleado. Introduciendo tal exceso de aire, aseguramos que las temperaturas en el interior del horno sean inferiores a 900°C, temperatura a partir de la cual el cloro se convierte, exponencialmente, en mucho más corrosivo y dañino para la instalación, pero cumpliendo la normativa, aseguraremos una temperatura superior a 850°C durante dos segundos en el interior del horno para la eliminación de las dioxinas y furanos. Al reducir la temperatura, también se reduce la generación de NO<sub>x</sub> y se consigue un mínimo de un 6% de concentración de O<sub>2</sub> en los humos. Dicho exceso de oxígeno, está dentro del rango de funcionamiento de los hornos de parrilla, aunque afecte negativamente a su rendimiento. Para tratar de funcionar siempre al máximo rendimiento, en la práctica, se variará la cantidad de exceso de aire en función de los RSU incinerados en cada momento (cantidad y composición) y de las mediciones realizadas a los humos.

Por tanto, la cantidad total de oxígeno necesaria será:

$$1,7635 \times 2 = 3,527 \frac{\text{kmol } O_2}{100 \text{ kg } RSU}$$

Que si lo expresamos en kg (multiplicar por 32kg/kmol) seria: 112,86 kgO<sub>2</sub>/100kgRSU.

Si consideramos la composición del aire expresada en peso, nos damos cuenta de que el oxígeno es el 23,1% del total, por tanto, la cantidad de aire necesario será:

$$\frac{112,86 \frac{\text{kg } O_2}{100 \text{ kg } RSU}}{0,231} = 488,59 \frac{\text{kg Aire}}{100 \text{ kg } RSU}$$

Teniendo en cuenta que la planta trata 24,5 ton/h de RSU, necesitaremos 119.704 kg de aire por hora. Si tratamos el aire como gas ideal, podemos calcular el volumen que ocuparía dicha cantidad de aire:

$$PV = nRT$$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

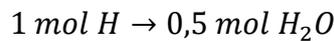
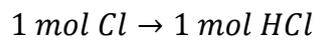
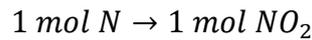
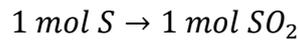
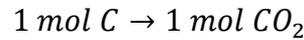
$$V = \frac{119.704 \text{ kg aire}}{28,83 \text{ kg/kmol}} \times 0,082 \frac{\text{atm m}^3}{\text{kmol k}} \times 293\text{k} = 118.759,45 \text{ m}^3$$

Necesitamos, por tanto, aproximadamente 118.759 m<sup>3</sup> por hora, y para ello hemos supuesto una temperatura de 20°C y una presión de 0,84 atm en el noroeste de Madrid.

Para la realización de estos cálculos se ha supuesto al N<sub>2</sub> presente en el aire como inerte, siendo por tanto el contenido en los residuos el único que genera los óxidos de nitrógeno. Esta suposición la podemos realizar debido a que, tal y como se ha descrito con anterioridad, al producirse la combustión con tanto exceso de aire, la temperatura dentro del horno es menor, contribuyendo a una menor generación de NO<sub>x</sub>.

### 3.5.2. ANÁLISIS DE LOS GASES DE SALIDA

Para determinar la cantidad de gases generados en el proceso de combustión, se tendrá en cuenta una vez más, las relaciones estequiométricas de las reacciones.



Por tanto, tendremos para cada 100kg de RSU las siguientes emisiones:

$$1,85 \text{ kmol } CO_2$$

$$0,0025 \text{ kmol } SO_2$$

$$0,031 \text{ kmol } NO_2$$

$$0,01 \text{ kmol } HCl$$

$$1,56 \text{ kmol } H_2O$$

En este punto, nos interesan las emisiones de cada compuesto por segundo, por lo que teniendo en cuenta que la planta trata 24,5 ton/h, cada segundo trata:

$$24,5 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 6,8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Nos interesan también las emisiones en kg/s, por lo que emplearemos el peso molecular y el flujo másico recién calculado para obtener el flujo másico de las emisiones:

$$\frac{1,85 \text{ kmol } CO_2}{100 \text{ kg } RSU} \times 6,8 \frac{\text{kg } RSU}{\text{s}} \times 44,01 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kmol } CO_2} = 5,54 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{s}}$$

$$\frac{0,0025 \text{ kmol } SO_2}{100 \text{ kg } RSU} \times 6,8 \frac{\text{kg } RSU}{s} \times 64,06 \frac{\text{kg } SO_2}{\text{kmol } SO_2} = 0,011 \frac{\text{kg } SO_2}{s}$$

$$\frac{0,031 \text{ kmol } NO_2}{100 \text{ kg } RSU} \times 6,8 \frac{\text{kg } RSU}{s} \times 46 \frac{\text{kg } NO_2}{\text{kmol } NO_2} = 0,097 \frac{\text{kg } NO_2}{s}$$

$$\frac{0,01 \text{ kmol } HCl}{100 \text{ kg } RSU} \times 6,8 \frac{\text{kg } RSU}{s} \times 36,46 \frac{\text{kg } HCl}{\text{kmol } HCl} = 0,025 \frac{\text{kg } HCl}{s}$$

$$\frac{1,56 \text{ kmol } H_2O}{100 \text{ kg } RSU} \times 6,8 \frac{\text{kg } RSU}{s} \times 18,01 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kmol } H_2O} = 1,91 \frac{\text{kg } H_2O}{s}$$

El límite máximo de las emisiones permisibles viene definido por el Real Decreto 815/2013. Los valores ahí indicados vienen dados en unidades de masa por volumen de gases emitidos ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ), a 1 atm y 273,15K. En la tabla inferior se muestran los valores límites que nos interesan en nuestro caso.

Emisión	Límite ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )
HCl	10
SO <sub>2</sub>	50
NO <sub>2</sub>	200

Tabla 44. Límite de emisiones según el RD 815/2013

Vamos a calcular por tanto cuál sería la emisión de estos contaminantes en función del volumen total emitido.

$$PV = nRT$$

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{P}$$

$$\frac{V}{n} = \frac{0,082 \frac{\text{atm } m^3}{\text{kmol } K} \times 273,15K}{1 \text{ atm}} = 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}}$$

Tenemos que definir ahora la cantidad de kmol que se emiten, ya que además de los contaminantes antes citados, también se emitirá O<sub>2</sub> (el excedente) y N<sub>2</sub> (el que entra con el aire lo tratamos como inerte). Por tanto, los moles presentes serán:

CO <sub>2</sub> : 0,1258 kmol/s	SO <sub>2</sub> : 1,7e <sup>-4</sup> kmol/s
NO <sub>2</sub> : 2,1e <sup>-3</sup> kmol/s	HCl: 6,8e <sup>-3</sup> kmol/s
H <sub>2</sub> O: 0,11 kmol/s	O <sub>2</sub> (exceso): 0,12 kmol/s
N <sub>2</sub> (inerte): 0,91 kmol/s	<b>TOTAL=1,275 kmol/s</b>

Por tanto, el volumen de gases total emitido será:

$$V = 22,4 \frac{Nm^3}{kmol} \times 1,275 \frac{kmol}{s} = 28,56 \frac{Nm^3}{s}$$

Y, las emisiones de HCl, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>2</sub> expresadas en mg/Nm<sup>3</sup> serán:

$$\frac{0,025 \frac{kg HCl}{s} \times \frac{10^6 mg}{kg}}{28,56 \frac{Nm^3}{s}} = 87,54 \frac{mg HCl}{Nm^3}$$

$$\frac{0,011 \frac{kg SO_2}{s} \times \frac{10^6 mg}{kg}}{28,56 \frac{Nm^3}{s}} = 385,15 \frac{mg SO_2}{Nm^3}$$

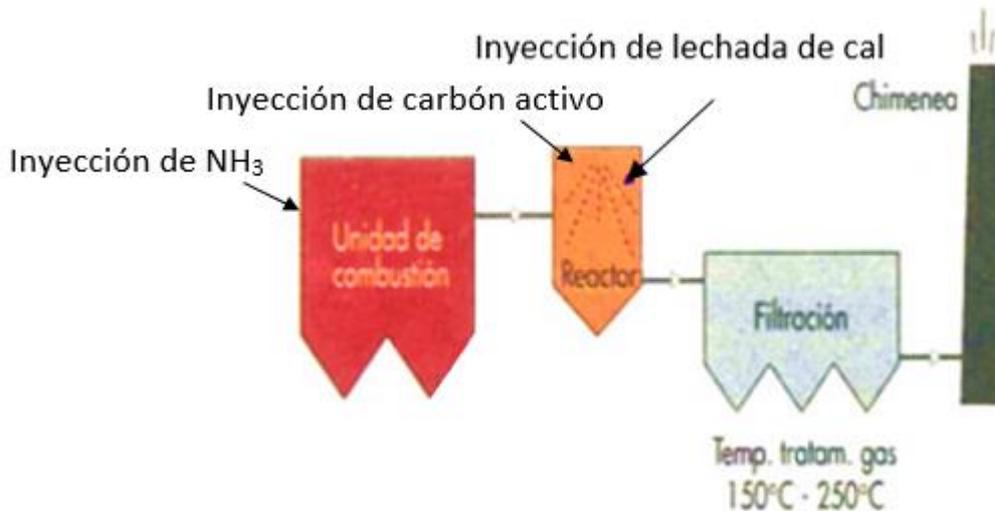
$$\frac{0,097 \frac{kg NO_2}{s} \times \frac{10^6 mg}{kg}}{28,56 \frac{Nm^3}{s}} = 3.396,36 \frac{mg NO_2}{Nm^3}$$

Vemos, como todas las emisiones superan el límite establecido, por lo que será necesario emplear equipos de lavado de gases antes de la emisión a la atmósfera.

### Lavado de gases

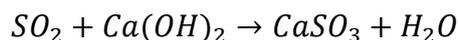
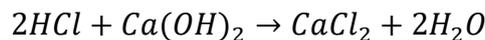
Tal y como se ha explicado con anterioridad, en el reactor se darán a cabo dos procesos para el lavado de gases. Por un lado, se inyectará lechada de cal (Ca(OH)<sub>2</sub>) para neutralizar la acidez de los gases, y por otro lado se llevará a cabo un proceso

de adsorción mediante la inyección de carbón activo micronizado, que eliminará los metales pesados y las posibles dioxinas y furanos que se hayan podido crear tras el proceso de combustión.

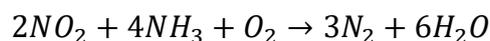


*Ilustración 65. Esquema del sistema de lavado de gases*

Las reacciones que se llevan a cabo en el reactor debido a la inyección de lechada de cal son las siguientes:



Para el tratamiento de los  $NO_x$ , se inyecta  $NH_3$  directamente por la parte superior del horno. La técnica que emplearemos en nuestra instalación será, por tanto, la de reducción mediante reacción selectiva no catalítica (SNCR). La reacción se dará a una temperatura de alrededor de unos  $850^\circ C$ , lo que reducirá el  $NO_x$  alrededor de un 40%-50%. La relación  $NH_3/NO_x$  que emplearemos será de 2. La reacción que se llevará a cabo en nuestro caso, con el  $NO_2$  es la siguiente:



Tras la neutralización de los gases, se procederá a su filtración. En la actualidad, los filtros de mangas pueden llegar alcanzar poderes de retención superiores al 99,9%, por lo que se emitiría un 0,1% de las cantidades anteriormente calculadas. Por tanto,

tras disponer del equipo de lavado preciso, las emisiones no tan solo cumplirán las limitaciones impuestas por el Real Decreto 815/2013, sino que incluso serán bastante inferiores a dichas restricciones, llegando a ser prácticamente nulas, por ejemplo, las emisiones de HCl o SO<sub>2</sub>.

Para reducir el impacto medioambiental en mayor medida, antes de ser emitidos por la chimenea, el 20% de los humos generados y depurados se recirculan y se utilizan como aire secundario en la combustión.

### 3.5.3. ANÁLISIS DE SÓLIDOS

Tras el proceso de incineración de los RSU, también nos encontraremos con sólidos como parte de las emisiones. Las emisiones de sólidos podrán ser diferenciadas en dos grupos, en función del diámetro de la partícula (el llamado diámetro aerodinámico): partículas sedimentables y partículas en suspensión. Estos segundos son los que conocemos como sólidos volátiles (SV); tienen mayor peligro ya que son arrastrados por la corriente de gas y son emitidos a la atmósfera si no se realiza una correcta actuación para capturarlos. Por lo que, los filtros de mangas deberán encargarse de la retención de los SV, dejando de lado los sólidos sedimentables, que se recogerán por la parte inferior del horno. Al realizar la limpieza de los filtros, la suciedad recogida se juntará con la que se ha recogido por la parte inferior del horno en un contenedor y se tratará para mitigar su peligrosidad.

Para las instalaciones de incineración, el límite de emisiones de partículas lo fija el RD 815/2013 en 10mg/Nm<sup>3</sup>. Dado que no disponemos de las mediciones precisas, lo único que podemos asegurar es que, debido a la alta eficiencia de los filtros a día de hoy, dicho límite se cumplirá con facilidad.

Algo de lo que no se ha hablado con anterioridad y también resulta de vital importancia, son los metales pesados contenidos en los RSU. La problemática con ellos, reside en que la mayor cantidad se emite en el flujo gaseoso, por lo que habrá que realizar las mediciones precisas para respetar la legislación. En el caso de los residuos de la comunidad de Madrid, los contenidos en metales pesados son los siguientes:

<b>Metal</b>	<b>Contenido (mg/kg ms)</b>
Plomo	118
Cadmio	4
Cobre	207
Zinc	556
Mercurio	3
Talio	0,05
Manganeso	67
Vanadio	7
Níquel	34
Cobalto	4
Arsénico	3
Cromo	78

*Tabla 45. Contenido en metales pesados de los RSU de la Comunidad de Madrid*

Igual que en casos anteriores, los límites vienen establecidos por el RD 815/2013 en mg/Nm<sup>3</sup>:

Metal	Limite (mg/Nm <sup>3</sup> )
Cadmio	Total 0,05
Talio	
Cobre	Total 0,5
Plomo	
Cromo	
Manganeso	
Vanadio	
Níquel	
Cobalto	
Arsénico	
Mercurio	0,05

Tabla 46. Límite de emisiones de metales pesados según el RD 815/2013

En este caso, también sería necesario el disponer de mediciones de las que no disponemos para la realización de los cálculos, pero igual que en el caso anterior, podemos garantizar que, tras el paso por el reactor, donde se dará el proceso de adsorción empleando carbón activo, y los filtros de mangas, gracias a su alta eficiencia, la instalación se encontrará dentro del marco legislativo en lo que a emisiones se refiere.

#### 3.5.4. CÁLCULO DE LA CHIMENEA

Se comenzará calculando el diámetro de chimenea necesario, empleando la ecuación de continuidad:

$$\dot{m} \left( \frac{kg}{s} \right) = A(m^2) \times \rho \left( \frac{kg}{m^3} \right) \times c \left( \frac{m}{s} \right)$$

Expresando esta fórmula en flujo volumétrico:

$$\dot{V} \left( \frac{m^3}{s} \right) = A(m^2) \times c \left( \frac{m}{s} \right)$$

Como se ha calculado con anterioridad, el flujo volumétrico de los gases de combustión es de 28,56 m<sup>3</sup>/s y las tablas, tras seleccionar como tipo de tiro inducido, nos indican para nuestro caso una velocidad de 15 m/s, quedando el área por tanto como:

$$A = \frac{28,56 \frac{m^3}{s}}{15 \frac{m}{s}} = 1,9 m^2$$

$$A = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{1,9}{\pi}} = 0,6 m$$

Para el cálculo de la altura de la chimenea, seguiremos la normativa estipulada en el RD 100/2011, el cual cataloga nuestra chimenea dentro del grupo B y sugiere para su cálculo las siguientes ecuaciones:

$$H = \sqrt{\frac{A Q_M F \times \sqrt[3]{\frac{n}{Q_G \Delta T}}}{C_M}}$$

$$A = 70 I_0$$

$$I_0 = \frac{\Delta'T + 2\delta T}{Tm} + \frac{80}{h}$$

En donde:

- A: Parámetro que refleja las condiciones climatológicas del lugar.
- Q<sub>M</sub>: Caudal máximo de sustancias contaminantes, expresado en kg/h.
- F: Coeficiente sin dimensiones relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas en la atmósfera. Para contaminantes gaseosos, cuya velocidad de sedimentación es prácticamente nula, se tomará F= 1.

- n: Número de chimeneas.
- $Q_G$ : Caudal de gases emitidos en las condiciones reales de emisión, expresado en  $m^3/hora$ .
- $\Delta T$  Diferencia entre la temperatura de los gases a la salida de la chimenea y la temperatura media anual del aire ambiente en el lugar considerado, expresado en  $^{\circ}C$ .
- $C_M$ : Incremento máximo de concentración de contaminantes, a nivel del suelo, expresada en  $mg/Nm^3$  como media de veinticuatro horas.
- $\Delta'T$ : Máxima oscilación de temperatura del lugar, es decir, es la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima, medida en  $^{\circ}C$ .
- $\delta T$ : Diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la temperatura media del mes más frío, medida en  $^{\circ}C$ .
- $T_m$ : Temperatura media anual, medida en  $^{\circ}C$ .
- h: Humedad relativa media de los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

Dando valores a estos parámetros, obtenemos:

$$I_0 = \frac{29,4 + 2 \times 19}{13,7} + \frac{80}{40} = 6,92$$

$$A = 70 \times 6,92 = 484,38$$

$$H = \sqrt{\frac{484,38 \times 3,98 \times 1 \times \sqrt[3]{\frac{1}{102.816 \times 120}}}{0,2}} = 20,42 \text{ m}$$

Optaremos, en primera instancia, por una chimenea de 30m, una altura muy utilizada en la industria. En caso de ser necesario, se realizará un estudio más detallado, provisto de mediciones, mediante el cual se asegurará que el nivel de inmisión (emisión de contaminantes a una altura de entre 0 y 2 metros desde el nivel del suelo) no supere los límites marcados por la normativa, aumentando la altura de la chimenea si fuese necesario.

Los cálculos llevados a cabo para este análisis medioambiental, son aproximados y sirven para hacerse una idea de las necesidades del equipamiento preciso para el



lavado de gases de la instalación. Para unos resultados más detallados, habría que hacer una ingeniería de mayor detalle, mediante un análisis experimental de las emisiones, al incinerar cierta cantidad de los RSU que se tratarán en la planta.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

Vemos en el apartado anterior que la realización de la planta de incineración es totalmente viable energéticamente, sin entrar aún en aspectos económicos. Advertimos como la producción de energía de la turbina supera en gran medida a los consumos de las bombas, y tras descontar el autoconsumo, la potencia eléctrica obtenida que podemos vender es superior a 13MW.

Por otra parte, el combustible empleado no nos supone un gasto adicional, debido a que al mismo tiempo que generamos electricidad, contribuimos a la eliminación de los RSU.

Habrà que prestar especial atención a la zona de tratamiento de gases, realizando un gran desembolso para la adquisición de los equipos más adecuados para la planta, que aseguren cumplir en todo momento con la normativa vigente.



# ASPECTOS ECONÓMICOS

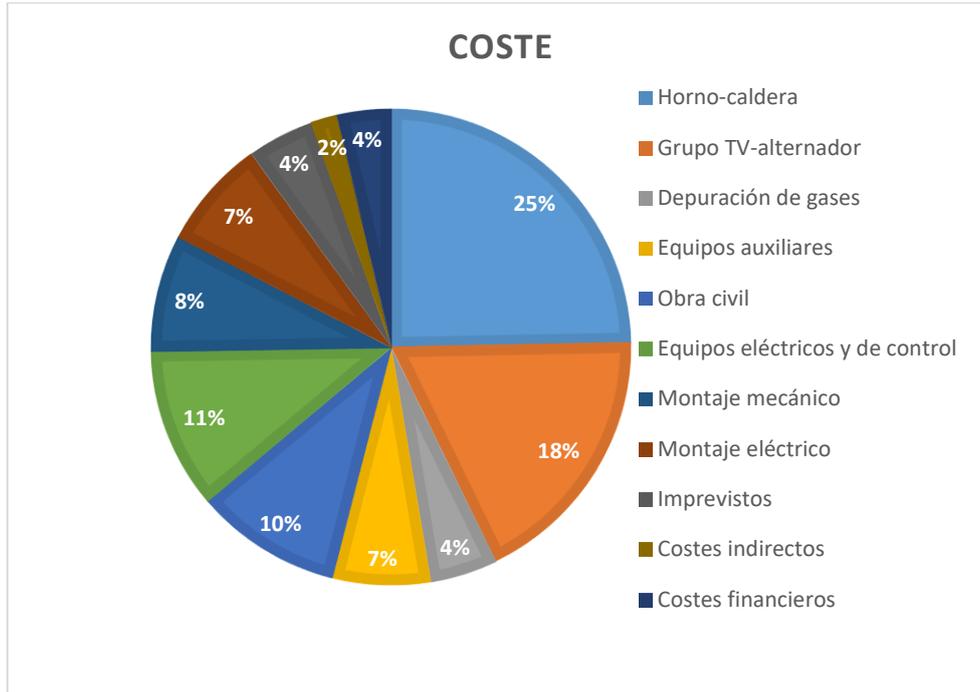
## 1. PRESUPUESTO

Para la realización del presupuesto se ha tenido en cuenta todos los costes necesarios para la puesta en marcha de la planta de incineración de RSU, de forma aproximada. Esto resulta útil e interesante para hacerse una idea inicial del coste.

Concepto	Coste (€)	Peso sobre total (%)
Horno-caldera	12.475.000	27,4
Grupo TV-alternador	9.150.000	20,1
Depuración de gases	2.300.000	5,1
Equipos auxiliares	3.325.000	7,3
Obra civil	5.000.000	11
Equipos eléctricos y de control	5.500.000	12,1
Montaje mecánico	4.000.000	8,8
Montaje eléctrico	3.750.000	8,2
<b>Subtotal</b>	<b>45.500.000</b>	<b>100</b>
Imprevistos	2.275.000	5
Costes indirectos	910.000	2
Costes financieros	1.820.000	4
<b>TOTAL</b>	<b>50.505.000</b>	

*Tabla 47. Presupuesto del proyecto*

Como podemos ver, hemos agrupado el presupuesto en distintas partidas. Debe observarse que se han incluido una serie de costes adicionales que incluyen los costes indirectos (seguridad, limpieza, etc.), los costes financieros y una partida para tratar de evitar sobrecostes por imprevistos, que suelen ser habituales a la hora de llevar a cabo ejecuciones de proyectos.



Gráfica 13. Porcentaje de peso de cada concepto

Vemos como el conjunto horno caldera y el turboalternador suponen la mayor parte del coste total, siendo la suma de ellos más del 40% de la inversión. También observamos, como se han modificado algo los porcentajes, debido a que antes habíamos dejado el subtotal como el 100%.

Los equipos de menor coste, como las bombas, el desgasificador, el aerocondensador, equipos de medida, etc., se incluyen en los grupos “equipos auxiliares”. La categoría montaje lleva incluido la mano de obra necesaria para la puesta en marcha de la planta.

La realización de este presupuesto nos permitirá saber si existe suficiente capital para acometer el proyecto. Se calculará el fondo de maniobra del balance, se comparará con el presupuesto y de ahí se deducirá si habrá problemas financieros para la realización de la planta.

## 2. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

La rentabilidad de un proyecto es una condición previa exigible para que los posibles inversores puedan comparar las diferentes alternativas de inversión posible, dado que para que un proyecto sea interesante económicamente su rentabilidad debe de ser superior a la que se podría obtener en una inversión sin riesgo.

Para analizar la viabilidad económica de la planta de incineración de RSU, se plantearán el periodo de recuperación (PAYBACK), el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR). Para ello se plantearán la inversión, los beneficios y los gastos de la planta.

### Inversión

En el apartado del presupuesto, se ha visto que la inversión a realizar es de 50.505.000€.

$$I = 50.505.000€$$

### Beneficios

Los ingresos de la planta vendrán dados por la venta de energía eléctrica a la red y por el canon cobrado a los ayuntamientos para tratar sus residuos.

- Ingresos por venta de energía eléctrica.

La potencia de la planta es de 13,4 MW una vez descontados los consumos de las bombas y el autoconsumo para la planta, y habiendo fijado el tiempo de producción de la misma en 320 días al año, obtenemos la energía generada:

$$13,4 \text{ MW} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 320 \frac{\text{d}}{\text{año}} = 102.912 \frac{\text{MWh}}{\text{año}}$$

El precio de venta, anteriormente venía definido por el RD 661/2007. En él, se primaba la energía obtenida de cierto tipo de instalaciones, en las cuales se incluía las plantas de valorización de RSU. Dichas primas desaparecieron, y en la actualidad, la planta deberá de vender la electricidad al precio que marque el Pool (mercado de electricidad).

En el momento de la realización del presente proyecto el pool fija el precio de venta en 5,00c€/kWh, es decir, 50 €/MWh.

Con estos datos, procedemos a calcular los ingresos debidos a la venta de electricidad:

$$Ingresos_{elec} = 102.912 \frac{MWh}{año} \times 50 \frac{€}{MWh} = 5.145.600 \frac{€}{año}$$

- Ingresos por canon.

Se cobrará a los ayuntamientos de los municipios de los que se traten los residuos 30€/t. Teniendo en cuenta que la planta incinera 24,5 t/h y que funciona 24h al día durante 320 días al año, podemos obtener los ingresos debidos al canon:

$$Ingresos_{canon} = 24,5 \frac{t}{h} \times 24 \frac{h}{d} \times 320 \frac{d}{año} \times 30 \frac{€}{t} = 5.644.800 \frac{€}{año}$$

Por tanto, los ingresos anuales totales será la suma de ambos:

$$Ingresos = 5.145.600 \frac{€}{año} + 5.644.800 \frac{€}{año} = 10.790.400 \frac{€}{año}$$

## **Gastos**

Si bien los beneficios son elevados, los costes también lo serán. Podemos diferenciar los costes de la siguiente manera:

- Costes de personal.
- Costes de mantenimiento.
- Costes de operación (agua, cal, aditivos, combustible para el arranque y periodos de baja carga del horno...).
- Costes de gestión de cenizas y otros costes medioambientales.

Los gastos totales de la planta se han estimado en:

$$Costes = 4.120.000€$$

Donde claramente el mayor coste es el debido al personal, dado que, para la gestión de una planta de estas características, se necesitará de un gran número de personas, alguna de ellas con altas cualificaciones.

Una vez disponemos de estos datos, procedemos al cálculo del análisis de rentabilidad. En primer lugar, calcularemos el PAYBACK. Para el cálculo, según los analistas, se debe estimar la vida útil de la planta en 25 años.

AÑO	GASTOS	BENEFICIOS	DIFERENCIA	ACUMULADO
1	-54625000	10790400	-43834600	-43834600
2	-4120000	10790400	6670400	-37164200
3	-4120000	10790400	6670400	-30493800
4	-4120000	10790400	6670400	-23823400
5	-4120000	10790400	6670400	-17153000
6	-4120000	10790400	6670400	-10482600
7	-4120000	10790400	6670400	-3812200
8	-4120000	10790400	6670400	2858200
9	-4120000	10790400	6670400	9528600
10	-4120000	10790400	6670400	16199000
11	-4120000	10790400	6670400	22869400
12	-4120000	10790400	6670400	29539800
13	-4120000	10790400	6670400	36210200
14	-4120000	10790400	6670400	42880600
15	-4120000	10790400	6670400	49551000
16	-4120000	10790400	6670400	56221400
17	-4120000	10790400	6670400	62891800
18	-4120000	10790400	6670400	69562200
19	-4120000	10790400	6670400	76232600
20	-4120000	10790400	6670400	82903000
21	-4120000	10790400	6670400	89573400
22	-4120000	10790400	6670400	96243800
23	-4120000	10790400	6670400	102914200
24	-4120000	10790400	6670400	109584600
25	-4120000	10790400	6670400	116255000

*Tabla 48. Flujo de caja del proyecto*

Vemos como el periodo de retorno de la inversión se sitúa en 8 años, pero el periodo de recuperación prima la liquidez frente a la rentabilidad. Por tanto, procedemos al cálculo del VAN y del TIR.

Para el cálculo del VAN emplearemos la siguiente fórmula:

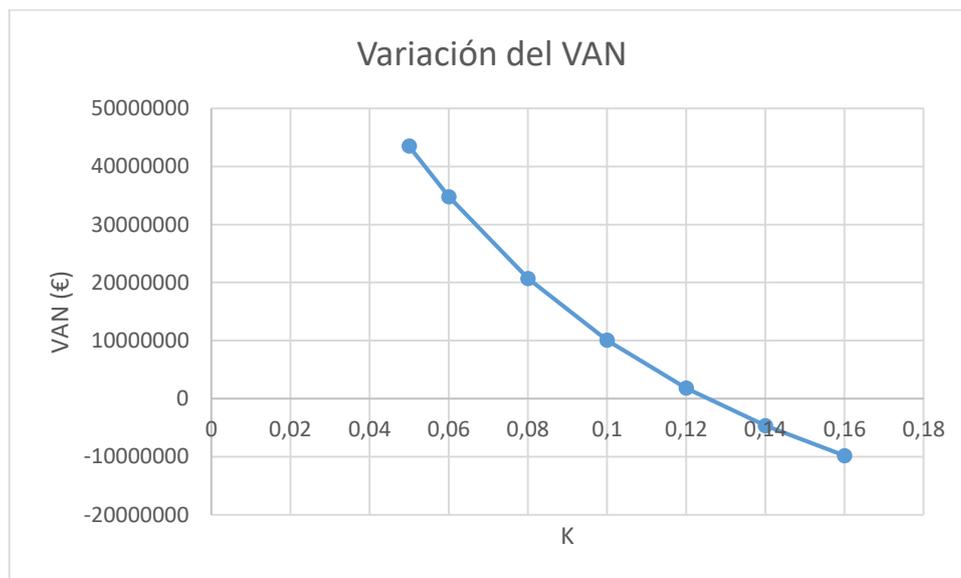
$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1 + K)^t}$$

En donde,

- I: inversión inicial del proyecto.
- $Q_t$ : Flujo neto de caja (cobros-gastos).
- K: tasa de descuento.
- n: duración del proyecto.

Suponiendo una tasa de descuento del 5%, el VAN que obtenemos es de 43.507.247,8 €.

Podemos gráficar el VAN en función de diferentes tasas de descuento.



Gráfica 14. Variación del VAN

El TIR es la tasa de descuento para que el VAN sea 0. Por tanto:

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1 + r)^t} = 0$$

Despejando de esta ecuación, y tal y como se ve en el gráfico, obtenemos un valor del TIR del 12,5%.

A la vista de este análisis, la realización de la planta se considera una inversión muy atractiva debido a su alto VAN, TIR y dado que el periodo de recuperación de la inversión no es muy elevado.

### **Análisis de sensibilidad**

Existen diferentes variables que introducen cierto grado de incertidumbre en el análisis económico, que durante el estudio hemos considerado fijas. Pero dada la importancia que tienen estas variables, vamos a comprobar el impacto que su variación tiene en el estudio económico.

Se ha considerado el estudio de las siguientes variables:

- Variación en la cantidad de RSU

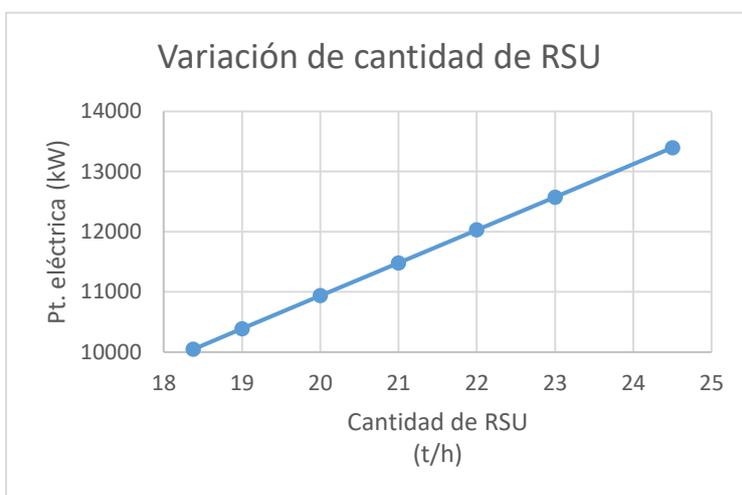
Como se ha visto en capítulos anteriores, la planta puede funcionar siempre y cuando la carga de residuos se encuentre entre un 60% y 110% de la carga de diseño. Realmente, las situaciones extremas no deberían darse durante largos periodos de tiempo, dado que se podría dañar el equipo, sobre todo si estamos por encima de la carga de diseño, por lo que en los cálculos aquí realizados tendremos en cuenta una variación de la carga de entre un 75% y un 100% de la carga de diseño, es decir entre 18,375 t/h y 24,5 t/h, valores entre los cuales la planta podría funcionar sin problema. No se tendrá en cuenta la reducción del rendimiento dado por funcionar a menor carga.

Para adaptarse a la variación de la cantidad de RSU, la instalación del ciclo Rankine de la planta dispone de un depósito, el cual se regula automáticamente mediante una válvula motorizada, mediante la que se varia el caudal del ciclo. La variación de la cantidad de RSU puede llegar a ser muy perjudicial, dado que esta afectará tanto a los ingresos por canon, como a los ingresos debidos a la venta de energía eléctrica. Para la obtención de los resultados, se han realizado todos los cálculos del apartado 3.4.2. de la Metodología, variando la cantidad de RSU, obteniendo la siguiente tabla.

t/h RSU	pot horno (MW)	mv (kg/s)	Mextrac1 (kg/s)	mextrac2 (kg/s)	mextract3 (kg/s)	Pot. turbina (kW)	Pot. elec. (kW)*
18,375	42,292	15,20	2,26	0,96	11,99	12606	10046
19	43,731	15,72	2,34	0,99	12,39	13035	10387
20	46,032	16,55	2,46	1,04	13,05	13724	10936
21	48,334	17,37	2,58	1,09	13,70	14408	11481
22	50,635	18,20	2,70	1,14	14,36	15096	12030
23	52,937	19,03	2,83	1,20	15,00	15778	12573
24,5	56,390	20,27	3,01	1,27	15,99	16812	13397

\*NOTA: En la columna Pot. elec. ya está restado el consumo de las bombas y el autoconsumo

Tabla 49. Variación de la potencia de la planta en función de la cantidad de RSU



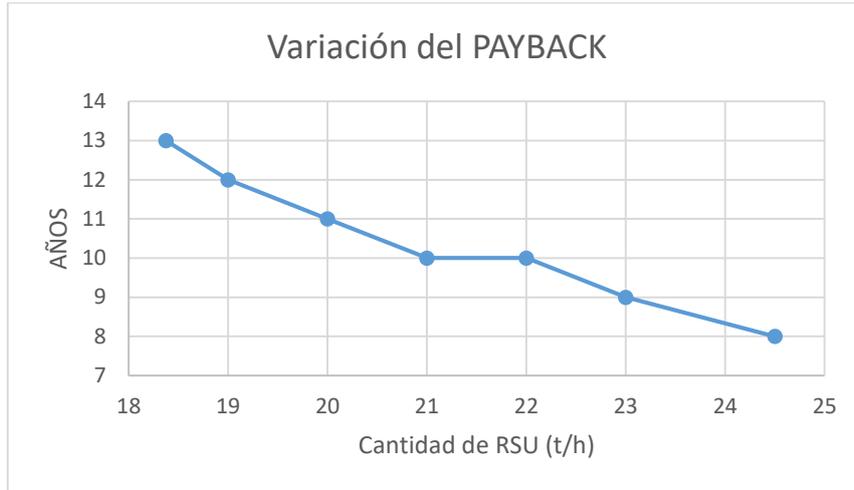
Gráfica 15. Variación de la potencia de la planta en función de la cantidad de RSU

Una vez obtenidas las nuevas potencias eléctricas generadas por la planta, podemos calcular los nuevos ingresos obtenidos por su venta y por el canon y obtener el nuevo PAYBACK, VAN y TIR.

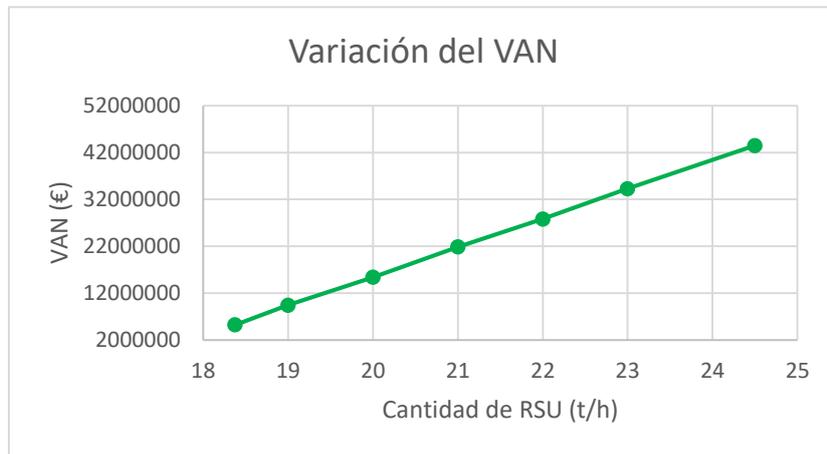
t/h RSU	Pot. elec. (MW)	PAYBACK (años)	VAN (€)	TIR (%)
18.375	10.0	13	5216819	6.0%
19	10.4	12	9411177	6.8%
20	10.9	11	15364459	7.8%
21	11.5	10	21858949	9.0%
22	12.0	10	27812231	10.0%
23	12.6	9	34306721	11.0%
24.5	13.4	8	43507248	12.5%

Tabla 50. Variación del PAYBACK, VAN y TIR en función de la cantidad de RSU

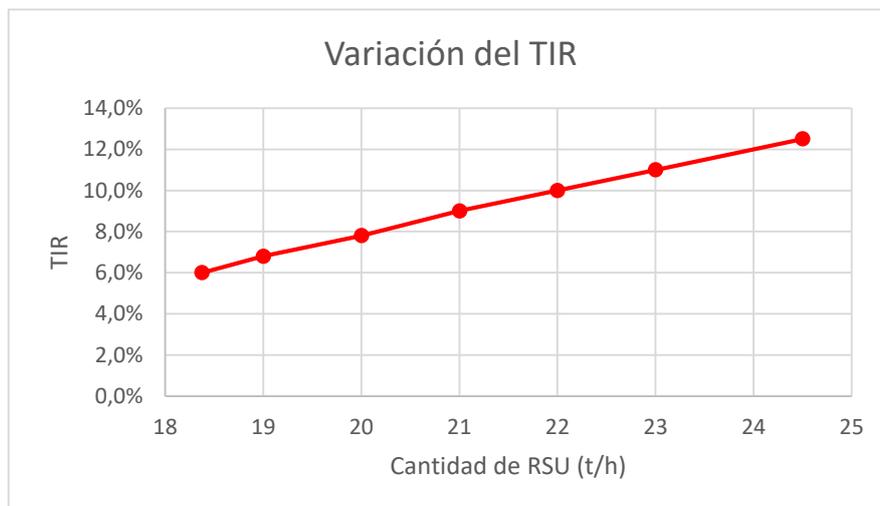
A continuación, se mostrarán los anteriores resultados gráficamente.



Gráfica 16. Variación del PAYBACK en función de la cantidad de RSU



Gráfica 17. Variación del VAN en función de la cantidad de RSU



Gráfica 18. Variación del TIR en función de la cantidad de RSU

Observamos que sí afecta a los distintos marcadores de rentabilidad, pero el proyecto aún sigue siendo económicamente atractivo, y no debemos de olvidar que se trata de situaciones que no se darán durante mucho tiempo en la planta, sino situaciones puntuales, en las que nos alejaremos de la carga de diseño.

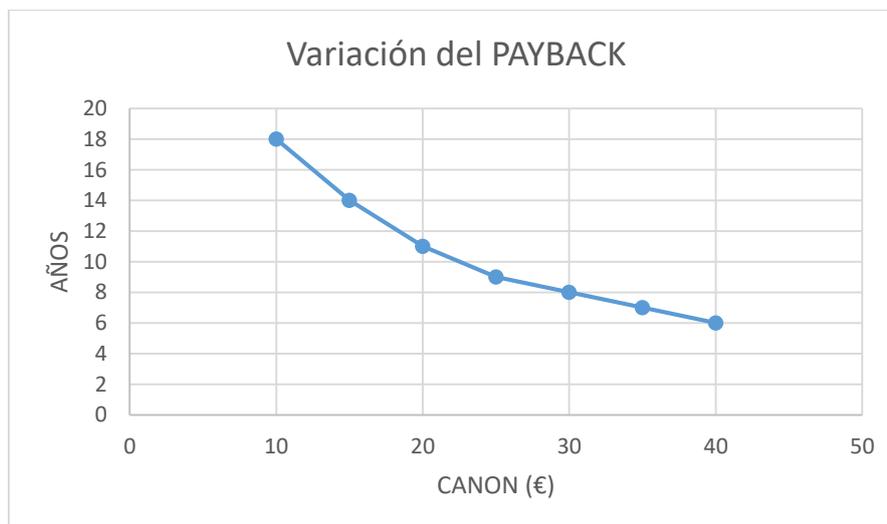
- Variación del canon.

Durante el estudio se ha supuesto el cobro de un canon de 30€ a los ayuntamientos. A continuación, se muestra cómo afectaría una variación del canon al PAYBACK, VAN y TIR.

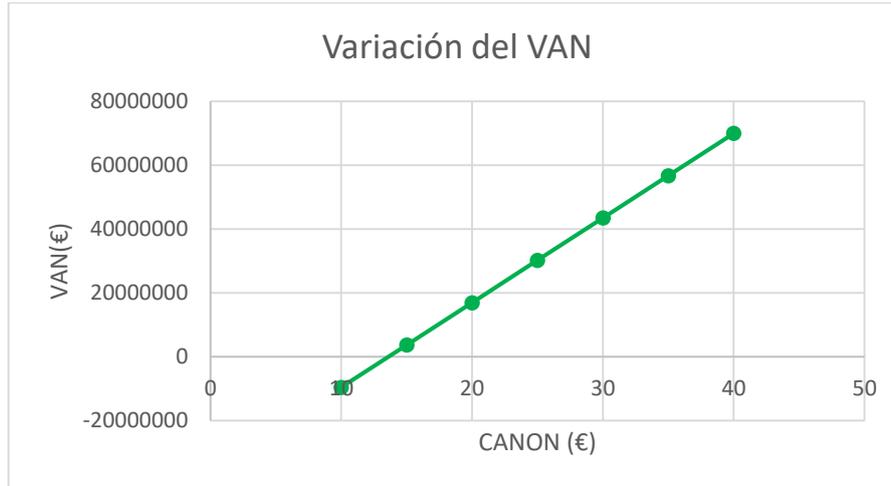
CANON	PAYBACK	VAN	TIR
10	18	-9531084,36	3,1%
15	14	3728498,69	5,7%
20	11	16988081,7	8,1%
25	9	30247664,8	10,4%
30	8	43507247,8	12,5%
35	7	56766830,9	14,6%
40	6	70026413,9	16,6%

*Tabla 51. Variación del PAYBACK, VAN y TIR en función del canon*

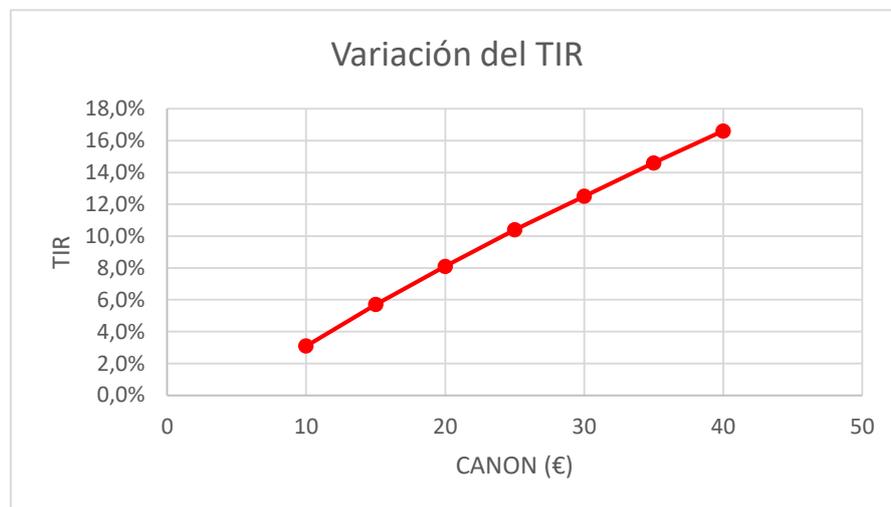
Para mostrarlo de una forma más visual se graficarán los resultados.



*Gráfica 19. Variación del PAYBACK en función del canon*



*Gráfica 20. Variación del VAN en función del canon*



*Gráfica 21. Variación del TIR en función del canon*

Vemos como no todos los canones serían rentables, descartando por completo el cobrar un canon de 10€ ya que el VAN pasa a ser negativo. En caso de cobrar otros canones, como pueden ser 15€ o 20€, debido a que, si la tasa de descuento es superior al valor del TIR, el proyecto no será realizable.

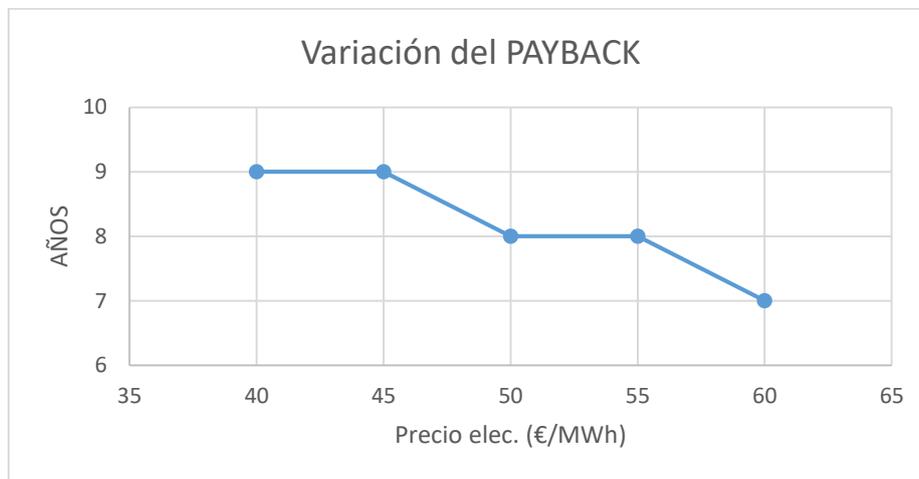
- Variación del precio de la potencia entregada a la red.

El precio de venta de la electricidad dependerá del precio marcado por el pool, por lo que se trata de una variable a tener en cuenta. A continuación, veremos cómo afectan las variaciones del pool a nuestro proyecto.

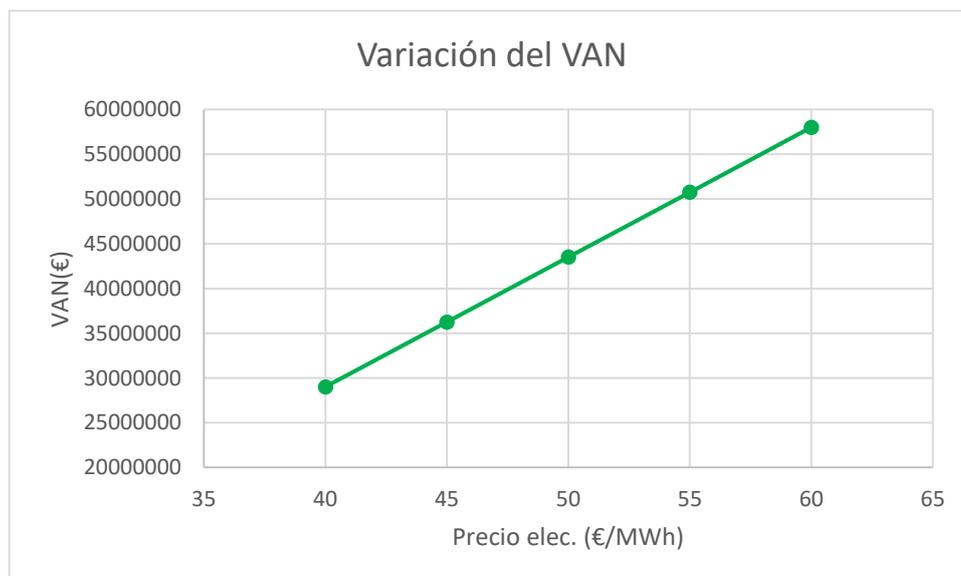
Precio elec. (€/MWh)	PAYBACK	VAN	TIR
40	9	29002888	10,2%
45	9	36255068	11,4%
50	8	43507248	12,5%
55	8	50759428	13,6%
60	7	58011608	14,7%

Tabla 52. Variación del PAYBACK, VAN y TIR en función del precio de venta de la electricidad

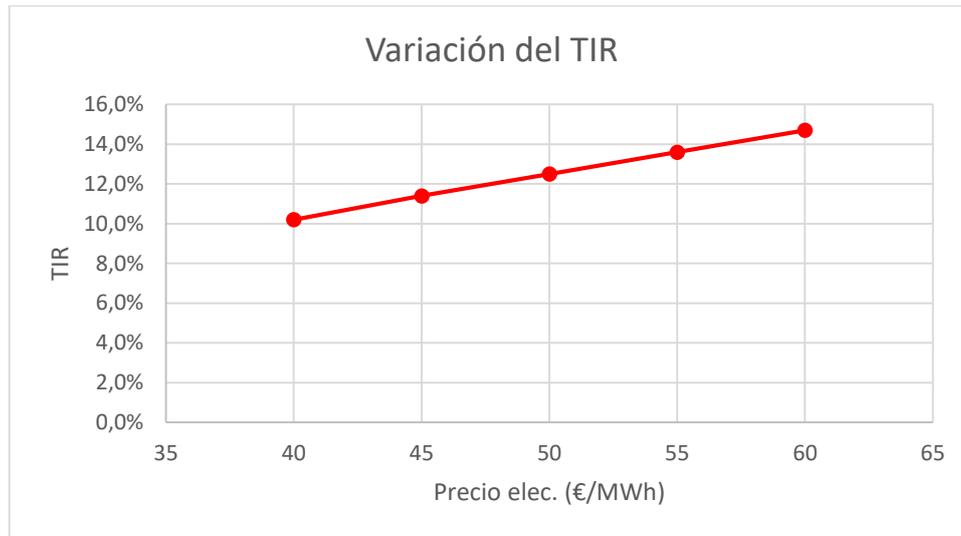
Al igual que en los casos anteriores, a continuación, se mostrarán estos resultados de manera gráfica.



Gráfica 22. Variación del PAYBACK en función del precio de venta de la electricidad



Gráfica 23. Variación del VAN en función del precio de venta de la electricidad



*Gráfica 24. Variación del TIR en función del precio de venta de la electricidad*

La variación del precio, dentro de los rangos que hemos analizado, no supondría un peligro para la rentabilidad, ya que sí variaría, pero no en gran medida.

A la vista de los resultados anteriores, reparamos en cómo la variación del canon cobrado a los ayuntamientos para tratar sus basuras, es el que mayor cambio provoca en la rentabilidad de la planta, por lo que será de vital importancia llegar a acuerdos con los ayuntamientos de la zona, antes de la ejecución de la planta para hacernos a la idea de la rentabilidad del proyecto.



# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Ante una economía industrial en pleno auge, con una creciente generación de residuos, nuestro desafío es tratar, eliminar y valorizar los residuos respetando el medio ambiente, velando por la salud, la seguridad y la minimización de los riesgos industriales.

Dado que existe un problema de gestión sostenible de los RSU, siendo, por otro lado, los residuos urbanos un recurso valioso que no se puede desaprovechar, se ha considerado que de entre los tratamientos de valorización energética de RSU, la “incineración con recuperación energética” es el proceso más desarrollado. Sin duda, es una tecnología madura, fiable y adecuada para tratar residuos heterogéneos.

Indudablemente, el tratamiento de los residuos sólidos urbanos es un proceso que requiere una alta inversión, sin embargo, pese a esto, reporta beneficios al ciudadano a medio y largo plazo, tanto en el plano medioambiental como en el plano económico como ya se ha visto en análisis de viabilidad, por lo que debe considerarse rentable.

Las sucesivas reglamentaciones aplicadas a los tratamientos térmicos de los RSU han obligado a desarrollos tecnológicos muy exigentes, tanto en el cuidado del medio ambiente y la salud de las personas, como en la mejora de la eficiencia energética conseguida, que se han demostrado de forma efectiva a través de las experiencias industriales existentes.

Las emisiones a la atmósfera son mínimas y de control continuo, por lo que la información al público de estas características favorables debería ir reduciendo el inicial rechazo social y permitir decisiones políticas que permitan la instalación de este tipo de plantas.

La gestión sostenible, según la normativa y experiencia de los países más avanzados, pasa por alcanzar porcentajes máximos de reciclaje de 45-60%, por valorizar energéticamente entre el 35-50% y por depositar en vertedero 1-5%.

Obviamente, todas las tecnologías asociadas a los procesos industriales presentan ventajas e inconvenientes (como se ha evidenciado a lo largo de este trabajo), por tanto se debe asumir el compromiso de favorecer un continuo desarrollo tecnológico,

con una clara disposición innovadora, para lo que es indispensable la consolidación de los programas de I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la valoración de RSU para, de esta manera, conseguir minimizar progresivamente los aspectos débiles que ésta aún presenta. Precisamente es uno de los objetivos generales del PNIR la *“Consolidación de los programas de I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, incluyendo análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación”*.

Constituye un auténtico reto para las nuevas generaciones de ingenieros (y otros técnicos) la investigación de todos los procesos de las distintas aéreas funcionales de las plantas de incineración de RSU, para lograr su progresivo perfeccionamiento, tratando de minimizar los inconvenientes que aún presentan.

Para finalizar, destacar que durante el proyecto se han definido las líneas básicas del mismo, llevando a cabo la ingeniería de concepto, de manera que suministre al promotor la información necesaria para decidir llevar adelante el proyecto o cancelarlo. Se han realizado un presupuesto y planificación básicos que servirán de referencia para etapas posteriores. En caso de ser aprobado, se llevaría a cabo la ingeniería básica y la ingeniería de detalle, las cuales partirían de los cálculos aquí realizados hasta llegar a un diseño más detallado de la instalación, necesario para proceder a la construcción.

De manera general se puede concluir que el resultado del proyecto es satisfactorio en todos los aspectos.



# BIBLIOGRAFÍA

## BIBLIOGRAFÍA

### Páginas web

[www.actualidadjuridicaambiental.com](http://www.actualidadjuridicaambiental.com)

[www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-10556](http://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-10556)

[www.comunidad.madrid](http://www.comunidad.madrid)

[www.condorchem.com](http://www.condorchem.com)

[www.cerney.es](http://www.cerney.es)

[www.currenta.com](http://www.currenta.com)

[www.degremont.es](http://www.degremont.es)

[www.ehu.eus](http://www.ehu.eus)

[www.eve.eus/CMSPages](http://www.eve.eus/CMSPages)

[www.emo-france.com](http://www.emo-france.com)

[www.euskadi.eus](http://www.euskadi.eus)

<https://globalelectricity.wordpress.com>

[www.ingenieroambiental.com](http://www.ingenieroambiental.com)

[www.javiersevillano.es/DeficitTarifa.htm#primas](http://www.javiersevillano.es/DeficitTarifa.htm#primas)

[www.lenntech.es](http://www.lenntech.es)

[www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es)

[www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

[www.omie.es/inicio](http://www.omie.es/inicio)

[www.reciclame.info](http://www.reciclame.info)

[www.renovetec.com](http://www.renovetec.com)

[www.spiraxsarco.com](http://www.spiraxsarco.com)

[www.uned.es/biblioteca/rsu](http://www.uned.es/biblioteca/rsu)

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) [www](#).

## Documentación

“Aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales” Martínez Centeno, L. M. (2006)», Capítulo 7 de la Guía sobre Gestión

“Incineración de residuos sólidos urbanos” Martínez Centeno, L. M. (2002) Fundación Biodiversidad. Madrid, España.

“Fundamentos de termodinámica técnica”, Howard N. Shapiro, Michael J. Moran

“Manuales de energías renovables: Incineración de residuos sólidos urbanos”. Biblioteca CINCO DÍAS. IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).

“Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos”, Documento BREF, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, (2011).

“Tratamiento y valorización energética de residuos”, Elías Castells, Xavier (2005) Ediciones Díaz de Santos, 5 mayo 2012 - 91 páginas.

“Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras”, F.J. Colomer Mendoza, M. Carlos Alberola, L. Herrera Prats, A. Gallardo Izquierdo, M.D. Bovea

## Otros

Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR).

Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020.

Tratamiento térmico de gases: Tratamiento y valorización energética de residuos.



# ANEXOS

## ANEXO I: Normativa aplicable

A continuación, se recogen las diferentes normativas aplicables al proyecto:

### Normativa de la Unión Europea

**Directiva 1999/31/CE** del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos.

**Directiva 2000/76/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos.

**Directiva 2000/532/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2004 por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

**Directiva 2008/98/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

**Directiva 2009/28/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.

**Directiva 2018/850** del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.

**Directiva 2018/851**, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

**Reglamento (CE) nº 166/2006** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de enero de 2006, relativo al establecimiento de un registro europeo de emisiones y transferencias de contaminantes y por el que se modifican las Directivas 91/689/CEE y 96/61/CE del Consejo.

**Reglamento (CE) nº 1418/2007** de la Comisión, de 29 de noviembre de 2007, relativo a la exportación, con fines de valorización, de determinados residuos.

### Normativa Española

**Ley 10/1998**, de 21 de abril, sobre residuos.

**Ley 16/2002**, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación.

**Ley 9/2006**, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

**Ley 26/2007**, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.

**Ley 34/2007**, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

**Ley 2/2011**, de 4 de marzo, de Economía Sostenible.

**Ley 22/2011**, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

**Ley 11/2012**, de 19 de diciembre, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.

**Ley 5/2013**, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

**Real Decreto 1481/2001**, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

**Real Decreto 653/2003**, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.

**Real Decreto Legislativo 1/2008**, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos.

**Real Decreto 2090/2008**, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.

**Real Decreto 100/2011**, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación.

**Real Decreto 102/2011**, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

**Real Decreto-ley 17/2012**, de 4 de mayo, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.

**Real Decreto 815/2013**, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

**Real Decreto 180/2015**, de 13 de marzo, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado.

**Real Decreto 773/2017**, de 28 de julio, por el que se modifican diversos reales decretos en materia de productos y emisiones industriales.

**Real Decreto 1042/2017**, de 22 de diciembre, sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas y por el que se actualiza el anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

**Resolución de 20 de diciembre de 2013**, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 13 de diciembre de 2013, por el que se aprueba el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020.

**Resolución de 16 de noviembre de 2015**, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.

**Orden MAM/304/2002**, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

**Orden AAA/699/2016**, de 9 de mayo, por la que se modifica la operación R1 del anexo II de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

### **Normativa Comunidad Autónoma de Madrid**

**Orden 1279/2000**, de 22 de marzo, del consejero de medio ambiente, por la que se desarrolla la regulación de la tasa por eliminación de residuos urbanos o municipales en instalaciones de transferencia o eliminación de la comunidad de Madrid.

**Orden 2505/2005**, de 2 de agosto, de la consejería de medio ambiente y ordenación del territorio, de bases reguladoras y convocatoria de subvenciones a las

corporaciones locales para la construcción y equipamiento de centros de recogida de residuos valorizables y especiales (puntos limpios).

**Orden 1520/2006**, de 3 de mayo, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se modifica la orden 2505/2005, de 2 de agosto, de la consejería de medio ambiente y ordenación del territorio, de bases reguladoras y convocatorias de subvenciones a las corporaciones locales para la construcción y equipamiento de centros de recogida de residuos valorizables y especiales (puntos limpios).

**Orden 3707/2009**, de 29 de septiembre, de convocatoria de subvenciones a las corporaciones locales para la construcción y equipamiento de centros de recogida de residuos valorizables y especiales (puntos limpios).

**Orden 1473/2016**, de 29 de julio, por la que se modifica la orden 2505/2005, de 2 de agosto, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, de bases reguladoras y convocatoria de subvenciones a las corporaciones locales para la construcción y equipamiento de centros de recogida de residuos valorizables y especiales (puntos limpios), modificada por las órdenes 1520/2006, de 3 de mayo; 2737/2006, de 4 de agosto, y 2720/2011, de 14 de julio, y su corrección de errores, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio

**Resolución de 27 de diciembre de 2012**, de la Secretaría General Técnica de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se hace público el acuerdo del consejo de gobierno, de 27 de diciembre de 2012, por el que se adapta el plan regional de residuos urbanos incluido en la estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid (2006-2016).

## ANEXO II: Planos y esquemas

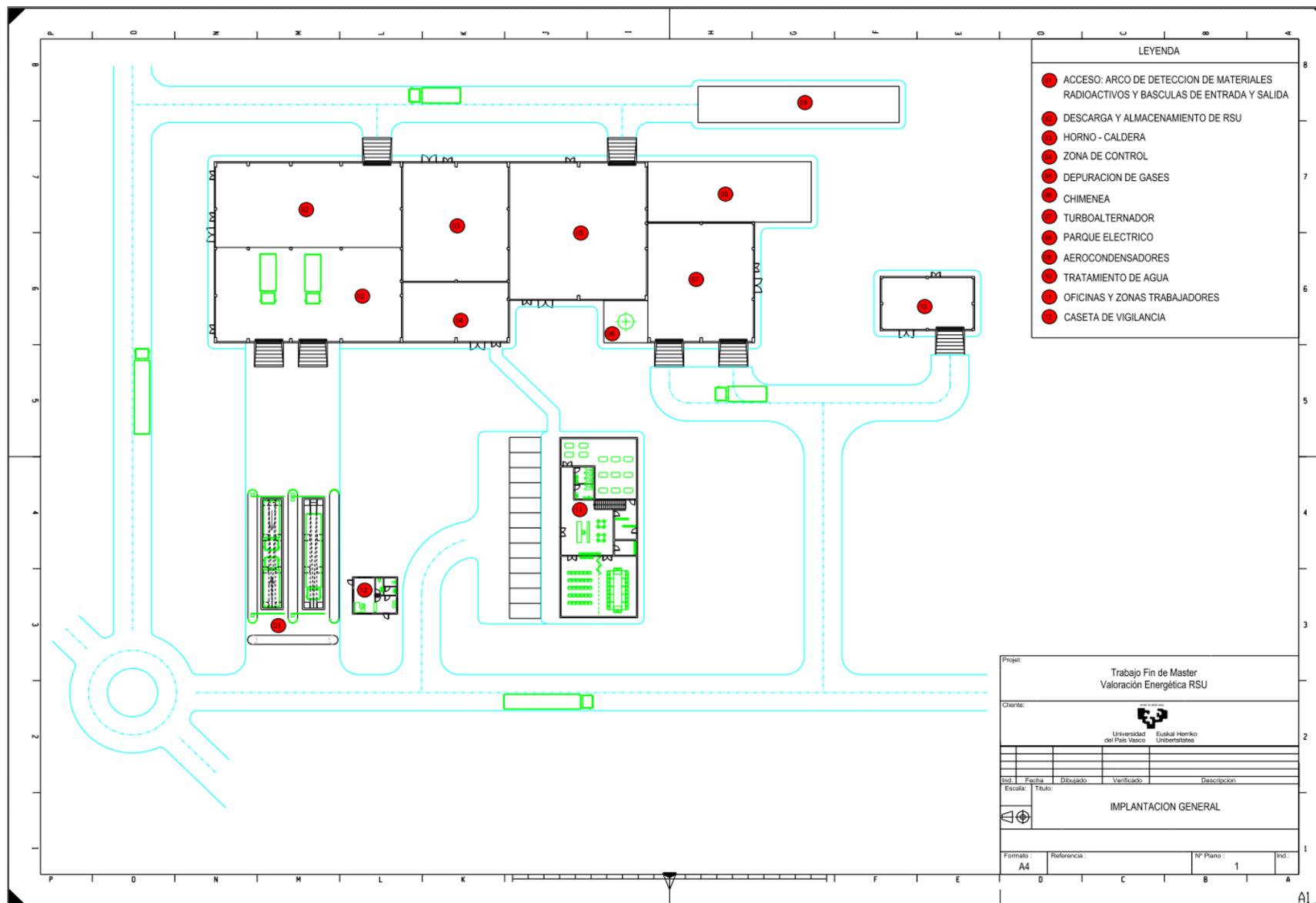


Ilustración 66. Plano de implantación general de la planta (elaboración propia)

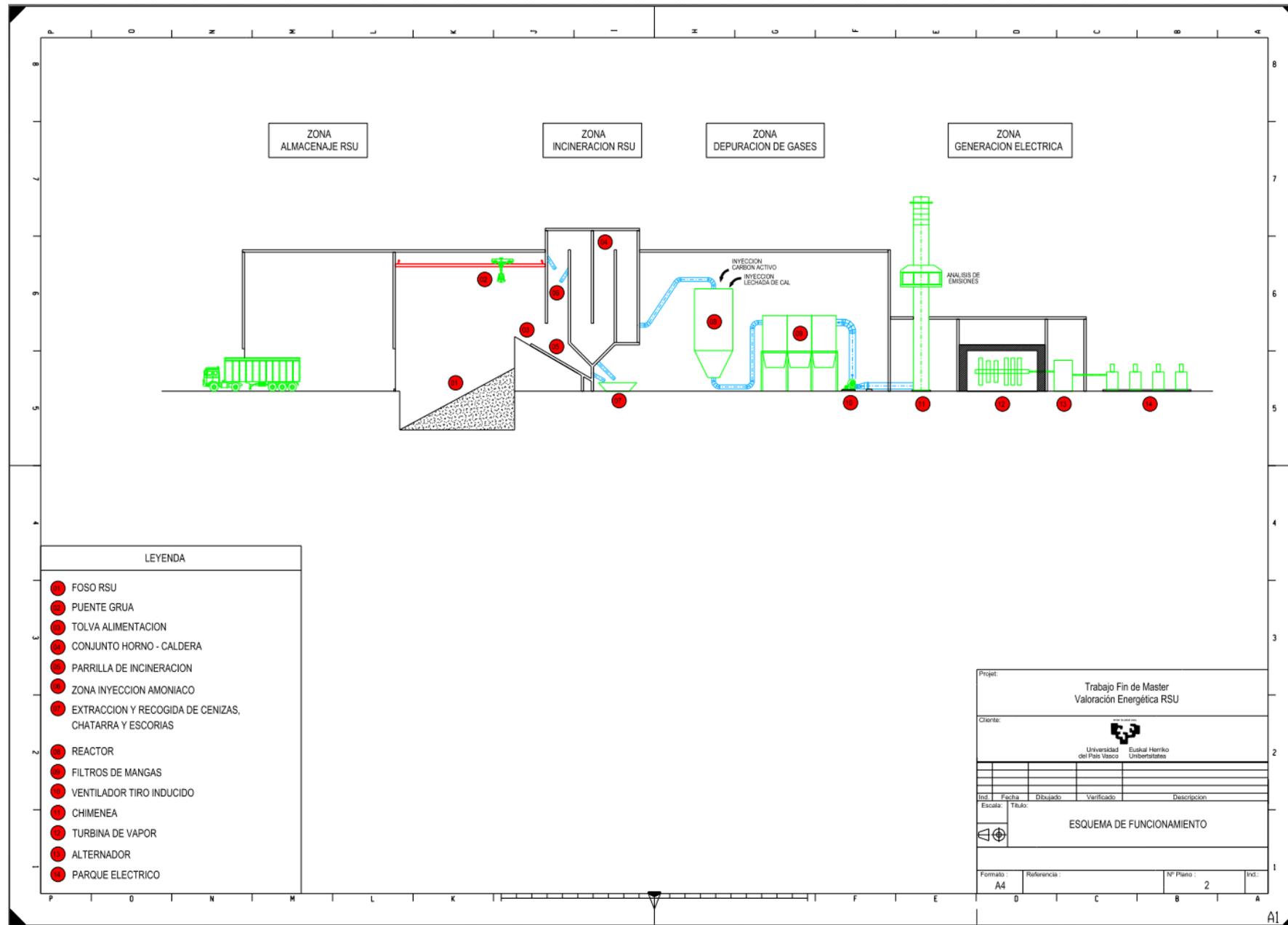


Ilustración 67. Esquema de funcionamiento de la planta (elaboración propia)

## ANEXO III: Código para la resolución mediante el software EES

Cálculo del ciclo Rankine mediante el software EES.

En primer lugar, seleccionaremos las unidades con las que vamos a trabajar en el EES. En nuestro caso, trabajaremos con °C, kJ, kg y bar.

A continuación, se muestra el texto introducido al programa:

"Punto 1"

```

T[1]=400           "°C"
P[1]=40           "bar"
h[1]=Enthalpy(Water;T=T[1];P=P[1]) "kJ/kg"
s[1]=Entropy(Water;T=T[1];P=P[1])  "kJ/kg*K"
  
```

"Punto 2s"

```

P_s[2]= 12        "bar"
s_s[2]= s[1]      "kJ/kg*K"
h_s[2]=Enthalpy(Water;s=s_s[2];P=P_s[2]) "kJ/kg"
  
```

"Punto 2"

```

P[2]=12           "bar"
eta[2]=0,85       "rendimiento primera extracción"
eta[2]=(h[1]-h[2])/(h[1]-h_s[2]) "obtenemos h[2]"
s[2]=Entropy(Water;h=h[2];P=P[2]) "kJ/kg*K"
T[2]=Temperature(Water;h=h[2];P=P[2]) "°C"
  
```

"Punto 3s"

```

P_s[3]= 3         "bar"
s_s[3]= s[1]      "kJ/kg*K"
h_s[3]=Enthalpy(Water;s=s_s[3];P=P_s[3]) "kJ/kg"
  
```

"Punto 3"

```

P[3]=3           "bar"
eta[3]=0,87       "rendimiento segunda extracción"
eta[3]=(h[1]-h[3])/(h[1]-h_s[3]) "obtenemos h[3]"
s[3]=Entropy(Water;h=h[3];P=P[3]) "kJ/kg*K"
T[3]=Temperature(Water;h=h[3];P=P[3]) "°C"
  
```

"Punto 4s"

```

P_s[4]= 0,1       "bar"
s_s[4]= s[1]      "kJ/kg*K"
h_s[4]=Enthalpy(Water;s=s_s[4];P=P_s[4]) "kJ/kg"
  
```

#### "Punto 4"

$P[4]=0,1$  "bar"  
 $\eta[4]=0,9$  "rendimiento turbina"  
 $\eta[4]=(h[1]-h[4])/(h[1]-h_s[4])$  "obtenemos h[4]"  
 $s[4]=\text{Entropy}(\text{Water};h=h[4];P=P[4])$  "kJ/kg\*K"  
 $T[4]=\text{Temperature}(\text{Water};h=h[4];P=P[4])$  "°C"  
 $x[4]=\text{Quality}(\text{Water};T=T[4];h=h[4])$  "-"

#### "Punto 5"

$x[5]=0$  "-"  
 $P[5]=0,1$  "bar"  
 $h[5]=\text{Enthalpy}(\text{Water};x=x[5];P=P[5])$  "kJ/kg"  
 $s[5]=\text{Entropy}(\text{Water};x=x[5];P=P[5])$  "kJ/kg\*K"  
 $T[5]=\text{Temperature}(\text{Water};x=x[5];P=P[5])$  "°C"  
 $v[5]=\text{Volume}(\text{Water};x=x[5];P=P[5])$  "m3/kg"

#### "Punto 6"

$P[6]=3$  "bar"  
 $\eta[6]=0,8$  "rendimiento de la bomba"  
 $W_{\text{bomba1}}=(v[5])*((P[6]-P[5])*1*10^5)/1000$  "Cálculo del trabajo ideal"  
 $\eta[6]=W_{\text{bomba1}}/(h[6]-h[5])$  "obtenemos h[6] kJ/kg"  
 $s[6]=\text{Entropy}(\text{Water};h=h[6];P=P[6])$  "kJ/kg\*K"  
 $T[6]=\text{Temperature}(\text{Water};h=h[6];P=P[6])$  "°C"

#### "Punto 7"

$T[7]=105$  "°C"  
 $P[7]=3$  "bar"  
 $h[7]=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T[7];P=P[7])$  "kJ/kg"  
 $s[7]=\text{Entropy}(\text{Water};T=T[7];P=P[7])$  "kJ/kg\*K"  
 $v[7]=\text{Volume}(\text{Water};T=T[7];P=P[7])$  "m3/kg"

#### "Punto 8"

$P[8]=40$  "bar"  
 $\eta[8]=0,8$  "rendimiento de la bomba"  
 $W_{\text{bomba2}}=(v[7])*((P[8]-P[7])*1*10^5)/1000$  "Cálculo del trabajo ideal"  
 $\eta[8]=W_{\text{bomba2}}/(h[8]-h[7])$  "obtenemos h[8] kJ/kg"  
 $s[8]=\text{Entropy}(\text{Water};h=h[8];P=P[8])$  "kJ/kg\*K"  
 $T[8]=\text{Temperature}(\text{Water};h=h[8];P=P[8])$  "°C"

#### "Punto 9"

$T[9]=180$  "°C"  
 $P[9]=40$  "bar"  
 $h[9]=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T[9];P=P[9])$  "kJ/kg"  
 $s[9]=\text{Entropy}(\text{Water};T=T[9];P=P[9])$  "kJ/kg\*K"

#### "Punto 10"

$P[10]=12$  "bar"  
 $x[10]=0$  "-"  
 $h[10]=\text{Enthalpy}(\text{Water};x=x[10];P=P[10])$  "kJ/kg"  
 $s[10]=\text{Entropy}(\text{Water};x=x[10];P=P[10])$  "kJ/kg\*K"  
 $T[10]=\text{Temperature}(\text{Water};x=x[10];P=P[10])$  "°C"

"Punto 11"

P[11]=3 "bar"  
 h[11]=h[10] "kJ/kg"  
 s[11]=Entropy(Water;h=h[11];P=P[11]) "kJ/kg\*K"  
 T[11]=Temperature(Water;h=h[11];P=P[11]) "°C"

De esta forma, los resultados que muestra el programa son los siguientes:

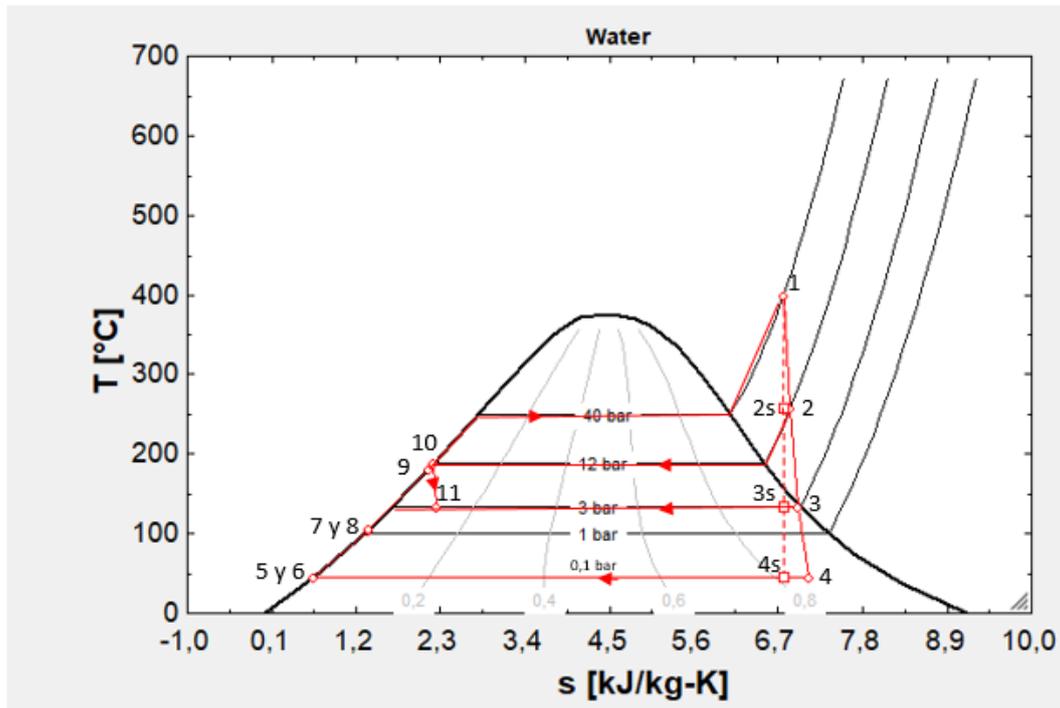
**Unit Settings: SI C bar kJ mass deg**

**Wbomba1 = 0,293 Wbomba2 = 3,875**

Sort	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$h_i$	$P_i$	$s_i$	$T_i$	$P_{s,i}$	$\eta_i$	$h_{s,i}$	$s_{s,i}$	$x_i$	$v_i$	
[1]	3213	40	6,769	400							
[2]	2950	12	6,858	257	12	0,85	2904	6,769			
[3]	2710	3	6,954	133,6	3	0,87	2634	6,769			
[4]	2251	0,1	7,104	45,82	0,1	0,9	2144	6,769	0,8608		
[5]	191,8	0,1	0,6493	45,82					0	0,00101	
[6]	192,2	3	0,6495	45,84		0,8					
[7]	440,3	3	1,363	105						0,001047	
[8]	445,2	40	1,365	105,5		0,8					
[9]	764,8	40	2,136	180							
[10]	798,7	12	2,217	188					0		
[11]	798,7	3	2,255	133,6							

Tabla 53. Tabla de resultado de los estados obtenida mediante el EES

Otra de las opciones de programa, permite realizar diferentes gráficos. Gracias a esta opción, se representa a continuación el diagrama T-s de nuestro ciclo:



Gráfica 25. Estados del ciclo Rankine

Observamos cómo entre los puntos 5-6, y 7-8, al ser las diferencias de  $s$  y  $T$  tan pequeñas, se gráficán como un único punto.

## ANEXO IV: Estrategia de gestión sostenible de los residuos de la comunidad de Madrid 2017-2024

La normativa europea, española y el PEMAR establecen los objetivos y los criterios que determinan la gestión de los residuos, los cuales han de ser incorporados en la Estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid.

La formulación de alternativas y elección del modelo de gestión de los residuos en la región debe tener en cuenta no sólo el cumplimiento de los objetivos establecidos por la normativa europea y española, sino también otras cuestiones como son las características territoriales y sociales de la Comunidad de Madrid, la compatibilidad de las previsiones recogidas en la nueva Estrategia con el sistema actual de gestión, los hábitos y actitudes de ciudadanos empresas, y otros agentes respecto a los residuos que generen, las soluciones técnicas disponibles en el mercado o el coste económico de su gestión.

A partir de dicho análisis se han planteado, en cada uno de los Planes que integran la Estrategia y teniendo en cuenta las particularidades de los distintos flujos de residuos, distintas alternativas, valorando:

- El cumplimiento de los objetivos ambientales exigidos a la Comunidad de Madrid.
- El análisis de la evolución de la gestión en la Comunidad de Madrid de cada tipo de residuos, el grado de cumplimiento de los objetivos de prevención y valorización y del potencial de mejora en la gestión de los residuos.
- La sostenibilidad del modelo de gestión a largo plazo.

### **ESTUDIO AMBIENTAL ESTRATÉGICO DE LA COMUNIDAD DE MADRID**

La Comunidad de Madrid ha llevado a cabo un estudio ambiental, proponiendo las siguientes actuaciones ante los siguientes objetivos ambientales en lo relativo a la gestión de residuos.

### Variable: Calidad atmosférica y cambio climático

<b>Objetivo ambiental: Favorecer la protección y conservación de la flora y la fauna</b>
<b><i>Principios de sostenibilidad</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimizar la afección a la flora y a la fauna de las actuaciones programadas.</li> <li>• Contribuir a la protección y conservación de los espacios naturales protegidos y zonas biosensibles o socialmente valoradas.</li> </ul>

*Tabla 54. Principios de sostenibilidad para favorecer la protección y conservación de la fauna y la flora*

### Variable: Gestión sostenible en materia de residuos

<b>Objetivo ambiental: Desarrollar eficazmente la gestión de residuos</b>
<b><i>Principios de sostenibilidad</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevenir la generación de residuos en la Comunidad de Madrid.</li> <li>• Fomentar la reutilización y el reciclaje.</li> <li>• Maximizar la transformación de los residuos en recursos.</li> <li>• Reducir el impacto ambiental asociado a la gestión de los residuos.</li> <li>• Tender hacia la autosuficiencia de la Comunidad de Madrid en la gestión de los residuos.</li> <li>• Establecer criterios ambientales para el establecimiento de las infraestructuras.</li> <li>• Contribuir a que servicios e infraestructuras se desarrollan en los plazos previstos.</li> </ul>

*Tabla 55. Principios de sostenibilidad para desarrollar eficazmente la gestión de residuos*

### Variable: Eficiencia energética

<b>Objetivo ambiental: Maximizar la eficiencia energética de la gestión de residuos</b>
<b><i>Principios de sostenibilidad</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorizar la valorización energética frente a la eliminación de los residuos.</li> <li>• Optimizar los sistemas de transporte.</li> <li>• Mejorar el consumo energético en las plantas de tratamiento.</li> <li>• Promover el uso de energías renovables.</li> </ul>

*Tabla 56. Principios de sostenibilidad para maximizar la eficiencia energética en la gestión de residuos*