



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



TRABAJO FIN DE GRADO

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS PARA EL IMPULSO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR
EN CANTABRIA

(WASTE-TO-ENERGY OF MUNICIPAL SOLID WASTE FOR
BETTER IMPLEMENTATION OF THE CIRCULAR ECONOMY
IN CANTABRIA)

Para acceder al título de:

Graduado en Ingeniería de los Recursos Energéticos

AUTOR: Anastasia Langa

TUTOR: Juan Carcedo Haya

Septiembre 2018

ÍNDICE

LISTA DE ILUSTRACIONES	2
LISTA DE TABLAS	3
LISTA DE ECUACIONES	4
LISTA DE SIGLAS	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS Y ALCANCE DE ESTE ESTUDIO	9
3. ESTADO DEL ARTE.....	10
3.1. GESTIÓN DE LOS RSU	10
3.1.1. <i>La noción del RSU</i>	<i>10</i>
3.1.2. <i>Clasificación.....</i>	<i>12</i>
3.1.3. <i>Jerarquía de los RSU</i>	<i>14</i>
3.1.4. <i>Modelos de gestión y tratamiento</i>	<i>18</i>
3.1.4.1. <i>Los vertederos y los RSU</i>	<i>20</i>
3.1.5. <i>Requerimientos de la UE</i>	<i>22</i>
3.1.6. <i>Eco-eficiencia y sostenibilidad.....</i>	<i>24</i>
3.2. RSU Y LA ECONOMÍA CIRCULAR	26
3.2.1. <i>Papel de la economía circular</i>	<i>27</i>
3.2.2. <i>Tendencias e indicadores</i>	<i>29</i>
3.2.3. <i>Situación en la Unión Europea</i>	<i>32</i>
3.2.4. <i>Situación en España</i>	<i>37</i>
3.3. TRANSFORMACIÓN Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RSU	43
3.3.1. <i>Tecnologías disponibles.....</i>	<i>43</i>
3.3.1.1. <i>Tecnologías de conversión termoquímica.....</i>	<i>45</i>
3.3.1.1.1. <i>Incineración</i>	<i>46</i>
3.3.1.1.2. <i>Gasificación.....</i>	<i>54</i>
3.3.1.1.3. <i>Pirólisis.....</i>	<i>56</i>
3.3.1.2. <i>Tecnologías de conversión fisicoquímica y bioquímica</i>	<i>59</i>
3.3.2. <i>Valoración económica de la incineración</i>	<i>61</i>
3.3.2.1. <i>Valorización de las cenizas de fondo</i>	<i>62</i>
3.3.3. <i>Contaminación y protección medioambiental</i>	<i>64</i>
3.3.3.1. <i>Tratamiento de los gases de combustión.....</i>	<i>68</i>
3.3.3.2. <i>Casos prácticos.....</i>	<i>72</i>
3.4. PLANTAS DE INCINERACIÓN EXISTENTES EN LA UE.....	73
3.4.1. <i>Amager Bakke / Copenhagen (Copenhague, Dinamarca)</i>	<i>73</i>
3.4.2. <i>Vantaan Energia (Vantaa, Finlandia)</i>	<i>75</i>
3.4.3. <i>Vestforbrænding (Glostrup, Dinamarca)</i>	<i>76</i>
3.4.4. <i>AEB (Ámsterdam, Holanda).....</i>	<i>77</i>
3.4.5. <i>Högdalen (Estocolmo, Suecia).....</i>	<i>78</i>
3.4.6. <i>AVG Köln (Colonia, Alemania)</i>	<i>79</i>
3.5. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.....	79
4. SUMINISTRO ENERGÉTICO A UNA PLANTA INDUSTRIAL EN CANTABRIA	84
4.1. INTRODUCCIÓN.....	84
4.2. SITUACIÓN EN CANTABRIA	84
4.2.1. <i>Servicio encargado de la gestión de RSU.....</i>	<i>85</i>
4.2.2. <i>Indicadores de generación de RSU</i>	<i>86</i>
4.2.3. <i>Tasa de valorización energética</i>	<i>89</i>
4.3. METODOLOGÍA	91

4.4. CÁLCULOS Y RESULTADOS	92
5. CONCLUSIONES	100
BIBLIOGRAFÍA	102

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. RSU generados en la UE en 2016 (kg/persona) [3]	5
Ilustración 2. Secuencia de la economía lineal [10]	7
Ilustración 3. Alcance de las corrientes de RSU [17]	12
Ilustración 4. Jerarquía de los residuos (elaboración propia) [21]	15
Ilustración 5. Jerarquía de residuos y procesos de transformación de residuos en energía [8].....	16
Ilustración 6. Opciones de tratamiento de los RSU [20]	18
Ilustración 7. Mecanismo de aprovechamiento del biogás del vertedero [31]	21
Ilustración 8. Cantidad de RSU generados entre 1995 y 2016 por tipo de tratamiento en kg por persona [18].....	22
Ilustración 9. Ruta de la economía circular [36]	26
Ilustración 10. Producción de energía primaria de la EU-28 en 2015 [43].....	28
Ilustración 11. Valorización energética de los residuos como parte de la economía circular [44]	29
Ilustración 12. Prospectiva Medioambiental de la OCDE para el 2030	29
Ilustración 13. Producción de energía eólica en 2015 y el consumo de electricidad durante 2 semanas junto con la producción eólica prevista en el año 2020 [44]	30
Ilustración 14. Predicciones de precios de la electricidad, precios constantes indexados con referencia al año 2014. El índice muestra el precio de la electricidad (por MWh) en porcentaje del precio del año 2014 [44]	31
Ilustración 15. RSU generados por país en 2005 y 2016 en UE (kg per cápita) [18]	33
Ilustración 16. Tratamiento de los RSU entre 2001 y 2016 [48]	35
Ilustración 17. Mapa de las plantas de incineración presentes en la UE en 2015 [49]	36
Ilustración 18. Evolución de la gestión de residuos hacia el reciclado [27]	37
Ilustración 19. Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España. 2015 (Elaboración propia) [54]	38
Ilustración 20. Estructura de generación eléctrica según tecnologías, 2016 [56]	39
Ilustración 21. Mapa de las plantas de incineración presentes en España en 2015 [49]	41
Ilustración 22. Emisiones 2017 por sectores en España [61].....	42
Ilustración 23. Tecnologías disponibles para la transformación y la valorización energética de la biomasa (elaboración propia) [17, 63, 64]	45
Ilustración 24. Tipos básicas de parrillas [64]	48
Ilustración 25. Esquema horno rotativo de incineración de residuos [66]	49
Ilustración 26. Esquema de horno de lecho fluidizado circulante [66].....	49
Ilustración 27. Planta de valorización energética de RSU [67]	51
Ilustración 28. Contenido energético y potencial de recuperación de energía de los residuos [7]	53
Ilustración 29. Esquema del proceso de gasificación con aire [66]	55
Ilustración 30. Estructura de una planta de pirólisis para tratamiento de residuos urbanos [66]	58
Ilustración 31. Cadena de proceso de una planta de digestión anaerobia húmeda que trata residuos biológicos [64]	60
Ilustración 32. Proceso productivo de la fermentación alcohólica [69]	61
Ilustración 33. Emisiones de CO2 por tipo de central eléctrica por kilovatio-hora de energía generada según ISWA (Elaboración propia) [7]	67
Ilustración 34. Emisiones de CO2 por tipo de central eléctrica por kilovatio-hora de energía generada según Green Peace (g CO2 por kWh) (Elaboración propia) [74]	67
Ilustración 35. Balance de CO2 emitidos en la incineración de RSU en comparación con una central de carbón, teniendo en cuenta la alternativa del vertido de residuos (Elaboración propia) [7]	68

Ilustración 36. Esquema de una incineradora con distintos equipos de depuración [75].....	71
Ilustración 37. Material y energía recuperados en Amager Bakke - Copenhill [44].....	75
Ilustración 38. Jerarquía de los residuos en Vestforbrænding [85]	76
Ilustración 39. Evolución de los artículos que incluyen "Residuos Sólidos Urbanos"	80
Ilustración 40. Evolución de los artículos que incluyen "Valorización energética" y "Residuos Sólidos Urbanos"	81
Ilustración 41. Evolución de los artículos que incluyen "Economía Circular" y "Residuos Sólidos Urbanos"	81
Ilustración 42. Evolución de los artículos que incluyen "Valorización energética" "Economía Circular" y "Residuos Sólidos Urbanos"	82
Ilustración 43. Cantidad de Residuos Sólidos Urbanos por habitante y día recogidos a nivel nacional y municipal en 2009 [98]	85
Ilustración 44. Modelo de gestión aplicado en Cantabria para los RSU [98]	86
Ilustración 45. Evolución en la generación de residuos domésticos per cápita [95].....	87
Ilustración 46. Grado de consecución de objetivos en Cantabria [95]	87
Ilustración 47. Recogida de RSU por comunidad autónoma (2015) [99]	89
Ilustración 48. Tasa de valorización energética de Residuos Domésticos [95]	89
Ilustración 49. Eficiencia de una planta de cogeneración [107]	92
Ilustración 50. Coste de inversión de incineradoras en función del tamaño de la planta [32]	95
Ilustración 51. Comparación de las emisiones de CO2 según las dos fuentes contradictorias (Elaboración propia)	98
Ilustración 52. Evolución económica dependiendo del tipo de combustible utilizado	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores caloríficos aproximados de fracciones comunes de los RSU [7].....	6
Tabla 2. Lista de los residuos municipales incluidos en la LER [19]	13
Tabla 3. Clasificación de los residuos de envases [19]	14
Tabla 4. Descripción de los términos de gestión de residuos según la jerarquía de residuos y la Directiva Marco de Residuos de la UE [22, 27].....	19
Tabla 5. Objetivos de gestión de residuos propuestos por la Comisión con modificaciones del Parlamento [33, 34].....	23
Tabla 6. Los efectos potenciales de los RSU y la gestión de los mismos [39]	25
Tabla 7. Tendencias de las emisiones de GEI a nivel mundial derivadas de los residuos utilizando las directrices, extrapolaciones y proyecciones del inventario del IPCC de 2006 (MtCO ₂ -eq, redondeado) [47]	31
Tabla 8. RSU generados en EU y A en años seleccionadas y la diferencia de generación entre 1995 y 2016 [18]	33
Tabla 9. RSU vertidos, incinerados, reciclados y compostados en años seleccionados y la diferencia existente entre 1995 y 2016 [18]	34
Tabla 10. Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España en 2015 clasificadas por tipo de recogida (Elaboración propia) [54]	39
Tabla 11. Producción y consumo con fuentes renovables en 2016 [56].....	40
Tabla 12. Plantas de incineración existentes en España [57, 58, 50]	41
Tabla 13. Condiciones de reacción típicas y productos de procesos de pirólisis, gasificación e incineración [63].....	46
Tabla 14. Resumen de la actual aplicación con éxito de las técnicas de tratamiento térmico para los RSU sin tratar y pretratados en instalaciones específicas [63]	47
Tabla 15. Tipos de lechos fluidizados para la incineración de residuos [66]	50
Tabla 16. Tipos de reactores de gasificación [66]	55
Tabla 17. Ventajas e inconvenientes de la gasificación de residuos [66]	56
Tabla 18. Ventajas e inconvenientes del proceso de pirólisis [66]	58

Tabla 19. Eficiencia promedio anual neta de los procesos de digestión anaerobia [17]	60
Tabla 20. Composición aproximada de las cenizas de fondo, en porcentajes de masa [57]	62
Tabla 21. Fuentes de emisión de GEI y acciones para su mitigación para distintos procesos y tecnologías propios de la gestión de residuos	65
Tabla 22. Técnicas para canalizar las emisiones a la atmósfera producidas durante el tratamiento de los residuos [29]	69
Tabla 23. Características de diseño de la planta Amager Bakke [81]	74
Tabla 24. Valores de los gases de combustión tras su limpieza en la planta Amager Bakke [81]	74
Tabla 25. Características de diseño de la planta Vantaan Energia [83]	76
Tabla 26. Características de diseño de la planta Vestforbrænding [84, 86, 57]	77
Tabla 27. Características de diseño de la planta AEB [17, 87]	78
Tabla 28. Características de la planta de Högdalen [89]	78
Tabla 29. Características de la planta de AVG Köln [89]	79
Tabla 30. Búsqueda de artículos científicos relacionas con el presente TFG a través de la base de datos Scopus realizada a fecha de 06/09/2018 [91]	80
Tabla 31. Cantidad de RSU recogidos clasificados por tipo de residuo en Cantabria (2015) [99]	88
Tabla 32. Cantidades de RSU clasificadas por su tratamiento en Cantabria (2015) [54]	90
Tabla 33. Datos principales de la planta de incineración de Meruelo [103].....	90
Tabla 34. RSU generados e incinerados por las CCAA adyacentes a Cantabria en 2015 [54].....	93
Tabla 35. RSU aportados por Asturias y Castilla y León para la planta de incineración de RSU	93
Tabla 36. Cantidad de RSU en toneladas aportada por cada CCAA y el coste del transporte.....	94
Tabla 37. Otros costes correspondientes a las 5 líneas de producción de la planta de incineración de RSU.....	95
Tabla 38. Residuos sólidos reciclados y beneficios obtenidos en la planta de incineración de RSU	96
Tabla 39. Datos característicos de los dos combustibles de la planta de coincineración	96
Tabla 40. Características de la planta de coincineración de RSU y hulla	97
Tabla 41. Residuos sólidos reciclados y beneficios obtenidos en el segundo caso.....	97
Tabla 42. Emisiones de CO2 del RSU y la hulla	98

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Eficiencia energética [23]	17
Ecuación 2. Cálculo del consumo energético previsto	92

LISTA DE SIGLAS

AEVERSU	Asociación de Empresas de Valorización Energética de RSU
CEWEP	Confederación de Plantas Europeas de Valorización Energética
CDR	Combustible Derivado de Residuos
CSR	Combustibles Sólido Recuperado
EEB	Oficina Europea de Medio Ambiente
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ISWA	Asociación Internacional de los Residuos Sólidos
LER	Lista Europea de Residuos
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PCI	Poder calorífico inferior
PSRM	Plan Sectorial de Residuos Municipales
RSU	Residuo Sólido Urbano
SCR	Reducción Catalítica Selectiva
SNCR	Reducción Catalítica No Selectiva
TMB	Tratamiento Mecánico-Biológico
UE	Unión Europea

1. INTRODUCCIÓN

La actividad humana genera grandes volúmenes de residuos incluyendo desechos agrícolas e industriales, pero el tipo más importante de desechos en las sociedades modernas es el Residuo Sólido Urbano (RSU) o residuo municipal. Se trata del desperdicio que producen los hogares y las personas cuya colección y eliminación es costosa y lenta. El crecimiento de la población, asociado al avance tecnológico, ha conducido a un aumento significativo en la generación de RSU, lo que conlleva a importantes riesgos ambientales y de salud pública en todo el mundo. La gestión incorrecta de los residuos ha contribuido, en gran medida, a la contaminación del aire, la tierra y el agua y al cambio climático [1].

El consumo ha cambiado drásticamente, ya que los consumidores tienen muchas más opciones a la hora de la compra y muchos productos están especialmente diseñados para tener vidas más cortas o ser de un solo uso. Actualmente, los consumidores poseen y usan muchos más dispositivos personales, y los actualizan con mayor frecuencia que en el pasado [2]. La cantidad promedio de RSU generados por cada uno de los cerca de 512 millones de habitantes de la Unión Europea fue de 480 kg en 2016, como se comprueba en la Ilustración 1 [3, 4].

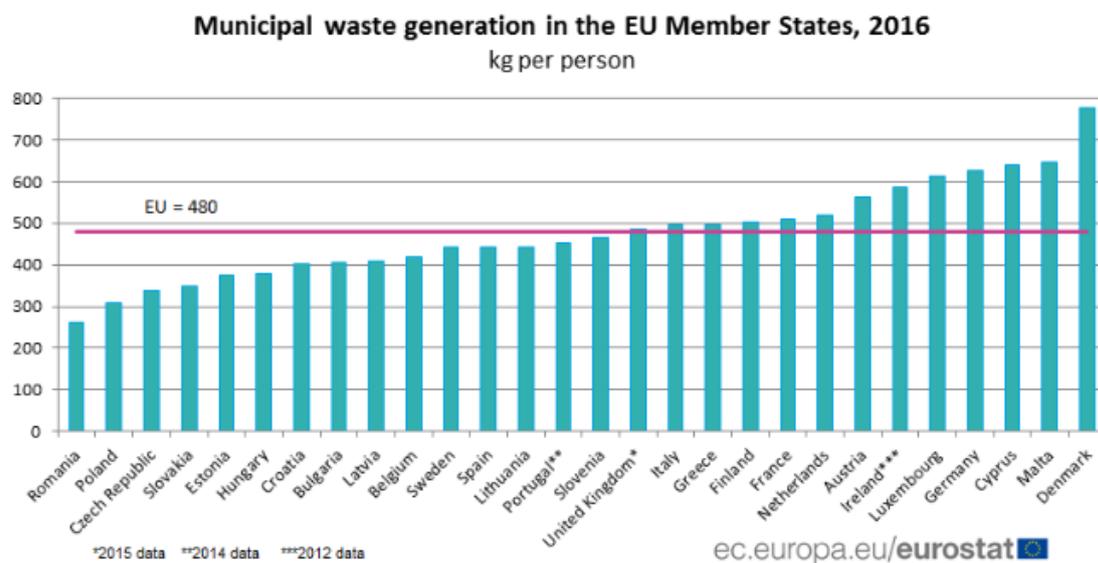


Ilustración 1. RSU generados en la UE en 2016 (kg/persona) [3]

La agricultura produce algunos de los mayores volúmenes de desechos. Muchos cultivos, como los cereales, la caña de azúcar o el arroz, dejan residuos fácilmente combustibles. De forma igual, la silvicultura genera residuos que pueden transformarse en energía eléctrica. La ganadería también produce desechos que a menudo pueden convertirse en biogás mediante un proceso llamado digestión anaeróbica. La industria del papel genera residuos que tradicionalmente se han utilizado para generar energía y calor, utilizándose para alimentar la planta industrial que produce el papel. Otras industrias producen residuos especializados para su conversión en energía [5].

En el caso concreto de los residuos municipales, sabiendo que el valor calorífico promedio de los RSU en los países desarrollados está entre 8 y 12 MJ/kg [6], parece lógico utilizar los residuos como fuente de energía. En la Tabla 1, se pueden apreciar los valores caloríficos aproximados de algunas fracciones de los RSU.

Tabla 1. Valores caloríficos aproximados de fracciones comunes de los RSU [7]

Fracción	Valor calorífico (MJ/kg)
Papel	16
Materia orgánica	4
Plásticos	35
Cristal	0
Metales	0
Textiles	19
Otros	11

Parte de este desperdicio (papel, vidrio, latas de metal, etc.) puede reciclarse, pero generalmente hay residuos que no tienen ningún valor adicional en su forma actual. Los residuos orgánicos pueden descomponerse de forma natural y luego ser devueltos al suelo para proporcionar nutrientes. Sin embargo, siempre quedará un residuo significativo. Aprovechar este residuo para generar energía ofrece un método de eliminación rentable y conveniente [5].

Tradicionalmente, la conversión de residuos en energía se ha asociado con la incineración. Sin embargo, la conversión de residuos en energía es un término amplio que abarca mucho más. Existen diversos procesos de tratamiento de residuos que generan energía, por ejemplo, en forma de electricidad o calor o la producción de combustible a partir de los residuos. [8]. Cuando esto último es posible, se consigue tanto la eliminación del residuo como un producto adicional útil.

En el pasado, la combustión de residuos, a menudo sin generación de calor o electricidad, se ha utilizado como un medio para reducir el volumen de residuos. La ceniza residual se enterraba en un vertedero. Dichos procesos son un desperdicio de energía y, actualmente, estas actividades no se consideran apropiadas. En toda la UE existen reglas estrictas sobre cómo deben tratarse los residuos y la combustión sin generación de energía es considerada una de las tecnologías de combustión menos deseables [5].

Hoy en día, se comienza a concebir el residuo como un recurso y se considera la valorización energética como una alternativa al vertedero. Utilizando las tecnologías disponibles, se puede conseguir una correcta gestión de los residuos y prescindir de los combustibles fósiles como el carbón o el gas natural. Esto conlleva a generar la energía de la Economía Circular que intenta evitar cualquier tipo de residuos.

Convertir los residuos en energía es una de las claves para conseguir una Economía Circular, que forma parte de un plan de acción de la UE adoptado en diciembre de 2015 con el objetivo de fomentar pautas de consumo y producción sostenibles, eliminando la

economía lineal presente desde la primera revolución industrial [9, 10]. Concretamente, este plan asegura que, en el caso de imposibilidad de reciclar, es preferible recuperar el contenido energético de los residuos en vez de depositarlos en vertederos. Así, la Comisión adopta una iniciativa para “transformación de residuos en energía” en el marco de la Unión de la Energía [11]. Este plan está en consonancia con los compromisos de la UE en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

A diferencia de la economía lineal, resumida como "extraer, producir, consumir y eliminar", una economía circular se define como aquella en la que el valor de los productos, materiales y recursos se mantiene durante el mayor tiempo posible, minimizando el desperdicio y el uso de recursos [12]. Va en contraste con el pensamiento lineal, el cual ha provocado que entre el 80 y el 90% de lo que usan los consumidores se conviertan en basura en 6 meses. Aproximadamente una quinta parte de la extracción y producción global de materiales se convierte en residuos cada año, siguiendo los pasos de la Ilustración 2.



Ilustración 2. Secuencia de la economía lineal [10]

En este contexto, la UE pide que la gestión de residuos sea una gestión sostenible centrándose en el ciclo de la vida de los materiales con el objetivo de cerrar el círculo. Debe haber un control y una medición de la producción y el consumo más exhaustivo. Para ello hay que incorporar los principios de la economía circular, mejorar la difusión de energías renovables, aumentar la eficiencia energética, reducir la dependencia de la UE a la importación de recursos y proporcionar oportunidades económicas y contribuir a la competitividad a largo plazo. Así, se consigue un ahorro sustancial para las empresas, las autoridades públicas y los consumidores, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero [13].

Los RSU constituyen, aproximadamente, entre el 7 y el 10% del total de residuos generados en la UE por lo que su participación en la economía circular es indiscutible. Su gestión y tratamiento se encuentra entre los más complejos y está continuamente evolucionando hacia procesos más eficientes. El camino que se sigue para el manejo de los RSU da una buena indicación de la calidad del sistema total de gestión de residuos en un país [13].

Independientemente del tipo de tratamiento, las centrales de tratamiento y valorización de residuos deben incluir controles medioambientales extensivos para asegurar que los materiales tóxicos que se liberan no superan los límites establecidos. Por otro lado, deben ser socialmente aceptados y económicamente efectivos. Otros factores que influyen en el tratamiento de los RSU son los tecnológicos, por la innovación y los avances de las nuevas infraestructuras; y los educativos ya que la investigación y los proyectos de cooperación son fundamentales en este ámbito. Dado que la economía circular ocupa un lugar destacado en la agenda de la UE, los Estados Miembros, al

abordar todos estos factores, deberían cambiar la eliminación anticuada de los RSU por un tratamiento de residuos más inteligente que abarque la economía circular.

No hay ninguna duda de que la reducción, reutilización y reciclaje de los RSU son las prioridades en la gestión de los residuos. Sin embargo, el término “Residuo Cero” no es realístico en el futuro previsible y, por lo tanto, las plantas de valorización energética tienen un papel fundamental ya que son preferibles al vertedero, siempre bloqueando el acceso de los materiales reciclables a estos niveles inferiores.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DE ESTE ESTUDIO

Este estudio trata sobre el aprovechamiento, desde la dimensión energética, de la fracción no reciclable de los RSU como aportación a la economía circular. La idea central de este TFG surge a partir de la necesidad de gestionar adecuadamente la creciente cantidad de RSU que se generan en Cantabria (aprox. 1,5 kg por persona y día) así como de dar respuesta a la normativa europea que paulatinamente plantea más obstáculos al carbón como fuente de energía primaria y apuesta seriamente por la transición hacia una economía circular. Para ello, se examinarán las políticas vigentes en la UE sobre la gestión de residuos y se indicará de qué manera se implementan dichas políticas en la práctica, tanto a nivel europeo como a nivel nacional y regional.

El objetivo de este estudio es, en primer lugar, identificar y describir las diferentes prácticas de gestión de RSU empleadas en la UE, sus enfoques para adoptar la economía circular y cualquier desafío que se presente; y, en segundo lugar, el papel que desempeñan las tecnologías de valorización energética en este contexto. Finalmente, se estudiará la viabilidad del suministro energético a una planta industrial en Cantabria, considerando las necesidades energéticas de la planta y el combustible disponible. Por lo tanto, en este documento se puede distinguir una perspectiva *genérica*, que abarca una explicación general de los RSU en la UE; y otra *específica*, con una descripción de la situación y la gestión de los RSU en los distintos países europeos y más concretamente, en España y en la Comunidad Autónoma de Cantabria, donde se hará el estudio de viabilidad.

Se tiene un apartado introductorio (más atrás), otro sobre la gestión de los RSU en general; y, también, una sección en el que se relacionan los RSU con la economía circular, diferenciando una parte dedicada a los países de la UE y otra dedicada a España. Por otro lado, hay un apartado en el que se recopilan las tecnologías existentes para valorizar energéticamente los residuos, clasificándolas según su tipo de conversión (termoquímica, fisicoquímica o bioquímica), además de una colección europea de plantas exitosas de incineración, la tecnología principal de este TFG. Por último, se incluye el número de artículos encontrados en *Scopus* (plataforma de artículos científicos), realizando búsquedas que incluyen las palabras claves relacionadas con el presente TFG y se muestra su evolución mediante gráficos. Todo ello bajo el nombre de «estado del arte». En el último apartado se analiza el suministro energético a una planta industrial en Cantabria con las consiguientes conclusiones generales, tal como se ha mencionado anteriormente.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. GESTIÓN DE LOS RSU

La gestión de los RSU es uno de los principales retos de la sociedad moderna debido a su impacto social, económico y ambiental. Con tal de facilitar el enfoque conjunto entre la eficiencia de la energía y los residuos, debe haber un claro concepto de los RSU y su gestión y una correcta valorización. Todo ello conducirá a la transición hacia una economía circular.

3.1.1. La noción del RSU

Dado que la aplicación de la legislación sobre residuos depende en su totalidad de la noción de «residuo» existente, es esencial definir su campo de aplicación. A efectos de la Directiva 2008/98/CE se entiende por residuo:

"Cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse." [14]

Esta definición apenas ha cambiado desde la primera Directiva emitida en 1975. Sin embargo, se han introducido nuevos conceptos como el de «subproductos» y «fin de la condición de residuo» lo que restringe el alcance de los residuos. Así, se eliminan algunas sustancias de la clasificación legal de residuos y se reclasifican como subproductos, definidos en el Artículo 5 como:

"Una sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto, puede ser considerada como subproducto y no como residuo [...] únicamente si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) es seguro que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente;*
- b) la sustancia u objeto puede utilizarse directamente sin tener que someterse a una transformación ulterior distinta de la práctica industrial normal;*
- c) la sustancia u objeto se produce como parte integrante de un proceso de producción; y*
- d) el uso ulterior es legal, es decir la sustancia u objeto cumple todos los requisitos pertinentes para la aplicación específica relativos a los productos y a la protección del medio ambiente y de la salud, y no producirá impactos generales adversos para el medio ambiente o la salud humana."* [14]

El Artículo 6 establece la definición del concepto «fin de la condición de residuo»:

"Determinados residuos específicos dejarán de ser residuos [...] cuando hayan sido sometidos a una operación, incluido el reciclado, de valorización y cumplan los criterios específicos que se elaboren, con arreglo a las condiciones siguientes:

- a) la sustancia u objeto se usa normalmente para finalidades específicas;*

- b) *existe un mercado o una demanda para dicha sustancia u objeto;*
- c) *la sustancia u objeto satisface los requisitos técnicos para las finalidades específicas, y cumple la legislación existente y las normas aplicables a los productos; y*
- d) *el uso de la sustancia u objeto no generará impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud.” [14]*

Al establecer este criterio, los Estados miembros deciden caso por caso cuando un residuo deja de tener esta condición teniendo en cuenta la jurisprudencia aplicable. Esto significa que algunas sustancias en determinados países se consideran «residuos» pero en otros no, si se le atribuye el fin de la condición de residuo [14]. Para garantizar el buen funcionamiento del mercado y un alto nivel de protección de la salud humana y el medio ambiente, la Comisión debería establecer unos criterios uniformes para todos los Estados.

En la Directiva 2008/98/CE no aparece la definición de los RSU por lo tanto no hay claridad al respecto. Esta definición sólo aparecía de manera imprecisa en la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos:

“los residuos domésticos y de otro tipo que, por su naturaleza o su composición, puedan asimilarse a los residuos domésticos.” [15]

Sin embargo, en la Directiva más reciente de la Comisión Europea de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE, finalmente se definen en profundidad los RSU, haciendo referencia a los «residuos municipales» como:

- a) *los residuos mezclados y los residuos recogidos de forma separada de origen doméstico, incluidos papel y cartón, vidrio, metales, plásticos, biorresiduos, madera, textiles, envases, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, residuos de pilas y acumuladores, y residuos voluminosos, incluidos los colchones y los muebles,*
- b) *los residuos mezclados y los residuos recogidos de forma separada procedentes de otras fuentes, cuando esos residuos sean similares en naturaleza y composición a los residuos de origen doméstico;*

Los residuos municipales no comprenden los residuos procedentes de la producción, la agricultura, la silvicultura, la pesca, las fosas sépticas y la red de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales, incluidos los lodos de depuradora, los vehículos al final de su vida útil ni los residuos de construcción y demolición. [13]

Esta definición excluye los residuos de construcción y demolición cuya definición aparece aparte. De igual forma, se excluyen los residuos alimenticios y, tampoco se menciona nada con respecto al estado público o privado del operador que gestiona los residuos [13]. Esta nueva definición de los RSU es más explícita y no permite que los Estados miembros tengan diferentes interpretaciones. Está en consonancia con la definición actual utilizada con fines estadísticos por Eurostat.

Dado que el «residuo» puede considerarse un «recurso», entra en juego la Directiva Europea de Energías Renovables, la cual incluye la «biomasa» como una de sus fuentes renovables y se define como:

“La fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.” [16]

Se comprueba que ha habido un progreso lento para definir el concepto de RSU en la legislación de residuos de la UE. Es esencial establecer definiciones claras e inequívocas para garantizar que el sistema funcione eficazmente y los resultados notificados por los Estados miembros sean auténticos. El alcance y la credibilidad de los objetivos legislativos de residuos establecidos deben ser justificados debidamente para alcanzar dichos objetivos. Por lo tanto, se requiere una mayor afinidad dentro de la UE, especialmente a la hora de definir los criterios de «fin de la condición de residuo» y las normas de cálculo. No existe un método único y homogéneo para calcular que se recicla, se hace compost o se deposita en vertederos. Por lo tanto, siempre habrá alguna desviación en los estudios estadísticos.

3.1.2. Clasificación

El siguiente esquema muestra el alcance de las corrientes de RSU según su método de recogida (Ilustración 3). Mirando el esquema, se observa una clara distinción entre los residuos domésticos y similares y los flujos específicos de los RSU. En principio, los residuos domésticos no cubren los residuos separados por tipo de material (papel, vidrio, etc.), al contrario de los RSU. La cantidad de RSU producida por persona es aproximadamente el doble de la cantidad de residuos domésticos [17].

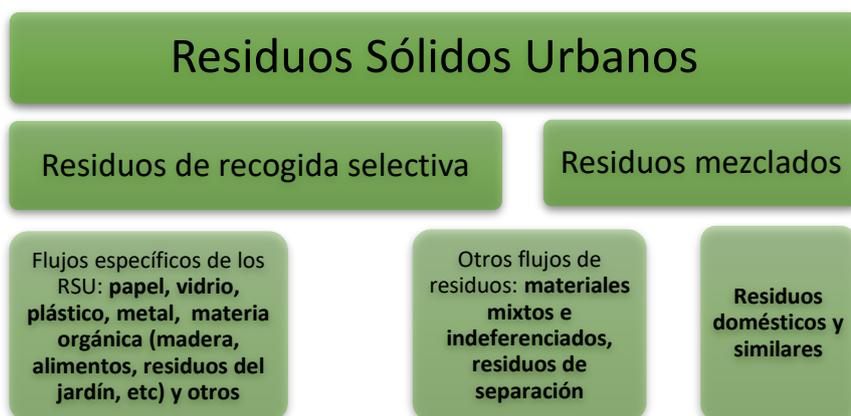


Ilustración 3. Alcance de las corrientes de RSU [17]

Debido a la similitud de los residuos domésticos con los RSU, Eurostat ha ofrecido una solución que se basa en el principio de que el alcance de los RSU incluye los residuos domésticos y otros residuos generados por otras fuentes además de los hogares,

independientemente de si son los municipios o las empresas privadas los responsables de su recogida [18].

La clasificación oficial de los residuos urbanos o municipales se encuentra en el capítulo 20 de la Lista Europea de Residuos (LER) elaborada por la Comisión Europea en el año 2000 y actualizada en diciembre de 2014. Aparecen bajo el nombre de “Residuos municipales (Residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente” y cada uno tiene un código determinado [19]. Esto implica que si un tipo de residuo es generado por los hogares y el mismo tipo de residuo también lo generan las empresas comerciales, industriales e institucionales, este residuo se asignará al mismo código [20]. Se dividen en los siguientes tres grupos cada uno con sus correspondientes componentes (Tabla 2).

Tabla 2. Lista de los residuos municipales incluidos en la LER [19]

Fracciones recogidas selectivamente	<ul style="list-style-type: none"> • Papel y cartón • Vidrio • Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes • Ropa • Materias textiles • Disolventes • Ácidos • Alcalis • Productos fotoquímicos • Plaguicidas • Tubos fluorescentes y otros residuos que contienen mercurio • Equipos desechados que contienen clorofluorocarburos • Aceites y grasas comestibles y no comestibles • Pinturas, tintas, adhesivos y resinas que contienen o no sustancias peligrosas • Detergentes que contienen sustancias peligrosas • Detergentes que no contienen sustancias peligrosas • Medicamentos citotóxicos y citostáticos • Medicamentos distintos a los anteriores • Baterías de plomo, acumuladores de Ni-Cd y pilas que contienen mercurio; y baterías y acumuladores sin clasificar que contienen esas baterías • Baterías y acumuladores distintos a los anteriores • Equipos eléctricos y electrónicos desechados, que contienen o no componentes peligrosos • Madera que contiene o no sustancias peligrosas • Plásticos • Metales
--	--

	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos del deshollinado de chimeneas • Otras fracciones no especificadas en otra categoría
Residuos de parques y jardines (incluidos los residuos de cementerios)	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos biodegradables • Tierra y piedras • Otros residuos no biodegradables
Otros residuos municipales	<ul style="list-style-type: none"> • Mezclas de residuos municipales • Residuos de mercados • Residuos de limpieza viaria • Lodos de fosas sépticas • Residuos de la limpieza de alcantarillas • Residuos voluminosos • Residuos municipales no especificados en otra categoría

Los envases no están cubiertos por el capítulo 20 de la LER sino por el capítulo 15 01 “*Envases (incluidos los residuos de envases de la recogida selectiva municipal)*” y, por lo tanto, este capítulo debe incluirse en la definición de los residuos urbanos o municipales [20]. Se clasifican de la siguiente manera, tal como aparecen en la Tabla 3:

Tabla 3. Clasificación de los residuos de envases [19]

Envases (incluidos los residuos de envases de la recogida selectiva municipal)	<ul style="list-style-type: none"> • Envases de papel y cartón • Envases de plástico • Envases de madera • Envases metálicos • Envases compuestos • Envases mezclados • Envases de vidrio • Envases textiles • Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas • Envases metálicos, incluidos los recipientes a presión vacíos, que contienen una matriz sólida y porosa peligrosa (por ejemplo, amianto)
---	--

3.1.3. Jerarquía de los RSU

La jerarquía de los residuos utilizada en la UE, fue publicada por *The World Bank* y responde a consideraciones económicas, ambientales, sociales y de gestión. El primer uso de una jerarquía de residuos se registró en los años 70 en la *Sonda de Contaminación de Ontario* y tenía solamente “3 erres”: reducir, reutilizar y reciclar. Sin embargo, ahora hay una cuarta erre: “recuperar” [21], lo que se puede ver en la siguiente Ilustración 4.



Ilustración 4. Jerarquía de los residuos (elaboración propia) [21]

La Comisión Europea publicó en la Directiva 2008/98/CE una jerarquía de residuos que sirve de orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos: “

- a) *prevención*
- b) *preparación para la reutilización*
- c) *reciclado*
- d) *otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética*
- e) *eliminación*” [14]

Esta jerarquía constituye la mejor opción global para el medio ambiente en la legislación y la política en materia de residuos y resulta fundamental para la transición a la economía circular (más adelante). Para determinados residuos, puede resultar necesario apartarse de dicha jerarquía siempre que sea justificado. Los motivos pueden deberse a: factibilidad técnica, viabilidad económica o protección del medio ambiente [14].

La reciente comunicación de la Comisión sobre el papel de la transformación de los residuos en energía en la economía circular destacó que la recuperación de energía a partir de residuos respalda los objetivos de la UE del plan de acción para la economía circular y es coherente con la jerarquía de residuos. Se trata del primer documento publicado por la Comisión Europea en el cual algunos procesos de recuperación de energía se asignaron a varios pasos de la jerarquía de residuos, por lo que se trata de un documento de mucha importancia [8]. Podemos observar la posición de los distintos procesos en la siguiente Ilustración 5.



Ilustración 5. Jerarquía de residuos y procesos de transformación de residuos en energía [8]

La jerarquía aborda los siguientes procesos fundamentales de transformación de residuos en energía:

- coincineración de residuos en instalaciones de combustión (p. ej., centrales eléctricas) y en la producción de cemento y cal*
- incineración de residuos en instalaciones especializadas*
- digestión anaerobia de residuos biodegradables*
- producción de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos derivados de residuos*
- otros procesos, incluida la incineración indirecta tras una fase de pirólisis o gasificación.* [8]

En la parte de «prevención» los productos aún no se consideran residuos mientras que en los demás niveles se habla de residuo [22].

La clasificación de los distintos procesos en la jerarquía depende del impacto medioambiental que ocasiona. Abarcan operaciones muy variadas, desde la «eliminación» y la «recuperación» hasta el «reciclado». Como puede verse, la incineración de residuos con un nivel elevado de recuperación de energía se entiende como «recuperación» mientras que la digestión anaeróbica se considera como «reciclado». La comunicación envía un mensaje claro de que la incineración debe evitarse, dejándolo en el nivel en el que el reciclaje ya no es posible. El caso menos deseable es la «eliminación» que se consigue mediante la incineración de residuos con recuperación de energía limitada y, por la tanto, no se considera como una recuperación de energía; o mediante el vertido de residuos utilizando gas de vertedero capturado.

Como conclusión, la recuperación de energía de los RSU mediante la incineración puede clasificarse como «eliminación» u «otra recuperación», dependiendo del nivel de energía recuperada. Para calcular la eficiencia energética, se utiliza la *fórmula R1* (Ecuación 1).

$$\text{Eficiencia energética (EE)} = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \times (E_w + E_f)}$$

Ecuación 1. Eficiencia energética [23]

Donde:

- a) E_p es la energía anual producida como calor o electricidad, que se calcula multiplicando la energía en forma de electricidad por 2,6 y el calor producido para usos comerciales por 1,1 (GJ/año).
- b) E_f es la aportación anual de energía al sistema a partir de los combustibles que contribuyen a la producción de vapor (GJ/año).
- c) E_w es la energía anual contenida en los residuos tratados, calculada utilizando el poder calorífico neto de los residuos (GJ/año).
- d) E_i es la energía anual importada excluyendo E_w y E_f (GJ/año).
- e) 0,97 es un factor que representa las pérdidas de energía debidas a las cenizas de fondo y la radiación. [23]

La fórmula calcula la energía útil entre la energía inicial aportada. Esta fórmula corrige el resultado final para evitar contar la energía producida a partir de otros combustibles distintos a los residuos, para pérdidas normales de energía, y con el propósito de comparar la electricidad y el calor entregado a los usuarios [24].

Inicialmente, la Comisión consideró que los incineradores, dedicados al procesamiento de los RSU, con un factor de eficiencia energética igual o superior a 0,6 se clasificarían como instalaciones de recuperación. Teniendo en cuenta el progreso tecnológico y con el objetivo de fomentar la innovación, la Comisión decidió que el umbral se elevaría en 2009 a 0,65 para las nuevas instalaciones. Por la tanto, actualmente, para que las instalaciones construidas a partir de 2009 se consideren de recuperación, su eficiencia energética debe ser igual o mayor a 0,65. En caso contrario, su labor será clasificada como eliminación, similar al depósito en vertedero [24, 25]. Para las nuevas plantas es una obligación obtener un resultado mayor a 0,65 mientras que para las más antiguas es un reto alcanzar el 0,6. Hay que destacar que la fórmula R1 no calcula la eficiencia energética de la planta sino la eficiencia de la recuperación de la planta. Es mucho más fácil de cumplir con el criterio R1 cuando se vende algo de calor ya que los factores de equivalencia de 2.6 y 1.1 están a favor del calor [26].

Concluyendo este apartado, la jerarquía de residuos es útil para las decisiones en la fase de residuos, pero solo a través del ciclo de vida se puede lograr una imagen más completa del desempeño ambiental de un producto. Las decisiones que se toman en las etapas de producción y consumo determinan el impacto ambiental de un producto y también las posibilidades de su posterior reutilización o reciclaje. Dichas decisiones deberían, por lo tanto, basarse en el pensamiento de ciclo de vida [27]. En estas circunstancias, la prevención y la gestión de residuos se convierte en una gestión de recursos, explicada en el siguiente apartado.

3.1.4. Modelos de gestión y tratamiento

La regulación de residuos en la UE se basa en la necesidad de mejorar la gestión y el tratamiento de los residuos debido a los distintos fallos del sistema. Esto concierne a los informes sobre el tratamiento de los RSU y, en particular, a la forma en que se considera el pretratamiento en el informe [20, 28]. El siguiente diagrama de flujo (Ilustración 6) muestra las operaciones usuales de tratamiento de RSU. Los datos del tratamiento se dividen en estas categorías [20]:

- Incineración (por separado para con y sin recuperación de energía)
- Vertedero
- Reciclaje (excluyendo el compostaje o la fermentación)
- Compostaje y/o digestión

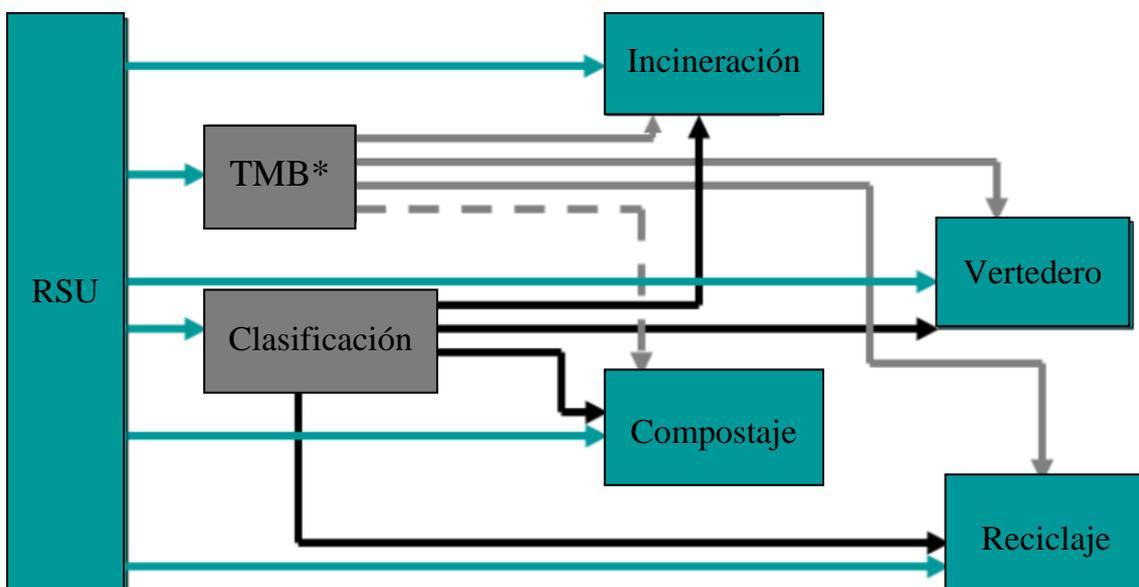


Ilustración 6. Opciones de tratamiento de los RSU [20]

El TMB (tratamiento mecánico-biológico) se define de la siguiente manera:

“Tratamiento de residuos sólidos mezclados que combina tratamientos mecánicos con tratamientos biológicos, como los tratamientos aerobios o anaerobios.” [29]

Como se observa en la ilustración, el primer paso es la realización de las operaciones de pretratamiento: el TMB o la clasificación de residuos. Sus salidas deben asignarse a una de las cuatro operaciones de tratamiento restantes (flechas negras y grises del diagrama). Las cantidades de estos productos pueden basarse en estimaciones y/o modelos, pero no deben contener pérdidas de proceso y de agua del pretratamiento, sino solamente los residuos secundarios realmente administrados. Para las cuatro operaciones de tratamiento (incineración, vertedero, reciclaje y compostaje) se considerarán las entradas directas (flechas verdes) e indirectas (flechas negras y grises) [20].

En el caso del cálculo de las cantidades de los productos derivados del compostaje y reciclado, se aplican disposiciones adicionales, ya que estos procesos deben seguir las siguientes definiciones:

“[...] el tratamiento aeróbico o anaeróbico pueden contabilizarse como reciclados si el tratamiento genera compost o digestato que, llegado el caso tras una transformación, se utilice como material, sustancia o producto reciclado en un tratamiento de los suelos que produzca un beneficio a la agricultura o una mejora ecológica de los mismos.” [30]

“«Reciclado»: toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno;” [14]

La valorización energética de los residuos, y en particular de los RSU, ofrece un método eficiente y confiable de tratamiento de residuos para el cual no existe otra alternativa hacia una economía circular. Después de haber hecho lo posible para reducir la generación de residuos a través de la prevención y el aumento de la reutilización y reciclaje, se necesita infraestructura básica para el tratamiento de los RSU [28]. Las diferentes tecnologías de valorización energética serán explicadas en el apartado 3.3.

La Tabla 4 presenta una descripción de los términos de la gestión de residuos de acuerdo con la jerarquía de residuos anteriormente explicada. Se puede ver que la gestión de recursos es el término más amplio ya que se trata del proceso de gestión de materiales y energía a lo largo de su ciclo de vida con el objetivo de maximizar la eficiencia y minimizar la pérdida de material. A diferencia de la gestión de residuos, que se ocupa exclusivamente de la fase final de la vida útil, la gestión de los recursos abarca una variedad de acciones. Los residuos ya no están en primer plano, sino cualquier acción que resulte en un proceso del ciclo de materiales.

Tabla 4. Descripción de los términos de gestión de residuos según la jerarquía de residuos y la Directiva Marco de Residuos de la UE [22, 27]

Término		Descripción	Acciones/ejemplos
Gestión de recursos	Prevención de residuos	Cualquier acción establecida antes de que un producto se haya convertido en residuo. Tiene como objetivo evitar o reducir el desperdicio en términos de cantidad y calidad.	<u>Evitar</u> el uso de utensilios desechables (p. ej., embalaje). <u>Ecodiseño</u> : desarrollo de productos que producen menos residuos (p. ej., productos de larga duración). <u>Producción más limpia</u> : pretende una aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada aplicada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia general y reducir los riesgos para las personas y el medio ambiente.
	Prevención		

Gestión de residuos	Preparación para la reutilización	Cualquier operación por la cual los productos o componentes que no son residuos se usan nuevamente para el mismo propósito para el que fueron concebidos.	<p><u>Reutilización directa</u> de productos completos (p. ej., ropa de segunda mano).</p> <p><u>Preparación para la reutilización</u>: reutilización después de limpiar o reparar (p. ej., neumáticos).</p> <p><u>Reutilización de componentes</u>: solo reutilización de partes de productos (por ejemplo, reutilización de un alternador de un vehículo al final de su vida útil) incluyendo limpieza o reparación si es necesario.</p>
	Reciclado	Cualquier operación de recuperación por la cual los residuos son reprocesados en productos, materiales o sustancias ya sea para el propósito original u otros.	<p><u>Reciclado del producto</u>: proceso en el que se mantenga la constitución física y química del producto, pero se use para otro propósito (p. ej., utilizar neumáticos o botellas de vidrio como material de construcción).</p> <p><u>Reciclado de materiales</u>: proceso en el que se destruye la constitución física, pero no la química (p. ej., reprocesamiento de metales, o reciclado de fertilizantes de residuos alimenticios por digestión o compostaje).</p> <p><u>Reciclado de materia prima</u>: proceso en el que la constitución física, así como la química de un material, se vuelve a procesar en sus componentes originales (p. ej., despolimerización).</p> <p><u>Downcycling</u>: proceso de reciclado que da como resultado un producto con una calidad considerablemente menor que la original (p.ej., plásticos reciclados).</p>
	Otra recuperación	Cualquier operación mediante la cual los residuos cumplen una función útil al reemplazar otros materiales .	<p><u>Recuperación térmica</u>: incineración con una tasa de recuperación de energía alta, gasificación, pirólisis.</p> <p><u>Digestión</u>: producción de biogás a partir de residuos alimenticios.</p>
	Eliminación	Cualquier operación que no sea de recuperación.	<p><u>Incineración</u> sin o con baja tasa de recuperación energética.</p> <p><u>Vertederos controlados</u>.</p>

3.1.4.1. Los vertederos y los RSU

Antiguamente, se abandonaban los residuos que ya no tenían utilidad en vertederos incontrolados, depósitos que carecen de medidas apropiadas para el vertido. Hoy en día, se considera totalmente inadmisibles debido a la peligrosidad y al grave atentado para el medio ambiente (incendios, contaminación de aguas, generación de gases, enfermedades y proliferación de insectos y roedores) y se ha sustituido por el vertedero controlado. Aun así, el vertido controlado no está exento de inconvenientes ya que posee los siguientes [31]:

- La producción de lixiviados: se trata de líquidos originados por la descomposición de los propios residuos junto con el agua de lluvia o corrientes superficiales. Alcanzan grados de contaminación muy altos, especialmente si contienen metales pesados.
- El impacto visual: se minimiza mediante la instalación de barreras vegetales y la adecuación de los accesos, las instalaciones y las infraestructuras al medio circundante.
- La generación de gases: la descomposición o fermentación anaeróbica de la materia orgánica genera diversos gases inflamables como, por ejemplo, el metano el cual es combustible, explosivo y contaminante. Es posible aprovechar energéticamente el biogás mediante su recogida y combustión; y es una práctica habitual en las instalaciones más modernas. Este proceso viene ilustrado a continuación en la Ilustración 7.

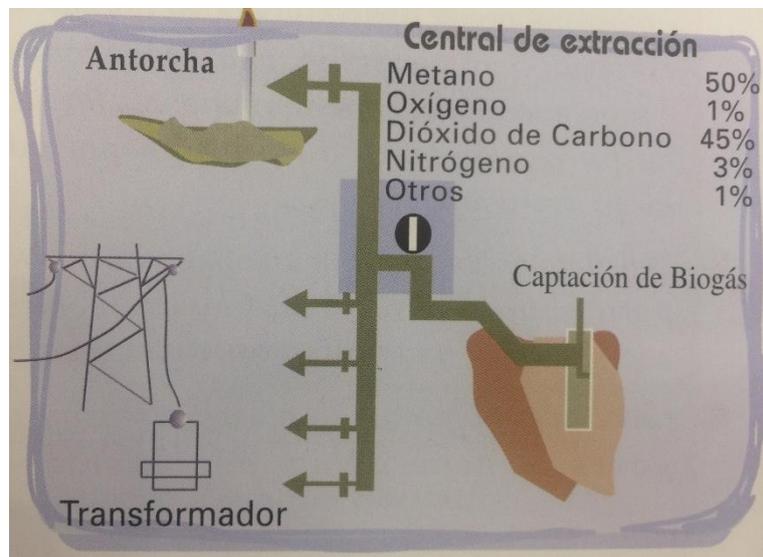


Ilustración 7. Mecanismo de aprovechamiento del biogás del vertedero [31]

- Los olores: para minimizarlos, es necesario establecer una distancia mínima de 2 km a las poblaciones cercanas.
- Las posibles plagas de animales: para evitar dicho problema se suelen utilizar ultrasonidos y se instalan vallas para impedir su paso.
- Los ruidos: generados casi exclusivamente por la maquinaria y el trasiego de vehículos.

Según la configuración del terreno, el depósito de los residuos en un vertedero controlado se puede realizar de las siguientes formas más representativas [31]:

- En trinchera: posee una estructura de zanja donde se hace la compactación y se aprovecha la tierra obtenida en la excavación para recubrir la zanja.
- En capa o área: los residuos se extienden, Trituran y compactan distribuyéndolos sobre la superficie del terreno en capas de 1 a 2 m de altura. El recubrimiento necesario se suele transportar.

- En vaguada o depresión: los residuos se depositan en vaguadas, barrancos o en canteras abandonadas. Es necesario disponer de material de cubrición.

El biogás se genera, habitualmente, en vertederos mediante la digestión anaerobia de materia orgánica. Este proceso está significativamente extendido, pero se espera una tendencia decreciente debido a las políticas de la UE respecto a la cantidad y contenido de los residuos depositados en los vertederos [32].

3.1.5. Requerimientos de la UE

La gestión de residuos es un campo complejo que va más allá de la prevención, reutilización, reciclado, valorización y eliminación. Se trata de un ámbito más amplio que incluye la necesidad de desarrollo socioeconómico, regulaciones gubernamentales y políticas de gestión de recursos. Se trata de proteger, preservar y mejorar la calidad del medio ambiente, la salud humana, garantizando una utilización prudente y racional de los recursos naturales, promoviendo, al mismo tiempo, una economía más circular [13].

La Comisión Europea expresó que la economía de la UE actualmente pierde una cantidad significativa de materias primas potenciales que se encuentran en los flujos de residuos. Solo una parte limitada (29%) de los RSU generados en la UE en 2016 fueron reciclados, mientras que el resto fueron vertidos (24%), incinerados (28%) o compostados (16%). La categoría de otros tratamientos constituye el 3% y es la diferencia entre la cantidad total de residuos generados y las cantidades recicladas, vertidas, incineradas y compostadas [18]. Se pueden visualizar gráficamente dichos datos en la Ilustración 8, donde se muestra la cantidad de RSU generados en la UE-28 y la cantidad de residuos por categoría de tratamiento (vertedero, incineración, reciclaje, compostaje).

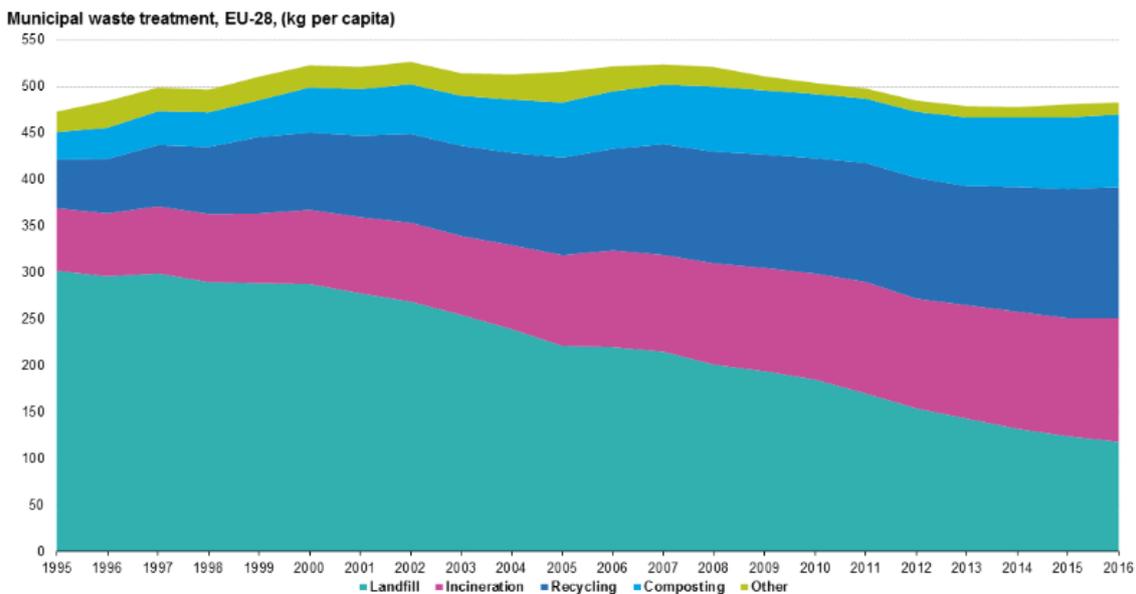


Ilustración 8. Cantidad de RSU generados entre 1995 y 2016 por tipo de tratamiento en kg por persona [18]

De esta manera, se comprueba que la UE pierde oportunidades significativas para recuperar la mayor cantidad de recursos posible y mejorar la transición hacia una

economía circular. Es imprescindible establecer objetivos ambiciosos para los Estados miembros. Por ello, el Parlamento Europeo instó a la Comisión a mejorar la legislación sobre residuos, desempeñando un papel esencial en la transición de la UE hacia una economía circular. En mayo de 2018, el Parlamento Europeo y el Consejo llegaron a un acuerdo sobre la revisión de las cuatro directivas clave de residuos. Se modificaron los objetivos de la reutilización y el reciclado de los RSU (60% para 2030 y 65% para 2035); los objetivos del vertido de los RSU (10% para 2035); y los objetivos del reciclaje de todos los residuos de envases (70% para 2030). Además, han concordado que se debe fortalecer la implementación de la jerarquía de residuos de las siguientes maneras: “

- a) *Ampliando el alcance de las medidas requeridas a los Estados miembros para la prevención de residuos, incluyendo el desperdicio de alimentos*
- b) *Introduciendo disposiciones para evitar la contaminación de materias primas secundarias*
- c) *Especificando los requisitos relacionados con los programas de prevención de residuos” [33]*

Por otro lado, se deben hacer obligatorios los esquemas de responsabilidad del productor para el envasado de productos hasta 2024; se refuerzan los requisitos relacionados con la recogida selectiva de residuos, requiriendo la recogida separada de los residuos biológicos para 2023, y de textiles y residuos peligrosos para 2025. También se requiere que la Comisión examine la oportunidad de fortalecer, para 2024, los requisitos del envasado, revisar la directiva sobre los vehículos al final de su vida útil; y la posibilidad de introducir objetivos para la reutilización y la reducción de los residuos, objetivos cuantitativos sobre la reutilización de envases, así como objetivos de reciclaje de residuos de envases. En la siguiente tabla se enumeran los diferentes objetivos de gestión de residuos que están actualmente vigentes en toda Europa, establecidos tras el acuerdo del Parlamento Europeo y la Comisión (Tabla 5).

Tabla 5. Objetivos de gestión de residuos propuestos por la Comisión con modificaciones del Parlamento [33, 34]

	2025	2030	2035
Proporción de RSU preparados para su reutilización y reciclaje	55%	60%	65%
Proporción de RSU vertidos	-	-	10%
Proporción de todos los residuos de envases preparados para su reutilización y reciclaje	65%	70%	-
Proporción de residuos de envases de plástico preparados para su reutilización y reciclaje	50%	55%	-
Proporción de desechos de envases de madera preparados para su reutilización y reciclaje	25%	30%	-
Proporción de desechos de envases de metales ferrosos preparados para su reutilización y reciclaje	70%	80%	-
Proporción de residuos de envases de aluminio preparados para su reutilización y reciclaje	50%	60%	-
Proporción de residuos de envases de vidrio preparados para su reutilización y reciclaje	70%	75%	-
Proporción de residuos de envases de papel y cartón preparados para su reutilización y reciclaje	75%	85%	-

Según la Oficina Europea de Medio Ambiente (EEB), la red de organizaciones ambientales más grande de Europa, las nuevas leyes y objetivos serán cruciales para ayudar a la transición de Europa hacia una economía circular, pero lamenta que los Estados Miembros hayan recortado casi todos los objetivos propuestos por un Parlamento Europeo más ambicioso [35].

Una buena estructura de gestión de residuos es una herramienta clave para que las autoridades de un Estado miembro apliquen los principios de la legislación de residuos de la UE a nivel nacional, regional y local. En el artículo 28 de la Directiva 2008/98/CE aparece lo siguiente:

“Los Estados miembros garantizarán que sus autoridades competentes establezcan, de conformidad con los artículos 1, 4, 13 y 16 uno o varios planes de gestión de residuos.

Estos planes, por separado o en combinación, cubrirán todo el territorio geográfico del Estado miembro.” [14]

Dichos planes deben incluir un análisis de la situación actual de la gestión de residuos, así como las medidas que deben tomarse con respecto a los pasos establecidos en la jerarquía de residuos: reutilización, reciclado, valorización y eliminación de los residuos. Además, el plan debe establecer una evaluación de cómo el plan contribuirá a la implementación de los objetivos de las directivas vigentes. [14]. La Comisión Europea puede emprender acciones legales contra los Estados miembros que incumplan las obligaciones de gestión de residuos.

Actualmente, en España está vigente el *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022* [36]. Cada Comunidad Autónoma posee su plan regional, siendo el de Cantabria el *Plan de residuos de la comunidad autónoma de Cantabria 2017-2023* [37].

Por otro lado, La Comisión Europea exige una reducción del 20% de las emisiones de dióxido de carbono para 2020 y un 40% en 2030 en comparación las emisiones de 1990 en todos los Estados miembros de la UE-28 [38]. Esto está impulsando el desarrollo de la producción de energía con bajas emisiones de dióxido de carbono.

3.1.6. Eco-eficiencia y sostenibilidad

En la Tabla 6 se muestra un análisis de los efectos negativos en los principales procesos de gestión y tratamiento de los RSU. Dichos efectos son diferentes para cada área afectada: aire, agua, suelos, paisajes, ecosistemas y zonas urbanas.

Tabla 6. Los efectos potenciales de los RSU y la gestión de los mismos [39]

	Vertederos	Compostaje	Incineración	Reciclado	Transporte
Aire	Emisión de CH ₄ y CO ₂ ; olores.	Emisión de CO ₂ ; olores.	Emisión de SO ₂ , NO _x , HCl, HF, COVNM, CO, CO ₂ , N ₂ O, dioxinas, dibenzofuranos y metales pesados (Zn, Pb, Cu, As).	Emisión de polvo.	Emisión de polvo, SO ₂ , NO _x ; derrame accidental de sustancias peligrosas.
Agua	Lixiviado de sales, metales pesados, compuestos orgánicos y biodegradables a la capa freática.		Deposición de sustancias peligrosas en aguas superficiales.	Vertido de aguas residuales.	Riesgo de contaminación de las aguas de superficie y subterráneas por derrames accidentales.
Suelos	Acumulación de sustancias peligrosas en el suelo.		Depósito de escorias, cenizas y chatarra en vertederos.	Depósito de los residuos finales en vertederos.	Riesgo de contaminación del suelo por derrames accidentales.
Paisajes	Ocupación del suelo, impide otros usos.	Ocupación del suelo, impide otros usos.	Impacto visual; impide otros usos.	Impacto visual.	Tráfico.
Ecosistemas	Contaminación y acumulación de sustancias en la cadena trófica.		Contaminación y acumulación de sustancias en la cadena trófica.		Riesgo de contaminación del suelo por derrames accidentales
Zonas urbanas	Exposición a sustancias peligrosas		Exposición a sustancias peligrosas	Ruido.	Riesgo de exposición a sustancias peligrosas por derrames accidentales; tráfico.

En el futuro, se espera que los países que están muy avanzados en su transición hacia una economía circular tengan una menor demanda de conversión de residuos en energía, debido a la prevención y la introducción de nuevas innovaciones en el ámbito del reciclaje. Sin embargo, la conversión de residuos en energía con recuperación de calor y electricidad todavía es un elemento esencial en un sistema sostenible de gestión de residuos, si se evalúa la capacidad de incineración con cuidado escrupuloso y se respeta la jerarquía de residuos. La recuperación de energía debe realizarse de forma energéticamente eficiente y respetuosa con el medio ambiente, consiguiendo una eco-eficiencia necesaria para un desarrollo sostenible [28, 40].

3.2. RSU Y LA ECONOMÍA CIRCULAR

A finales de 2015, la Comisión Europea adopta un paquete ambicioso y completo para avanzar hacia una economía circular y resolver la problemática de los residuos para los años venideros. Su objetivo es conseguir una economía más fuerte y circular en la que los recursos disponibles se utilizan de una manera más sostenible, eliminando la economía lineal actual. Las propuestas contribuirán a "cerrar el círculo" del ciclo de vida de los productos a través de un mayor reciclaje y reutilización, y traer beneficios para el medio ambiente y la economía, tal como se observa en la Ilustración 9. Los planes extraerán el máximo valor y el uso de todas las materias primas, productos y desechos, fomentando el ahorro de energía y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Las propuestas cubren el ciclo de vida completo de los productos: desde la producción y el consumo hasta la gestión de residuos y el mercado de materias primas secundarias [11]. Esta transición contará con el respaldo financiero de los Fondos Estructurales y de Inversión Europeos (Fondos EIE), que incluyen 5.500 millones de euros para la gestión de residuos. Además, contará con 650 millones de euros para el marco de Horizonte 2020 (el programa de financiación de la UE para investigación e innovación) y las inversiones en la economía circular a nivel nacional [9].



Ilustración 9. Ruta de la economía circular [36]

En los próximos años, será esencial mantener el impulso creado por la adopción del paquete de economía circular y por las medidas a todos los niveles para hacer de la economía circular una realidad con beneficios para todos los europeos. La ejecución coherente del Plan de Acción y una rápida adopción de las propuestas legislativas sobre residuos ayudarán a proporcionar instrucciones claras a los inversores y a apoyar la transición [9].

3.2.1. Papel de la economía circular

Se podría argumentar que la combustión de los RSU puede provocar un mayor despilfarro y reducir el reciclado para garantizar la alimentación regular de los incineradores. Algunas ONG como Zero Waste Europe (ZWE) declaran que las plantas de incineración no tienen un lugar en la economía circular ya que consideran que la quema de residuos es contraproducente para la UE y no debería ser apoyada [41]. Sin embargo, esta conclusión se hace únicamente en el contexto de la incineración. La Comisión Europea pretende aclarar el papel de la incineración en la economía circular en su comunicado:

"Los procesos de transformación de residuos en energía pueden desempeñar un papel en la transición a una economía circular, siempre y cuando se utilice la jerarquía de residuos de la UE como principio rector y las decisiones adoptadas no sean óbice para unos niveles mayores de prevención, reutilización y reciclado" [8].

Hay una visión bastante escéptica ya que a la Comisión le preocupa que, al aumentar la capacidad y la cantidad de plantas, el reciclaje se vea comprometido, lo que debilitaría la jerarquía de los residuos. La Comisión destaca que los países de UE deben tener en cuenta el riesgo de posibles "activos abandonados" al invertir en plantas de incineración. Las nuevas plantas deberían construirse siempre que la disponibilidad de materia prima se mantenga a lo largo de su vida útil (20-30 años) sin descuidar las obligaciones de recogida y reciclaje por separado [8].

Finalmente, se aconseja a los Estados miembros que eliminen progresivamente los regímenes de ayuda a la recuperación de energía a partir de residuos y que introduzcan o aumenten los impuestos sobre esto último. Además, se aconseja implementar una moratoria sobre las nuevas plantas y desmantelar las que han sobrepasado su vida útil. Por lo tanto, el mensaje de la UE es claro: la prevención y la reutilización de los residuos, el desarrollo de estructuras de recogida selectiva y la capacidad de reciclaje debe ser una prioridad [8].

Si bien hay cierta incertidumbre desde el punto de vista de la gestión de residuos, existe un enfoque diferente desde el punto de vista de las energías renovables. Es bien sabido la fracción biodegradable de los RSU se incluye en el concepto de "biomasa" y es una de las fuentes de energía renovables existentes, según la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [16]. En la propuesta más reciente del Parlamento y Concilio Europeos se fomenta el conjunto de la biomasa como fuente de energía renovable [42]. La 'basura' puede dejar de ser un problema y convertirse en un recurso valioso. Estadísticamente hablando, la biomasa y los residuos son las mayores fuentes de "energía renovable" en Europa, que representan el 63.1% del total de las fuentes de energía renovables. A continuación, se puede observar en la Ilustración 10 la producción total de energía primaria de la EU-28 en 2015 donde más de la cuarta parte (26,7%) se obtuvo de fuentes de energía primaria [43].

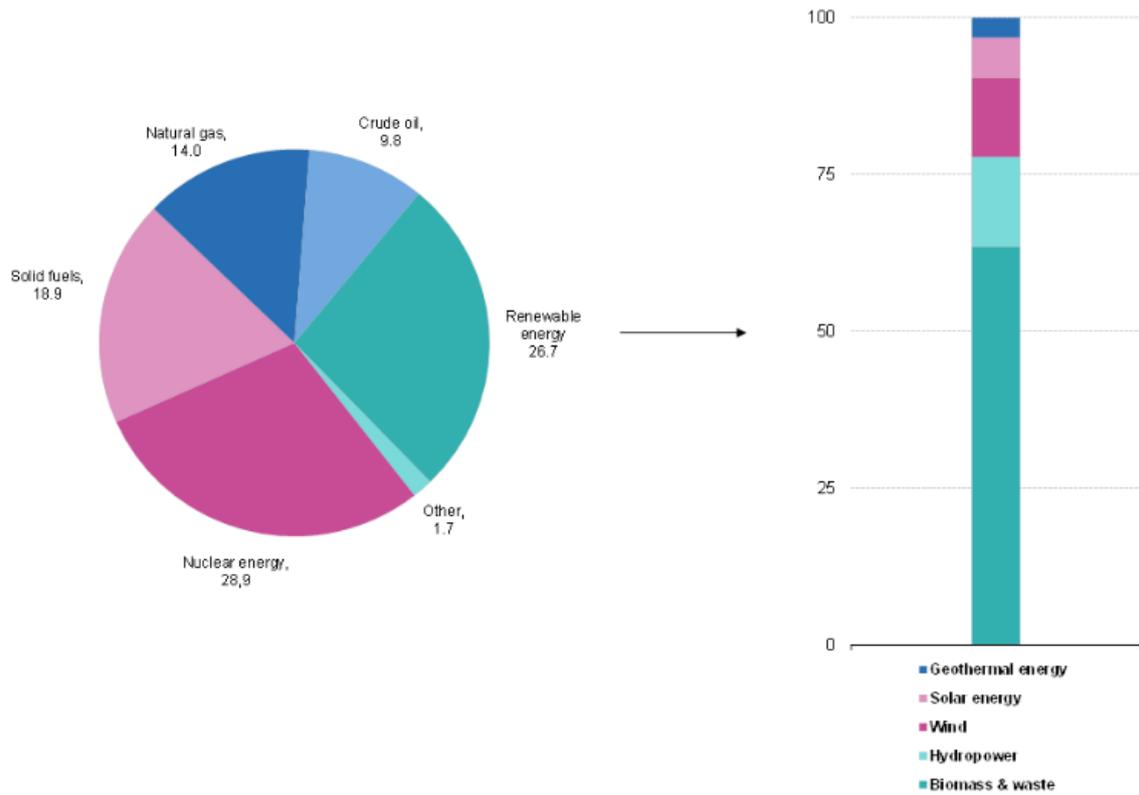


Ilustración 10. Producción de energía primaria de la EU-28 en 2015 [43]

El Parlamento Europeo ha marcado un objetivo de al menos el 30% del consumo total de energía procedente de fuentes de energía renovables para 2030. Este objetivo debe ser implementado por medio de objetivos nacionales individuales teniendo en cuenta la situación y el potencial de cada Estado miembro. Por lo tanto, la biomasa como fuente renovable permitiría a los Estados miembros cumplir el objetivo energético de la UE.

Al centrarse en el caso concreto de la valorización energética de los residuos, en la Ilustración 11, se ilustra como dicha valorización forma parte de la economía circular. A medida que se reemplazan los combustibles fósiles y se recuperan otros materiales, *Waste-to-energy* cumple el mismo propósito de alto nivel que muchas actividades de reciclaje. Por lo tanto, debe considerarse como una parte integrada de la economía circular. En la imagen, en blanco se muestra el material biogénico mientras que en azul oscuro está el material no biogénico. La traducción, realizada por el autor, aparece en las esquinas de la imagen por orden de apariencia.

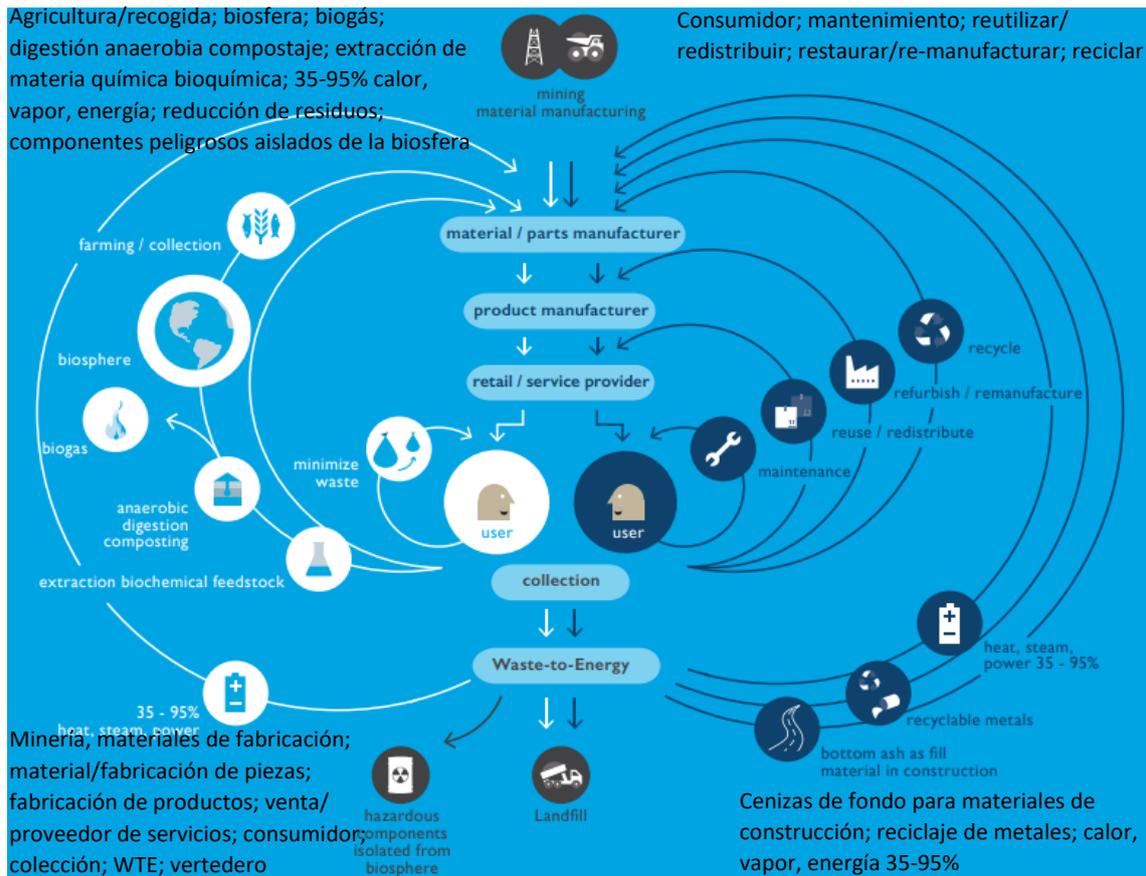


Ilustración 11. Valorización energética de los residuos como parte de la economía circular [44]

3.2.2. Tendencias e indicadores

Según la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), la gestión de residuos en los países de la OCDE está en “semáforo verde”, es decir, es un problema que está bien gestionado y ha habido mejoras significativas en la gestión durante los últimos años, pero los países deben seguir vigilantes. Sin embargo, la producción de RSU está en “semáforo naranja” ya que sigue siendo un reto, pero su gestión está mejorando, tal como se puede observar en la Ilustración 12. Si no hay más políticas ambiciosas las crecientes presiones sobre el medio ambiente podrían provocar daños irreparables en las próximas décadas. Se debe fomentar el uso eficiente de los recursos y estimular el desarrollo de la eco-innovación [45].

	[Semáforo verde]	[Semáforo naranja]	[Semáforo rojo]
Residuos y sustancias químicas peligrosas.	<ul style="list-style-type: none"> Gestión de residuos en los países de la OCDE. Emisiones de compuestos clorofluorocarbonados (CFC) en los países de la OCDE. 	<ul style="list-style-type: none"> Producción de residuos urbanos. Emisiones de compuestos clorofluorocarbonados (CFC) en los países en vías de desarrollo. 	<ul style="list-style-type: none"> Gestión y transporte de los residuos peligrosos. Gestión de residuos en los países en vías de desarrollo. Sustancias químicas en el medio ambiente y en los productos.

Ilustración 12. Prospectiva Medioambiental de la OCDE para el 2030

En cuanto a la perspectiva económica, la Oficina Europea de Medio Ambiente (EEB) asegura que mejores leyes de gestión de residuos podrían crear 800.000 empleos (uno

de cada diez propios de la reutilización), y 72 mil millones de dólares al año en ahorros en toda Europa. Los países de la UE también ahorrarían más de 420 millones de toneladas equivalentes de CO₂, lo que equivale a retirar cuatro de cada 10 automóviles de las carreteras europeas. Indudablemente, una reforma en la gestión de residuos aseguraría un impulso hacia la economía circular y supondría una gran oportunidad económica [46].

Centrándose en los mercados y la distribución, según la Asociación Internacional de los Residuos Sólidos (ISWA), el mercado de la electricidad ya se encuentra afectado por algunas fuentes de energía renovable que no pueden controlarse fácilmente como, por ejemplo, la energía solar fotovoltaica o la eólica. Esto último se puede comprobar en la Ilustración 13 donde el área blanca delimita la producción eólica de 2015, el área gris el consumo, la línea blanca es el pronóstico para 2020 y las áreas azules entre la línea blanca y el área gris indican una generación de electricidad eólica pronosticada que excede el consumo. Esto hace que la demanda, que no está cubierta por las energías renovables, varíe significativamente. La futura producción de electricidad debería ser más flexible [44].

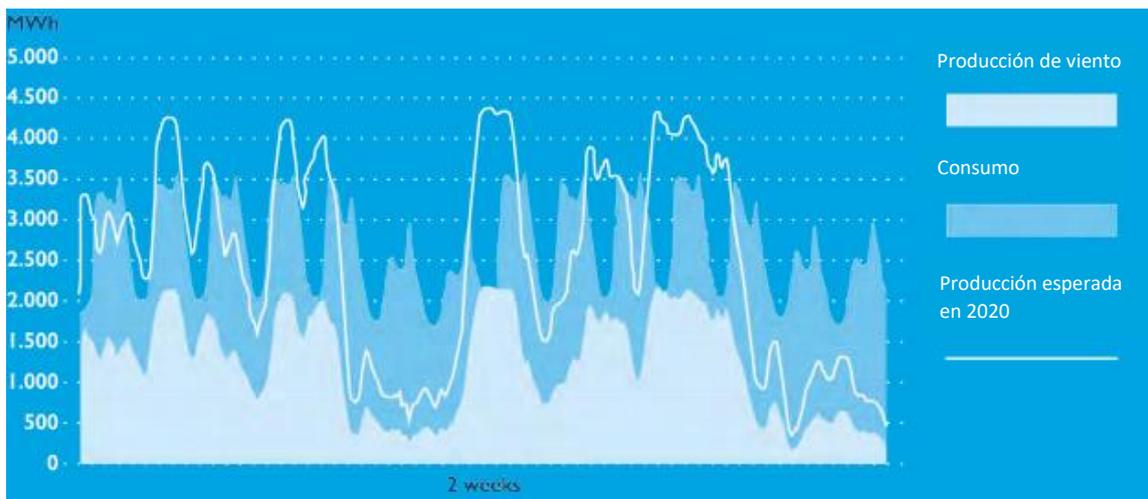


Ilustración 13. Producción de energía eólica en 2015 y el consumo de electricidad durante 2 semanas junto con la producción eólica prevista en el año 2020 [44]

La valorización energética de los RSU también enfrentará este desafío y tendrá que ajustar su operación para maximizar el valor de la producción de energía. Esto se podría conseguir estableciendo una mayor capacidad de tratamiento y/u operando menos horas para alimentar a la red en momentos en que otras fuentes de energía renovables no pueden cumplir con las demandas del mercado. Con el impulso hacia una reducción en el uso de combustibles fósiles y una creciente demanda energética mundial, otras fuentes de electricidad necesitarán expandir su producción. Para afrontar este cambio, maximizar la eficiencia será un objetivo clave, especialmente para las instalaciones de conversión de residuos en energía. Por lo tanto, se espera que las futuras instalaciones de valorización energética se desarrollen con una eficiencia energética sobresaliente y que las plantas más antiguas con una baja eficiencia energética sean reemplazadas por plantas modernas [44].

Las plantas de cogeneración tendrán una ventaja porque pueden parar la producción de electricidad cuando los precios de la electricidad son bajos. Además, las redes de calefacción urbana permitirán el almacenamiento del calor. Se espera un aumento en el precio de la electricidad en torno al 40-60% en los próximos 20 años, como se observa en la Ilustración 14, en cuyo caso, la recuperación de energía a partir de los residuos se vuelve aún más atractiva [44].

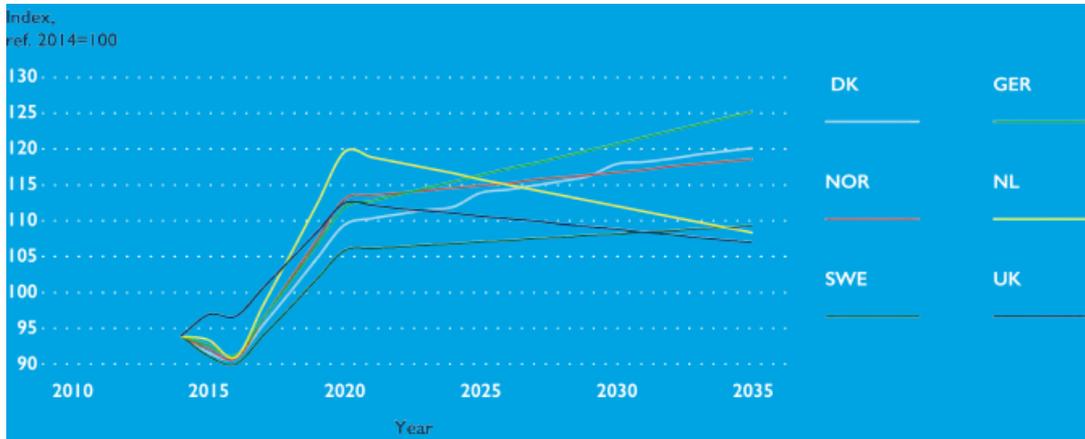


Ilustración 14. Predicciones de precios de la electricidad, precios constantes indexados con referencia al año 2014. El índice muestra el precio de la electricidad (por MWh) en porcentaje del precio del año 2014 [44]

Centrándose en el problema medioambiental, el vertedero ha sido históricamente la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector de los residuos al emitir grandes cantidades de metano. En segundo lugar, se encuentra el metano de las aguas residuales y el óxido nitroso. Sin embargo, el crecimiento de las emisiones de los vertederos ha disminuido durante los últimos años debido al aumento de las tasas de recuperación de metano y la disminución de los vertidos en la UE. En comparación con los vertederos, la incineración de los residuos y otros procesos térmicos evitan de mayor manera la generación de GEI, lo que resulta en emisiones menores de CO₂. Las emisiones actuales estimadas de GEI procedentes de la incineración de residuos son alrededor de 40 millones de toneladas equivalentes de CO₂ al año, lo que equivale a menos de una décima parte de las emisiones de CH₄ en los vertederos. Las tendencias futuras dependerán de las fluctuaciones de los precios de la energía, así como de los incentivos y costos para la mitigación de GEI [47].

La Tabla 7 indica que las emisiones totales históricamente han aumentado y continuarán aumentando. Un correcto seguimiento de las directrices de la economía circular, supondría una disminución o mitigación de dichas emisiones.

Tabla 7. Tendencias de las emisiones de GEI a nivel mundial derivadas de los residuos utilizando las directrices, extrapolaciones y proyecciones del inventario del IPCC de 2006 (MtCO₂-eq, redondeado) [47]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2030	2050
CH₄ vertedero	550	585	590	636	700	795	910	-	-
CH₄ aguas residuales	450	490	520	590	600	630	670	-	-
N₂O aguas residuales	80	90	90	100	100	100	100	-	-
CO₂ incineración	40	40	50	50	60	60	60	70	80

Emisiones GEI totales	1120	1205	1250	1345	1460	1585	1740		
------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	--	--

Los líderes en la industria de los residuos expresan que la economía circular brinda la oportunidad de extender su visión más allá del reciclaje y avanzar en el diseño y fabricación. Las empresas de gestión de residuos tienen la oportunidad de involucrarse en el diseño de productos y servicios y muestran cómo se puede recuperar y reutilizar los materiales secundarios para mejorar la rentabilidad de los nuevos modelos comerciales. Al tomar tales medidas, la industria de residuos estará mejor posicionada para asesorar sobre las mejores prácticas para los materiales a través de ciclos de reutilización, la identificación de oportunidades óptimas para extraer energía de estos materiales y el diseño de procesos estratégicos para la eliminación de materiales inutilizables [10].

Se espera un futuro en el que los comerciantes del mercado puedan comerciar materias primas secundarias tal como lo hacen actualmente con materias primas primarias. El mercado actual de materias primas secundarias ya vale 200 mil millones de dólares y se estima en 700-800 millones de toneladas. Está dominado por metales recuperados (casi 50% por valor) y papel (el papel recuperado ahora representa el 50% del mercado mundial del papel). Las oportunidades están creciendo para la recuperación de plásticos, materias primas de residuos electrónicos y textiles. Lo que está claro es que existen oportunidades significativas para explotar el mercado para capturar y usar materias primas secundarias [10].

3.2.3. Situación en la Unión Europea

Hay que destacar que Europa es el mercado más grande y sofisticado para tecnologías de valorización energética, representando el 47,6% de los ingresos totales del mercado en 2013. El aumento de los residuos industriales, junto con la estricta legislación de residuos en toda la UE, han sido los principales impulsores del mercado europeo. Suiza, Alemania, Suecia, Austria y los Países Bajos lideran la capacidad de instalación en Europa. [7]

La Ilustración 15 muestra los últimos datos de la generación de RSU por país expresada en kilogramos por persona. Se incluyen tanto los Estados miembros como los países de la Asociación Europea de Libre Comercio (AELC), es decir, Suiza, Noruega e Islandia. Para ilustrar el cambio producido en los diferentes países, el gráfico cubre solo los años 2005 y 2016, pudiendo observar la media de la EU-28 para su comparación con cada país individualmente. Conjuntamente, ha habido un ligero descenso en los RSU generados en 2016 en comparación con 2005, concretamente, 480 kg por habitante [18]. Este dato nos demuestra que la economía circular se ha adaptado de manera correcta, aun habiendo un largo camino que recorrer, ya que en muchos países ha habido un aumento en la generación.

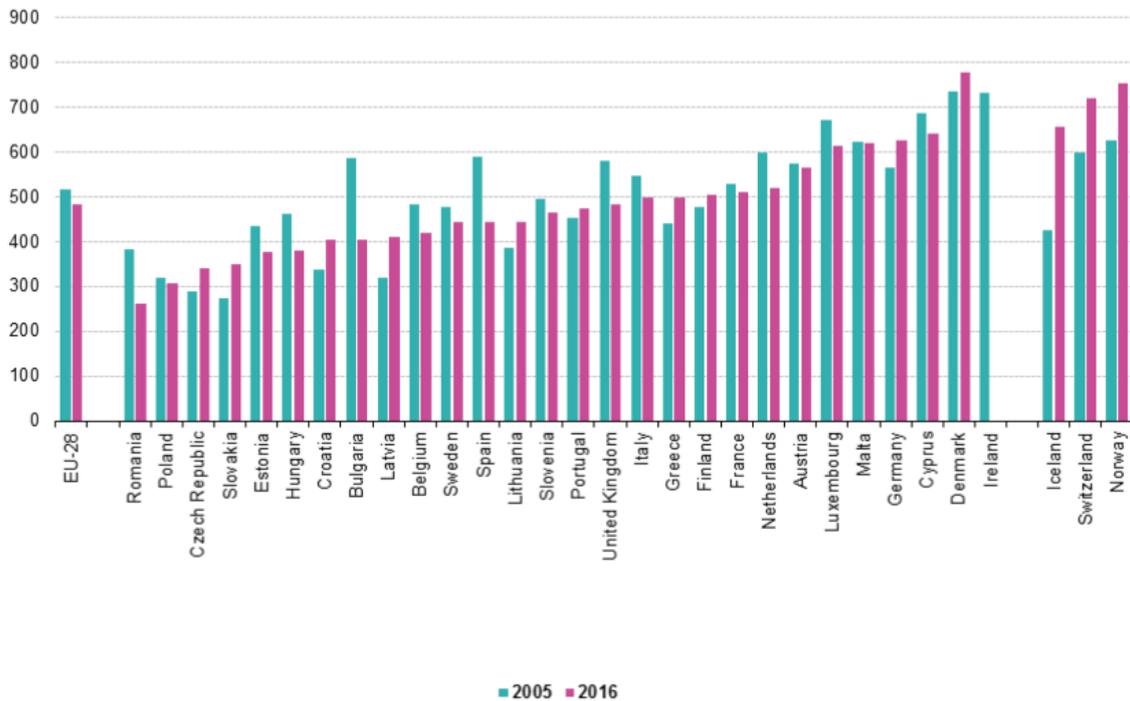


Ilustración 15. RSU generados por país en 2005 y 2016 en UE (kg per cápita) [18]

Tal como se observa en la siguiente Tabla 8, la generación total de RSU en 2016 varía considerablemente, que va desde los 261 kg per cápita en Rumania a 777 kg en Dinamarca. Dichas variaciones reflejan las diferencias en el consumo y la económica de cada país, pero también dependen de cómo se recogen y gestionan los residuos. En 21 de los 31 países, la cantidad de RSU generados en 2016 aumentó en comparación con 1995. Según las cifras de Eurostat, las tasas medias de crecimiento anual más elevadas se registraron en Grecia (2,4%), Malta (2,3%), Letonia (2,1%) y Dinamarca (1,9%). Bulgaria mostró la mayor reducción, con una disminución media anual del -2,5%, seguida de Rumania (-1,3%) y Eslovenia (-1,2%).

Tabla 8. RSU generados en EU y A en años seleccionadas y la diferencia de generación entre 1995 y 2016 [18]

	1995	2000	2005	2011	2016	1995-2016 (%)
EU-28	473	521	515	498	483	2,1
Bélgica	455	471	482	456	420	-7,7
Bulgaria	694	612	588	508	404	-41,8
Rep. Checa	302	335	289	320	339	12,2
Dinamarca	521	664	736	781	777	49,2
Alemania	623	642	565	626	627	0,6
Estonia	371	453	433	301	376	1,3
Irlanda	512	599	731	617	-	-
Grecia	303	412	442	503	498	64,4
España	505	653	588	485	443	-12,3
Francia	475	514	530	534	511	7,5
Croacia	-	262	336	384	403	-

Italia	454	509	546	529	497	9,6
Chipre	595	628	688	672	640	7,6
Letonia	264	271	320	350	410	55,1
Lituania	426	365	387	442	444	4,2
Luxemburgo	587	654	672	666	614	4,5
Hungría	460	446	461	382	379	-17,6
Malta	387	533	623	589	621	60,3
Holanda	539	598	599	568	520	-3,6
Austria	437	580	575	573	564	29
Polonia	285	320	319	319	307	7,9
Portugal	352	457	452	490	474	34,7
Romania	342	355	383	259	261	-23,7
Eslovenia	596	513	494	415	466	-21,8
Eslovaquia	295	254	273	311	348	18,1
Finlandia	413	502	478	505	504	22,1
Suecia	386	428	477	449	443	14,8
Reino Unido	498	577	581	491	483	-3
Islandia	426	462	516	495	656	53,9
Noruega	624	613	426	485	754	20,7
Suiza	600	656	661	689	720	20,1

La Tabla 9 muestra la cantidad de residuos municipales tratados en la UE-28 para algunos años seleccionados entre 1995 y 2016 por método de tratamiento, en kg per cápita.

Tabla 9. RSU vertidos, incinerados, reciclados y compostados en años seleccionados y la diferencia existente entre 1995 y 2016 [18]

	1995	2000	2005	2010	2016	1995-2016 (%)
Vertido	302	288	221	185	118	-59
Incineración	67	80	98	114	133	89
Reciclaje	52	83	105	124	141	166
Compostaje	30	49	59	69	78	161
Otros	22	24	33	12	13	-36

Aunque actualmente se estén generando más residuos en la UE, la cantidad total de residuos municipales vertidos ha disminuido significativamente. En el período de referencia (1995-2016), el total de RSU vertidos disminuyó en 85 millones de toneladas, o 59%, de 145 millones de toneladas (302 kg per cápita) en 1995 a 60 millones de toneladas (118 kg per cápita) en 2016. Por lo tanto, la tasa de vertido en comparación con la generación disminuyó del 64% en 1995 al 24% en 2016. Como resultado, la cantidad de residuos reciclados aumentó de 25 millones de toneladas (52 kg per cápita) en 1995 a 72 millones de toneladas (141 kg per cápita) en 2016 a una tasa anual promedio del 5,2%. Los residuos municipales reciclados subieron del 11% al

29%. La recuperación de material orgánico mediante compostaje ha crecido con una tasa anual promedio del 5,1% de 1995 a 2016. La incineración de residuos también ha crecido constantemente, aunque no tanto como el reciclaje y el compostaje. Desde 1995, la cantidad de residuos municipales incinerados en la UE aumentó en 34 millones de toneladas o 112% y representó 68 millones de toneladas en 2016. Los RSU incinerados pasaron de 67 kg per cápita a 133 kg per cápita [18]. Se pueden apreciar dichos cambios en el gráfico de Eursotat de la Ilustración 8, anteriormente incluida.

En la siguiente Ilustración 16, publicada por ISWA, se observa, de forma más visual, las tendencias que ha seguido la UE en cuanto al vertido, la incineración y el reciclaje y compostaje de cualquier tipo de residuos. Mientras que las dos últimas han aumentado considerablemente entre 2001 y 2016, el depósito de residuos en vertederos ha disminuido un 31%, lo que se debe, en parte, a una buena aplicación de los principios de la economía circular. Se espera un mayor aumento de dichos tratamientos ya que los Estados miembros deben cumplir determinados objetivos de gestión de residuos que están actualmente vigentes en toda la UE y tienen como propósito la consecución de una economía más circular.

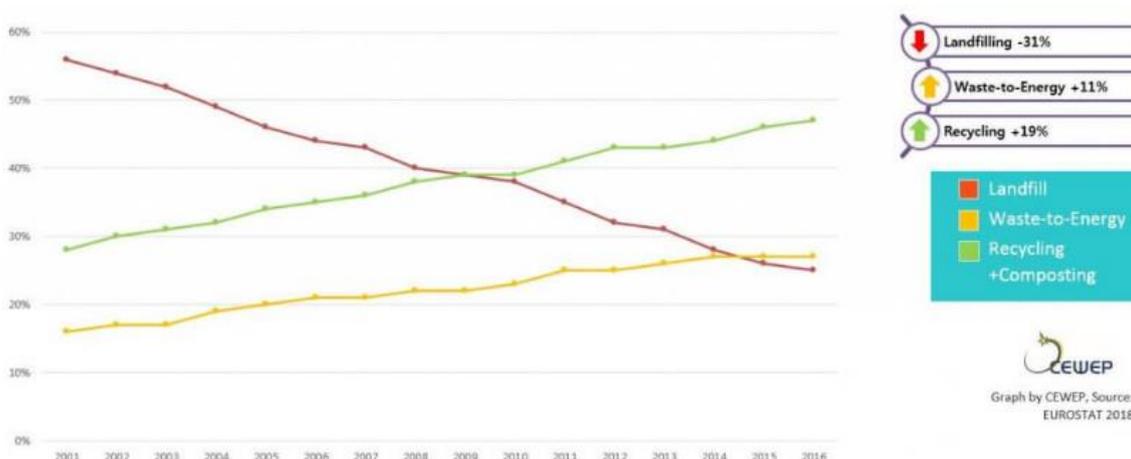


Ilustración 16. Tratamiento de los RSU entre 2001 y 2016 [48]

Sin embargo, doce Estados miembros de la UE vertieron más del 50% de sus residuos municipales en 2016 y tienen poca o ninguna capacidad de incineración. La UE en su conjunto sigue vertiendo más de 72 millones de toneladas de residuos municipales cada año, lo que equivale a un 27% del total [18]. La Comunicación “El papel de la transformación de los residuos en energía”, publicada por la Comisión Europea en mayo de 2015 para el impulso de la economía circular, debería abordar esta cuestión, pero no la ha conseguido del todo [40].

El siguiente mapa (Ilustración 17), elaborado por CEWEP (Confederación de Plantas Europeas de Valorización Energética), presenta la capacidad de conversión de residuos en energía en la UE en 2015. Informa sobre el número de plantas, en azul, y la cantidad de residuos tratados en millones de toneladas, en rojo, por cada país. En total hay casi 500 plantas en 23 países europeos, miembros de CEWEP [49].

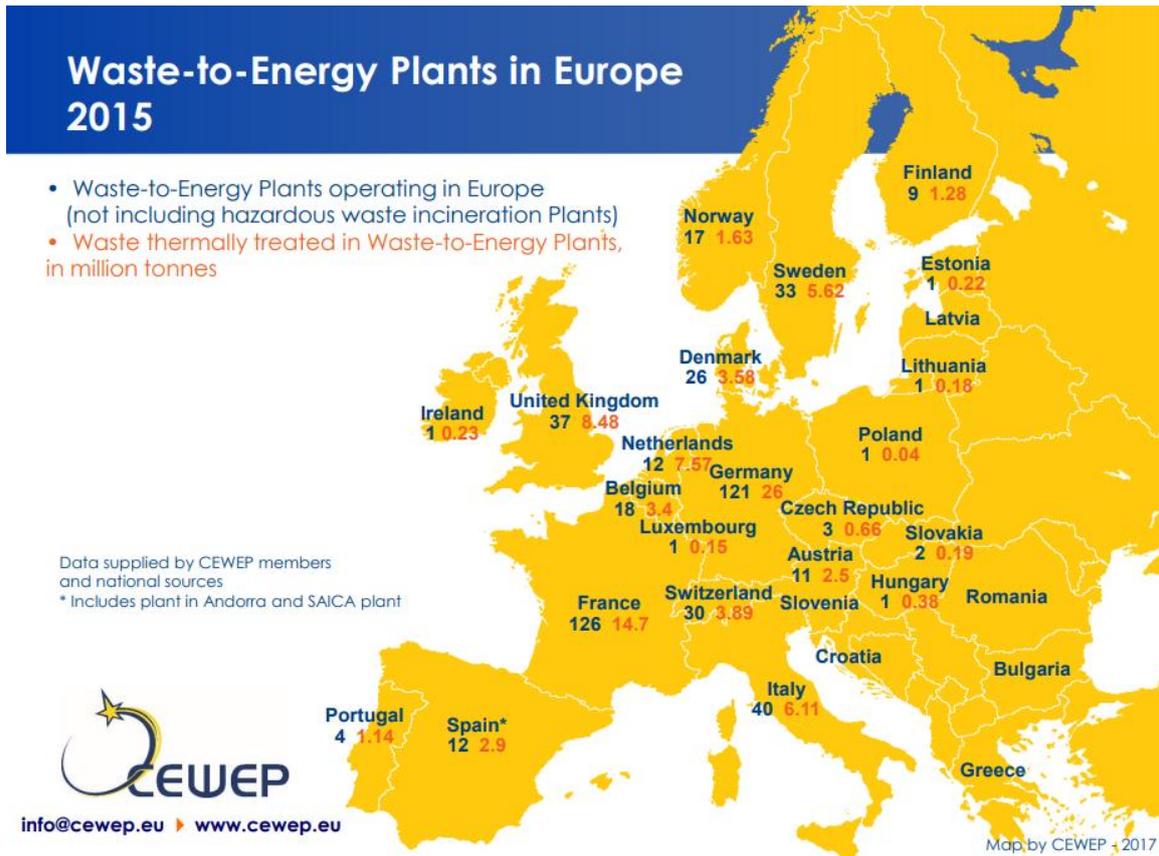


Ilustración 17. Mapa de las plantas de incineración presentes en la UE en 2015 [49]

Se podría concluir que, aquellos países que han obtenido mayores tasas de reciclado (Alemania, Bélgica, Suecia, Dinamarca y Holanda), son también los que poseen un número elevado de plantas de incineración. Hay que destacar el caso de Alemania que alberga 121 plantas, incinerando 26 millones de toneladas de residuos. Los países que combinan altas tasas de reciclaje y altas tasas de incineración son los que tienen los menores porcentajes de depósito de residuos en vertedero sin tratamiento. Es decir, la incineración juega un papel importante en los modelos de gestión de residuos más avanzados donde se han alcanzado tasas de reciclado muy elevadas, siguiendo la filosofía de la economía circular [50].

Al trazar los datos de países individuales de la UE en un triángulo de Venn (Ilustración 18), la posición de los diferentes países en términos de gestión de residuos se hace evidente. Los principales procesos de gestión de residuos se pueden clasificar en vertido, incineración, y reciclado (incluido el compostaje y la digestión). En la mayoría de los casos, la posición inicial es la esquina derecha, lo que significa que el 100% de los residuos terminan en vertederos. El objetivo final es llegar a la esquina izquierda, donde se recicla el 100% de los residuos y se evita por completo la incineración y el vertedero. La incineración es el objetivo intermedio y se puede encontrar en la esquina superior. Comúnmente, la evolución en la gestión de residuos sigue la dirección indicada por la flecha rosa, alejándose de la esquina del vertedero hacia el borde entre la incineración y el reciclaje [27].

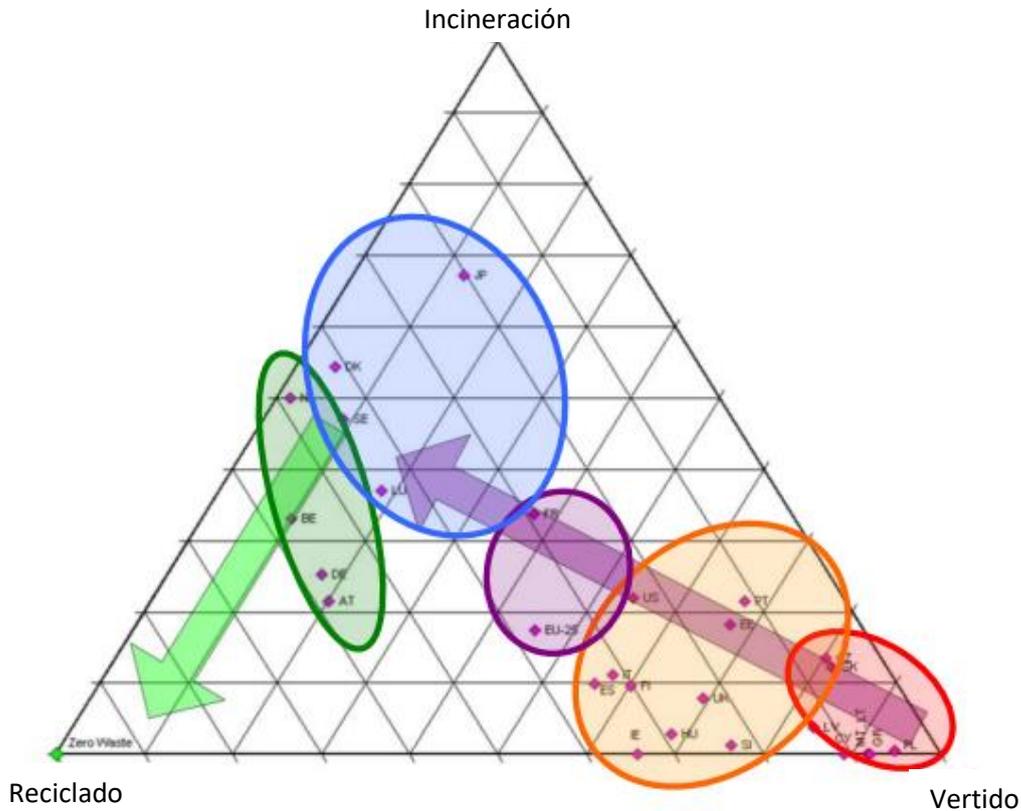


Ilustración 18. Evolución de la gestión de residuos hacia el reciclado [27]

En la región del vertido, entre 20 y 50% ("rosa"), se puede encontrar la media de la UE. Los países que están más avanzados en la gestión de residuos tienen un índice de vertederos por debajo del 20%. Estos países se pueden separar en dos grupos. Por un lado, el grupo "azul" se caracteriza por una alta proporción de incineración y, por lo tanto, exhibe una tasa de reciclaje inferior al 45%. Por otro lado, el grupo "verde" supera una tasa de reciclaje del 45%, por lo tanto, representa la mejor clase en gestión de residuos. Sin embargo, este grupo todavía tiene una gran distancia considerable al objetivo final [27].

Está claro que la gestión de residuos en la UE ha tenido un desarrollo tremendo en las últimas décadas. Los desafíos que se enfrentan hoy, sin embargo, también dejan en claro que la gestión tradicional de residuos no es suficiente para abordar los problemas relacionados con la prevención de residuos, la producción y el consumo sostenibles, y con la gestión de los recursos para la implementación de la economía circular, eliminando la gestión lineal.

3.2.4. Situación en España

En España, la situación con respecto al manejo de los RSU requiere mayor atención ya que se está quedando atrás si lo comparamos con la gestión de otros Estados miembros, según AEVERSU (Asociación de Empresas de Valorización Energética de RSU) [51].

Con una población de más de 46.500.000 de habitantes [52]. y un vasto territorio que abarca 505.370 km^2 [53], España es el segundo país más grande de la UE. Sin embargo, como podemos comprobar en la Ilustración 19, aún se envía el 57,3% de los residuos de competencia municipal sin tratar a los vertederos por lo que, en comparación con otros países europeos, es una cifra muy alta. Es uno de los países de la UE que menos residuos municipales reciclan, un 18,4%, y que más envía basura sin tratar al vertedero. La valorización energética es del 12,7%, porcentaje que debe ser aumentado si se quiere alcanzar un futuro sostenible y conseguir una economía más circular [51].

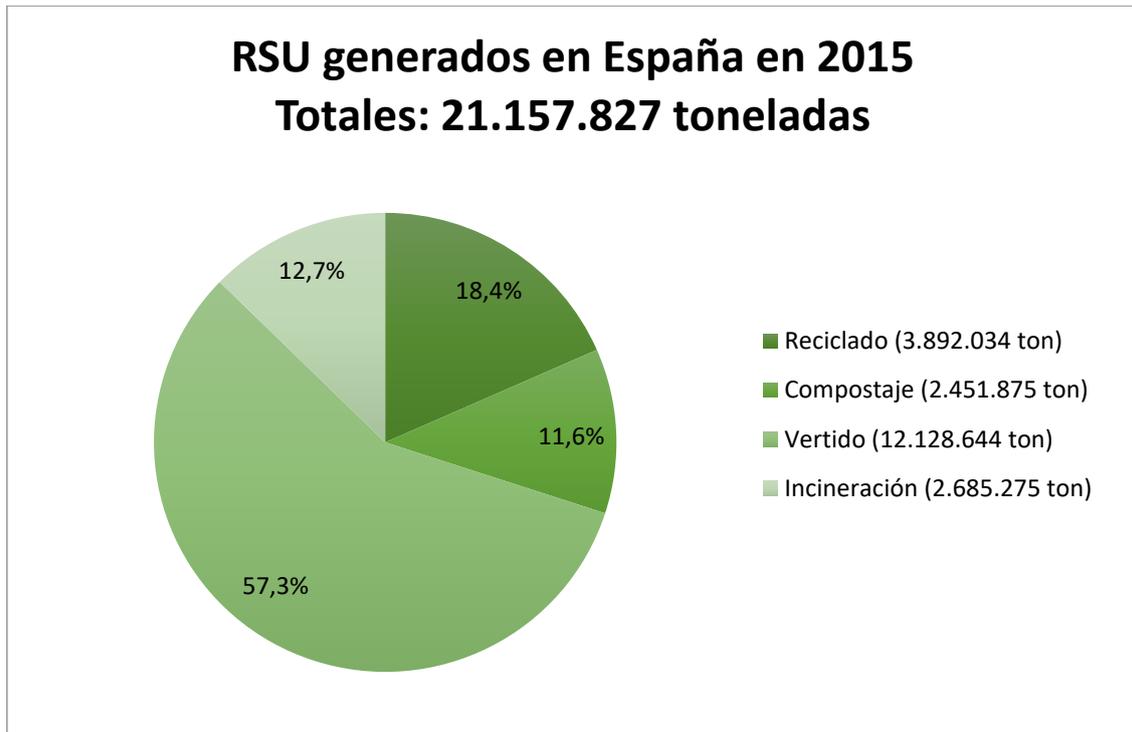


Ilustración 19. Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España. 2015 (Elaboración propia) [54]

Para AEVERSU, la causa de que en España aún haya tasas de vertido tan elevadas se debe a las pocas iniciativas en marcha que aprovechen la energía contenida en la fracción no reciclable de los residuos. Con una cifra de 466,4 kilogramos de residuos por habitante al año [55], se debe comenzar a concebir el residuo como un recurso y a considerar la valorización energética como una alternativa al vertedero. La valorización energética va de la mano del reciclaje que en España sólo constituye el 18,4%. Todos los países que han aumentado sus índices de reciclado, lo han hecho de forma paralela al aumento de la valorización energética en detrimento del vertido [51]. Para maximizar el reciclaje es importante introducir la recogida selectiva de manera más efectiva la cual solamente constituye el 16%, como se puede comprobar en la Tabla 10.

Tabla 10. Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España en 2015 clasificadas por tipo de recogida (Elaboración propia) [54]

Modalidad de recogida	Residuo	Ton/año	%
Residuos mezclados	Mezclas de residuos municipales	17.106.176	84
Residuos recogidos selectivamente	Papel y cartón	1.008.959	16
	Vidrio	9.129	
	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes	560.619	
	Residuos biodegradables de parques y jardines	229.300	
	Envases mezclados	592.353	
	Envases de vidrio	746.479	
TOTAL		20.253.015	100

En la estructura de producción eléctrica del año 2016, Ilustración 20, las energías renovables supusieron el 38,1% de la producción eléctrica bruta total. Dentro de la producción eléctrica renovable, cerca del 47% fue satisfecho por energía eólica y el 35% por hidráulica (exceptuando la generación eléctrica procedente de bombeo), el 13% fue satisfecho por la energía solar y el 5% restante por los recursos provenientes, por este orden, de la biomasa, el biogás y los residuos sólidos urbanos.

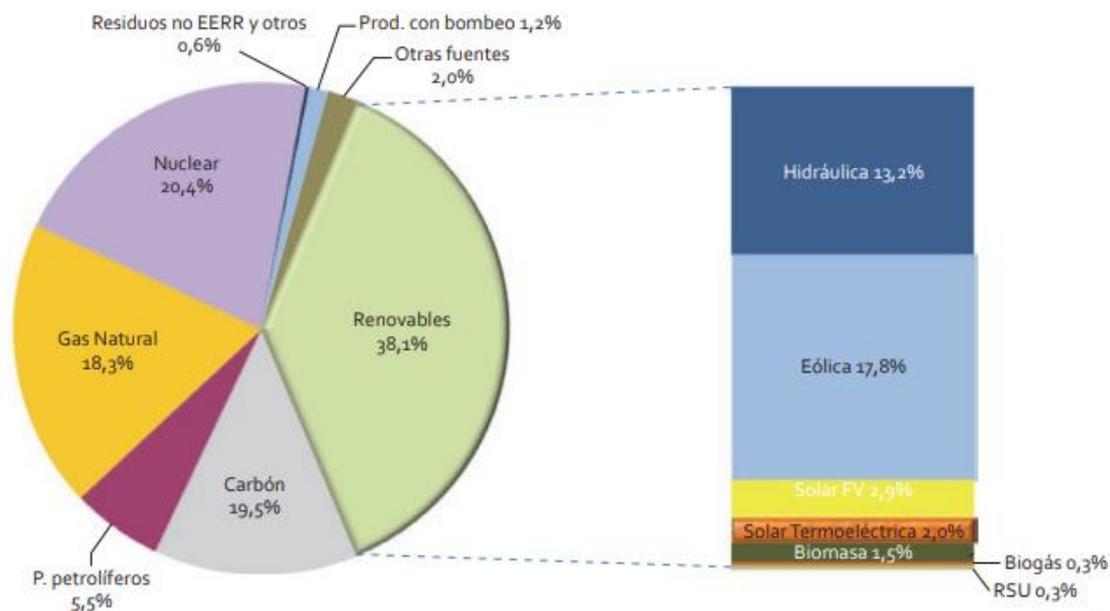


Ilustración 20. Estructura de generación eléctrica según tecnologías, 2016 [56]

Se puede observar en la Tabla 11, el detalle de la producción energética con recursos renovables durante 2016. Teniendo en cuenta tanto el sector eléctrico como los de la calefacción y la refrigeración y el sector del transporte, el 30% de la producción energética renovable procede de la biomasa, un 24% tiene su origen en el recurso eólico, las energías hidráulica y solar representa un 18% cada una, los biocarburantes aportan el 6% del total de la energía renovable producida y los residuos sólidos urbanos,

el biogás y la geotermia, con aportaciones en el orden del uno por ciento o inferiores, completan el 4% restante.

Tabla 11. Producción y consumo con fuentes renovables en 2016 [56]

Generación Eléctrica renovables en 2016			
	Potencia (MW)	Producción (GWh)	Producción Energía Primaria (ktep)
Hidráulica (1)	20.056	36.385	3.130
Biomasa	678	4.038	1.174
R.S.U.	234	734	243
Eólica	22.978	48.914	4.205
Solar fotovoltaica	4.897	8.064	693
Biogás	226	893	193
Solar termoeléctrica	2.300	5.579	2.190
TOTAL ÁREAS ELÉCTRICAS	51.370	104.607	11.827

Sector de la calefacción y la refrigeración		
	m² Solar t. baja temp.	Producción Energía Primaria (ktep)
Biomasa y residuos		4.011
Biogás		38
Solar térmica de baja temperatura	3.803.274	293
Geotermia		19
TOTAL ÁREAS TÉRMICAS		4.362

Sector del Transporte	
Biocarburantes (Transporte)	Consumo (ktep)
TOTAL BIOCARBURANTES	1.023

TOTAL ENERGÍAS RENOVABLES (KTEP)	17.213
CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA (KTEP)	123.484

(1): No incluye la producción con bombeo.

Actualmente existen en España 234 MW de potencia eléctrica que suponen el tratamiento mediante incineración de aproximadamente 2,7 millones de toneladas de RSU y que representa del orden del 13% de la generación total de residuos. Las tecnologías consideradas para generar energía a partir de estos residuos (horno de parrillas, lecho fluidizado y hornos cementeros) se consideran plenamente maduras. Se debe conseguir un desarrollo de los usos energéticos de los residuos acorde con los valores medios europeos y la jerarquía de gestión de residuos comunitaria, haciendo de la valorización energética un tratamiento habitual.

Según el Plan de Energías Renovables 2011-2020, “La principal propuesta para la consecución de los objetivos es aumentar la formación e información tanto entre las administraciones públicas como entre la sociedad, de forma que se eliminen barreras existentes hoy día sobre opciones de gestión de residuos que han de ser prioritarias al depósito en vertedero.” [50] Utilizando las tecnologías actualmente disponibles, se puede conseguir una correcta gestión de los residuos y prescindir de los combustibles fósiles como el carbón o el gas natural. Esto conlleva a generar la energía de la economía circular que intenta evitar cualquier tipo de residuos.

Para conseguir reducir el uso del vertedero en España y llevarlo a las cotas ya existentes en los países de la UE más avanzados en la gestión de residuos, será necesario el desarrollo del resto de opciones, valorando la jerarquía de residuos y las limitaciones de emisiones. Según ISWA, en la actualidad existen en España 12 incineradoras, distribuidas de la siguiente manera (Ilustración 21):

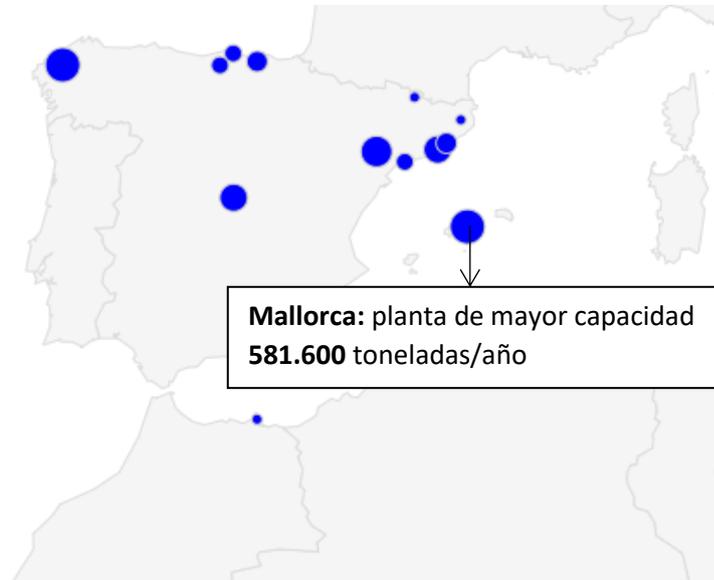


Ilustración 21. Mapa de las plantas de incineración presentes en España en 2015 [49]

En el mapa anterior podemos observar 12 instalaciones, sin embargo, la incineradora de Aragón valoriza energéticamente biomasa forestal y no se va a tener en cuenta en esta clasificación. Las 11 incineradoras de RSU, pertenecientes a AEVERSU aparecen en la siguiente Tabla 12, con la excepción de la planta de incineración de Andorra que no se considera en esta lista al no pertenecer a España. Se muestra, para cada planta, su operador, el año de puesta en marcha, la capacidad de la planta y los residuos incinerados, así como el tipo de horno utilizado para la combustión, según los últimos datos de ISWA.

Tabla 12. Plantas de incineración existentes en España [57, 58, 50]

Ubicación	Operador	Año de puesta en marcha	Capacidad (ton/h)	Residuos Incinerados (ton)	Tipo de combustión
Cantabria (Meruelo)	TirCantabria	2006	12	115.977	Parrilla móvil
Melilla	Remesa	1996	4,5	41.771	Parrilla móvil
Tarragona	Sirusa	1991	9,6	139.991	Parrilla móvil
Cerceda	Sogama	2002	23	563.363	Combustión de lecho fluidizado
Barcelona	Tersa	1975	15	368.799	Parrilla móvil
Madrid	TirMadrid	1997	9,17	314.035	Combustión de lecho fluidizado
Mallorca	Tirme	1997	18,75	581.600	Parrilla móvil

Gerona	Trargisa	1984	3	22.035	Parrilla móvil
Mataró	Mataró	1994	10	168.913	Parrilla móvil
Bilbao	Zabalgardi	2005	8,3	221.664	Parrilla móvil

Según AEVERSU, España precisaría 18 incineradoras para gestionar los residuos que genera y disminuir la cantidad que se lleva a los vertederos. Consideran que no existe industria con controles más exigentes que la valorización energética e inciden en la importancia de debatir el modo de verter menos [59].

La política de residuos tiene una incidencia muy importante en otras políticas ambientales, en particular, en la de lucha contra el cambio climático, en la de protección de las aguas continentales y en la de protección y conservación del medio ambiente marino. La contribución de los residuos al Cambio Climático es pequeña en relación a la de otros sectores (en el año 2017 fue un 4% de las emisiones de GEI, lo que se muestra en la Ilustración 22) y aún se puede reducir de forma significativa. En el entorno de los residuos, la disminución de GEI debe tener en cuenta que los distintos materiales que componen los residuos tienen un comportamiento diferente cara a la emisión de GEI y en consecuencia las medidas de reducción que se pueden proponer son diferentes. Se debe por tanto reducir las actividades emisoras, fomentar las actividades que secuestran carbono y valorar la disminución de emisiones asociadas a tratamiento y transporte de residuos [60].

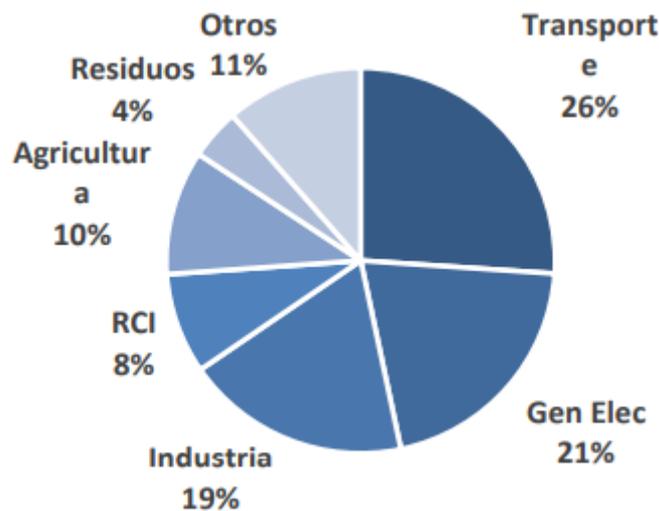


Ilustración 22. Emisiones 2017 por sectores en España [61]

La “Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental” informa sobre los proyectos sometidos a la evaluación de impacto ambiental ordinaria regulada. Entre ellos se encuentran los proyectos de tratamiento y gestión de residuos que son los siguientes [62]:

- a) *Instalaciones de incineración de residuos peligrosos [...], de residuos y suelos contaminados, así como las de eliminación de dichos residuos mediante depósito en vertedero, depósito de seguridad o tratamiento químico [...].*

- b) *Instalaciones de incineración de residuos no peligrosos o de eliminación de dichos residuos mediante tratamiento físico-químico [...], con una capacidad superior a 100 t diarias.*
- c) *Vertederos de residuos no peligrosos que reciban más de 10 t por día o que tengan una capacidad total de más de 25.000 t, excluidos los vertederos de residuos inertes.*

3.3. TRANSFORMACIÓN Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RSU

Las opciones de prevención, reutilización, reciclaje y recuperación de la jerarquía de residuos no son mutuamente excluyentes y la recuperación de energía a partir de los residuos no es incompatible con el aumento de las tasas de reciclaje. Existe una amplia gama de tecnologías de pretratamiento y tratamiento térmico que han demostrado ser eficaces y están disponibles comercialmente en la UE y en todo el mundo. La selección de las tecnologías más sostenibles ambientalmente y comercialmente puede ser un desafío y representa una barrera para la inversión [17].

La **incineración** es el principal procedimiento para valorizar energéticamente los RSU en Europa. Sus instalaciones están obligadas a cumplir con las Directivas relativas a la incineración de residuos que establecen unos valores límites de emisión muy rigurosos y unas mediciones de emisiones al aire muy frecuentes. Para cumplir con dichos valores de emisión, es necesario el desarrollo de tecnologías de incineración y depuración de gases (adición de carbón activo granular, lechada de cal, reducción catalítica no Selectiva (SNCR) o reducción catalítica selectiva (SCR), filtros de mangas o precipitadores electrostáticos, etc.), mantener una correcta gestión y unas buenas condiciones de las instalaciones [50].

Si se trata del uso de combustibles procedentes de RSU o residuos industriales, la valorización energética se produce mediante la sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero, aunque hay otros sectores con potencial, como el papelero, cerámico, centrales térmicas, etc.). Los residuos pueden procesarse para obtener combustibles derivados de residuos (CDR) y combustibles sólidos recuperados (CSR). Un CDR es un combustible que se ha obtenido a partir de residuos peligrosos o no peligrosos, líquidos o sólidos. Por el contrario, los CSR son combustibles sólidos preparados sólo a partir de residuos no peligrosos para ser utilizados para recuperación energética en plantas de incineración o coíncineración [50].

3.3.1. Tecnologías disponibles

En diciembre de 2016, el Centro Común de Investigación (CCI) de la Comisión Europea publicó un informe titulado "*Hacia una mejor explotación del potencial técnico de la conversión de residuos en energía*". Este documento, además de informar sobre la conversión de residuos en energía, evalúa cada proceso y proporciona un análisis de su situación en el futuro y las posibles evoluciones y mejoras. Se realizó con el fin de recopilar información previa a la publicación de la comunicación del papel de

la transformación de los residuos en energía, facilitando la transición a una economía circular [17]. En dicha comunicación, se enumeran los procesos fundamentales de transformación de residuos en energía: “

- a) *Coincineración de residuos en instalaciones de combustión (p. ej., centrales eléctricas) y en la producción de cemento y cal*
- b) *Incineración de residuos en instalaciones especializadas*
- c) *Digestión anaerobia de residuos biodegradables*
- d) *Producción de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos derivados de residuos*
- e) *Otros procesos, incluida la incineración indirecta tras una fase de pirólisis o gasificación”* [8]

Actualmente, existe un abanico cada vez mayor de flujos de residuos para los cuales la recuperación de energía es una alternativa al vertedero. La evolución de estas tecnologías también ha facilitado la forma en que los productos intermedios de la valorización energética se pueden utilizar. Ejemplos de ello son la conversión del biogás en un combustible para el funcionamiento de los automóviles o su inyección a una red de distribución de gas, o la conversión de los productos de pirólisis en productos químicos [17].

Los dos documentos anteriormente citados llegan a la conclusión de que la recuperación eficiente de energía a partir de desechos puede mejorar los beneficios ambientales en comparación con los vertederos, hacer una contribución importante a los objetivos de energía renovable de una UE que aspira a tener una economía circular y ayudar a proporcionar seguridad energética en todos los Estados miembros. Sin embargo, actualmente existe una brecha entre el potencial y la entrega de energía a partir de residuos, lo que está generando recursos valiosos para el relleno sanitario [17, 8].

En el siguiente esquema (Ilustración 23) se pueden observar las diferentes tecnologías de conversión de residuos actualmente disponibles. Cada tipo de combustión se divide, a su vez, en varios procesos que dan lugar a sus correspondientes productos. Aunque haya tres tipos de conversión de los RSU, este documento se centra en la conversión termoquímica mediante la incineración de los residuos.

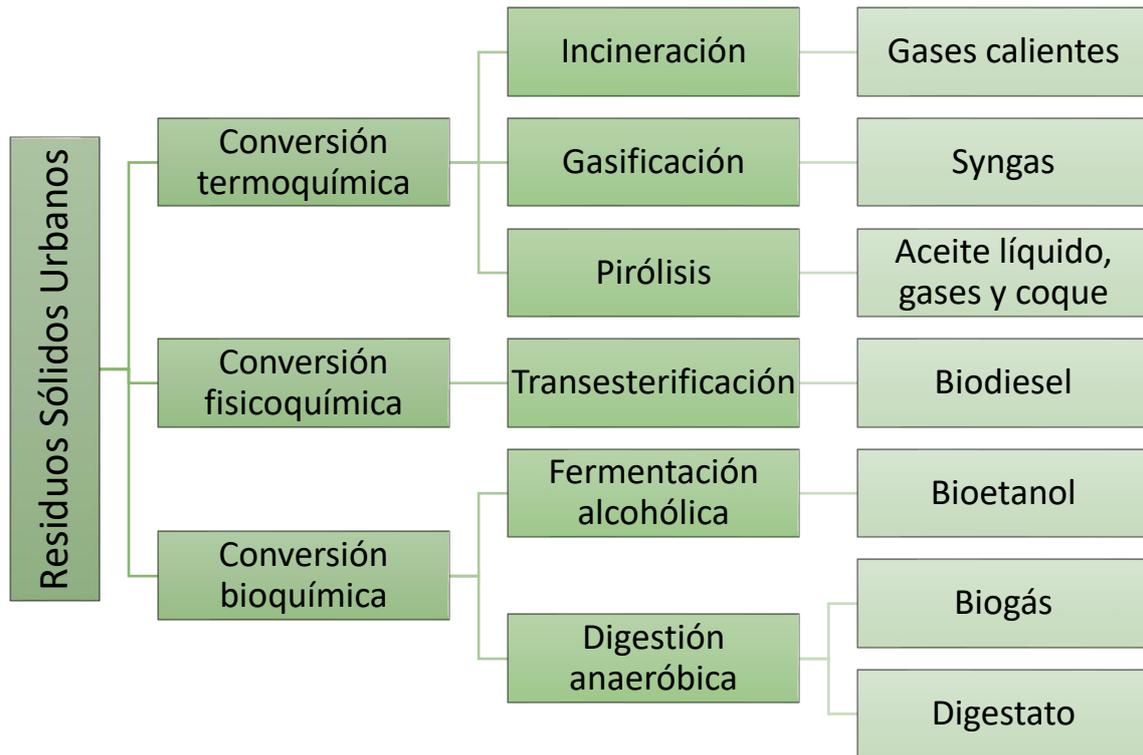


Ilustración 23. Tecnologías disponibles para la transformación y la valorización energética de la biomasa (elaboración propia) [17, 63, 64]

3.3.1.1. Tecnologías de conversión termoquímica

Mientras que la conversión termoquímica prevalece en algunos Estados miembros, menos del 5% de todos los residuos se utilizaron para la recuperación de energía en la UE-28 en 2012. El vertido sigue dominando la gestión de residuos en muchos países de la UE [17]. Como se puede observar en la Ilustración 23, aunque la incineración es el tratamiento térmico más ampliamente aplicado, existen otros dos tipos de tratamientos térmicos de residuos los cuales, en casi todos los casos, van seguidos de un proceso de combustión [63]:

- Incineración: combustión oxidativa completa
- Pirólisis: degradación térmica de material orgánico en ausencia de oxígeno
- Gasificación: oxidación parcial

Las condiciones de reacción para estos tratamientos térmicos varían, pero pueden diferenciarse aproximadamente estableciendo las características de la Tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de reacción típicas y productos de procesos de pirólisis, gasificación e incineración [63]

	Pirólisis	Gasificación	Combustión
Temperatura de reacción (°C)	250 - 700	500 - 1600	800 - 1450
Presión (bar)	1	1 - 45	1
Atmósfera	Inerte/nitrógeno	Agente de gasificación: O ₂ , H ₂ O	Aire
Productos obtenidos	H ₂ , CO, hidrocarburos, H ₂ O, N ₂	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂
Fase gaseosa:			
Fase sólida:	Ceniza, coque	Ceniza, escoria	Ceniza, escoria
Fase líquida:	Aceite de pirólisis y agua		

Aunque la incineración supone el tema principal de este documento, se describen también las otras dos técnicas de tratamiento térmico. Mientras que la incineración se aplica al tratamiento de una amplia variedad de residuos, la pirólisis y la gasificación se aplican a un rango de residuos más reducido y raramente se aplican a los RSU ya sean pretratados o estén sin tratar [63].

Hay que destacar que el uso del RSU como combustible proporciona muchos beneficios. Además de proporcionar electricidad local y calor para la calefacción urbana, se considera una fuente alternativa al combustible fósil y reduce enormemente los costes del transporte al tratar los residuos locales. Por otro lado, las tecnologías de valorización energética han experimentado mejoras en la eficiencia y efectividad en los últimos años [65].

3.3.1.1.1. Incineración

Las plantas de incineración están dedicadas al tratamiento térmico de residuos, con recuperación del calor de combustión, a través de la incineración directa por oxidación de residuos [17]. Los residuos urbanos incinerados pueden ser mixtos, basuras y residuos domésticos mixtos y generalmente sin tratar; o pretratados, residuos que han sido selectivamente recogidos, pretratados o preparados en algún modo. Pueden incinerarse en varios sistemas de combustión, como parrilla móvil, hornos rotativos y lechos fluidizados. El lecho fluidizado requiere que los residuos tengan un determinado tamaño de partícula, lo que generalmente requiere algún grado de pretratamiento. En la siguiente Tabla 14 aparece el nivel de aplicación de algunas técnicas de tratamiento térmico para los RSU, dependiendo de si están sin tratar o son pretratados [63]:

Tabla 14. Resumen de la actual aplicación con éxito de las técnicas de tratamiento térmico para los RSU sin tratar y pretratados en instalaciones específicas [63]

Técnica	RSU sin tratar	RSU pretratados y CDR
Parrilla-reciprocante	<u>Se aplica ampliamente</u>	<u>Se aplica ampliamente</u>
Parrilla-móvil	Se aplica	Se aplica
Parrilla-oscilante	Se aplica	Se aplica
Parrilla-rodillos	Se aplica	<u>Se aplica ampliamente</u>
Parrilla-refrigerada por agua	Se aplica	Se aplica
Parrilla más horno rotativo	Se aplica	Normalmente no se aplica
Horno rotativo	Normalmente no se aplica	Se aplica
Horno rotativo-refrigerado por agua	Normalmente no se aplica	Se aplica
Solera estática	Normalmente no se aplica	Normalmente no se aplica
Horno estático	Normalmente no se aplica	Normalmente no se aplica
Lecho fluidizado-borboteo	Se aplica raramente	Se aplica
Lecho fluidizado-circulante	Se aplica raramente	Se aplica
Lecho fluidizado-rotativo	Se aplica	Se aplica

Tal como se observa, los incineradores de parrilla se aplican ampliamente en la incineración de RSU sin tratar y mixtos. Aproximadamente un 90 % de las instalaciones europeas que tratan RSU utilizan parrillas. Otros residuos tratados mediante esta tecnología, muchas veces junto con los RSU, son los residuos comerciales e industriales no peligrosos, lodos de depuradora y algunos residuos clínicos [63].

Las tecnologías más avanzadas utilizadas en las plantas de incineración de residuos son las que aparecen a continuación. Cada uno de estos equipos de incineración ofrece diferentes ventajas e inconvenientes dependiendo de la situación (tipo de residuo a tratar, tamaño de la instalación, legislación aplicable, etc.). Una aplicación más amplia de dichas técnicas podría mejorar la energía actualmente recuperada de los residuos en más de una cuarta parte [17].

- **Parrilla móvil:** los residuos, recogidos de un búnker de almacenamiento, se dejan caer en una tolva y se empujan mecánicamente sobre la parrilla de combustión; la tasa de empuje se controla cuidadosamente para garantizar una alimentación uniforme. Se queman a una temperatura de 1000°C o más, con inyección de aire de combustión desde debajo de la parrilla. Los residuos son transportados hacia adelante y las cenizas de fondo resultantes caen en un baño de agua en el extremo de la parrilla. La combustión completa en fase gaseosa se logra mediante la inyección de aire secundario. El sistema garantiza que se alcance una temperatura de al menos 850 °C durante un mínimo de 2 segundos en la zona de combustión secundaria. Para lograr las condiciones de temperatura adecuadas para la alimentación de residuos se utiliza combustible auxiliar solo para la puesta en marcha y el apagado [17].

La *parrilla-rodillos* es una variación de la *parrilla de empuje*; en lugar de mover los residuos hacia adelante, la parrilla de rodillos pasa el desperdicio sobre una serie de rodillos giratorios inclinados. Esta forma de parrilla de combustión es mucho menos común que la parrilla móvil. En la Ilustración 24 aparecen los esquemas de algunas parrillas anteriormente mencionadas.

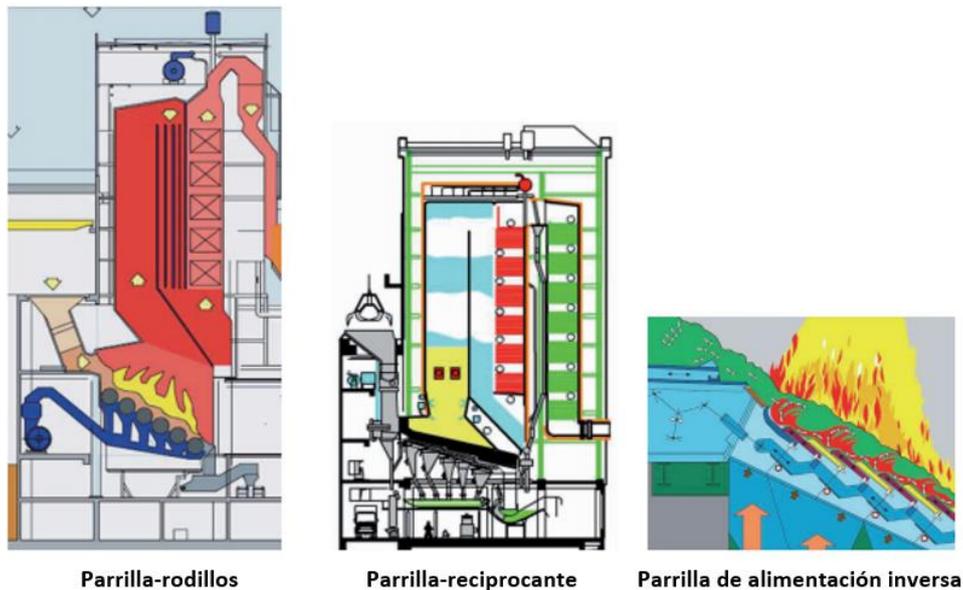


Ilustración 24. Tipos básicas de parrillas [64]

Los hornos de parrilla operan de manera flexible, permitiendo utilizar combustibles heterogéneos tales como, RSU, residuos industriales, lodos de depuradoras o residuos hospitalarios. En el caso de los RSU, su aplicación es tan extensa y demostrada que en Europa el 90% de las instalaciones de tratamiento de RSU usan hornos de parrilla con capacidades de incineración muy elevadas (más de 30 toneladas por hora). Esto se debe a su posibilidad de tratar una gran variedad de residuos, sin ser necesario un pretratamiento previo. Únicamente se aplica una trituración previa a la alimentación al horno para reducir el tamaño y homogeneizar el material. La incineración en horno de parrilla no es idónea para partículas, líquidos o materiales que pueden fundirse [66].

- Un **horno rotativo** también se puede usar para quemar RSU, aunque no sucede normalmente. En el horno rotativo, los residuos se empujan mecánicamente en la parte superior de un cilindro u horno que se estrecha. Con el fin de pasar los residuos a través del horno y controlar la velocidad de combustión, el horno oscila alrededor de su eje, pasando los residuos entre las paletas colocadas en las paredes internas del horno. El horno rotativo da lugar a un proceso de combustión convencional ya que puede incinerar prácticamente cualquier residuo, independientemente de su composición. Hay más aplicaciones del horno rotatorio en el tratamiento de residuos peligrosos (debido a la capacidad del horno para operar a temperaturas elevadas) que para los RSU, pero ambos

están establecidos [66, 17]. A continuación, se muestra un esquema del horno rotativo en la Ilustración 25.

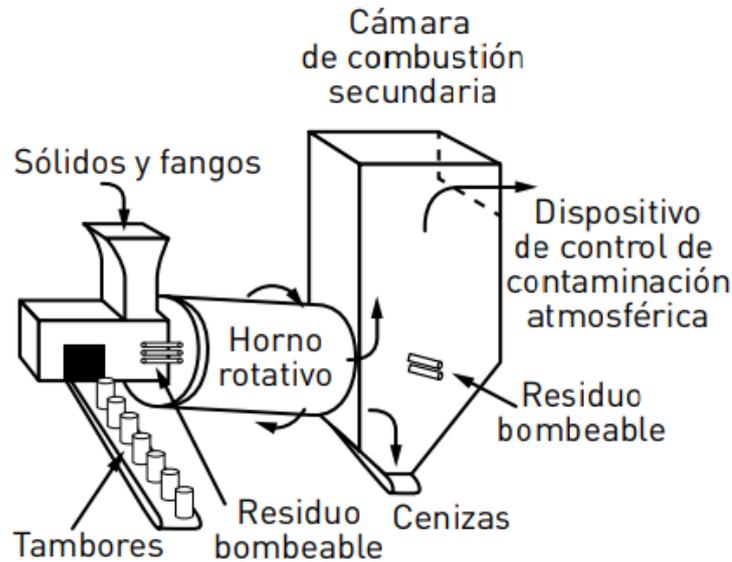


Ilustración 25. Esquema horno rotativo de incineración de residuos [66]

- **Combustión de lecho fluidizado:** es adecuado para materiales de alimentación más homogéneos, como desechos de madera astillada o residuos que resultan de un proceso de eliminación de metal y trituración para reducir el tamaño. El esquema que aparece en la Ilustración 26, nos indica las diferentes etapas del proceso y su sentido.

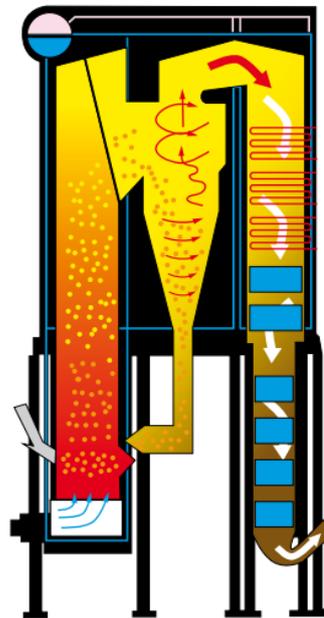


Ilustración 26. Esquema de horno de lecho fluidizado circulante [66]

La materia prima preparada se transfiere a la cámara del reactor, cilíndrica y vertical. Dicha cámara contiene arena o caliza muy caliente, que es fluidizada por una corriente de aire desde la caja de viento (parte inferior del lecho), denominado aire primario. El requisito de la DEI (Directiva 2010/75/UE del

Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las emisiones industriales) de un mínimo de 2 segundos a 850°C se logra en la zona de combustión secundaria usando el aire secundario para la combustión completa de los gases. La energía se transfiere a un sistema de caldera similar a una instalación tipo parrilla de empuje. Sin embargo, tanto la disponibilidad como la eficiencia energética de las plantas de lecho fluidizado que utilizan RSU tratados han demostrado ser tan buenas o mejores que las de las plantas con parrillas de empuje [17]. Según el movimiento del lecho, se diferencian tres tipos de hornos de lecho fluidizado (Tabla 15).

Tabla 15. Tipos de lechos fluidizados para la incineración de residuos [66]

<p>Lecho fluidizado burbujeante (BFB)</p>	<p>Se hace pasar aire por la parte inferior del horno a través de una placa de distribución hasta hacer burbujear el lecho manteniéndolo en suspensión. El residuo es aproximadamente el 2-3% en peso del lecho. Las cenizas volantes se arrastran con los gases de combustión y las escorias se recogen por la parte inferior del horno.</p>
<p>Lecho fluidizado circulante (CFB)</p>	<p>Esta tecnología se desarrolló con la intención de mejorar el lecho burbujeante, y lograr una combustión más completa, conjuntamente con un mayor control sobre la temperatura. En este caso, la velocidad de aire a través del lecho aumenta, con lo que parte del material del lecho se arrastra con los gases de combustión.</p>
<p>Lecho fluidizado “Revolving type”</p>	<p>El objetivo de este diseño es el de mejorar el contacto de las partículas en el lecho, manteniéndolo en continuo movimiento. El lecho es del tipo BFB, en el cual el aire se inyecta de forma no uniforme, creando zonas diferenciadas de paso de aire. Adicionalmente, se instalan unos deflectores en la zona inferior del lecho contra los que golpean los sólidos del lecho, resultando un movimiento circular de agitación. Las escorias se extraen por los laterales del lecho.</p>

En la siguiente Ilustración 27, se observa una planta típica de incineración de RSU dividida en siete partes principales, explicadas a continuación [67, 63].

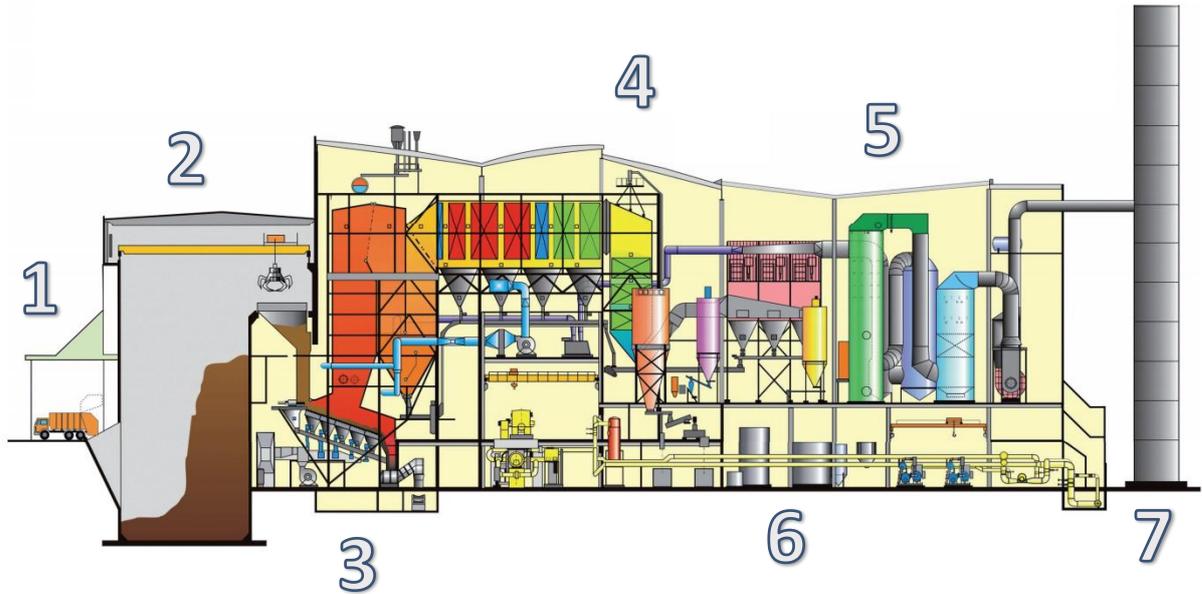


Ilustración 27. Planta de valorización energética de RSU [67]

- 1) Suministro:** recepción de los residuos entrantes.
- 2) Búnker o foso:** almacenamiento de residuos y materias primas. Puede que se requiera un pretratamiento, in situ o externamente, antes de la carga de la materia prima en el proceso mediante un sistema de alimentación.
- 3) Incineración de los RSU:** habitualmente se utiliza una parrilla de combustión para transportar los residuos a través de la cámara de combustión donde se quema por completo. Además, hay un movimiento de cada uno de los elementos que forman la parrilla, produciendo un volteo y avance de los residuos y facilitando su mezcla y homogeneización. El material no combustible se deja como ceniza de fondo al final de la parrilla. Metales y materiales de construcción se pueden recuperar de esta ceniza de fondo y regresar al ciclo del material, ahorrando así otras materias primas y energía que se usaría para producirlos.
- 4) Recuperación de energía:** en la caldera se recupera alrededor del 85% de la energía contenida en los residuos y lo hace utilizable como vapor.
- 5) Tratamiento de gases de combustión:** proceso altamente sofisticado que trata los contaminantes contenidos en los residuos y transferidos a los gases de combustión. Puede contener un separador de partículas, carbón activo o filtro de mangas, entre otros. Dichas plantas, también deben incluir un sistema de control y tratamiento de aguas residuales [63].
- 6) Utilización de energía (turbina, bomba de calor, etc.):** la energía recuperada se puede usar como electricidad y/o calor (por ejemplo, calefacción urbana, procesos industriales).
- 7) Chimenea:** descarga de los gases de combustión con una monitorización y control de emisiones.

Tal como se observa en la Ilustración 27, los gases calientes de la cámara de combustión pasan a una *caldera*, que convierte la energía de los gases en vapor sobrecalentado. Tal proceso genera calor como un subproducto que también se puede recuperar en un sistema combinado de calor y energía. Los diseños más eficientes incorporan una caldera de horno integrada, en lugar del transporte de gases calientes a través de conductos a una caldera separada. Los datos de vapor típicos son 400 °C y 45 bar obteniéndose una eficiencia energética de alrededor de 85% para la producción de vapor. El agua de alimentación de la caldera debe precalentarse en un economizador, el cual recupera el calor máximo de los gases de combustión que salen de la caldera. El vapor de alta presión generado por la caldera se alimenta a una *turbina de vapor* donde se expande a través del sistema de álabes de la turbina, convirtiendo la energía del vapor en movimiento mecánico. Se logra una eficiencia eléctrica neta típica del 25% (de la energía de entrada de residuos) en condiciones de vapor estándar de 400 °C y 45 bar. Para maximizar la recuperación de energía eléctrica, se utiliza una turbina de condensación, donde la expansión del vapor se maximiza y, en el escape de la turbina, el vapor generalmente estará por debajo de la presión atmosférica. La turbina está conectada a un generador a través de una caja de engranajes. La rotación del generador se sincroniza con la red a 50 Hz, con una salida eléctrica a un voltaje de 11 KV a través de un transformador. Generalmente, los condensadores enfriados por aire se instalan en el sitio para condensar los gases de escape de la turbina de vapor.

La incineración ha experimentado un rápido desarrollo tecnológico durante los últimos 20 años, impulsado, en gran medida, por legislaciones específicas para el sector. Se han reducido las emisiones a la atmósfera y se han desarrollado técnicas que limitan los costes al tiempo que mantienen o mejoran el rendimiento medioambiental [63]. Tradicionalmente, la incineración de residuos ha tenido dificultades para lograr una eficiencia energética alta ya que la materia prima es altamente heterogénea y contiene contaminantes. Dichos contaminantes provocan la corrosión de las calderas debido a las altas temperaturas y presiones del vapor, necesarias para lograr una alta eficiencia. Esto sucede a pesar de los importantes avances en la protección contra la corrosión del acero, como los recubrimientos a base de níquel. Es posible que la eficiencia eléctrica neta pueda aumentar de un promedio actual de alrededor del 25% a alrededor del 33% mediante la aplicación de estas técnicas [17]:

- Formas innovadoras de sobrecalentar el vapor sin efectos de corrosión graves.
- Extraer energía de baja calidad de los gases de combustión.
- La generación de calor para la calefacción urbana, una técnica muy establecida, es la mejor oportunidad para aumentar el potencial energético.

La cantidad de energía que puede recuperarse a partir de la incineración de RSU depende del poder calorífico inferior (PCI) del residuo y de la tecnología aplicada. Si la producción de electricidad es única, la eficiencia térmica es más alta, pero la eficiencia total más baja. La mayor eficiencia total se encuentra cuando se produce tanto electricidad como calor. En general, la electricidad tiene un valor de mercado mayor

que el calor. Por lo tanto, una combinación de calor y electricidad suele ser óptima, tal como se comprueba en la Ilustración 28 [7].

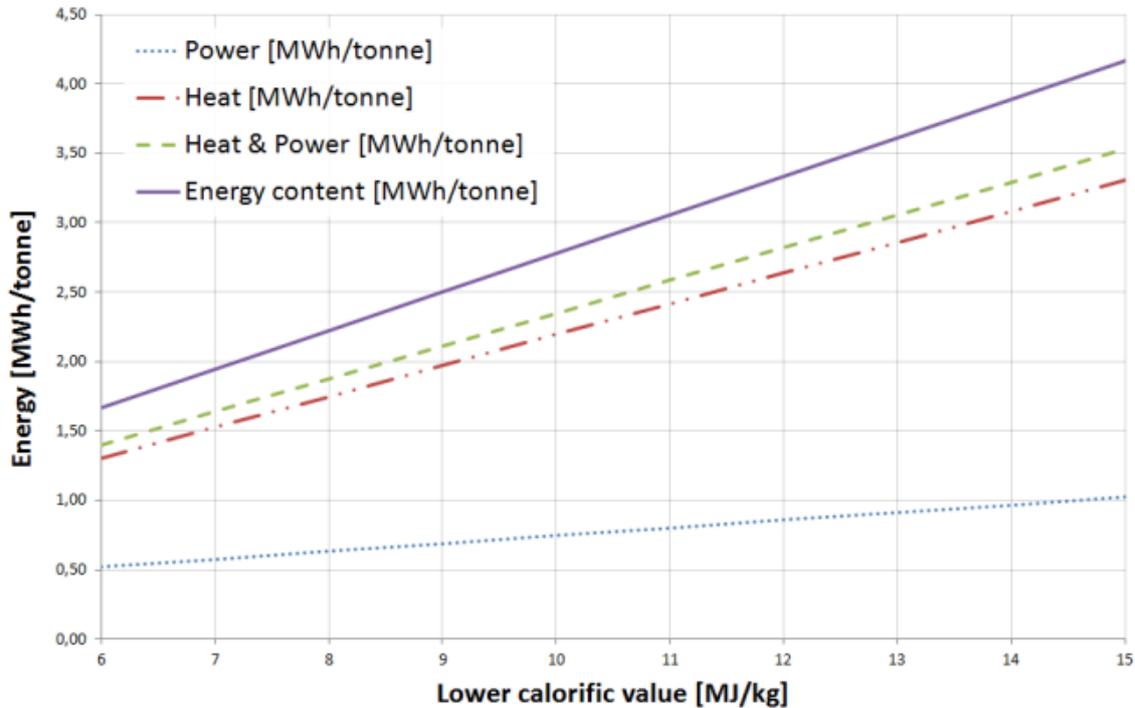


Ilustración 28. Contenido energético y potencial de recuperación de energía de los residuos [7]

Por otro lado, están las **plantas de coincineración** donde los residuos son un combustible secundario y el combustible primario no es un residuo sino un combustible fósil o biomasa. Los residuos secundarios más utilizados son biomasa contaminada, lodo de aguas residuales, madera, productos químicos y RSU pretratados (papel, plástico, residuos de envases y residuos mixtos). La coincineración de ciertos residuos puede considerarse atractiva ya que ofrece beneficios económicos cuando se puede cobrar una tarifa de entrada y los residuos con un alto contenido biogénico pueden ayudar a compensar las emisiones de GEI de la combustión de combustibles fósiles [17]. Actualmente, existen tecnologías que permitirían la coincineración de residuos con combustibles a una eficiencia eléctrica neta relativamente alta. Las principales desventajas de algunas de estas técnicas son que algunas están estrictamente limitadas en términos de cantidades de residuos que pueden co-incinerarse sin causar efectos perjudiciales para la planta. Las técnicas de mejora más prometedoras son [17]:

- La producción de productos de gas a partir de residuos que pueden ser quemados en plantas de combustión de alta eficiencia y a una tasa de sustitución relativamente alta. El syngas producido a partir de residuos puede ser quemado en plantas de carbón con una eficiencia eléctrica neta de entre 36% y 40%. El biometano producido a partir de residuos que tiene un estándar similar al del gas natural puede ser utilizado en centrales eléctricas con turbina de gas de ciclo combinado con una eficiencia eléctrica de más del 50%.

- La biomasa y los combustibles preparados como CSR (combustible sólido recuperado) se pueden co-incinerar utilizando reactores de lecho fluidizado con una eficiencia eléctrica de alrededor del 30%.

3.3.1.1.2. Gasificación

La gasificación es la descomposición térmica y oxidación parcial de los residuos bajo una atmósfera de oxígeno controlada donde el contenido de oxígeno es menor que el necesario para la combustión. El residuo reacciona químicamente con vapor o aire a alta temperatura, mayor de 750°C, denominado agente gasificante, que reacciona principalmente con el componente carbono procedente de la descomposición. El proceso se sustenta por el calor recuperado de la combustión parcial de la materia prima. El syngas (que consiste principalmente en CO, H₂, CO₂ y N₂) producido por gasificación tiene un valor calorífico inferior que el gas de pirólisis y depende del proceso de gasificación. Los niveles de alquitrán en el syngas son más bajos que los del gas de pirólisis, pero dependen de la tecnología de gasificación. Los usos potenciales del gas de síntesis son los mismos que para la pirólisis [17, 68].

Hay diferentes procesos de gasificación dependiendo del medio gasificante [68]:

- Gasificación con aire: el aire se introduce como aporte de calor y permite la combustión de parte del residuo carbonoso procedente de la pirólisis (proceso simultáneo al de gasificación). Así, se obtiene un gas combustible de bajo contenido energético (menos de 6 MJ/Nm₃) que puede ser empleado en quemadores de caldera o turbinas de gas, o en motores de combustión interna.
- Gasificación con oxígeno: se genera un gas de medio contenido energético (10-20 MJ/Nm₃). Sus aplicaciones son las mismas que las del proceso anterior, siendo el gas de mayor calidad al no estar diluido en nitrógeno. Además, este proceso es utilizado para generar syngas.
- Gasificación con vapor de agua y oxígeno o aire: se genera un gas enriquecido en hidrógeno y monóxido de carbono el cual se puede utilizar como gas de síntesis para metanol, amoníaco, gasolina, etc.
- Gasificación con agua: se produce un gas de alto contenido energético (más de 30 MJ/Nm₃) que puede utilizarse como sustituto del gas natural por tener alto porcentaje en metano y oleofinas.

La gasificación con aire presenta mayor interés económico y social al no necesitar fuente de calor externa. Este proceso permite, con un bajo coste, el aprovechamiento local, en pueblos, granjas o comarcas, de diversos residuos mediante su conversión termoquímica en gases combustibles de bajo contenido energético. La siguiente Ilustración 29 presenta un esquema básico de dicho proceso.

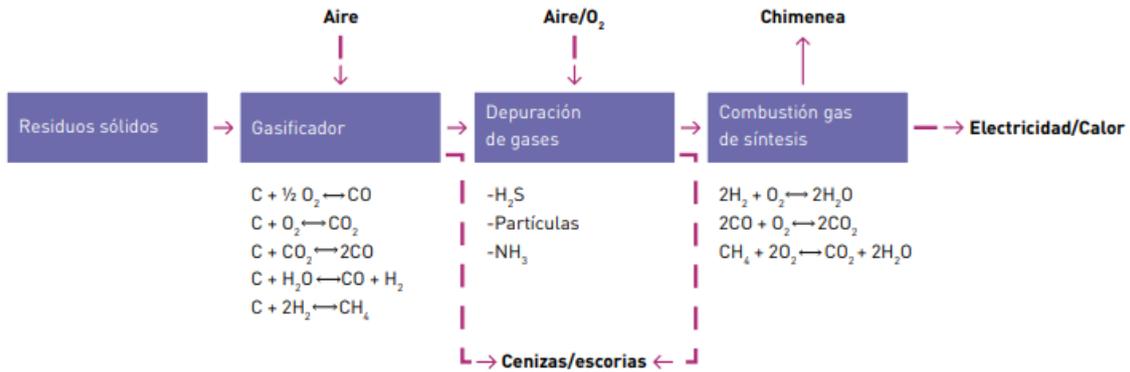


Ilustración 29. Esquema del proceso de gasificación con aire [66]

Los tipos de reactores o gasificadores utilizados en la gasificación son los de lecho fijo y los de lecho fluidizado cuyas operaciones aparecen en la Tabla 16. La diferencia principal entre los dos reactores es la derivada del flujo del sólido en el reactor lo que influye decisivamente en la calidad de los gases.

Tabla 16. Tipos de reactores de gasificación [66]

Reactor	Operación
Gasificadores de lecho fijo	Flujo a contracorriente (updraft)
	Flujo en paralelo (downdraft)
	Gasificadores de parrilla
Gasificadores de lecho fluidizado	Burbujeante
	Circulante
	De flujo arrastrado

Si se opera con flujo en contracorriente, los líquidos son arrastrados por el gas hacia zonas de menor temperatura y fuera del reactor. Por lo tanto, el gas se obtiene con mucho alquitrán y polvo y es necesaria su purificación antes de ser utilizado como combustible. Esto se puede evitar al utilizar el gasificador con flujo paralelo, donde el flujo descendente de gas arrastra los alquitranes de la pirólisis hacia la zona de oxidación que se encuentra a elevada temperatura (1200 y 1500 °C). Ahí, se produce el craqueo y/o descomposición de gases. El flujo paralelo permite obtener mayores cantidades de monóxido de carbono y metano, aumentando el contenido energético. Mediante el gasificador de lecho fluidizado se obtiene un gas a alta temperatura sin alquitranes, siendo posible controlar la composición de los gases a obtener. Así, se puede obtener un gas de mayor contenido energético al conseguirse una mayor cantidad de monóxido de carbono, moléculas de hidrógeno y metano. Sin embargo, hay una dificultad a la hora de fluidizar los residuos, lo que implica la adición de otro sólido coadyuvante de la fluidización [68].

La gasificación solo puede tratar algunos materiales específicos cuyas características deben asegurarse como mínimo que: contenga el mínimo de inertes y de componentes muy húmedos; tenga un tamaño de partícula comprendido entre 80 y 300 mm; contenga una cantidad de carbono suficiente para poder llevarse a cabo las reacciones del

proceso; no contener sustancias peligrosas; y, si puede ser, que tenga elevado PCI [66]. Los ejemplos exitosos de gasificación también tienden a ser aquellas plantas que usan corrientes de desechos homogéneas tales como neumáticos y astillas de madera, al igual que las plantas de pirólisis [17].

En la Tabla 17 se pueden ver las principales ventajas e inconvenientes de la valorización energética de residuos mediante gasificación:

Tabla 17. Ventajas e inconvenientes de la gasificación de residuos [66]

Ventajas	La baja producción de residuos de filtrado
	La producción de un gas de síntesis
	La oxidación reducida de metales
Inconvenientes	Limitaciones de residuos tratables
	La necesidad de un pretratamiento exigente
	Requiere un buen control de la operación
	La formación de alquitranes en el gas producido
	La necesidad de limpieza del gas

Actualmente, se dispone de un proceso de **gasificación del plasma**, término que se aplica a una variedad de tecnologías que implican el uso de una antorcha o arco de plasma. El plasma es un gas eléctricamente conductor, como el nitrógeno o argón, que se calienta con una corriente eléctrica. La reacción tiene lugar dentro de una cámara conectada a un soplete de plasma, que está revestido de material refractario para resistir las altas temperaturas. La antorcha se puede aplicar directamente a la materia prima, o al syngas producido por un proceso de gasificación. La gasificación con plasma funciona a temperaturas tan altas como 7.000 °C, lo que resulta en reacciones químicas rápidas para descomponer la materia prima en gases [17].

Las temperaturas altas aseguran que el syngas sea más limpio que el de la combustión convencional, ya que producen la descomposición de los alquitranes. El syngas puede utilizarse para generar electricidad a través de calderas, turbinas de gas o motores. La gasificación con plasma es un proceso complejo y costoso, y la tecnología no se considera probada todavía. Se requiere una entrada de energía significativa y la limpieza del syngas es compleja [17].

3.3.1.1.3. Pirólisis

Tal como se comentaba, la pirólisis es el degradado de residuos en ausencia de oxígeno o cuando está tan limitado que no se produce la gasificación. La pirólisis convencional tiene lugar a temperaturas entre 400 y 900 ° C y los productos que se forman son syngas, líquidos y coque sólido. El producto líquido también se conoce como aceite de pirólisis, olefina o bioaceite cuando se procesa biomasa. La pirólisis es una tecnología avanzada cuando se aplica al carbón, la turba y los combustibles fósiles líquidos, pero también hay ejemplos de su aplicación a los CSR (combustibles derivados de residuos). Los residuos utilizados son materiales orgánicos y algunos materiales inorgánicos como

neumáticos y residuos de plástico. El poder calorífico del gas de pirólisis está normalmente entre 5 y 15 MJ/m³ si es a base de RSU, y entre 15 y 30 MJ/m³ si se utiliza CSR [17, 63].

Actualmente, la utilización de la pirólisis para el tratamiento de residuos está menos desarrollada que la gasificación, aunque existen algunos ejemplos instalados. Existe cierta experiencia en la pirólisis lenta de los RSU, pero aún está en desarrollo y presenta problemas. Los ejemplos exitosos de pirólisis tienden a ser aquellas plantas que usan corrientes de desechos homogéneas tales como neumáticos, astillas de madera y residuos plásticos. En general, el número de plantas de pirólisis en Europa está disminuyendo, pero, en ciertos países como España y Reino Unido, su utilización es una tendencia actual [17, 63].

Existen diferentes equipos de pirólisis, que incluyen lecho fluidizado, lecho móvil y equipo de cono giratorio. La pirólisis lenta produce carbón, petróleo y gas, mientras que la pirólisis rápida está diseñada para maximizar la producción de aceites de pirólisis además del gas de bajo hidrocarburo que es un subproducto. Mientras que los sistemas de gasificación pueden diseñarse para liberar parte de la energía en la materia prima para sostener el proceso de gasificación, la pirólisis generalmente necesita energía de una fuente externa para sostener el proceso [17].

Durante el proceso suceden una serie de combinaciones de diferentes tecnologías [63]:

- Proceso de combustión lenta: formación de gas a partir de partículas de residuos volátiles a temperaturas entre 400 y 600°C.
- Pirólisis: descomposición de las moléculas orgánicas del residuo entre 500 y 800°C, que produce la formación de gas y de una fracción sólida.
- Gasificación: conversión de la fracción de carbono remanente en el coque de pirólisis, a 800-1000°C con ayuda de una sustancia de gasificación (ej., aire o vapor), en syngas.
- Incineración: según la combinación de tecnologías, el gas y el coque de pirólisis se combustionan en una cámara de incineración.

Las plantas de pirólisis para el tratamiento de residuos suelen incluir las siguientes etapas de proceso básicas, los cuales se pueden observar en la Ilustración 30 [63, 66]:

- A.** Preparación y molienda: mejora la calidad y promueve la transferencia de calor. Se realiza en la zona de descarga y trituración. Se suele realizar un secado del material para mejorar el PCI de los gases y aumenta la eficiencia.
- B.** Pirólisis de residuos, donde además del gas de pirólisis se acumula un residuo sólido con contenido de carbono. Los hornos usados típicamente son los rotativos o los de tubos calentados externamente.
- C.** Recogida y selección de residuos sólidos procedentes del sistema: pueden contener carbono, en una proporción superior al 40% (coque), conteniendo una proporción significativa de energía del residuo de entrada.
- D.** Recuperación de energía: mediante un ciclo de vapor para la producción de energía eléctrica (combustión de gases y aceites obtenidos); aplicándolo como

una etapa previa a un proceso de gasificación; o usando el producto sólido como combustible en instalaciones industriales, como, por ejemplo, en plantas cementeras.

- E. Depuración de gases. También puede contener un tratamiento secundario del gas y el coque de pirólisis, mediante condensación de los gases para la extracción de mezclas de aceite utilizables energéticamente y/o incineración de gas y coque para la destrucción de los ingredientes orgánicos y utilización simultánea de energía.

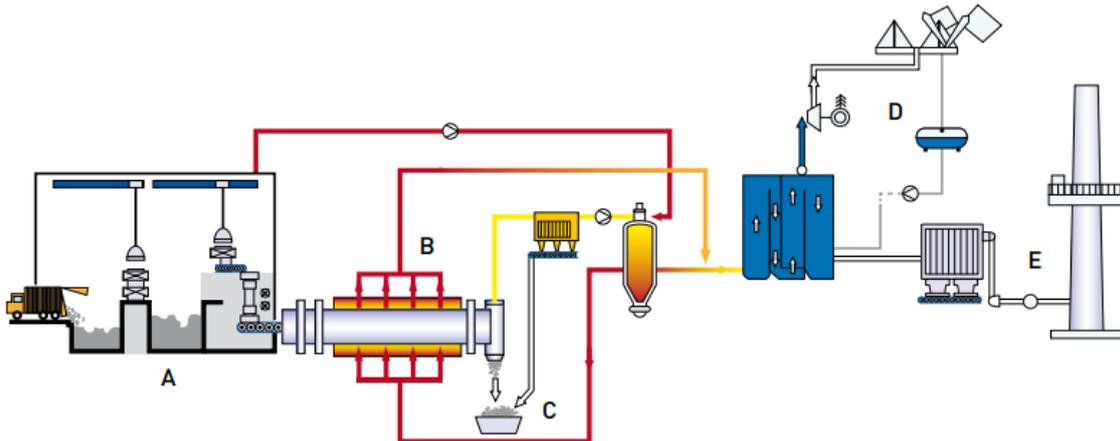


Ilustración 30. Estructura de una planta de pirólisis para tratamiento de residuos urbanos [66]

La pirólisis se plantea como una etapa previa a la combustión para mejorar su rendimiento energético. Además, de los residuos recibidos se deben seleccionar los materiales con contenido energético más alto y aplicarles también un pretratamiento para su adecuación a las características del proceso [66]. Se muestran las diferentes ventajas e inconvenientes del proceso en la Tabla 18.

Tabla 18. Ventajas e inconvenientes del proceso de pirólisis [66]

Ventajas	Posibilidad de recuperar fracciones orgánicas (p. ej., metanol)
	Posibilidad de generar electricidad usando motores o turbinas de gas, en lugar de calderas de vapor
	Reducción del volumen de los gases de combustión, para reducir el coste de inversión en el tratamiento de gases de combustión.
Inconvenientes	Limitaciones de residuos tratables
	La tecnología no está ampliamente probada
	Requiere un buen control de la operación
	Requiere un mercado para el gas de síntesis. Normalmente se utiliza en una etapa posterior de combustión.

Al igual que en la gasificación, se ha desarrollado la tecnología de **pirólisis del plasma**, un proceso para convertir residuos altamente calóricos, típicamente residuos de plástico, en syngas por medio del plasma térmico. El proceso utiliza temperaturas de hasta 6000

°C en un ambiente sin oxígeno para descomponer los residuos de entrada en syngas [17].

3.3.1.2. Tecnologías de conversión fisicoquímica y bioquímica

El proceso de **digestión anaeróbica** produce biogás a partir de residuos, llevándose a cabo en instalaciones que van desde pequeñas plantas basadas en granjas hasta grandes plantas industriales. Se puede utilizar para tratar la fracción biodegradable de los RSU domésticos mixtos, típicamente como parte de un proceso de tratamiento mecánico-biológico (TMB), y los residuos orgánicos domésticos y comerciales. El proceso no siempre se ha implementado con éxito para su uso en el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU domésticos [17].

Hay una gran variedad de métodos y tecnologías disponibles para digerir la fracción orgánica de los RSU. Básicamente, el tratamiento de digestión anaerobia de los RSU puede clasificarse, de acuerdo con el contenido de sólidos totales del sustrato a digerir, en digestión húmeda y seca. Los bajos niveles de sólidos (digestión húmeda) contienen menos del 12% de sólidos totales, mientras que los de alto contenido de sólidos (digestión seca) oscilan entre el 22% y 40%. El biogás y el digestato producidos por los procesos secos se usan de la misma manera que para los sistemas húmedos. Debido a la naturaleza más intensiva del equipo del proceso seco, generalmente se lleva a cabo a escalas que superan las 25.000 toneladas por año. El proceso normalmente utiliza maquinaria especializada, como las trituradoras y las pantallas, que hacen que el proceso sea más eficiente, introducen un mayor control del proceso y reducen los costes a través de una mayor mecanización. Los digestores húmedos a menudo funcionan como plantas de co-digestión, lo que significa que además de los RSU, se digiere otro material líquido o incluso sólido al mismo tiempo como, por ejemplo, el lodo de aguas residuales [17, 64].

Los pasos principales de una planta de digestión anaerobia son los siguientes [17]:

- Los residuos orgánicos se reciben en el sitio, se inspecciona su cumplimiento con los códigos de residuos y se preparan para el proceso de digestión. Existen sistemas de pretratamiento exitosos para residuos biológicos domésticos y residuos alimenticios empaquetados.
- Para procesos húmedos, se agrega agua para crear una suspensión.
- La materia prima se digiere anaeróbicamente y en condiciones controladas en un tanque sellado durante un período de tiempo, generando biogás.
- El biogás se captura y se utiliza para recuperar electricidad o calor renovables.
- Después de completar el proceso de digestión, el digestato puede almacenarse para permitir la estabilización antes de ser utilizado en forma líquida o deshidratada como fertilizante, para mejorar los suelos agrícolas o para la restauración de tierras. El digestato se filtra mecánicamente al grado de tamaño requerido para su uso final y para eliminar cualquier contaminación como el plástico que no se eliminó en la etapa de pretratamiento.

Para una planta convencional, la salida eléctrica basada en el contenido de energía de la materia prima orgánica es del 18%. En la Ilustración 31, mostrada a continuación, se puede observar el proceso de digestión anaerobia seca.

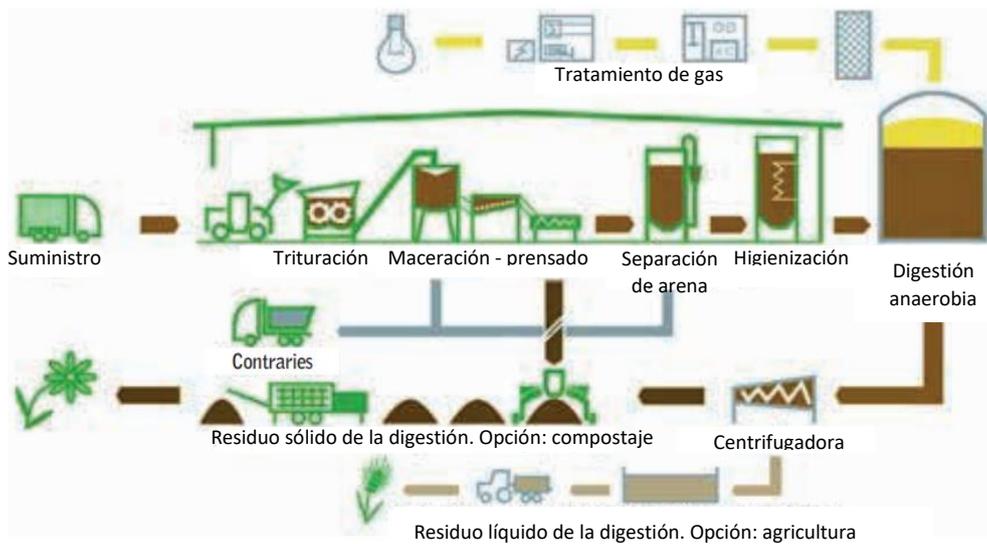


Ilustración 31. Cadena de proceso de una planta de digestión anaerobia húmeda que trata residuos biológicos [64]

La producción de energía depende en gran medida del potencial de biometano de la materia prima. Las materias primas de alta energía, como la glucosa o los residuos alimenticios, tendrán rendimientos energéticos mucho más altos (del orden de 10 veces más) que, por ejemplo, los residuos de jardín o los lodos de aguas residuales. El rango de eficiencia energética, basado en el aporte de energía de residuos orgánicos, en las plantas de digestión anaerobia se muestra a continuación en la Tabla 19 [17].

Tabla 19. Eficiencia promedio anual neta de los procesos de digestión anaerobia [17]

Eficiencia promedio anual neta (%)	
Sólo electricidad	Cogeneración
18-23	36

La digestión anaeróbica ha experimentado un crecimiento constante para la recuperación de energía a partir de residuos orgánicos con un alto contenido de humedad (hasta 95%) que en su forma natural no tienen suficiente poder calorífico para la combustión. Esta tecnología solo convertirá alrededor del 50% del contenido de la materia prima en una forma utilizable como el biogás, que luego deberá convertirse en energía [17].

La **fermentación alcohólica** es una técnica empleada desde muy antiguo con los azúcares, que puede usarse también con la celulosa y el almidón, a condición de realizar una hidrólisis previa a de estas do sustancias. El proceso se basa en el almacenamiento por parte de las plantas de energía solar en forma de hidratos de carbono a partir de los cuales se puede obtener alcohol por fermentación, siguiendo diferentes etapas en función del tipo de biomasa de partida [69]. El proceso productivo viene representado en el diagrama siguiente Ilustración 32:

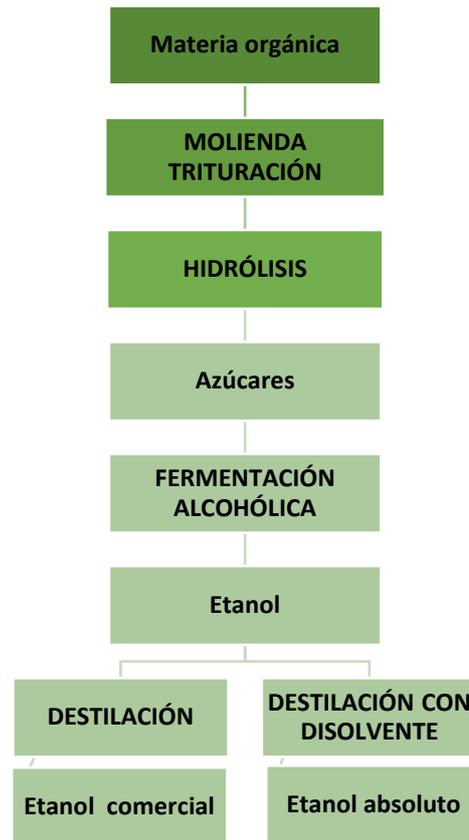


Ilustración 32. Proceso productivo de la fermentación alcohólica [69]

La **transesterificación** es un proceso consistente en la conversión de los triglicéridos en ésteres, para lo cual se produce una reacción en los aceites mediante el uso de metanol y un catalizador, que puede ser hidróxido de sodio o de potasio. Luego, se decanta la sustancia resultante, quedando el biodiesel en la parte superior y glicerina en la parte inferior. Es importante mencionar que la calidad del biodiesel tiene mucho que ver con el tipo de materia usada. Otras materias primas, a priori más económicas, para la producción de biodiesel son los aceites vegetales usados o las grasas de origen animal. El biodiesel se produce a partir de aceites vegetales, obtenidos principalmente por extracción química o mecánica, de semillas oleaginosas como girasol, colza, soja, etc. [69].

3.3.2. Valoración económica de la incineración

La incineración de residuos con el fin de producir energía es un método práctico de eliminación de residuos y de reducción del volumen a un nivel más manejable. Sin embargo, dichas plantas son costosas de construir y operar y, en algunos casos, no son muy económicas. Si el objetivo es obtener ingresos adicionales, se puede cobrar una tarifa de entrada por cada tonelada de residuos que se procesa. Económicamente hablando, si esto es menor que el coste correspondiente a dejar los residuos en un vertedero, es probable que se prefiera la combustión de los residuos. Cuando la tarifa de entrada se combina con los ingresos de la producción de energía, la planta se vuelve económica [5].

Algunos beneficios económicos son los siguientes [65]:

- Reduce los costes de los vertederos
- Crea oportunidades de trabajo
- Genera ingresos gracias a la recuperación energética a partir de los metales
- Ayuda a cumplir los objetivos de los requisitos regulatorios
- Contribuye a la venta de electricidad/vapor y agua caliente.

La electricidad se transfiere fácilmente desde la instalación de valorización energética a la red eléctrica, por lo que está disponible para todo tipo de clientes, incluso a larga distancia a través de conexiones transfronterizas. Según ISWA, la venta de electricidad producida al valorizar energéticamente los residuos tiene un valor de alrededor de 15 billones de euros al año, suponiendo que el potencial de venta de electricidad sea de 300 TWh/año y un precio típico de 50 €/MWh [44].

En cuanto a la energía térmica útil, su venta requiere la existencia de una demanda local y la creación de una red de transmisión. El calor podría ser suministrado por plantas de incineración que producen solo calor o plantas combinadas de calor y energía (plantas de cogeneración). El precio de la energía térmica suele ser algo menor que el precio de la electricidad, lo que refleja su menor valor energético y económico. La venta potencial de calor producido en una planta de cogeneración utilizando RSU como combustible tiene un valor de alrededor de 8 billones de euros al año, suponiendo que el potencial de venta de calor es de 400 TWh/año y un precio promedio de 20 €/MWh. Puede haber problemas de impuestos que afectan al mercado y a los precios como, por ejemplo, el impuesto sobre el calor suministrado por la planta de conversión de residuos en energía y/o el impuesto sobre el combustible alternativo para el suministro de calor [44].

3.3.2.1. Valorización de las cenizas de fondo

La mayor corriente de residuos sólidos generada tras la incineración de los RSU y tipos de residuos similares es la fracción inerte de los residuos, denominada colectivamente *cenizas de fondo* o escorias. Por cada tonelada de RSU, se generan aproximadamente 180-250 kg de cenizas de fondo. Su apariencia es similar a un material poroso gris muy fino que comprende componentes inertes como grava fina, rocas, vidrio, cerámica y artículos metálicos [70]. Consiste principalmente de silicio, calcio, hierro, aluminio y sodio cuya composición aproximada aparece en la Tabla 20.

Tabla 20. Composición aproximada de las cenizas de fondo, en porcentajes de masa [57]

Elemento	Contenido (g/kg)	Media (g/kg)
Silicio	168 - 274	221
Calcio	89,1 - 104	94,9
Hierro	46,7 - 77,8	65,1
Aluminio	45 - 56,1	50,3
Sodio	33,3 - 39,2	35,4
Magnesio	10,5 - 11,2	10,7
Potasio	7,4 - 8,6	8,1
Cobre	3,4 - 11	5,6

Cinc	2 - 4,8	3,1
Bario	1,1-2,4	1,5
Plomo	0,6-2,6	1,4

La cantidad de elementos metálicos que pueden separarse de las cenizas del fondo varía, dependiendo de la composición de los residuos entrantes. En los artículos científicos, se considera que los metales ferrosos representan el 7-15% del peso, mientras que los metales no ferrosos representan el 1-2%. Tales metales a menudo se eliminan de las cenizas del fondo utilizando diversas técnicas de separación [70].

Actualmente, la recuperación del metal se realiza, in situ o en instalaciones especializadas, mediante el uso de tamices, imanes, separadores de corrientes de Foucault, separadores de rayos X, clasificación por inducción y otros separadores. Usualmente, el primer paso es usar un imán para extraer metales ferrosos de la ceniza. La ceniza inferior se clasifica en diferentes fracciones en función del tamaño de los residuos. Esto permite una separación más precisa de los diversos metales no ferrosos con la técnica de separación de corrientes de Foucault. Esta técnica implica una cinta transportadora que expulsa metales no ferrosos como el aluminio a diferentes distancias de acuerdo con su reacción a los campos magnéticos cambiantes [71, 70].

La tecnología ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años, impulsado por el aumento de los precios de los metales y la constatación de que las cenizas de fondo se pueden considerar como un mineral de metal de alta concentración. El metal recuperado se vende para la producción de nuevos productos metálicos y, por lo tanto, reemplaza los recursos vírgenes, cerrando el ciclo en la economía circular. El consumo de energía de una planta de clasificación es muy pequeño en comparación con el ahorro de energía gracias al reciclaje. Por lo tanto, el impacto ambiental de una planta de clasificación es casi insignificante. Además, la eliminación de los artículos metálicos, especialmente el aluminio, mejora las propiedades mecánicas de las cenizas del fondo como material de construcción de carreteras [70, 44].

La recuperación de metal de las cenizas del fondo puede superar el 90% de su contenido de metal si se utilizan las técnicas más modernas. El valor económico de los metales podría ser de alrededor de 10 € por tonelada de residuos de entrada, lo que proporciona tiempos de amortización cortos para la inversión en sistemas de separación [44].

En 2014, se trataron alrededor de 88 millones de toneladas de residuos en plantas de incineración en Europa, de los cuales, aproximadamente 18 millones de toneladas fueron convertidos en cenizas de fondo [71]. La capacidad de reciclar dichas cenizas es importante para establecer las credenciales medioambientales de la incineración de residuos. Aunque es muy común en algunos Estados miembros de la UE (por ejemplo, Dinamarca, los Países Bajos y Alemania), el reciclaje de las cenizas de fondo no está completamente establecido en Europa y, por lo tanto, es una técnica madura, pero en desarrollo [17]. Sin embargo, los datos clave sobre las cenizas de fondo enumeradas a continuación, son de carácter positivo [71]:

- El ahorro de gases de efecto invernadero (GEI) debido al reciclaje de metales fue de, aproximadamente, 2,000 kg de CO₂ equivalente por tonelada de metal reciclado y en total 3,2 millones de toneladas equivalentes de CO₂.
- En 2014, se recuperaron, respectivamente, 20.000 y 17.000 toneladas de aluminio de las cenizas de fondo en los Países Bajos y en Francia. Este metal se utilizó principalmente en la industria del automóvil (bloques de motores, etc.).
- Después del reciclaje de metal, la parte restante se utiliza como materiales de construcción.

Las **cenizas volantes** también se pueden usar para la recuperación de metales. En una planta en Suiza se extrae zinc metálico de alta pureza a una velocidad de hasta 1 kg por tonelada de residuos incinerados. Otras plantas realizan la limpieza de la ceniza volante para recuperar el lodo que contiene el zinc que posteriormente se envía para la recuperación de zinc en instalaciones industriales de fusión [44].

3.3.3. Contaminación y protección medioambiental

Hay muchas maneras de mantener los residuos en la cima de la jerarquía de residuos: reciclar, reparar, donar, compartir, etc. Mientras que algunas cosas para las que no hay más uso se pueden reciclar, se debe buscar una solución a la hora de gestionar los materiales contaminados, tóxicos o degradados después de múltiples reciclajes. No todo puede ser reciclado y, en estos casos, las únicas opciones son la recuperación y la eliminación, los procesos que ocupan las últimas posiciones en la jerarquía de residuos [48]. El estudio de la Comisión Europea para una estrategia para un ambiente no tóxico ha llegado a la siguiente conclusión:

“En los procesos de reciclaje, los artículos (y los materiales de los que están compuestos) que contienen sustancias tóxicas contaminan las respectivas corrientes de residuos y se diluyen en materiales que no contienen sustancias tóxicas. Estas sustancias continuarán circulando durante el tiempo en que las sustancias tóxicas de los artículos se incluyan en las corrientes de residuos que entran en los procesos de reciclaje. Según los estudios de modelización, puede llevar siglos descontaminar una corriente de residuos reciclados, incluso si se implementan medidas preventivas [...]” [72]

Las implicaciones del tratamiento térmico y valorización energética de los residuos sobre el medio ambiente deben analizarse teniendo en cuenta tres ventajas fundamentales sobre el vertido en depósitos controlados [68]:

- Reducción de volumen de residuos
- Reducción de volumen de emisiones y sustancias potencialmente nocivas reduciendo, por lo tanto, la peligrosidad.
- Generación de vapor y/o electricidad

La incineración de los RSU proporciona energía local, sostenible y rentable; y, al mismo tiempo, impide que los residuos sean depositados en vertederos. Es bien sabido que la desviación del vertedero es el principal contribuyente a la reducción de las

emisiones de GEI en el sector de gestión de residuos. Incluso si los residuos se depositan en vertederos controlados con extracción de gas de vertedero, sigue habiendo un potencial significativo de reducción de GEI si los residuos se reciclan siempre que sea posible y, cuando no es factible, se valorizan energéticamente. Un sistema de gestión de residuos que priorice la reutilización, el reciclado y, de lo contrario, la recuperación de energía en lugar de un vertido en vertederos, puede contribuir significativamente a los objetivos de mitigación de las emisiones de GEI [73]. Aunque algunas instalaciones europeas todavía deben modernizarse, el sector está alcanzando en general niveles operativos que cumplen o mejoran los límites de emisiones atmosféricas establecidos en la Directiva 2000/76/CE [63].

El impulso actual hacia la reducción de las emisiones de GEI da como resultado la necesidad de aplicar una serie de soluciones y estrategias para reducir o evitar las emisiones. Se trata de unas acciones anteriores al tratamiento de dichos gases y su contribución es muy significativa para el desarrollo de una economía sostenible y circular. En la Tabla 21, se muestran las fuentes de emisión de GEI más importantes y las acciones pertinentes para cada proceso o tecnología de gestión de residuos.

Tabla 21. Fuentes de emisión de GEI y acciones para su mitigación para distintos procesos y tecnologías propios de la gestión de residuos

Proceso/ tecnología	Fuentes de emisión de GEI	Acciones para reducir o evitar las emisiones de GEI
Recogida y transporte	CO ₂ del consumo de combustibles fósiles y electricidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Racionalización de las operaciones de recogida y mejora de la eficiencia del combustible. • Uso de combustibles alternativos como biodiesel, bioetanol o biogás. • Desarrollo de medios alternativos de transporte como el ferrocarril o el barco. • Reducción de las distancias de transporte.
Reciclado	CO ₂ del consumo de combustibles fósiles para actividades de transporte y reciclado y consumo de electricidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la tasa de recuperación de material.
Compostaje y digestión anaeróbica	CO ₂ de la combustión de combustibles fósiles y el consumo de electricidad. Emisiones de CH ₄ y N ₂ O de los procesos.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la producción de compost y uso de tecnologías de tratamiento de baja emisión. • Mejora en la eficiencia del proceso y conversión del metano de la digestión anaeróbica en energía minimizando las emisiones.
Incineración	CO ₂ de la combustión de combustibles fósiles y del consumo de electricidad. CO ₂ de la combustión de	<ul style="list-style-type: none"> • Sustitución de la energía producida a partir de combustibles fósiles por calor y electricidad a partir de la combustión de residuos. • Recuperación de metales de las cenizas de fondo para su reciclaje.

	residuos	
Vertido	<p>CH₄ de la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos.</p> <p>CO₂ de la combustión de combustibles fósiles y del consumo de electricidad.</p> <p>N₂O del tratamiento de lixiviados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación de sistemas activos de recogida y tratamiento de GEI. • Uso del gas de vertedero como combustible para producir electricidad o calor. • Relleno de vertedero diseñado para controlar las emisiones.
Tratamiento mecánico biológico (TMB)	<p>CO₂ de la combustión de combustibles fósiles y el consumo de electricidad.</p> <p>CH₄ y N₂O del TMB de residuos orgánicos.</p> <p>CO₂ de la combustión de componentes de residuos fósiles.</p> <p>CH₄ del vertido de residuos orgánicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la desviación de biodegradables del vertido. • Producción de CDR que sustituye a los combustibles fósiles.
Otros	<p>El sector de gestión de residuos utiliza otros procesos y tecnologías avanzadas, como la pirolisis o gasificación. Sin embargo, sus aplicaciones comerciales y, por lo tanto, su potencial para reducir las emisiones de GEI aún no se han probado.</p>	

Algunas fuentes aseguran que las emisiones de CO₂ de la incineración de RSU son más bajas que las tecnologías más tradicionales, tal como se observa en la Ilustración 33. Según ISWA, la mayoría de los RSU que se queman en las instalaciones de incineración derivan de algunos recursos neutros en carbono cuando se queman como, por ejemplo, papel y cartón. Esto se aplica dado que estos recursos son biogénicos, lo que significa que las emisiones de CO₂ liberadas durante la combustión se suman a las capturadas durante el crecimiento del recurso respectivo [7].

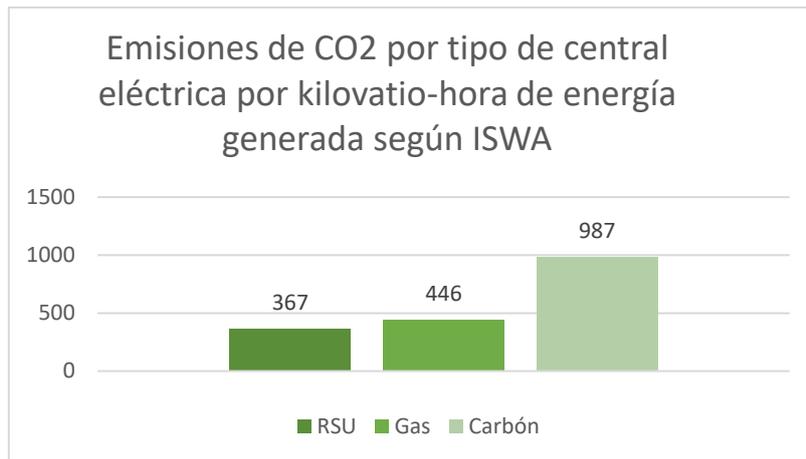


Ilustración 33. Emisiones de CO2 por tipo de central eléctrica por kilovatio-hora de energía generada según ISWA (Elaboración propia) [7]

Esta afirmación es muy controvertida al haber opiniones totalmente opuestas las cuales no consideran que algunos recursos incinerados sean neutros en carbono. Según Green Peace, una planta incineradora moderna con producción de energía eléctrica emite más CO2 por kilovatio hora generado que una central térmica de carbón, llegando a ser hasta un tercio más contaminante que las centrales térmicas que funcionan con gas, tal como se observa en el siguiente gráfico (Ilustración 34) [74].

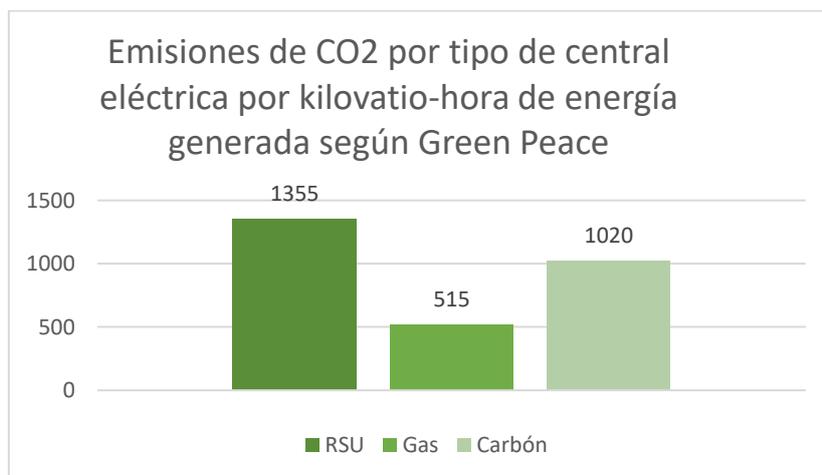


Ilustración 34. Emisiones de CO2 por tipo de central eléctrica por kilovatio-hora de energía generada según Green Peace (g CO2 por kWh) (Elaboración propia) [74]

Es cierto que, si los RSU se depositan en vertederos en lugar de quemarse, se libera metano en la atmósfera lo que contribuye 23 veces más al calentamiento global que el CO2. El balance de CO2 equivalente de los RSU vertidos en comparación con una central de carbón se muestra en la Ilustración 35 [7].



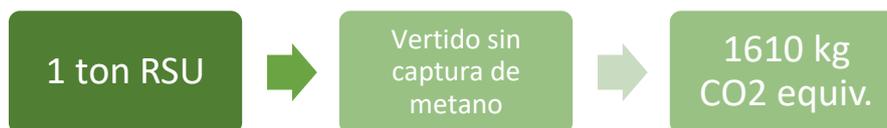


Ilustración 35. Balance de CO2 emitidos en la incineración de RSU en comparación con una central de carbón, teniendo en cuenta la alternativa del vertido de residuos (Elaboración propia) [7]

La incineración de RSU es una solución mucho más sostenible que el carbón con respecto a las emisiones de CO₂, si se considera que la combustión de residuos biogénicos es neutra en carbono. Si se considera lo contrario, la incineración de residuos seguiría siendo medioambientalmente mejor, en el contexto de la gestión de residuos, ya que emitiría una cantidad menor de CO₂. El grado de emisiones de CO₂ de la incineración de RSU depende en gran medida de la composición de residuos y la tecnología.

3.3.3.1. Tratamiento de los gases de combustión

Hoy en día, todos los hornos de incineración europeos poseen sistemas de control de la contaminación del aire. Inicialmente, fueron simples ciclones o precipitadores electrostáticos. Sin embargo, las normas de emisión de aire, establecidos en los documentos legales de los diferentes Estados y organismos supranacionales, se fueron haciendo cada vez más rigurosas, requiriendo una limpieza química de gases más eficiente. Dichas normas pretenden hacer compatible la contaminación originada en el entorno de estas instalaciones con los beneficios que presenta la combustión de residuos [64, 75].

Después de hacer lo posible para mitigar su emisión, comienza la fase de tratamiento de gases, para lo que existe muchas tecnologías probadas y disponibles que dan como resultado sistemas de gestión de residuos más eficientes. Es necesario utilizar técnicas de depuración que sean capaces de retener o transformar cada uno de los contaminantes para no superar el límite establecido por la legislación. Los gases más significativos que se emiten durante la incineración son los siguientes [75]:

- compuestos de cloro
- compuestos de flúor
- dióxido de azufre
- óxidos de nitrógeno
- monóxido de carbono
- sustancias orgánicas
- partículas
- metales pesados como el plomo, el cadmio y las trazas de mercurio
- metales pesados en forma gaseosa
- dioxinas y furanos

Con el nombre de dioxinas y furanos se incluyen los compuestos clorados de la dibenzopara-dioxina y del dibenzofurano. Su formación se debe a las altas temperaturas de la incineración y la volatilización de metales. Se aplican procedimientos de depuración muy eficaces para evitar su salida a la atmósfera. El límite de emisión es

casi un millón de veces menor que el establecido para los contaminantes metálicos más peligrosos, debido a las características que presentan: son bioacumulables (mucho más solubles en las grasas que en agua), 17 congéneres son muy tóxicos (uno de los compuestos posee la mayor toxicidad que ha sintetizado el hombre), son refractarios (son estables a temperaturas tan elevadas como los 600°C) y persistentes (no se destruyen significativamente en las condiciones ambientales) [75].

La corriente de gases que se forma tras la incineración está formada principalmente por nitrógeno del aire, oxígeno alimentado en exceso, dióxido de carbono y vapor de agua. Los componentes minoritarios son las partículas sólidas, gases ácidos, monóxido de carbono y compuestos orgánicos y metálicos volátiles. Los límites para las emisiones son variables y cada vez más bajos según sea el peligro que se asigne a cada. Existe un elevado número de tecnologías para eliminar dichos contaminantes y alcanzar los límites establecidos por las legislaciones [75].

En la siguiente Tabla 22 aparece la descripción de las mejores técnicas, un total de nueve técnicas elegidas por la Comisión Europea en su última Decisión de Ejecución sobre las mejores técnicas de tratamiento de residuos [29], aplicadas para canalizar las emisiones a la atmósfera generadas durante el tratamiento de residuos. Las nuevas especificaciones buscan reducir el impacto medioambiental de las instalaciones de tratamiento de residuos de la UE, tanto las que se ocupan de los residuos peligrosos y como de los no peligrosos y que afecta a alrededor de 4.000 instalaciones [76].

Tabla 22. Técnicas para canalizar las emisiones a la atmósfera producidas durante el tratamiento de los residuos [29]

Técnica	Contaminantes típicos reducidos	Descripción
Adsorción	Mercurio, compuestos orgánicos volátiles, sulfuro de hidrógeno, compuestos olorosos	La adsorción es una reacción heterogénea en la que las moléculas de gas son retenidas sobre una superficie sólida o líquida que prefiere determinados compuestos frente a otros y, así, los elimina de las corrientes de efluentes. Cuando la superficie ha adsorbido todo lo que puede, se procede a la sustitución del adsorbente o a la desorción del contenido adsorbido como parte de la regeneración del adsorbente. Una vez desorbidos, los contaminantes suelen estar a una concentración más elevada, por lo que, a continuación, pueden valorizarse o eliminarse. El adsorbente más común es el carbón activo granular .
Biofiltración	Amoníaco, sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles, compuestos olorosos	El flujo de gases residuales pasa a través de un lecho de material orgánico (por ejemplo, turba, brezo, compost, raíces, corteza de árbol, madera blanda y distintas combinaciones de estos materiales) o de algún material inerte (como arcilla, carbón activo y poliuretano), donde experimenta una oxidación biológica por la

		<p>acción de microorganismos naturalmente presentes, formándose dióxido de carbono, agua, sales inorgánicas y biomasa.</p> <p>En el diseño del biofiltro se tiene en cuenta los tipos de residuos que entran en la instalación. Para el lecho se selecciona un material adecuado, por ejemplo, desde el punto de vista de la capacidad de retención de agua, densidad aparente, porosidad o integridad estructural. También es importante que la superficie y la altura del lecho del filtro sean adecuadas. El biofiltro se conecta a un sistema apropiado de circulación de aire y de ventilación a fin de garantizar una distribución uniforme del aire en el lecho y un tiempo de permanencia suficiente del gas residual en su interior.</p>
Condensación y condensación criogénica	Compuestos orgánicos volátiles	<p>La condensación es una técnica que elimina los vapores de disolvente de los flujos de gases residuales reduciendo su temperatura por debajo de su punto de rocío. En el caso de la condensación criogénica, la temperatura de funcionamiento puede llegar hasta $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero en la práctica suele situarse entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el dispositivo de condensación. La condensación criogénica es adecuada para todos los COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) y todos los contaminantes inorgánicos volátiles, independientemente de su presión de vapor. Las bajas temperaturas aplicadas propician eficiencias de condensación muy elevadas, de manera que resulta idónea como técnica final de control de las emisiones de COV.</p>
Uso de ciclones	Partículas	<p>Los filtros de ciclón se utilizan para eliminar las partículas más pesadas, que «caen» a medida que se impone a los gases residuales un movimiento rotatorio antes de salir del separador.</p> <p>Los ciclones se utilizan para controlar las partículas, sobre todo las PM_{10} (partículas en suspensión, dispersas en el aire, de fuentes naturales y artificiales menores de 10 micrómetros).</p>
Precipitación electrostática (PE)	Partículas	<p>Los precipitadores electrostáticos funcionan de tal modo que las partículas se cargan y separan bajo la influencia de un campo eléctrico. Los precipitadores electrostáticos pueden funcionar en condiciones muy diversas. En un PE seco, el material recogido se elimina por medios mecánicos (por ejemplo, por agitación, vibración o con aire comprimido), mientras que en un PE húmedo, se retira con un chorro de un líquido adecuado, normalmente agua.</p>

<p>Filtración por filtro de mangas</p>	<p>Partículas</p>	<p>Los filtros de mangas, también denominados filtros de tela, están fabricados con telas porosas tejidas o afieltradas a través de las cuales se hacen pasar los gases para retirar las partículas. La utilización de filtros de mangas exige la selección de una tela adecuada para las características de los gases residuales y la temperatura de funcionamiento máxima.</p>
<p>Filtración por filtro HEPA</p>	<p>Partículas</p>	<p>Los filtros HEPA (filtros de aire de partículas de alta eficiencia) son filtros absolutos. El medio filtrante consiste en papel o un fieltro de fibras de vidrio con alta densidad de empaquetado. El flujo de gases residuales pasa a través del medio filtrante, donde se recogen las partículas.</p>
<p>Oxidación térmica</p>	<p>Compuestos orgánicos volátiles</p>	<p>Oxidación de los gases combustibles y las sustancias olorosas presentes en un flujo de gases residuales calentando la mezcla de contaminantes con aire u oxígeno por encima de su punto de autoignición en una cámara de combustión y manteniéndola a altas temperaturas el tiempo suficiente para completar su combustión en dióxido de carbono y agua.</p>
<p>Depuración húmeda</p>	<p>Partículas, compuestos orgánicos volátiles, compuestos ácidos gaseosos (depurador alcalino), compuestos gaseosos alcalinos (depurador ácido)</p>	<p>Eliminación de los contaminantes gaseosos o en partículas de un flujo de gas mediante la transferencia de masa hacia un disolvente líquido, normalmente agua o una solución acuosa. Puede llevar aparejada una reacción química (por ejemplo, en una depuradora ácida o alcalina). En algunos casos, pueden recuperarse los compuestos del disolvente.</p>

A continuación, se muestra el esquema de un ejemplo de incineradora que incluyen diferentes técnicas de depuración (Ilustración 36).

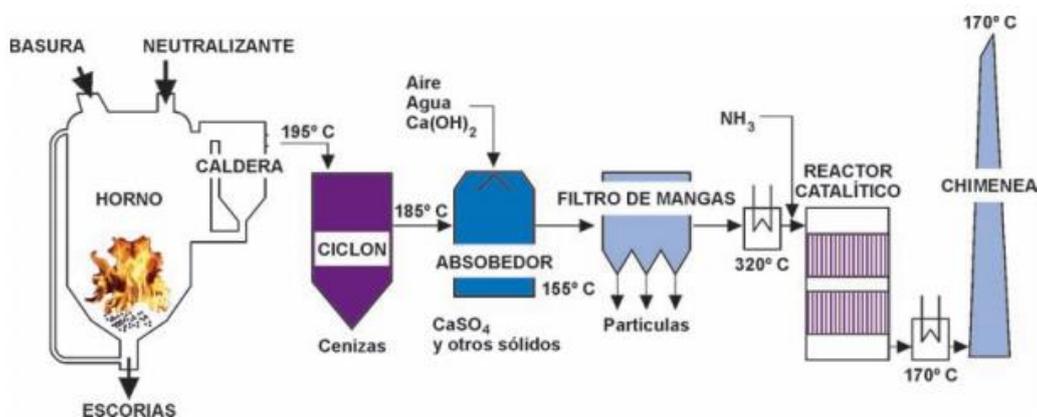


Ilustración 36. Esquema de una incineradora con distintos equipos de depuración [75]

La tecnología de depuración de gases que predomina en países como Suiza, Alemania, los Países Bajos y Dinamarca es la *depuración húmeda*. Su ventaja es que la operación

está cerca de la estequiometría química. Muchas de estas plantas no pueden verter efluentes líquidos, incluso después de la limpieza. Por lo tanto, están equipados con un secador por aspersión y un filtro de tela para evaporar el agua [64]. Un ejemplo típico, que utiliza esta tecnología, es la nueva planta de incineración AEB de Ámsterdam, cuyas características serán explicadas en apartados posteriores.

Las plantas de incineración de residuos de hoy también están equipadas con sistemas de reducción de NOx. Esto a menudo se realiza mediante *reducción selectiva no catalítica (SNCR)* en la que se pulveriza amoníaco o urea en el primer tiro de gases de combustión a una temperatura entre 900 y 1.000°C. Alternativamente, se aplica una *reducción catalítica específica (SCR)* a temperaturas entre 180 y 300°C. Para la eliminación de dioxinas y furanos, la utilización del carbón activado es lo más común, el cual los absorbe. Para la neutralización final y limpieza de gases, se prefieren los sistemas de filtración por filtro de manga. Estas etapas también eliminan las huellas de mercurio en el gas [58, 64].

Tras los diferentes procesos de depuración de humos, los gases depurados se recogen y analizan en continuo y se evacúan a la atmósfera por la chimenea mediante un ventilador de tiro inducido [58].

La elevada eficiencia de retención de contaminantes a la atmósfera hace que la contaminación de las plantas de incineración sea menor. El inconveniente se basa en los elevados costes de dichas tecnologías al haber un gran volumen de gases de combustión necesario de tratar.

3.3.3.2. Casos prácticos

Un caso muy novedoso es el de la empresa neerlandesa de valorización energética, AVR, que anunció, en mayo de 2018, la construcción de un sistema de captura de CO_2 a gran escala en su planta de Duiven. Una vez que esté operativo en 2019, el sistema reciclará 60,000 toneladas de emisiones de CO_2 al año, que se corresponde al 15% de las emisiones de CO_2 de la ciudad. El dióxido de carbono, una vez capturado y liberado en un invernadero, es un recurso valioso y servirá como materia prima para el crecimiento de cultivos. Reciclar el CO_2 producido durante la incineración de residuos también ayudará a los invernaderos a reducir su consumo de combustibles fósiles como el gas natural. De esta manera, AVR contribuye directamente a la reducción de CO_2 en los Países Bajos y a cumplir sus objetivos climáticos. A largo plazo, AVR pretende construir una instalación similar en sus plantas de incineración de Rozenburg, con la captura y el uso potencial de 800,000 toneladas de CO_2 [77, 78].

La planta de incineración Twence de los Países Bajos captura CO_2 del tratamiento de gases de combustión secos de una de las líneas de incineración, para usarlo como materia prima para producir bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$). Este, se utiliza en el sistema de limpieza de gases de combustión de la planta, concretamente, para la eliminación de componentes ácidos. De este modo, la planta ahorra materias primas valiosas y reduce las emisiones de CO_2 . El sistema está completamente integrado en la planta y produce aproximadamente 8,000 toneladas de bicarbonato de sodio

anualmente. Esto equivale a una reducción de las emisiones de CO₂ de hasta 3.000 toneladas por año. El proyecto cuenta con el apoyo del gobierno provincial y holandés, así como de la Unión Europea [48].

3.4. PLANTAS DE INCINERACIÓN EXISTENTES EN LA UE

Las plantas de valorización energética pagan una tarifa de entrada a los gobiernos locales y a las empresas encargadas de gestionar los residuos para tener acceso a los RSU y vender la electricidad producida a la red. Los proyectos de esta escala tienen que realizar contratos a largo plazo para garantizar un suministro confiable de materia prima. En muchas instalaciones se logran ingresos adicionales ya que generan tanto electricidad como calor, distribuido a través de los sistemas de calefacción urbana. Las cenizas residuales se trasladan al vertedero, a menos que sean reprocesadas y convertidas en nuevos productos, generalmente, elementos para la construcción. Una gran planta de combustión puede costar cientos de millones de dólares, creando cientos de trabajos de construcción y docenas de trabajos en curso [79]. A continuación, se enumeran algunas de las plantas de incineración más exitosas de la UE que utilizan como combustible los RSU.

3.4.1. Amager Bakke / Copenhill (Copenhague, Dinamarca)

La planta de valorización energética de Copenhague establece nuevos estándares para el desempeño ambiental, la producción energética y el tratamiento de residuos. Se considera una de las mejores plantas europeas en términos de eficiencia energética, capacidad de tratamiento de residuos e impacto en el medio ambiente. También destaca por su innovación y aceptación local. La planta Amager Bakke ha sido construida por Amager Ressourcecenter y reemplaza una planta de 45 años con cuatro líneas de horno. Entró en funcionamiento en marzo de 2017.

Como resumen, la planta tiene las siguientes características clave [80]:

- Trata alrededor de 400.000 toneladas de RSU anualmente para 500.000-700.000 habitantes y al menos 46.000 empresas.
- Suministra electricidad a un mínimo de 50.000 hogares y calefacción urbana a 120.000 hogares.
- El vapor llega a unos 440°C y 70 bares que duplica la eficiencia eléctrica en comparación a la antigua planta.
- Está diseñada para cambiar entre dos modos de operación, produciendo hasta 63 MW de electricidad y hasta 247 MW de calefacción urbana, adaptándose a las necesidades de los consumidores. Depende de la demanda local de calefacción y el precio de la energía, siendo compatible con la energía renovable del viento y el sol.
- Está equipada con dos líneas de horno y un sistema conjunto de turbina y generador. Cada horno quema 35 toneladas de residuos por hora.

Además de los méritos tecnológicos, la arquitectura de la planta incluye una pendiente de esquí artificial en la azotea, abierta para el público. Hay una combinación de tecnología ingeniosa y arquitectura innovadora en un proyecto dedicado a la comunidad.

La planta utiliza más del 100% del contenido de energía del combustible, tiene una eficiencia eléctrica del 28%, reduce las emisiones de azufre en un 99,5% y minimiza las emisiones de NOx en un 90%. La reducción de NOx es posible gracias al proceso de SCR [81].

En la siguiente tabla, se resumen las características principales de dicha planta (Tabla 23), mientras que en la Tabla 24 se presentan los valores de gases de combustión tras su depuración.

Tabla 23. Características de diseño de la planta Amager Bakke [81]

Parámetros del proceso	Valores	Unidades
Capacidad de RSU	35	ton/h
Poder calorífico inferior	11,5	MJ/kg
Temperatura del vapor	440	°C
Presión del vapor	70	bar
Salida de vapor	141,1	ton/h

Tabla 24. Valores de los gases de combustión tras su limpieza en la planta Amager Bakke [81]

Gases de combustión después de la limpieza	Valores	Unidades
NOx (promedio de 24 horas)	15	mg/Nm ³
CO (promedio de media hora)	50	mg/Nm ³
NH ₃ (promedio de 24 horas)	3	mg/Nm ³
COT (carbono orgánico total)	5	mg/Nm ³

Hay que tener en cuenta los materiales recuperados tras el proceso y su posterior aplicación. La ceniza de fondo, que constituye aproximadamente el 20% de la masa de residuos de entrada, puede utilizarse para fines de construcción, en particular la construcción de carreteras o la recuperación de tierras. La Ilustración 37 ilustra el proceso de recuperación a partir de 1000 kg de RSU utilizados [44].

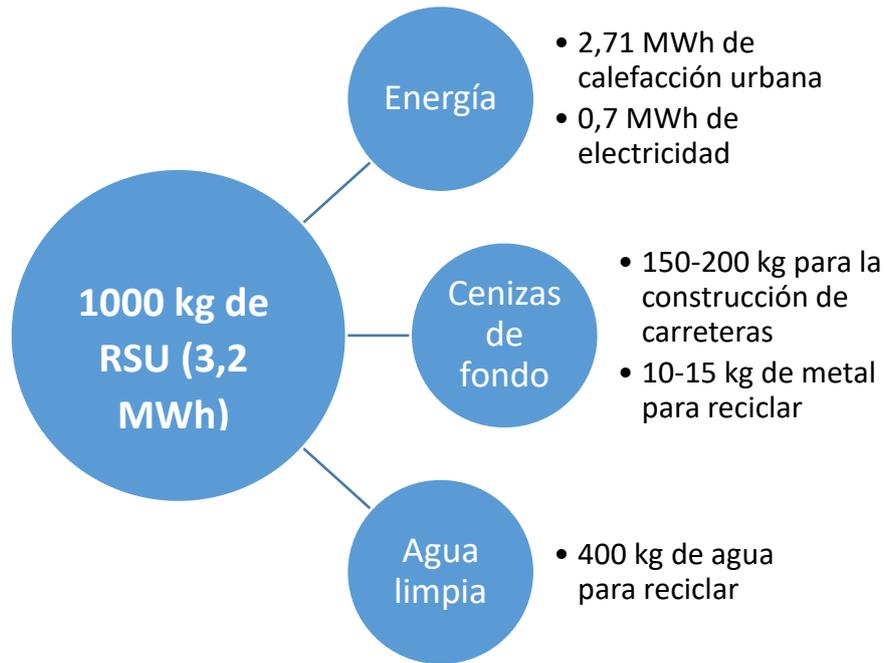


Ilustración 37. Material y energía recuperados en Amager Bakke - Copenhill [44]

3.4.2. Vantaan Energia (Vantaa, Finlandia)

Se trata de una de las compañías energéticas más grandes de Finlandia produciendo tanto electricidad como calefacción urbana. Esta planta de conversión de RSU en energía, finalizada en 2014, pertenece a la ciudad de Vantaa (60%) y a Helsinki (40%) [82].

Gracias a esta planta, la cantidad de residuos producidos por los residentes de Helsinki que terminan en el vertedero se reduce en 360.000 toneladas anualmente. Por otro lado, tras la construcción de esta planta, se redujo el uso de combustibles fósiles de Vantaan Energy en un 40% y las emisiones de dióxido de carbono en un 20%. El 90% de las partículas de gas de la chimenea se filtran y la planta se detiene si los niveles de gas superan los valores de emisión permitidos. Vantaan Energy está en el camino hacia una producción libre de combustibles fósiles ya que su objetivo es retirar por completo el uso de carbón en la década de 2020.

Las características clave de esta planta son las siguientes [83]:

- Trata alrededor de 360.000 toneladas de RSU anualmente.
- Se trata de una central de ciclo combinado con sobrecalentamiento de vapor a 91 bar de presión hasta 520°C (gas de escape) gracias a su turbina de gas de 80 MW.
- Hay una producción combinada de calor y energía: hasta 107 MW de calor para la calefacción urbana y 78 MW de potencia eléctrica.
- Utiliza un horno de parrilla refrigerado por agua, una caldera de 4 pasos para la recuperación de energía y un economizador vertical externo.
- El tratamiento de los gases de combustión se realiza mediante SNCR.

En la siguiente tabla, se resumen las características principales de la planta (Tabla 25).

Tabla 25. Características de diseño de la planta Vantaan Energia [83]

Parámetros del proceso	Valores	Unidades
Capacidad de RSU	44	ton/h
Poder calorífico inferior	10,5	MJ/kg
Temperatura del vapor	400	°C
Presión del vapor	91	bar
Salida de vapor	166	ton/h

3.4.3. Vestforbrænding (Glostrup, Dinamarca)

Vestforbrænding opera la planta de conversión de RSU en energía más grande de Dinamarca. La fracción no reciclable de los residuos se incineran y la energía resultante se utiliza en la producción de electricidad y calor para la calefacción urbana, y, por lo tanto, sustituye el uso de los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas [84].

Esta empresa de gestión de los residuos prefiere el reciclado a la incineración y la incineración con recuperación de energía al vertido. Cada año manejan alrededor de un millón de toneladas de residuos ya sean materiales para el reciclaje o combustible para la producción de energía, aprovechando su valor correctamente [84]. Podemos observar en la Ilustración 38 la jerarquía que sigue la empresa depositando el 5% de los residuos, incinerando el 25% y reciclando el 70% [85]. En Dinamarca se ha decidido políticamente que todos los residuos adecuados para la incineración se incineren teniendo en cuenta el medio ambiente, los olores, la higiene, etc. El 50% de los residuos incinerados en Vestforbrænding son residuos domésticos [84].

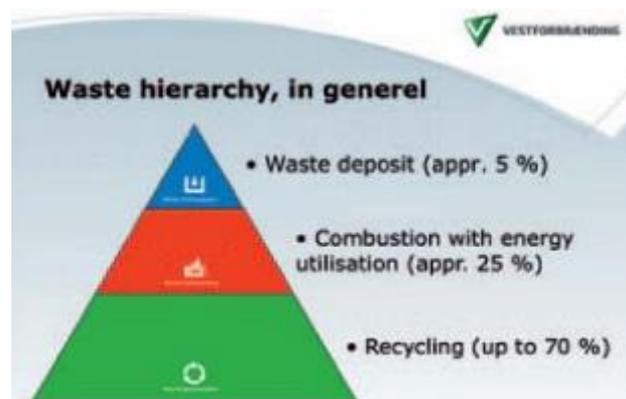


Ilustración 38. Jerarquía de los residuos en Vestforbrænding [85]

Las características más destacables de esta planta son las mostradas a continuación [84, 85], mostrando en la Tabla 26 algunos parámetros del proceso.

- La incineración se produce mediante dos hornos con una capacidad total de 600.000 toneladas de RSU por año.
- En 2015 se incineraron alrededor de 570.000 toneladas de RSU generando 270.000 MWh de energía y 1.162.000 MWh de calefacción urbana. Estas cifras

corresponden al consumo de electricidad de 184.000 daneses y de calefacción urbana en 70.000 hogares.

- Coexisten dos plantas separadas las cuales incineran alrededor de 35 y 30 toneladas por hora respectivamente.
- Los hornos son de tipo parrilla los cuales reciben aire desde la parte inferior para asegurar unas condiciones óptimas.
- Las cenizas de fondo constituyen aproximadamente el 17% del peso de los residuos iniciales. Son reprocesadas asegurando que el 95% de su volumen se recicle. Se utiliza como material de relleno para, por ejemplo, la construcción de carreteras.

Tabla 26. Características de diseño de la planta Vestforbrænding [84, 86, 57]

Parámetros del proceso	Valores	Unidades
Capacidad de RSU	30 / 35	ton/h
Poder calorífico inferior	11	MJ/kg
Temperatura del vapor	380	°C
Presión del vapor	52	bar
Salida de vapor	103,2	ton/h

3.4.4. AEB (Ámsterdam, Holanda)

AEB es la compañía de valorización energética más grande del mundo en una sola ubicación. La compañía consta de una planta de valorización energética, una planta de incineración de residuos, un depósito de residuos peligrosos y los puntos limpios de Ámsterdam. Al año, convierte el 99% de los 1,4 millones de residuos urbanos e industriales que recibe en energía y materias primas [87].

La información más destacable de esta planta está resumida a continuación, teniendo los parámetros del proceso en la Tabla 27.

- La incineración se produce mediante dos hornos de parrilla móvil con una capacidad total de 600.000 toneladas de RSU por año.
- Al año, se generan 1.000.000 de MWh de electricidad dando servicio a 320.000 hogares. Además, se producen más de 150.000 MWh de calor, el cual se utiliza para la calefacción urbana: agua caliente y calefacción central de 230.000 hogares de Ámsterdam.
- Los residuos incinerados también son una fuente de materias primas. Tras la incineración, se extraen, de las cenizas de fondo, 30.000 toneladas de metales valiosos como hierro, cobre y aluminio. El material restante, como el yeso, se utiliza como material de relleno en la construcción de carreteras. Los productos que se extraen del gas de combustión se usan en la industria del asfalto.
- Se trata de una planta de alta eficiencia gracias a sus propias innovaciones tecnológicas. La eficiencia eléctrica de la planta es de 30,86%, la más alta en el mundo de conversión de residuos a energía.
- Emplean un sistema de recalentamiento de vapor a través de un recalentador intermedio que funciona en condiciones de vapor a 480°C y 130 bares. Los

supercalentadores están diseñados para retirarlos fácilmente y, debido a la rápida corrosión, es necesario reemplazarlos cada dos años. En una planta tan grande como esta, los ingresos de la producción eléctrica superan el costo del reemplazo del sobrecalentador.

Tabla 27. Características de diseño de la planta AEB [17, 87]

Parámetros del proceso	Valores	Unidades
Capacidad de RSU	33,6	ton/h
Poder calorífico inferior	10	MJ/kg
Temperatura del vapor	480	°C
Presión del vapor	130	bar

3.4.5. Högdalen (Estocolmo, Suecia)

La planta de incineración de Högdalen produce electricidad y calefacción urbana a partir de la fracción no reciclable de los residuos y otros biocombustibles, como astillas de madera y residuos industriales pretratados. La planta se ha utilizado para la incineración de residuos desde 1970 como alternativa al vertedero. Cuando la red de calefacción del distrito creció en Estocolmo, se decidió convertir a Högdalen en una planta de generación combinada de calor y energía. La construcción de las nuevas instalaciones de producción de calor dio lugar a la conexión de la planta a la calefacción urbana local [88].

Los datos más destacables de esta planta son los siguientes [89, 88]:

- La planta tiene una capacidad total de 700.000 toneladas por año, de los cuales 500.000 toneladas son de RSU.
- Tiene un total de cinco líneas que utilizan tecnologías diferentes: parrilla móvil, horno rotativo y combustión de lecho fluidizado circulante, siendo esta última la más eficiente.
- Se producen un total de 2.174 GWh de calor y 197 GWh de electricidad al año.
- En 2017 proporcionó calefacción urbana a 240.000 de apartamentos.
- Tiene dos turbinas de vapor para la producción de electricidad, una de 27 MW y otra de aproximadamente 44 MW: un total de 71 MW eléctricos.
- Utilizan varias técnicas de depuración de gases como la depuración húmeda y filtro de mangas.

Dichas líneas comprenden los valores resumidos en la Tabla 28.

Tabla 28. Características de la planta de Högdalen [89]

Parámetros del proceso	Valores	Unidades
Capacidad de RSU	11-34	ton/h
Poder calorífico inferior	10	MJ/kg
Temperatura del vapor	430-480	°C
Presión del vapor	35-60	bar

3.4.6. AVG Köln (Colonia, Alemania)

AVG Köln se ocupa de la recogida, el reciclaje y la eliminación de residuos, además de la recuperación energética ambientalmente segura de los residuos de Colonia. Se trata de un proveedor de materias primas y combustibles secundarios, así como de energía y calor procedentes de la valorización energética de residuos. Posee una planta de compostaje para la producción de compost a partir de residuos biogénicos, plantas de separación de residuos comerciales y de construcción, una planta de reprocesamiento de la madera residual, plantas de reciclaje, una planta de incineración de residuos y un vertedero. A continuación, se enumeran algunas características del centro [90, 89]:

- En 2016 se gestionaron y trataron un total de 1.236.000 toneladas de residuos.
- El mismo año se incineraron un total de 736.000 toneladas de RSU, generando 363.000 MWh de energía. La incineradora tiene 4 líneas, generando cada una 56 MW térmicos, un total de 224 MW térmicos. El tipo de horno utilizado es la parrilla móvil.
- Se vertieron 440.000 toneladas en 2016, una cantidad menor que en 2015. Dio lugar a 20.000 MWh de energía. Por otro lado, se compostaron 100.000 toneladas y se reciclaron otros 260.000.
- Se ahorraron 100.000 toneladas de CO₂ equivalentes gracias a su planta de incineración en 2016.
- Utilizan varias técnicas de depuración de gases: depuración húmeda, SCR y filtro de mangas.

La planta de incineración posee los siguientes valores característicos (Tabla 29):

Tabla 29. Características de la planta de AVG Köln [89]

Parámetros del proceso	Valores	Unidades
Capacidad de RSU	18	ton/h
Poder calorífico inferior	11,3	MJ/kg
Temperatura del vapor	400	°C
Presión del vapor	40	bar

3.5. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

La gestión y tratamiento de los RSU, con su reciente tendencia centrada en la economía circular, necesita aportaciones de una amplia gama de disciplinas. Los estudios previos que abordan dichas cuestiones tienen, entre otros, un enfoque científico, económico, socio-legal, o tienen como objetivo describir los avances tecnológicos producidos. *Scopus* es una base de datos que realiza la búsqueda de los artículos científicos deseados además de ofrecer una evaluación de la investigación en forma de gráficos [91]. En la siguiente tabla (Tabla 30), se incluyen el número de artículos encontrados en la plataforma, realizando diferentes búsquedas que incluyen las palabras claves relacionadas con el presente TFG (RSU, valorización energética de los residuos y economía circular). Se realiza la búsqueda para cada término individualmente, otra que incluya RSU con cada uno de los términos restantes y, por último, una búsqueda de todas las palabras clave conjuntamente. Además, se muestran los análisis de algunas búsquedas mediante gráficas que muestran la evolución del número de documentos

encontrados para cada año. Mientras que en la Tabla 30 aparecen los artículos publicados a fecha de 06/09/2018, en las gráficas aparecen los artículos publicados hasta 2018, no incluido, para una visualización más clara ya que el año actual no ha finalizado y los resultados no son terminantes.

Tabla 30. Búsqueda de artículos científicos relacionas con el presente TFG a través de la base de datos Scopus realizada a fecha de 06/09/2018 [91]

Palabras clave de búsqueda	Nº documentos disponibles
Municipal Solid Waste (Residuos Sólidos Urbanos)	22.902
Circular Economy (Economía Circular)	3.447
Waste-to-energy (Valorización energética de residuos)	2.948
Municipal Solid Waste Waste-to-energy (Residuos Sólidos Urbanos Valorización energética de residuos)	5.009
Municipal Solid Waste Ciruclar Economy (Residuos Sólidos Urbanos Economía Circular)	112
Municipal Solid Waste Waste-to-energy Circular Economy (Valorización energética Economía Circular Residuos Sólidos Urbanos)	41

Tal como se puede observar en la Tabla 30, hay un elevado número de artículos sobre los RSU al ser un tema ampliamente discutido y al tener una preocupación social, medioambiental, económica y de salud pública. En la gráfica posterior (Ilustración 39), se observa una tendencia ascendente muy notoria a partir del año 2000 pero se nota un pequeño descenso en el año 2013. Sin embargo, vuelve a haber un aumento continuo a partir de 2015. Este cambio positivo se ha producido como respuesta a la publicación del paquete de Economía Circular por parte de la Comisión Europea, la cual se hizo en diciembre de 2015 [11].

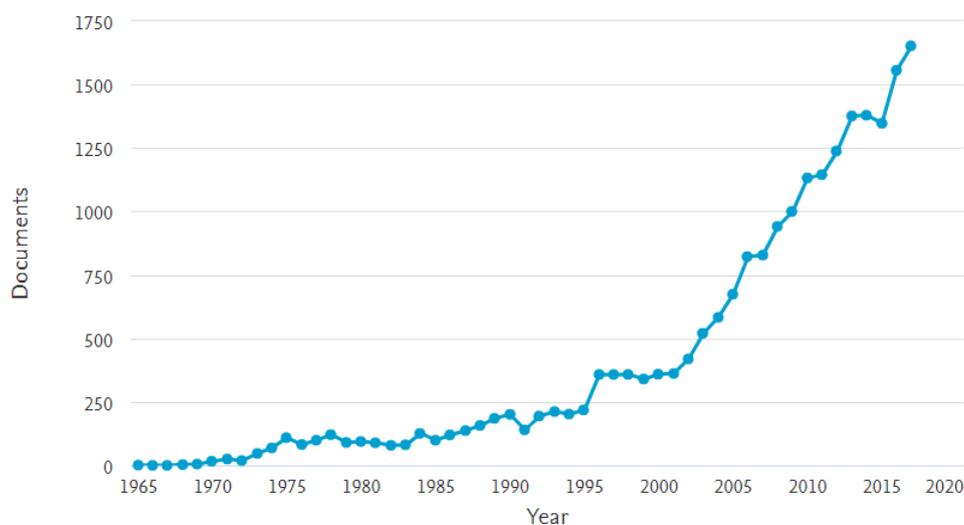


Ilustración 39. Evolución de los artículos que incluyen "Residuos Sólidos Urbanos"

Si se añade el concepto de valorización energética de residuos a la búsqueda de RSU, el número de artículos se reduce a un 22% de los resultados iniciales, es decir, un poco más de 5000 ensayos. Esto se debe a las distintas modalidades disponibles de gestión y tratamiento de RSU, siendo la valorización energética una forma de conversión de RSU de entre los múltiples procedimientos que existen actualmente. Al igual que en el gráfico anterior, en la Ilustración 40, hay un crecimiento muy notorio a partir del año 2000 pero se nota un pequeño descenso en el año 2013, el cual, se recupera a partir de 2015 con a la publicación del paquete de Economía Circular por parte de la Comisión Europea.

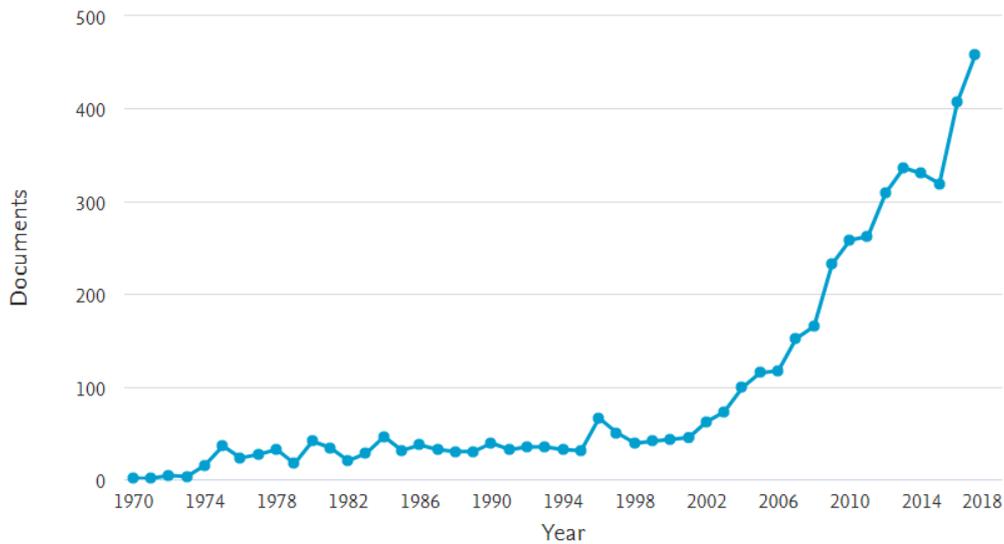


Ilustración 40. Evolución de los artículos que incluyen "Valorización energética" y "Residuos Sólidos Urbanos"

Hay una reducción muy notoria (112 artículos científicos), al juntar el término de RSU con Economía Circular. Se debe al hecho de que la economía circular es un concepto novedoso y aún está en fase de desarrollo. En el gráfico siguiente (Ilustración 41), hay un crecimiento muy notorio a partir del 2015, que al igual que los casos anteriores, tiene como motivo la a la adopción del paquete de Economía Circular por parte de la Comisión Europea en 2015.

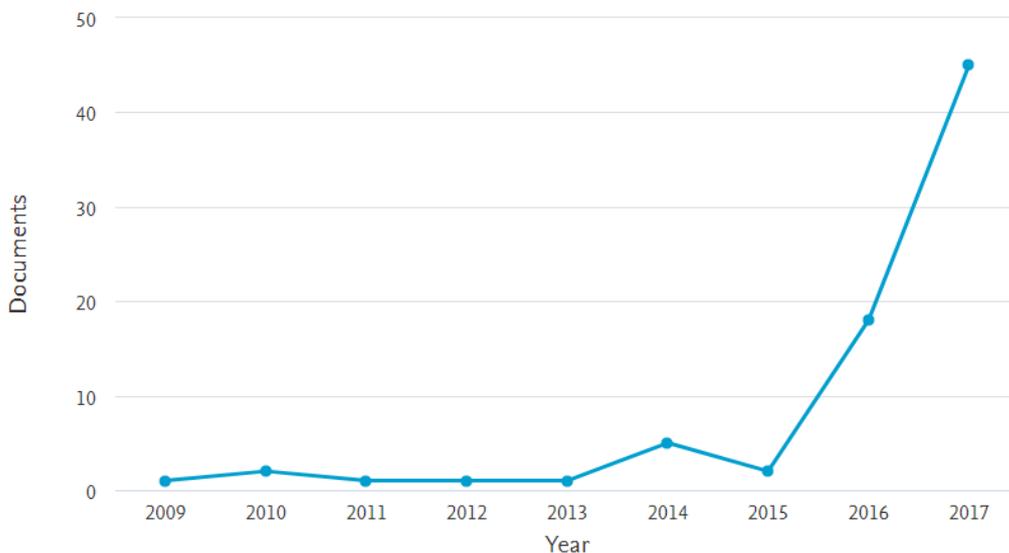


Ilustración 41. Evolución de los artículos que incluyen "Economía Circular" y "Residuos Sólidos Urbanos"

Combinando los tres términos, se consiguen un total de 41 artículos. Si se observa la Ilustración 42, la subida a partir del año 2015 es evidente y está relacionada con la adopción de la Economía Circular. Dichos artículos van en aumento a medida que este ámbito se va haciendo más común.

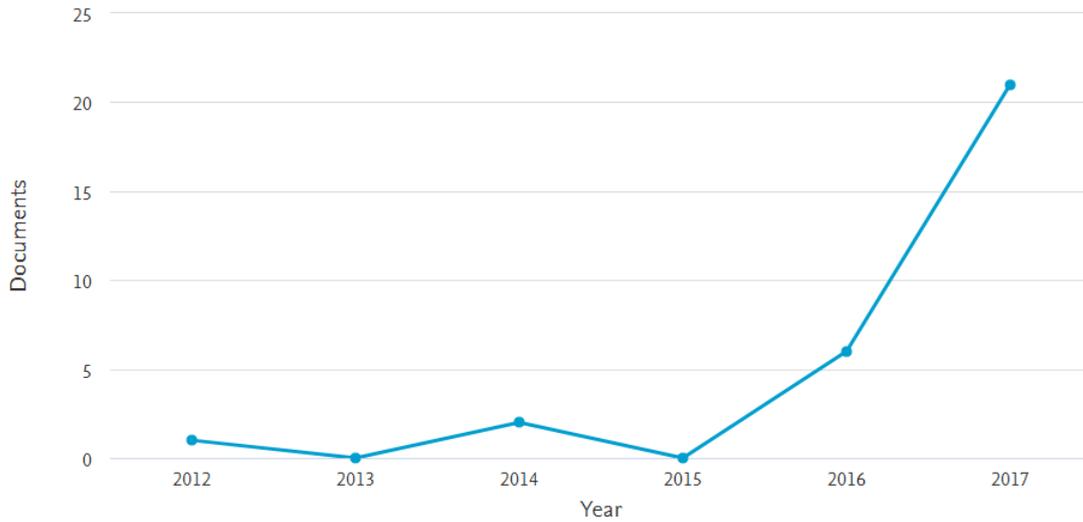


Ilustración 42. Evolución de los artículos que incluyen "Valorización energética" "Economía Circular" y "Residuos Sólidos Urbanos"

A partir de la búsqueda de los tres términos conjuntamente en Scopus, se han seleccionado los siguientes tres artículos con un objetivo similar al presente TFG con el objetivo de realizar una comparación entre dichos artículos y el TFG.

[92] E. C. Rada, L. I. Cioca y G. Ionescu, «*Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: Proposals to assess the management performance under a circular economy perspective*» 9 de Agosto de 2017.

[93] D. Arina y R. Bendere, «*Waste as energy source in EU action plan for the circular economy*» Febrero de 2018.

[94] J. Malinauskaite, H. Jouhara y D. Czajczyńska, «*Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe*» 15 de Diciembre de 2017.

En el primer documento [92], se proponen tres indicadores para el rendimiento de la valorización energética de los RSU en un escenario de economía circular. El primero se refiere al porcentaje de desperdicio que se obtiene al utilizar los RSU directa o indirectamente (CSR) como combustible de las plantas de incineración. El segundo se refiere al porcentaje de cenizas recuperadas. Por último, se hace referencia al porcentaje de residuos alimentarios tratado mediante digestión anaeróbica. Los indicadores tienen que integrarse con otros para cuantificar el rol de la gestión de RSU en términos de recuperación de energía bajo una estrategia de economía circular. Este TFG trata los conceptos de residuos obtenidos tras la incineración y las cenizas recuperadas de manera más completa. La digestión anaerobia sólo se menciona, pero no es objeto del trabajo.

La segunda investigación [93] demuestra que los cambios en la composición y propiedades de los RSU se correlacionan con el tamaño y la densidad del tipo de residuo. El pretratamiento mecánico incluyendo la separación por peso y tamaño puede ser útil para la preparación del CSR y utilizado para la recuperación de energía.

El último documento [94], propone una revisión general de los sistemas de gestión de RSU de la UE y de la valorización energética de dichos residuos en el contexto de la economía circular en algunos países seleccionados de Europa (Estonia, Grecia, Italia, Letonia, Lituania, Noruega, Polonia, Eslovenia, España y el Reino Unido). Por lo tanto, trata temas muy similares a los ofrecidos en este TFG. Considera que convertir los RSU en energía puede ser una de las claves de una economía circular que permita mantener el valor de los productos, materiales y recursos en el mercado el mayor tiempo posible, minimizando el desperdicio y el uso de los recursos. Además, el artículo examina cómo las políticas de la UE se implementan en la práctica, parecida a la evaluación realizada en el presente TFG.

4. SUMINISTRO ENERGÉTICO A UNA PLANTA INDUSTRIAL EN CANTABRIA

4.1. INTRODUCCIÓN

Tal como se ha visto en apartados anteriores, la normativa europea plantea cada vez más obstáculos al carbón como fuente de energía primaria y apuesta seriamente por una economía circular. Las plantas industriales que utilizan el carbón como fuente energética comienzan a plantearse el abandono de dicho combustible y apuestan por la transición energética. La implantación progresiva de renovables térmicas como la biomasa o la solar son las opciones consideradas por la mayoría de las empresas ya que el uso de energías renovables comienza a ser trascendental para el futuro de dichas empresas.

En el presente caso, se estudiará la viabilidad del suministro energético a una planta industrial en Cantabria a través de la incineración de RSU, considerando las necesidades energéticas de la planta y el combustible disponible. Dicha planta utiliza la quema de carbón para la generación de calor y electricidad, concretamente, el combustible usado es la hulla.

A continuación, se realiza un análisis de la situación de la gestión y tratamiento de los residuos en la Comunidad Autónoma de Cantabria cuyos datos serán necesarios para el estudio de viabilidad.

4.2. SITUACIÓN EN CANTABRIA

Cantabria se ha marcado unos objetivos y unas actuaciones concretas necesarias para lograr una economía eficiente en el uso de recursos siguiendo la Estrategia 2020 de la UE. Para ello, se ha puesto en marcha el *Plan de Residuos de La Comunidad Autónoma de Cantabria 2017-2023* que incluye 108 medidas y cuanta con más de 9 millones de presupuesto. Se trata de una herramienta para cumplir con los objetivos establecidos en la legislación y en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos, aprobado en noviembre de 2015 [37]. Con el fin de dar acceso al público a la información medioambiental se ha creado en 2005 el Punto Focal de Residuos de Cantabria [95]. En lo que a competencias se refiere, las administraciones locales y la empresa pública MARE tienen un papel fundamental [96]. La planificación en materia de residuos ha venido anteriormente fijada por el *Plan Sectorial de Residuos Municipales 2010-2014* que actualmente no está vigente, pero se debe hacer referencia a dicho documento con el fin de analizar la consecución de objetivos [97].

Para tener una perspectiva visual, se muestra la siguiente ilustración (Ilustración 43) donde se representa la tasa de recogida de RSU de Cantabria junto con la del resto de Comunidades Españolas en 2009. Cantabria se encuentra entre las de mayor tasa de

generación de RSU por detrás de Castilla y León, Navarra y con unas tasas similares a la de Comunidad de Madrid y País Vasco. En el análisis a nivel regional, se observa que los municipios asociados al sector turismo y a localidades de tipo urbano o semiurbano son los que, en general, producen una mayor cantidad de RSU [98]. Los últimos datos disponibles, correspondientes al año 2015, presentan unos números similares, tal como se explicará en el siguiente apartado.

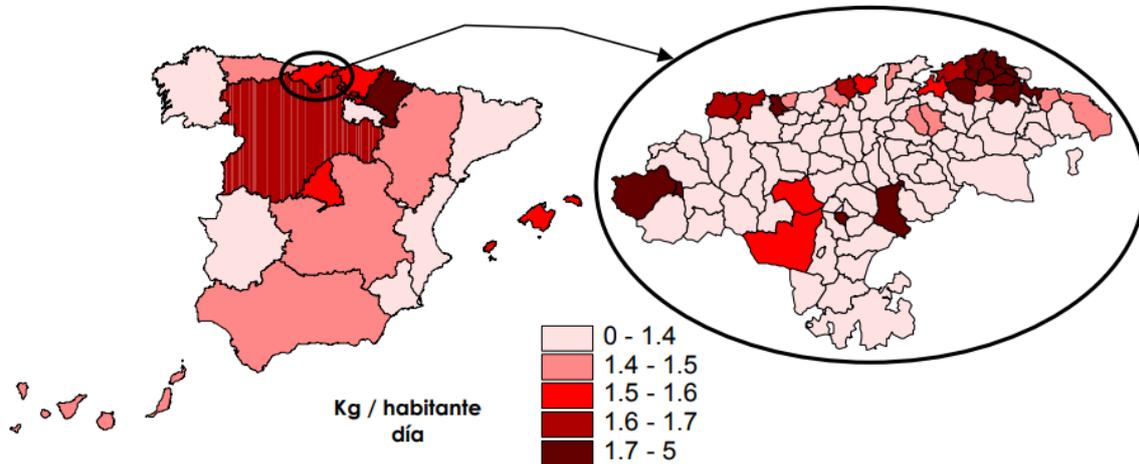


Ilustración 43. Cantidad de Residuos Sólidos Urbanos por habitante y día recogidos a nivel nacional y municipal en 2009 [98]

4.2.1. Servicio encargado de la gestión de RSU

La mayor parte de la gestión de los RSU en Cantabria no es de competencia exclusiva municipal, sino que existe un servicio público autonómico de gestión y tratamiento de los RSU. Se trata de “Medio Ambiente, Agua, Residuos y Energía de Cantabria, S.A.” o “MARE”. Se encarga de la gestión de ciertos flujos de residuos, entre ellos los Residuos Domésticos en los distintos municipios de Cantabria. En concreto, MARE realiza las siguientes actuaciones: “

- a) Actuaciones de abastecimiento en alta de agua.
- b) Actuaciones de saneamiento en alta y depuración de aguas residuales urbanas.
- c) Actuaciones relativas a los residuos urbanos e industriales.
- d) Actuaciones de mantenimiento y rehabilitación del territorio.
- e) Gestión de la producción energética derivada del ejercicio de las actividades anteriores, y aprovechamiento de energías alternativas en general.
- f) Cualesquiera otras actividades relacionadas con la gestión de residuos y con el ciclo del agua que le encomienden el Gobierno de Cantabria, las Entidades Locales y, en general, las personas físicas y jurídicas.” Además, realiza la recogida de RSU en los municipios que no disponen de los medios necesarios para ello [37].

El modelo actual de gestión, ilustrado en la Ilustración 44 está basado en la recogida de cuatro fracciones diferenciadas de residuos domiciliarios, la recogida selectiva de envases ligeros, papel-cartón y vidrio y la recogida de la fracción resto, la recogida de residuos peligrosos generados en los hogares a través de la red de puntos limpios y la

recogida comercial. Los tratamientos llevados a cabo con los Residuos Domésticos en Cantabria son:

- Hay una fracción de los residuos que se separa y se envía a los gestores para su reciclaje
- La materia orgánica de los RSU se separa para su compostaje y posterior utilización como abono
- Una parte de los RSU se envía a valorización energética en la Planta de Recuperación Energética de Meruelo
- Los rechazos de las otras plantas que no pueden ser valorizados de ninguna forma se envían a vertedero [98].

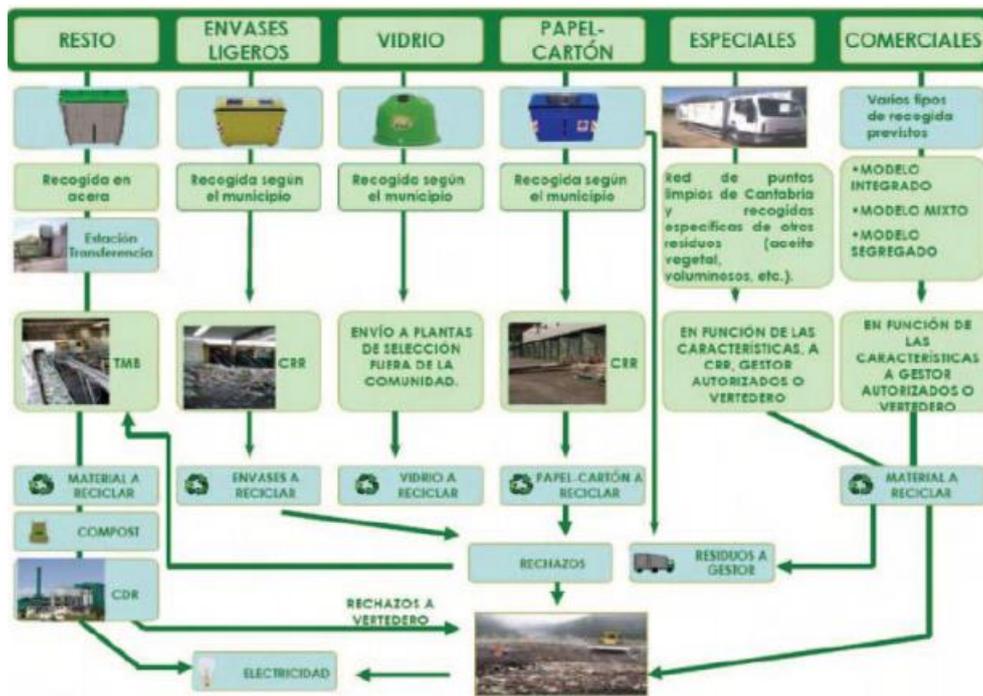


Ilustración 44. Modelo de gestión aplicado en Cantabria para los RSU [98]

Dichos sistemas de tratamiento tienen un seguimiento riguroso para comprobar si se está realizando una adecuada gestión residual, de acuerdo con las políticas europeas. El objetivo es la reducción de las cantidades destinadas a ser depositadas en vertedero o a ser incineradas sin recuperación de energía, en favor del compostaje y la recogida selectiva, cuyos materiales se destinan a reutilización, reciclado y valorización [98].

4.2.2. Indicadores de generación de RSU

El Punto focal de residuos de Cantabria ha elaborado un indicador que analiza la generación de RSU por habitante y año en Cantabria y otro en el que aparece la consecución de los objetivos marcados en el Plan Sectorial de Residuos Municipales 2010-2014 (ver Ilustración 45 e Ilustración 46) [95]. La producción de residuos en Cantabria ha seguido una tendencia favorable en los últimos años, tal como podemos ver en las siguientes gráficas.

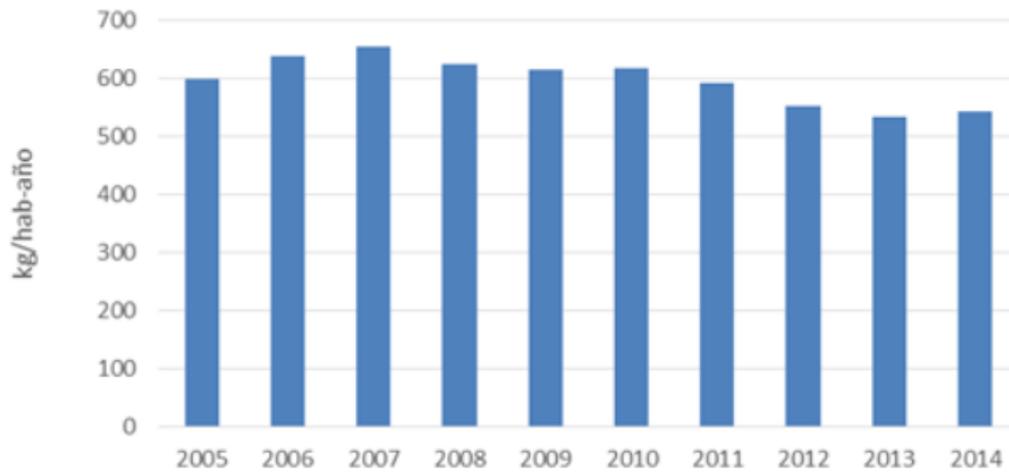


Ilustración 45. Evolución en la generación de residuos domésticos per cápita [95]

El gráfico anterior presenta un aumento constante desde el año 2005 hasta un máximo de generación en 2007 (656,7 kg/hab./año). A partir de ese año, la tasa ha disminuido progresivamente, alcanzando los 534 kg/hab./año en 2013, el valor mínimo de esta serie 2005-2014. Esto se debe a la entrada en vigor del Plan Sectorial de Residuos Municipales 2010-2014. Sin embargo, en el año 2014 se observa un pequeño aumento [95]. Al igual que en la gráfica anterior, en la Ilustración 9 se observa un ligero aumento en la tasa de generación en 2014, último año para el que esta institución dispone de información. En dicho año ha habido una producción de 1,49 kg/hab./día alcanzando 319.961 toneladas/año.

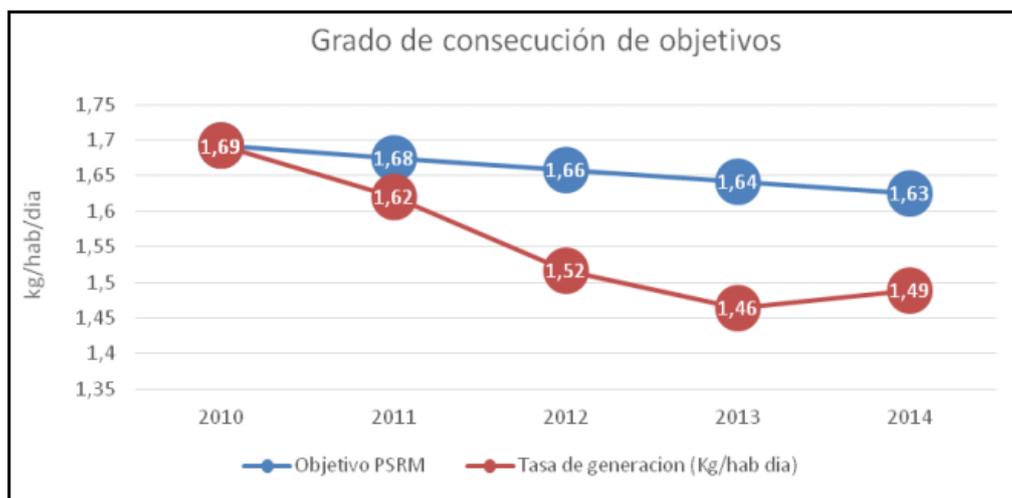


Ilustración 46. Grado de consecución de objetivos en Cantabria [95]

En la gráfica superior aparece en azul el objetivo del Plan Sectorial de Residuos Municipales (PSRM) que consiste en “la disminución de la generación de RSU per cápita de un 1% anualmente desde el año 2010, siendo la tasa de generación per cápita inferior al valor propuesto, cumpliendo el objetivo planteado.” En rojo está la tasa de generación real que es “el cociente entre los residuos recogidos en cada una de las modalidades existentes y la población” [95, 97]. Durante estos años, se han cumplido

los objetivos señalados en la normativa nacional y la línea estratégica recogida en el PSRM [37].

Por otro lado, el Instituto Nacional Estadística publica cada 5 años la cantidad de residuos urbanos recogidos clasificados por tipo de residuo (Tabla 31). Se dispone de los datos correspondientes a 2015 en toneladas [99]:

Tabla 31. Cantidad de RSU recogidos clasificados por tipo de residuo en Cantabria (2015) [99]

Residuos domésticos y similares (domésticos y vías públicas)	240.609
Residuos domésticos voluminosos mezclados (enseres domésticos)	19.841
Residuos metálicos	307
Residuos de vidrio	10.999
Residuos de papel y cartón	9.640
Residuos textiles	782
Equipos eléctricos desechados y componentes de equipos electrónicos desechados	603
Residuos de pilas y acumuladores	73
Residuos animales y vegetales	4.034
Envases mixtos y embalajes mezclados	5.277
Residuos minerales (incluye residuos de construcción y demolición)	18.562
Otros	89
Total residuos mezclados	260.450
Total residuos de recogida separada	50.366
Total residuos	310.816

En la categoría de “Otros” están incluidos los medicamentos no utilizados, los residuos de caucho y los residuos sanitarios y biológicos. El “Total residuos mezclados” incluye los “Residuos domésticos y similares” y los “Residuos domésticos voluminosos mezclados”. El resto se agrupan en la categoría de “Total residuos de recogida separada” [99] . Ha habido una disminución en la generación de residuos con respecto al año 2014 cuyo valor fue de 319.961 toneladas/año.

En términos per cápita, en el año 2015, Cantabria fue una de las comunidades autónomas donde se recogió la mayor cantidad de residuos por persona y año: 532,6 kg de residuos por persona. Se puede comparar este dato con los datos de las demás comunidades en la Ilustración 47 [99].

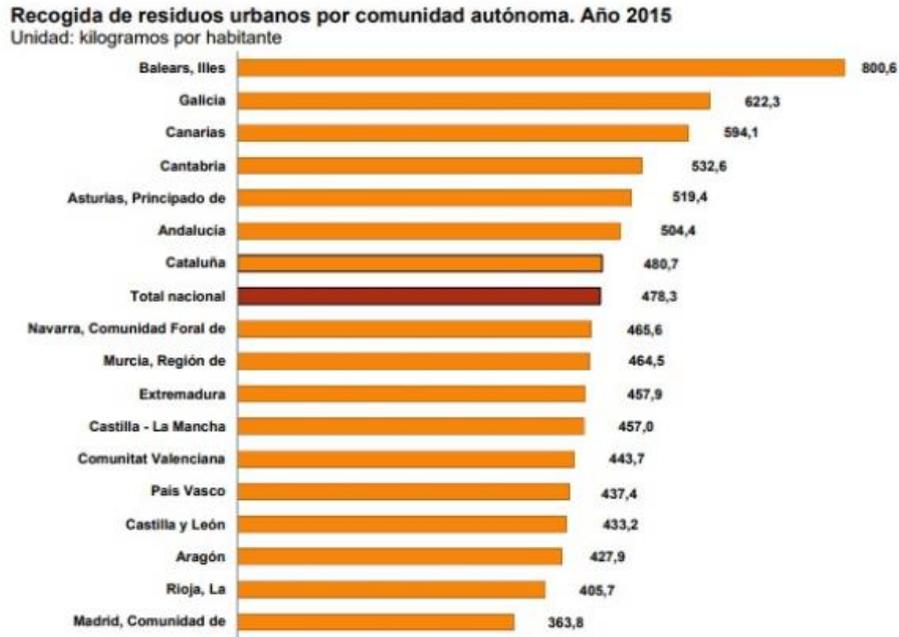


Ilustración 47. Recogida de RSU por comunidad autónoma (2015) [99]

4.2.3. Tasa de valorización energética

De igual forma, el Punto focal de residuos de Cantabria ha elaborado un indicador que analiza la tasa de valorización energética de los RSU, como lo podemos comprobar en la Ilustración 48. Gran parte de la valorización energética se realiza en el complejo medioambiental de Meruelo el cual dispone de una planta de incineración y otra de compostaje con recuperación de energía además de una planta de reciclaje y una zona preparada para el vertido controlado [95, 100].



Ilustración 48. Tasa de valorización energética de Residuos Domésticos [95]

El indicador que aparece en azul “compara la cantidad de RU valorizados en planta de valorización energética respecto a la cantidad total de RU generados” [95]. Desde la puesta en marcha de la planta de Meruelo, en el año 2006, la tasa de residuos valorizados energéticamente ha aumentado considerablemente. La cantidad de residuos

destinados a valorización energética ha sido de aproximadamente 115.000 toneladas desde 2008, aumentando en el año 2014 hasta alcanzar las 126.800 toneladas, lo que supone un 40% del total de RSU generados en la comunidad.

El combustible que utiliza la incineradora de Meruelo es el CDR (combustible derivado del residuo) consistente en los materiales de rechazo de la planta de TMB (tratamiento mecánico-biológico), concretamente de los procesos de triaje y compostaje no aprovechable. Por otro lado, existe otro flujo de residuos, aceite vegetal usado, que puede ser aprovechado energéticamente en forma de biodiesel [95].

El Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, publica cada año una memoria anual de generación y gestión de residuos de competencia municipal. La última memoria publicada se corresponde al año 2015 y en ella podemos encontrar información sobre las cantidades de residuos tratadas en Cantabria en toneladas (Tabla 32) [54]

Tabla 32. Cantidades de RSU clasificadas por su tratamiento en Cantabria (2015) [54]

Reciclado procedente de recogida separada	35.845
Materiales Recuperado procedente del TMB* de residuos mezclados	12.299
Compostado y digestión anaerobia de FORS**	0
Compostado y digestión anaerobia en TMB	57.775
Incinerado	117.879
Vertido de rechazos	37.518
Vertido sin tratamiento previo	17.308

*TMB: Tratamiento Mecánico Biológico

**FORS: plantas de compostaje de la fracción orgánica recogida de forma selectiva

Como se puede apreciar en la tabla, en el año 2015 se han destinado a la incineración aproximadamente 118.000 toneladas de RSU, lo que supone una cifra muy elevada en comparación con otras Comunidades Autónomas, teniendo en cuenta la cantidad de residuos total. Supone aproximadamente un 40% del total, al igual que el año anterior.

Según los datos de la MARE, el Complejo Medioambiental de Meruelo ha gestionado en 2015 un total de 223.301 toneladas procedentes de la fracción resto de los residuos domésticos, de los cuales solamente un 24% han tenido como destino final el vertedero. Por lo tanto, los 76% restantes se valorizaron generando cerca de 10 millones de kWh de energía [101, 102]. Los datos técnicos de la planta de incineración de Meruelo se recogen en la Tabla 33 [103].

Tabla 33. Datos principales de la planta de incineración de Meruelo [103]

Funcionamiento desde	2006
Capacidad	12 t/h
Poder calorífico inferior (PCI)	11,72 MJ/kg
Parámetros de vapor vivo	46 bar; 420°C
Energía generada en 2015	93.229 MWh
Cantidad de RSU incinerados en 2015	115.977 t

Cantabria está en ratios superiores a los que obliga la normativa de gestión de RSU y, por lo tanto, se dispone de una evolución correcta en este ámbito. Sin embargo, la normativa europea es cada vez más exigente y se debe seguir evolucionando en los próximos años [104]. Gracias a las mejoras realizadas en las instalaciones del complejo, se ha conseguido reducir significativamente la entrada de los residuos al vertedero. La Ley de Residuos 22/2011 exige que *“antes de 2020, la cantidad de residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la reutilización y el reciclado para las fracciones de papel, metales, vidrio, plástico, biorresiduos u otras fracciones reciclables deberá alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50% en peso”* [105]. Cantabria ha reciclado el 44,34% de los residuos, por lo tanto, hay que avanzar alrededor de 6% para cumplir con el objetivo fijado [106, 104].

4.3. METODOLOGÍA

La cogeneración es uno de los medios de generación energética más eficiente que existe, promovido tanto por las autoridades nacionales como las europeas en materia energética y medioambiental. Se debe, en cierta medida, a la contribución del proceso a la reducción global de las emisiones de GEI. La cogeneración se considera fundamental para la planta química objeto del estudio ya que la producción de vapor es un elemento indispensable para sus procesos, cogenerando al mismo tiempo electricidad.

Al tratarse de un consumidor industrial, la planta de incineración de residuos debe estar ubicada muy cerca del usuario de vapor y electricidad comercial. El vapor normalmente está a presiones más altas que el utilizado para la calefacción urbana, pero el sistema de distribución está diseñado de acuerdo con los requisitos del consumidor. Por otro lado, se requieren instalaciones de respaldo para proporcionar interrupciones en el suministro de la planta de incineración [17].

En este estudio se analizará cuál sería la cantidad necesaria de RSU para la sustitución del carbón, teniendo en cuenta que la planta utiliza diariamente 1000 toneladas de hulla, la cual tiene un PCI mucho más elevado que el del RSU: 25 MJ/kg. En principio, se considera que la planta va a utilizar toda la fracción de materiales de rechazo de Meruelo, es decir, casi 116.000 toneladas (las obtenidas en 2015). Sin embargo, esta cantidad no podría ser suficiente por lo que se van a proponer dos posibilidades para abastecer energéticamente la planta. En todas las opciones se van a utilizar los RSU incinerables propios de Cantabria.

- 1) Importar la fracción resto no reciclable de los RSU de las Comunidades Autónomas adyacentes (Asturias, Castilla y León y País Vasco). Vamos a considerar que esto supone solamente unos costes de transporte determinados, no unos específicos por el combustible, ya que la planta química se ocuparía de su gestión y tratamiento sin que las CCAA tengan que hacerlo.
- 2) Co-incinerar la fracción de rechazo de los RSU regionales (116.000 toneladas) junto con una cantidad menor de hulla que la actualmente utilizada, es decir, la

cantidad restante. El combustible residual no supondría ningún coste para la planta mientras que el carbón supondría un gasto elevado.

4.4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

La planta industrial de cogeneración tiene un consumo medio de unas 1000 toneladas de carbón al día con un PCI de 25 MJ/kg. Por lo tanto, el consumo energético que supone es el siguiente:

$$\text{Consumo energético} = \text{kg combustible} \times \text{PCI}$$

Ecuación 2. Cálculo del consumo energético previsto

$$\text{Consumo energético} = 1000 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 25 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 25 \cdot 10^6 \frac{\text{MJ}}{\text{día}} = 289,4 \frac{\text{MJ}}{\text{s}}$$

$$\text{Consumo energético} = 289,4 \text{ MW} \approx \mathbf{290 \text{ MW}}$$

Al tratarse de una planta de cogeneración de carbón, consideramos una eficiencia del 80%. Las industrias son mayores consumidores de calor que de electricidad, consiguiendo unas eficiencias elevadas, tal como observamos en la Ilustración 49:



Ilustración 49. Eficiencia de una planta de cogeneración [107]

$$289,4 \text{ MW} \cdot 0,49 = 141,8 \text{ MW térmicos}$$

$$289,4 \text{ MW} \cdot 0,31 = 89,7 \text{ MW eléctricos}$$

$$289,4 \text{ MW} \cdot 0,20 = 57,9 \text{ MW pérdidas}$$

La energía útil total será del 231,5 MW, considerando la electricidad y el calor totales generados. No se va a tener en cuenta la eficiencia de la planta ya que su cálculo es muy complejo.

Utilizando solamente carbón, la planta necesita 365.000 toneladas de hulla al año, suponiendo que la planta funciona los 365 días al año. El precio de la hulla del Norte en 2015 rondaba los 80 euros por tonelada según el informe de Greenpeace [108]. Por lo tanto, el coste total del carbón sería de **29,2 millones de euros al año**.

En el caso de utilizar solamente RSU para el abastecimiento energético de la planta, se considera un PCI de 11,72 MJ/kg RSU, el obtenido en la planta de valorización energética de Meruelo. Calculamos las toneladas que se necesitarían:

$$\frac{25 \cdot 10^6 \text{ MJ/día}}{11,72 \text{ MJ/kg}} = 2133 \cdot 10^3 \frac{\text{kg RSU}}{\text{día}} = 2133 \frac{\text{ton RSU}}{\text{día}} = 778.545 \frac{\text{ton RSU}}{\text{año}}$$

La cantidad de residuos urbanos generados en Cantabria en 2015 fue de 310.816 toneladas. Sin embargo, los RSU incinerados en la planta de Meruelo fueron 115.977 toneladas, según los datos de Meruelo [103], es decir, un 37,5% del total. Se trata de la fracción de materiales de rechazo procedentes de los procesos de separación de la materia orgánica y de recuperación de los materiales reciclables. Por lo tanto, el uso de los RSU de Cantabria para el funcionamiento de la planta industrial es inviable. A partir de aquí se procede a analizar los dos casos explicados anteriormente.

- 1) Suponiendo que la cantidad de RSU útil para la incineración, propia de Cantabria, no supusiera ningún coste a la planta industrial, se necesitarían otras **662.568 toneladas** de la fracción de rechazo de los RSU de otras comunidades, con unos costes de transporte determinados. En la siguiente tabla aparecen los RSU generados e incinerados por las comunidades autónomas adyacentes a Cantabria en 2015 (Tabla 34).

Tabla 34. RSU generados e incinerados por las CCAA adyacentes a Cantabria en 2015 [54]

Comunidad Autónoma	Residuos incinerados	Residuos generados
Principado de Asturias	0	527.408
Castilla y León	0	1.073.331
País Vasco	293.758	948.698

Como se puede ver, tanto Asturias como Castilla y León no ha valorizado energéticamente sus residuos mediante la incineración, sino que han apostado seriamente por el vertido. Sin embargo, País Vasco ha incinerado una cantidad importante por lo que hay que centrarse en las otras dos comunidades.

Sabiendo que Cantabria ha incinerado el 37,5% de sus residuos municipales, vamos a aplicar el mismo porcentaje para el caso de Asturias y Castilla y León para tener la cantidad aproximada de la fracción rechazo de los RSU de cada comunidad (Tabla 35).

Tabla 35. RSU aportados por Asturias y Castilla y León para la planta de incineración de RSU

Asturias	Castilla y León
197.778 ton	402.450 ton
600.228 ton totales	

Como la cantidad necesaria es de 662.568 toneladas RSU, País Vasco tendría que aportar un total de 62.340 toneladas para llegar a la cantidad requerida.

Vamos a suponer que la empresa cántabra va a recibir dichos residuos de manera gratuita ya que las comunidades se beneficiarían de una liberación de la obligación de gestionar una parte de sus residuos. Además, se eximen de pagar cánones por las emisiones de CO2 que se producirían. Sin embargo, va a haber unos costes de transporte determinados, por parte de la empresa química.

Los RSU se van a transportar en camiones tipo con una capacidad de 25 toneladas y con una tarifa de 50 euros la hora. La distancia entre Cantabria y las demás comunidades se va a calcular de forma aproximada, utilizando la distancia entre sus correspondientes capitales.

La aportación de cada C.A. al año, así como los camiones necesarios para transportar dicha cantidad, la distancia y el coste de transporte se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36. Cantidad de RSU en toneladas aportada por cada CCAA y el coste del transporte

C.A.	Asturias	Castilla y León	País Vasco	Total
RSU aportados (ton)	197.778	402.450	62.340	662.568
Camiones necesarios	7.911	16.098	2.494	26.503
Distancia (horas)	2	3	1	
Coste transporte (euros)	791.100	2.414.700	124.700	3.330.500

Sólo el transporte le supondría a la empresa un gasto de **3,33 millones de euros**.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, debido a la elevada cantidad de residuos requeridos, se necesitaría la construcción de otras líneas de producción con sus respectivos hornos con una gran capacidad de incineración, además de las líneas que ya posee la planta para la quema de carbón. Todo ello con unos gastos de inversión inicial, de operación, mantenimiento y amortización de la construcción o adecuación de la planta para poder producir el combustible [66].

Como ya se ha visto, se produce una transformación de las 1000 toneladas de hulla iniciales a 2133 toneladas de RSU. En este caso, la cantidad del combustible es más del doble por lo que se necesita unas nuevas líneas de producción correspondientes al cambio.

Para calcularlo, se tiene el ejemplo de la incineradora de Estocolmo, Högdalen, (3.4.5), que incinera al año una cantidad de RSU parecida a la requerida por la planta química. Dicha planta necesita cinco líneas de incineración para su funcionamiento, siendo sistemas de incineración de parrilla y caldera. Tal como se ha visto, utiliza los siguientes sistemas de depuración de gases: depuración húmeda, SCR y filtro de mangas. Al seguir este ejemplo, en nuestro caso se utilizaría una cantidad de 155.709 de toneladas de RSU para cada línea (778.545 toneladas totales). Como sólo se necesita nuevas instalaciones para poco más de la mitad del combustible de RSU, se va a requerir la construcción de 3 líneas de producción (155.709 ton para cada línea, es decir, 467.127 ton para las tres). Supondría un gasto de inversión aproximado de **300 millones de euros** (100 millones para cada línea, tal como se observa en el gráfico de la Ilustración 50) según el documento sobre los costes de las energías renovables de IDAE de 2010 [32]:

“Las instalaciones de incineración de residuos suponen una inversión inicial de entre 90 y 100 M€ para plantas de 150.000 t anuales de capacidad” [32]

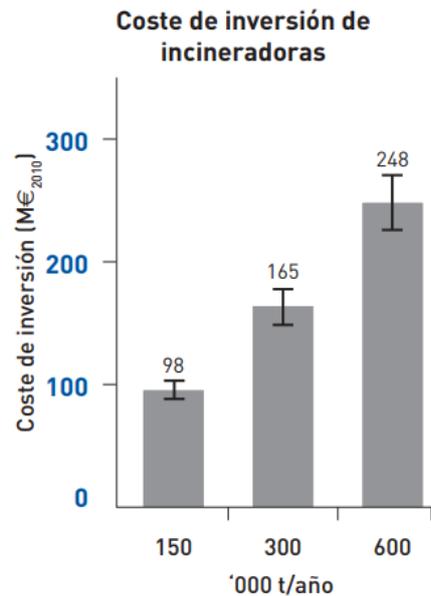


Ilustración 50. Coste de inversión de incineradoras en función del tamaño de la planta [32]

A todo ello hay que añadir los siguientes costes, aplicables a las cinco líneas de producción (778.545 toneladas RSU), que aparecen en la Tabla 37. Los cálculos fueron realizados con los datos del documento BREF de la Comisión Europea [63].

Tabla 37. Otros costes correspondientes a las 5 líneas de producción de la planta de incineración de RSU

	Euros/año
Costes de inversión específicos (incineración y caldera)	8.548.424
Costes de mantenimiento específicos (incineración y caldera)	3.581.307
Costes de electricidad (incineración y caldera)	521.625
Coste sistema depuración húmeda	1.650.515
Coste filtros de manga	5.512.098
Costes limpieza catalítica de gases (SCR)	2.351.206
Costes específicos descarga y almacenamiento	2.724.907
Costes específicos ciclo agua-vapor	9.186.831
Impuestos sobre la incineración (Cantabria)	0
Total	34.076.913

Tal como se ha visto, la incineración de una tonelada de RSU da lugar a 180-250 kg de cenizas de fondo. En la planta de Amager Bakke (3.4.1), 10-15 kg de una tonelada de residuo de entrada se recupera como metal, valorizándose por 10 euros por tonelada de RSU de entrada [44]. Después del reciclaje de metal, una parte restante se utiliza como materiales de construcción (150-200 kg), lo cual se puede vender por unos 70-90 euros por tonelada, según EOI [109]. Suponiendo que en esta planta se reciclan 15 kg de metal (10 euros por tonelada de RSU de entrada) y 200 kg de material de construcción (70 euros por tonelada de material), los beneficios obtenidos son los siguientes (Tabla 38):

Tabla 38. Residuos sólidos reciclados y beneficios obtenidos en la planta de incineración de RSU

	Cantidad reciclada (ton)	Beneficios (euros)
Metal	11.678	7.785.450
Material de construcción	155.709	10.899.630
Total	167.377	18.685.080

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la electricidad generada mediante la incineración de residuos se considera producción de energía en régimen especial y, como tal, recibe unas aportaciones fijadas reglamentariamente por la Administración. En el año 2009, por cada tonelada incinerada se pagaron 19 euros por este concepto [74]. En este caso, las aportaciones recibidas anualmente serían 14.792.355 euros al año.

Resumiendo, el coste de inversión resultan ser **300 millones de euros**, a los que hay que añadir los costes anuales: 3,3 millones de euros por el transporte de residuos y 34 millones de euros por los costes específicos calculados en la Tabla 37, un total de **37,3 millones de euros anuales**. La energía y el calor obtenidos en el proceso se van a utilizar en su totalidad para el funcionamiento de la planta por lo que no van a generar beneficios extra. La valorización de las cenizas y escorias se estima en 18,7 millones de euros mientras que las aportaciones por parte de la Administración supondrían unos ingresos de 14,8 millones de euros: un total de **33,5 millones de euros**.

Aunque haya beneficios al valorizar las cenizas y la escoria, la inversión requiere unos costes desorbitados por lo que no es algo factible para una planta industrial que simplemente quiere abastecer sus instalaciones. Las instalaciones que se construirían son de gran tamaño y complejidad, requiriendo un alto número de personas contratadas, aproximadamente 25 trabajadores por cada 100.000 toneladas (**195 trabajadores** para las toneladas de la planta) [74]. La planta no va a poder recuperar la inversión realizada para la instalación y funcionamiento de la misma. Se debe pensar en otras alternativas como, por ejemplo, la coincineración de carbón y los RSU locales, sin necesidad de un transporte costoso y contaminante.

- 2) En este caso, se van a combinar las dos materias primas para conseguir un equilibrio económico y medioambiental, reduciendo la quema de carbón. Se trata de la coincineración de RSU y hulla, cuyos datos aparecen en la Tabla 39 [17, 108].

Tabla 39. Datos característicos de los dos combustibles de la planta de coincineración

	Hulla	RSU
PCI (MJ/kg)	25	11,72 (Meruelo)
Precio (€/ton)	80	0
Eficiencia central eléctrica (%)	35	30
Eficiencia central produciendo solo calor (%)	80	85
Eficiencia cogeneración (%)	Depende de la demanda de electricidad y calor	

La cantidad de RSU que se va a co-incinerar se corresponde a la fracción de rechazo de los RSU obtenida en Meruelo, es decir, 115.977 toneladas (318 ton/día). El combustible restante, requerido para el abastecimiento energético de la planta, seguirá siendo la hulla, pero en una menor cantidad. La adquisición del combustible residual no supone ningún coste para la planta mientras que el carbón supondría un gasto elevado, tal como se refleja en la siguiente Tabla 40.

Tabla 40. Características de la planta de co-incineración de RSU y hulla

RSU				Hulla			
Ton/día	MW	%	Coste (€/año)	Ton/día	MW	%	Coste (€/año)
318	43	14,8	0	854	247	85,2	24.936.800

El porcentaje que le corresponde al RSU es el 15% mientras que la hulla abarcaría el 85% del combustible requerido. El coste anual de la hulla se reduce de manera significativa ya que, como se calculó anteriormente, el coste del uso exclusivo de la hulla es de 29,2 millones de euros al año. Combinando las dos materias primas, el coste del carbón se reduce en un 14%, beneficiando a la empresa.

Además, tal como hemos visto en el caso anterior, la empresa al aceptar dichos residuos recibe unas aportaciones fijadas por la Administración. Se paga 19 euros por tonelada, por lo que la aportación anual sería de **2.203.563 euros**.

Al igual que en el caso anterior, se puede realizar una valorización de las cenizas de fondo y escorias producidas. Suponiendo que en la planta se van a reciclar 15 kg de metal y 200 kg de material de construcción por tonelada de RSU de entrada, los beneficios obtenidos son los siguientes (Tabla 41):

Tabla 41. Residuos sólidos reciclados y beneficios obtenidos en el segundo caso

	Cantidad reciclada (ton)	Beneficios (euros)
Metal	1.740	1.159.970
Material de construcción	23.200	1.624.000
Total	24.940	2.783.970

Los ingresos de la planta son los obtenidos por aceptar los residuos y los que se obtienen por valorizar las cenizas de fondo y escorias, es decir, un total de, aproximadamente, **5 millones de euros**. Tal como se ha visto, se reduce el gasto por la compra de carbón en un 14%, ahorrando 4,3 millones de euros.

Se va a considerar que los gases liberados por la incineración de RSU van a recibir el mismo tratamiento de depuración de gases que los liberados por el carbón. Por lo tanto, no hay que invertir en sistemas de limpieza.

Ahora se va a proceder a calcular el CO₂ liberado tras la incineración de los dos combustibles. Tal como se ha visto en la Ilustración 33 e Ilustración 34, según ISWA, la quema de los RSU emite 367 g de CO₂ por kWh mientras que el carbón emite 987 g por kWh. Sin embargo, según Green Peace, los RSU y el carbón

generan, respectivamente, 1355 y 1020 g de CO₂ por kWh. Se considera que la planta tiene un rendimiento del 90% (funciona 7884 horas al año), por lo que, los kWh generados al año por tipo de combustible son los que aparecen en la Tabla 42.

Tabla 42. Emisiones de CO₂ del RSU y la hulla

		Producción (kWh)	Emisión CO ₂ (ton/kWh)	TOTAL
ISWA	RSU	339.012.000	124.417	2.046.449
	Hulla	1.947.348.000	1.922.032	
Green Peace	RSU	339.012.000	459.361	2.445.656
	Hulla	1.947.348.000	1.986.294	

A continuación, se puede observar gráficamente las emisiones de CO₂ según las dos fuentes contradictorias (Ilustración 51). Es evidente que los datos de emisión de CO₂ de la incineración de RSU son totalmente opuestos ya que muchas fuentes no consideran que algunos recursos incinerados sean neutros en carbono. Según Green Peace, una planta incineradora de residuos moderna con producción de energía eléctrica emite más CO₂ por kilovatio hora generado que una central térmica de carbón, conclusión contraria a ISWA [74, 7].

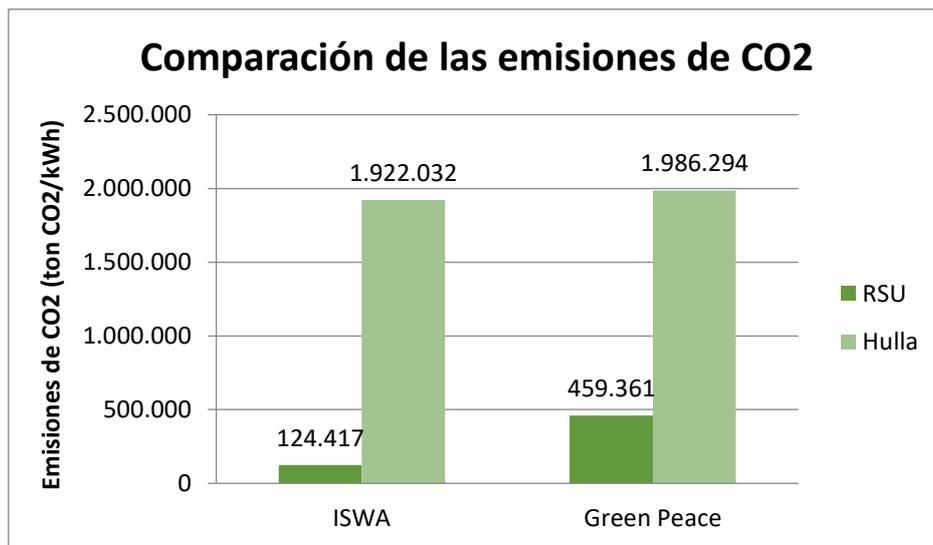


Ilustración 51. Comparación de las emisiones de CO₂ según las dos fuentes contradictorias (Elaboración propia)

En la siguiente Ilustración 52, se puede observar la evolución económica de las dos opciones, teniendo en cuenta todos los factores. El gráfico comienza con la inversión inicial y sigue hasta los cinco años siguientes. Mientras que la inversión de la opción 1 supone 300 millones de euros, la opción 2 no supone ninguna inversión. Las dos líneas nunca cortarían por lo que la opción 1 supone un gasto innecesario para la planta que nunca recuperaría. Por ello, la co-incineración es la opción idónea.

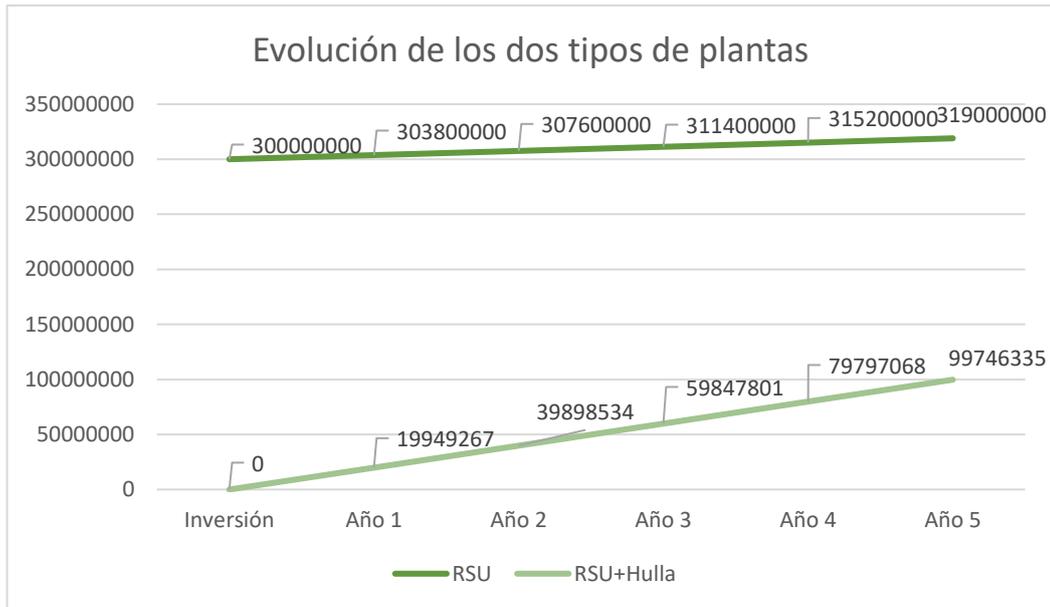


Ilustración 52. Evolución económica dependiendo del tipo de combustible utilizado durante cinco años

Como conclusión, la coincineración es la opción idónea para llevar a cabo una transición energética de la planta química enfocada en los RSU. De esta manera, se consigue una correcta gestión de los residuos, impulsando la economía circular de Cantabria. Así, la valorización energética de los RSU, además de proporcionar electricidad y calor para el abastecimiento de la planta, se convierte en una fuente alternativa al carbón y reduce enormemente los costes del transporte al tratar los residuos locales. Por otro lado, se obtienen beneficios económicos por aceptar y tratar dichos residuos y por valorizar de las cenizas de fondo y escorias.

5. CONCLUSIONES

La gestión de residuos ha tenido un desarrollo tremendo en las últimas décadas. Es bien sabido que la gestión tradicional de residuos no es suficiente para abordar los problemas relacionados con la producción y consumo sostenibles, y con la gestión de los recursos.

Para garantizar la disponibilidad de recursos en el futuro y contrarrestar el aumento constante de la demanda mundial de recursos primarios, es necesario lograr una optimización del uso y gestión de los materiales. Antes que nada, se necesita un cambio de mentalidad, el cual se va a conseguir aumentando la formación e información tanto entre las administraciones públicas como entre la sociedad, de forma que se eliminen barreras existentes sobre opciones de gestión de residuos que han de ser prioritarias al depósito en vertedero. Para ello, un conjunto de instrumentos y políticas están disponibles. El paquete de la Economía Circular es buen ejemplo de ello y sirve, sobre todo, para que el valor de los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y se reduzca al mínimo la generación de residuos, cerrando así el ciclo de los materiales.

Las opciones de prevención, reutilización, reciclaje y recuperación de la jerarquía de residuos no son mutuamente excluyentes y la recuperación de energía a partir de los residuos no es incompatible con el aumento de las tasas de reciclaje. Tal como se ha visto, países como Dinamarca o Alemania, son de larga tradición ambientalista, con altos niveles de valorización material y, al mismo tiempo, tienen los índices más altos de reciclaje.

Mientras que algunas cosas para las que no hay más uso se pueden reciclar, se debe buscar una solución a la hora de gestionar los materiales contaminados, tóxicos o degradados después de múltiples reciclajes. No todo puede ser reciclado y, en estos casos, las únicas opciones son la recuperación y la eliminación, los procesos que ocupan las últimas posiciones en la jerarquía de residuos.

Hay que tener en cuenta que el objetivo común es eliminar en vertederos la menor fracción posible. Cada vez es más complicado encontrar ubicaciones aptas para los vertederos debido a la presión demográfica sobre el territorio. Existe una amplia gama de tecnologías de pretratamiento y tratamiento térmico que han demostrado ser eficaces y están disponibles comercialmente en la UE y en todo el mundo. Esto se debe al hecho demostrado de que no se puede renunciar a un flujo valorizable energéticamente cuantitativamente significativo. Sin embargo, la selección de las tecnologías más sostenibles ambientalmente y comercialmente puede ser un desafío y representa una barrera para la inversión.

Hay que destacar que el uso del RSU como combustible proporciona muchos beneficios. Además de proporcionar electricidad local y calor para la calefacción urbana, se considera una fuente alternativa al combustible fósil y reduce enormemente los costes del transporte al tratar los residuos locales.

Hay fuentes que consideran que es demasiado problemático clasificar la incineración de residuos, y por tanto los RSU, como una forma de energía renovable. Para mitigar esto, se debe implementar la Jerarquía de Residuos, donde la minimización de los residuos tiene prioridad mientras que la conversión de residuos en energía tiene una clasificación inferior a la reutilización y el reciclaje de materiales.

Un riesgo importante de los sistemas basados en la valorización energética es que se vuelven dependientes y justifican el consumo cada vez más derrochador de las sociedades. Se debe evitar la creación de un incentivo para aumentar, en lugar de disminuir, las cantidades de residuos producidos, contribuyendo así a niveles más altos de uso de energía y materiales en toda la sociedad. Por otro lado, Hay que evitar el transporte a larga distancia, lo que aumenta aún más el impacto ambiental. La solución radica en la utilización de los residuos locales o los que se encuentran en la cercanía, sin la necesidad de recurrir al transporte de larga distancia. Esto es uno de los motivos por los que se ha considerado la segunda opción de la parte práctica de este TFG como la más viable

Tal como se ha visto en la parte de cálculos, la combustión de los RSU es una técnica prometedora de adaptación para las centrales eléctricas de carbón, que tiene el beneficio adicional de reducir el volumen de eliminación de residuos en los vertederos. Además, la co-incineración de residuos y carbón, permite a los operadores de las plantas a ser flexibles ante las variaciones en el suministro de RSU. La sustitución de parte de la alimentación de carbón por residuos procesados de alto valor calórico reduce las emisiones de NO_x, SO₂ y CO₂. Sin embargo, el contenido alcalino de los RSU y su interacción potencialmente dañina con las cenizas de carbón, así como los efectos adversos de la presencia de cloro en los residuos son inconvenientes importantes en plantas de energía a gran escala. Por ello es tan imprescindible el desarrollo de las tecnologías de captura de contaminantes específicos para mejorar el desempeño ambiental de las plantas.

En un mundo que mira hacia la producción de energía verde, la reducción de la cantidad de carbón utilizada para producir energía a través de la co-incineración de materiales baratos y parcialmente renovables que son los residuos es de interés crítico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. J. Reddy, *Energy recovery form municipal solid waste by thermal conversion technologies*, CRC Press/Balkema, 2016.
- [2] Comisión Europea, «Being wise with waste: the EU's approach to waste management,» 2010. [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/WASTE%20BROCHURE.pdf>.
- [3] Eurostat, «480 kg of municipal waste generated per person in the EU,» 2017. [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180123-1>.
- [4] Eurostat, «Population on 1 January,» 2017. [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.
- [5] P. Breeze, *Energy from Waste*, Academic Press, 2017.
- [6] F. Kokalj y N. Samec, «Combustion of Municipal Solid Waste for Power,» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/43672.pdf>.
- [7] B. Kamuk y J. Haukohl, *ISWA Guidelines: waste to energy in low and middle income countries*, 2013.
- [8] Comisión Europea, «Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones - El papel de la transformación de los residuos en energía,» 2017. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0034&from=ES>.
- [9] Comisión Europea, «Hacia una economía circular,» 2015. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_es.
- [10] B. Appelqvist, A. Loureiro y A. Bartl, «Circular Economy: Trends and emerging ideas,» Septiembre 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Task_Forces/Task_Force_Report_1_02.pdf.
- [11] Comisión Europea, «Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones - Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular,» 2 de Diciembre de 2015. [En línea]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF.
- [12] Gobierno de España - Mapama, «España Circular 2030,» Febrero 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/180206economicircular_tcm30-440922.pdf.
- [13] Parlamento y Comisión Europeos, «Diario Oficial de la Unión Europea: Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo,» 30 de mayo 2018. [En línea].

Disponible en:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=ES>.

- [14] Parlamento y Consejo Europeos, «Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo,» 19 de noviembre de 2008. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>.
- [15] Consejo de la Unión Europea, «Diario Oficial de la Comunidades Europeas: Directiva 1999/31/CE del Consejo relativa al vertido de residuos,» 26 de abril de 1999. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031&from=en>.
- [16] Parlamento y Consejo Europeos, «Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables,» Abril 2009. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=ES>.
- [17] H. Saveyn, P. Eder, M. Ramsay, G. Thonier, K. Warren y M. Hestin, «Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy,» 12 de diciembre de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC104013/wte%20report%20full%2020161212.pdf>.
- [18] Eurostat, «Municipal waste statistics,» Julio 2018. [En línea]. Disponible en: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_generation.
- [19] Comisión Europea, «DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 18 de diciembre de 2014 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,» 18 de Diciembre de 2014. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0955&from=ES>.
- [20] Comisión Europea, «Guidance on municipal waste data collection,» Septiembre 2017. [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/351758/Guidance+on+municipal+waste/3106067c-6ad6-4208-bbed-49c08f7c47f2>.
- [21] D. Hoornweg y P. Bhada-Tata, «What a waste - A Global Review of Solid Waste Management,» Marzo 2012. [En línea]. Disponible en: https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf.
- [22] Comisión Europea, «Waste Framework Directive,» [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>.
- [23] AEVERSU, «Eficiencia energética y energía renovable,» [En línea]. Disponible en: <http://www.aeversu.org/index.php/es/valorizacion-energetica/eficiencia-energetica-y-energia-renovable>.

- [24] Comisión Europea, «Non-paper on the background of the development of the Commission proposal on the distinction between energy recovery and disposal of waste in municipal incinerators,» [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/background.pdf>.
- [25] Comisión Europea, «Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste according to annex II of Directive 2008/98/EC on waste,» Junio 2011. [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/guidance.pdf>.
- [26] CEWEP, «The R1- Formula an energy efficiency criterion for Municipal Waste Incinerators,» 2010. [En línea]. Disponible en: http://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/11/509_10._hubert_de_chefdebien_r1_guideline.pdf.
- [27] M. Goorhuis y A. Bartl, «ISWA Key Issue Paper on Waste Prevention, Waste Minimization and Resource Management,» ISWA Working Group Recycling and Waste Minimization, 2011.
- [28] Eurocities, «Eurocities statement on waste-to-energy in a circular economy,» Septiembre 2017. [En línea]. Disponible en: http://nws.eurocities.eu/MediaShell/media/WD_6_EUROCITIES_statement_waste_to_energy-final.pdf.
- [29] Comisión Europea, «DECISIÓN DE EJECUCIÓN (UE) 2018/1147 DE LA COMISIÓN por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en el tratamiento de residuos, de conformidad con la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo,» 10 de agosto de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018D1147&from=ES>.
- [30] Comisión Europea, «DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 18 de noviembre de 2011 por la que se establecen normas y métodos de cálculo para la verificación del cumplimiento de los objetivos previstos en el artículo 11, apartado 2, de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo,» 18 de noviembre de 2011. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011D0753&from=en>.
- [31] V. A. Quintal, I. d. L. C. Cortés y F. F. Santiago, Los Residuos, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno de Cantabria, 2001.
- [32] The Boston Consulting Group (BCG), «Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables.,» 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e2_tecnologia_y_costes_7d24f737.pdf.
- [33] D. Bourguignon, «Circular economy package - Four legislative proposals on waste,» Julio 2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625108/EPRS_BRI\(2018\)625108_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625108/EPRS_BRI(2018)625108_EN.pdf).
- [34] Comisión Europea, «New waste rules will make EU global front-runner in waste management and recycling,» 18 de abril de 2018. [En línea]. Disponible en:

https://ec.europa.eu/info/news/new-waste-rules-will-make-eu-global-front-runner-waste-management-and-recycling-2018-apr-18_en.

- [35] EEB, «Waste no more: Introducing Europe's new waste laws,» 18 de julio de 2018. [En línea]. Disponible en: <http://eeb.org/waste-no-more-introducing-europes-new-waste-laws/>.
- [36] MAPAMA, «Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022,» 6 de noviembre de 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf.
- [37] Gobierno de Cantabria, «Plan de residuos de la comunidad autónoma de Cantabria 2017-2023,» 30 de marzo de 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.cantabria.es/documents/16894/4699136/PLAN+RESIDUOS+CANTABRIA+2017-2023+%28BOC+30-3-2017%29.pdf/acba2296-4953-6f4b-899d-cb86e8d2c2e6>.
- [38] Comisión Europea, «EU climate action,» [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_en.
- [39] Junta de Andalucía, «El ciclo de los recursos: agua, materiales/residuos y energía,» 2007. [En línea]. Disponible en: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/hitos_y_tendencias_ma/parte_primeira_el_ciclo_de_los_recursos.pdf.
- [40] E. Stengler, «Communicating WtE's role,» Recycling and waste world, 15 de mayo de 2017. [En línea]. Disponible en: <http://recyclingwasteworld.co.uk/in-depth-article/communicating-wtes-role/155079/>.
- [41] Zero Waste Europe, «Harmful subsidies to waste-to-energy,» 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2016/10/REcasestudy_final8.pdf.
- [42] Comisión Europea, «Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast),» 30 de noviembre de 2016. [En línea]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:151772eb-b7e9-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.
- [43] Eurostat, «Producción e importaciones de energía,» Junio 2017. [En línea]. Disponible en: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_production_and_imports/es.
- [44] B. Appelqvist, A. Loureiro y A. Bartl, «Circular economy: energy and fuels,» Septiembre 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Task_Forces/Task_Force_Report_5.pdf.
- [45] OCDE, «Prospectiva Medioambiental de la OCDE para el 2030 - Resumen en español,» 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling->

outlooks/40224072.pdf.

- [46] EEB, «2016 Annual Report,» 2016. [En línea]. Disponible en: http://eeb.org/wp-content/uploads/2017/11/EEB_AR2016.pdf.
- [47] Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change: Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, 2007.
- [48] CEWEP, «Waste-to-Energy: Energising your waste,» [En línea]. Disponible en: <http://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2018/07/Interactive-presentation-2018-New-slides.pdf>.
- [49] CEWEP, «Interactive Map of Waste-to-Energy Plants,» 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.cewep.eu/interactive-map/>.
- [50] IDAE, «Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020,» 2011. [En línea].
- [51] Residuos Profesional, «AEVERSU: España se está quedando atrás en la gestión de residuos,» 13 de julio de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/aever-su-espana-atras-gestion-residuos/>.
- [52] INE, «Población residente en España,» 1 de enero de 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176951&menu=ultiDatos&idp=1254735572981.
- [53] IGN, «Instituto Geográfico Nacional,» 2018. [En línea]. Disponible en: www.ign.es.
- [54] MAPAMA, «Memoria anual de generación y gestión de residuos de competencia municipal. 2015,» [En línea]. Disponible en: http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/memoriaanualdegeneracionygestionderesiduosresiduosdecompetenciamunicipal2015_tcm30-438175.pdf.
- [55] INE, «Recogida de residuos urbanos - Año 2015,» 31 de octubre de 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176844&menu=ultiDatos&idp=1254735976612.
- [56] I. MINETAD, «Libro de la Energía en España 2016,» 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.mincotur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/energia-espana-2016.pdf>.
- [57] ISWA, «International Solid Waste Assosiation,» [En línea]. Disponible en: <https://www.iswa.org/>.
- [58] AEVERSU, «Asociación de Empresas de Valorización Energética de RSU,» [En línea]. Disponible en: <http://www.aever-su.org/>.
- [59] I. Astarloa Ruben Plaza, «En España hay 11 incineradoras, pero para gestionar toda la basura se precisan 18,» 8 de junio de 2016. [En línea]. Disponible en:

<http://www.noticiasdegipuzkoa.eus/2016/06/08/sociedad/en-espana-hay-11-incineradoras-pero-para-gestionar-toda-la-basura-se-precisan-18>.

- [60] a. y. M. A. Ministerio de Agricultura, «Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022,» [En línea]. Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf.
- [61] MAPAMA, «Avance de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero correspondientes al año 2017,» 10 de julio de 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/notaresultadosavance-2017_tcm30-457778.pdf.
- [62] J. d. Estado, «Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. «BOE» núm. 296.,» 11 de diciembre de 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-12913-consolidado.pdf>.
- [63] Comisión Europea y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural, «Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos. Documento BREF.,» 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.prtr-es.es/Data/images/MTD_Incineracion_residuos_ES.pdf.
- [64] IEA Bioenergy, «Waste to Energy. Summary and Conclusions from the IEA Bioenergy ExCo71 Workshop,» 21 de mayo de 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2014/03/ExCo71-Waste-to-Energy-Summary-and-Conclusions-28.03.14.pdf>.
- [65] The Babcock & Wilcox Company, «Thermal Waste Processing - Sustainable, Clean Energy from Waste. Environmental, cost-effective solutions for generating power in a circular economy,» 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.babcock.com/-/media/documents/resources/published-articles/e101-3241-waste-to-energy.ashx>.
- [66] A. Grau y O. Farré, «Situación y potencial de valorización energética directa de residuos Estudio Técnico PER 2011-2020,» 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf.
- [67] ESWET, «Everything you always wanted to know about Waste-To-Energy,» 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.eswet.eu/tl_files/eswet/3.%20Facts/ESWET%20Handbook_for%20website.pdf.
- [68] Asiaín García, R., Tecnología y sus aplicaciones, Barcelona: Tibidabo Ediciones, 2008.
- [69] J. F. Miranda Cotano, M. Calva Cotero y M. Peña Sacristán, Estado del arte de las energías renovables, Santander: Universidad de Cantabria. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, 2012.
- [70] K. Kahle, B. Kamuk y J. Kallesøe, «ISWA Report: Bottom ash from WTE plants metal recovery and utilization,» 2015.

- [71] CEWEP, «Bottom Ash Fact Sheet,» 19 de mayo de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/09/FINAL-Bottom-Ash-factsheet.pdf>.
- [72] RIVM, Ö. Milieu Ltd y Risk & Policy Analysts (RPA), «Study for the strategy for a non-toxic environment of the 7th Environment Action Programme - Final Report,» Agosto 2017. [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/chemicals/non-toxic/pdf/NTE%20main%20report%20final.pdf>.
- [73] R. Vogt, C. Derreza-Greeven y J. Giegrich, «The Climate Change Mitigation Potential of the Waste Sector - Umwelt Bundesamt,» 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_56_2015_the_climate_change_mitigation_potential_of_the_waste_sector.pdf.
- [74] Green Peace España, «Incineración de residuos: malos humos para el clima,» Noviembre 2009. [En línea]. Disponible en: <https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/costas/091124-02.pdf>.
- [75] A. Romero Salvador, «La incineradora de residuos: ¿está justificado el rechazo social?,» 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00913.pdf>.
- [76] ASEGRE, «Publicadas las conclusiones sobre mejores técnicas disponibles en tratamiento de residuos,» 20 de agosto de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://asegre.com/conclusiones-sobre-mejores-tecnicas-disponibles-en-tratamiento-de-residuos/>.
- [77] «AVR,» [En línea]. Disponible en: <https://www.avr.nl/en/>.
- [78] H. Verhoeff, «Press release: Waste-to-energy company tackles CO2 emissions with large-scale CO2 capture installation,» 28 de Mayo de 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2018/05/PRESS-RELEASE-Waste-to-energy-company-tackles-CO2-emissions-with-CO2-capture-installation.pdf>.
- [79] State of Victoria, «Turning waste into energy - Join the discussion,» 2017. [En línea]. Disponible en: https://s3.ap-southeast-2.amazonaws.com/hdp.au.prod.app.vic-engage.files/9415/0897/9363/Turning_waste_into_energy_-_Final.pdf.
- [80] Amager Ressource Center, «Amager Ressource Center,» [En línea]. Disponible en: <https://www.a-r-c.dk/amager-bakke>.
- [81] Babcock & Wilcox Vølund A/S, «Volund,» 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.volund.dk/~media/Downloads/Brochures_-_WTE/Amager_Bakke_-_Copenhagen_-_Denmark.pdf.
- [82] Vantaan Energia, «Vantaa Energy,» [En línea]. Disponible en: <https://www.vantaanenergia.fi/en/we/vantaaenergy/>.
- [83] Hitachi Zosen- INOVA, «Hitachi Zosen - INOVA,» [En línea]. Disponible en: <http://www.hz-inova.com/cms/wp-content/uploads/2014/11/Vanta.pdf>.
- [84] Vestforbrænding, «Vestforbrænding,» [En línea]. Disponible en:

<https://www.vestfor.dk/>.

- [85] K. Windahl, «Vestforbrænding,» *Hot Cool - DBDH*, nº Journal N0. 4, 2012.
- [86] S. D. Heron Kleis, «100 years of waste incineration in Denmark,» 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/100YearsofWasteIncinerationinDenmark.pdf>.
- [87] «AEB Amsterdam,» [En línea]. Disponible en: <http://www.aebamsterdam.com/>.
- [88] Fortum, «Högdalen CHP plant,» [En línea]. Disponible en: <https://www.fortum.com/about-us/our-company/our-energy-production/our-power-plants/hogdalen-chp-plant>.
- [89] ISWA - Working Group on Energy Recovery, «Waste-to-Energy State-of-the-Art-Report. Statistics, 6th Edition,» ISWA, Dinamarca, 2012.
- [90] AVG Koeln, «Informe de sostenibilidad 2016,» Junio 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.avgkoeln.de/pdf/SWK-Nachhaltigkeitsbericht-2016.pdf>.
- [91] Scopus, «Scopus,» Elsevier B.V., 2018. [En línea]. Disponible en: www.scopus.com.
- [92] E. C. Rada, L. I. Cioca y G. Ionescu, «Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: Proposals to assess the management performance under a circular economy perspective,» 9 de agosto de 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/35/mateconf_mse2017_05006/mateconf_mse2017_05006.html.
- [93] D. Arina y R. Bendere, «Waste as energy source in EU action plan for the circular economy,» Febrero 2018. [En línea]. Disponible en: <http://erem.ktu.lt/index.php/erem/article/view/19779>.
- [94] J. Malinauskaite, H. Jouhara y D. Czajczyńska, «Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe,» 15 de diciembre de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217319862?via%3Dihub>.
- [95] Punto focal de residuos de Cantabria, «Generación de Residuos Municipales,» Octubre 2015. [En línea]. Disponible en: https://puntofocalderesiduos.cantabria.es/residuos-municipales/-/asset_publisher/Dk24ntMBIq3S/content/ind-1-generacion-de-residuos-municipales?inheritRedirect=false.
- [96] MARE. [En línea]. Disponible en: <http://www.mare.es/>.
- [97] Gobierno de Cantabria, «Plan Sectorial de Residuos Municipales,» 2010. [En línea]. Disponible en: http://www.medioambientecantabria.es/documentos_contenidos/23830_9.plan.solo.municipales.pdf.

- [98] A. A. Payán, E. D. Viñas y E. C. Bemposta, «Punto Focal de Residuos de Cantabria - Análisis de la Generación y Gestión de los Residuos en Cantabria,» Julio 2013. [En línea]. Disponible en: http://puntofocalderesiduos.cantabria.es/documents/4493807/4494410/monografia_2013.pdf.
- [99] Instituto Nacional de Estadística, «Estadísticas sobre recogida y tratamiento de residuos. Residuos urbanos: Serie 2010-2015,» 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t26/e068/p01/serie/l0/&file=02003.px>.
- [100] Ayuntamiento de Meruelo, «Planta de reciclaje Meruelo,» 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.meruelo.es/plantareciclaje.htm>.
- [101] MARE, «Los participantes en el Congreso VERSOS16, 'Buenas prácticas en la gestión de los residuos', visitan el Complejo Medioambiental de Meruelo,» 11 de noviembre de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.mare.es/Default.aspx?pag=147&ntype=%2791%27&news=%27b16b1269-8f82-4cd9-9031-92f908c0c642%27>.
- [102] Gobierno de Cantabria, «Martín anuncia la convocatoria de ayudas a las energías renovables, ahorro y eficiencia energética destinadas a empresas y entidades locales,» 3 de mayo 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.cantabria.es/detalle/-/journal_content/56_INSTANCE_DETALLE/16413/3727432.
- [103] MARE, «Valorizar energéticamente los residuos: el caso del biogás de vertedero. La planta de Meruelo.,» 3 de mayo de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2016/04/6.-Presentaci%C3%B3n-MARE-BIOG%C3%81S-SEMINARIO-GAS-NATURAL-MAYO-2016-V.-1.4web.pdf>.
- [104] Universidad de Cantabria, «La gestión de residuos de Cantabria, en ratios muy superiores a los que obliga la normativa,» iResiduo, 28 de julio de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://iresiduo.com/noticias/espana/universidad-cantabria/16/06/28/gestion-residuos-cantabria-ratios-muy-superiores-que>.
- [105] Jefatura del Estado «BOE», «Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.,» 29 de julio de 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-13046-consolidado.pdf>.
- [106] Gestores de Residuos, «Cantabria es un ejemplo de gestión de residuos a nivel nacional e internacional,» 2 de agosto de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://gestoresderesiduos.org/noticias/cantabria-es-un-ejemplo-de-gestion-de-residuos-a-nivel-nacional-e-internacional>.
- [107] Ó. Cubero, «La Cogeneración: Eficiencia y reducción de emisiones,» 19 de septiembre de 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/wp-content/uploads/2016/07/3.-Oscar-Cubero-20160919_GAS-NATURAL_FENOSA.pdf.
- [108] Green Peace España, «Las trampas del carbón - Informe sobre las centrales térmicas de carbón en España,» Septiembre 2015. [En línea]. Disponible en: <https://archivo->

es.greenpeace.org/espana/Global/espana/2015/Report/cambio-climatico/las-trampas-del-carbon.pdf.

- [109] A. Méndez Piña, *Proyecto sobre residuos: utilización de escorias como sustituto de áridos*, 2011.
- [110] C. d. I. Peña, «Meruelo ha recibido ya 76.096 toneladas de basura de Guipúzcoa,» El Diario Montañés, 2 de diciembre de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.eldiariomontanes.es/cantabria/201612/02/meruelo-recibido-toneladas-basura-20161201224408.html>.