

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Ahorro y eficiencia energética en instalaciones medioambientales

Autor: Francisco Mendoza Espadas

Tutora: María del Carmen Arnaiz Franco

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Ahorro y eficiencia energética en instalaciones medioambientales

Autor:

Francisco Mendoza Espadas

Tutora:

María del Carmen Arnaiz Franco

Profesora contratada doctora

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Ahorro y eficiencia energética en instalaciones medioambientales

Autor: Francisco Mendoza Espadas

Tutor: María del Carmen Arnaiz Franco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*Cada paso que he dado tiene el
impulso de los que siempre han
creído en mí*

A mi familia

A mis maestros

Resumen

Una de las necesidades que tiene España, sobre todo en las zonas rurales, es allanar y facilitar el camino para conseguir los objetivos fijados para la gestión de los RSU y las aguas residuales, a la vez, que dar respuesta a los problemas medioambientales que generan. Esta situación requiere de grandes inversiones, que los pequeños y medianos municipios no pueden asumir de forma sencilla.

Este trabajo nace con el propósito de responder a esa necesidad, ofreciendo, desde el punto de vista energético, una metodología de ahorro y eficiencia energética en instalaciones medioambientales, para señalar la forma de materializarlo, los obstáculos que superar y los recursos que emplear. De esta manera, se facilita, especialmente en las zonas rurales, la consecución de las metas para una economía circular y sostenible.

Abstract

One of the needs that Spain has, especially in rural areas, is to make easier the way to achieve the objectives set for the management of MSW and wastewater, at the same time, it responds to the environmental problems that this waste generates. This situation requires large investments, which villages and towns cannot easily assume.

This work was born with the purpose of answering to this need, from the energy point of view, with a methodology of saving and energy efficiency in environmental facilities, to indicate the way to do it, the obstacles to overcome and the resources to use. In this way, it facilitates, especially in rural areas, the achievement of the goals for a circular and sustainable economy.

Índice

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
2 Ahorro y eficiencia energética en EDAR	7
2.1. <i>EVALUACIÓN DEL CONSUMO</i>	9
2.2. <i>ÍNDICES Y POTENCIAL DE AHORRO</i>	12
2.3. <i>REDUCCIÓN DEL CONSUMO</i>	14
2.3.1. <i>Concienciación para reducir el consumo de agua</i>	15
2.3.2. <i>Mantenimiento y mejoras operacionales</i>	16
2.4. <i>OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO</i>	18
2.5. <i>NUEVAS TECNOLOGÍAS</i>	21
2.6. <i>APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA DEPURACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS DEPURADAS</i>	23
2.6.1. <i>Biogás</i>	23
2.6.2. <i>Lodos de depuración</i>	25
2.6.3. <i>Reutilización de las aguas depuradas</i>	27
2.7. <i>BARRERAS LEGISLATIVAS</i>	27
2.7.1. <i>Normativa sobre utilización del biogás</i>	28
2.7.2. <i>Normativa sobre lodos de depuración</i>	31
2.7.3. <i>Normativa sobre reutilización de aguas depuradas</i>	33
3 Ahorro y eficiencia energética en plantas de tratamiento de RSU y vertederos	35
3.1 <i>EVALUACIÓN DEL CONSUMO Y LOS PROCESOS</i>	36
3.1.1 <i>Transporte de los residuos</i>	38
3.1.2 <i>Separación y compactación</i>	39
3.1.3 <i>Tratamientos de reciclado y de obtención de subproductos</i>	41
3.1.4 <i>Eliminación final</i>	44

3.2	<i>ÍNDICES Y POTENCIAL DE AHORRO</i>	45
3.3	<i>REDUCCIÓN DEL CONSUMO</i>	46
3.4	<i>OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO</i>	48
3.5	<i>NUEVAS TECNOLOGÍAS</i>	51
3.6	<i>APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS</i>	52
3.6.1	Biogás	53
3.6.2	Productos reciclados	56
3.6.3	Compost	56
3.6.4	Energía recuperable en la incineración	57
3.7	<i>BARRERAS LEGISLATIVAS</i>	58
4	Conclusión	67
	Referencias	71
	Glosario	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencias y consumos de los equipos de la EDAR de caudal medio de 12.000 m³/día. Fuente: (Almazán Lope, 2014). 11

Tabla 2. Valores de los parámetros energéticos y de caudal de las EDAR de Emasesa. Fuente: Emasesa. 13

Tabla 3. Índices de eficiencia energética para las distintas EDAR que gestiona Emasesa, en rojo los peores valores, en verde los mejores valores, en amarillo los valores medios. Fuente: Elaboración propia. 13

Tabla 4. Comparación de datos en cuanto a las fracciones de los residuos municipales. Fuente: (FAO, 1998). 40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la población española. Fuente: INE: Cifras de población.	1
Figura 2. Evolución de la generación de residuos en toneladas en España. Fuente: INE: Estadísticas sobre generación de residuos.	2
Figura 3. Evolución del número de depuradoras. Fuente: Eurostat y AEAS.	2
Figura 4. Porcentaje de la factura de consumo de agua urbana correspondiente a la depuración y al alcantarillado. Fuente: INE: Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua (2000-2014).	3
Figura 5. Importe total facturado por consumo de agua y su desglose. Fuente: INE: Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua (2000-2014).	3
Figura 6. Porcentaje de los distintos tratamientos de gestión de RSU. Fuente: INE: Memoria anual de generación de residuos.	4
Figura 7. Vista aérea de la EDAR de Tablada. Fuente: Google maps.	8
Figura 8. Gráfico de la distribución del consumo de energía por procesos en una EDAR con un caudal medio de 12.000 m³/día. Fuente: (Almazán Lope, 2014).	11
Figura 9. Gráfico de la distribución del consumo de energía en el tratamiento biológico en una EDAR con un caudal medio de 12.000 m³/día. Fuente: (Almazán Lope, 2014).	12
Figura 10. Índices de eficiencia energética para las EDAR que gestiona Emasesa, en la gráfica, KWh/m³ frente a tamaño de la planta. Fuente: Elaboración propia.	14
Figura 11. Campaña del Gobierno para concienciar sobre el consumo del agua en 2017, el segundo año más seco desde 1965. Fuente: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.	15
Figura 12. Campaña del Ayuntamiento de Fernán Núñez para concienciar sobre el consumo de agua. Fuente: Ayuntamiento de Fernán Núñez.	16
Figura 13. Turbinas en el desagüe de la EDAR Sur de Madrid, producen 1500 MWh al año. Fuente: (Madrid Subterra, 2017).	20
Figura 14. Complejo medioambiental La Vega. Fuente: (Mancomunidad La Vega, 2016).	36
Figura 15. Camión de recogida de los residuos para su traslado a la planta de tratamiento. Fuente: (Madridiario, 2017).	38

Figura 16. Contenedores para la recogida selectiva de residuos. Fuente: (UH Noticias, 2017).	39
Figura 17. Datos promedio de las fracciones de los residuos municipales en países en vías de desarrollo. Fuente: (FAO, 1998).	40
Figura 18. Datos promedio de las fracciones de los residuos municipales en países desarrollados. Fuente: (FAO, 1998).	41
Figura 19. Planta de compostaje. Fuente: (Tallón, 2019).	44
Figura 20. Vertedero controlado en Málaga. Fuente: (Grupotec, 2014).	45
Figura 21. Campaña de concienciación en Calahorra. Fuente: (Calahorra Limpia, 2019).	47
Figura 22. Dibujo de recogida neumática. Fuente: (Residuos Profesional, 2015).	49
Figura 23. Esquema de una instalación de aprovechamiento energético del biogás producido en el vertedero. Fuente: (Home Jerez, 2014).	50
Figura 24. Camión de la basura eléctrico y punto de recarga. Fuente: (Endesa, 2017).	51
Figura 25. Evolución de los componentes de un gas de vertedero. Fuente: (Elías Castells & Bordas Alsina, 2017)	53
Figura 26. Detalle de pozo de extracción de biogás. Fuente: (Lang-Lenton Barrera & de Bethencourt Gallego, 2008).	54
Figura 27. Pozos de captación y conexión para el drenaje del biogás del vertedero hacia la planta de valorización energética. Fuente: (ENC Energy, 2016).	55
Figura 28. Pila de compostaje con aireación forzada. Fuente: (Fernández López, 2011).	57
Figura 29. Planta incineradora de residuos. Fuente: (Campos, 2017).	57

1 INTRODUCCIÓN

Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla, mientras el género humano no escucha

- Víctor Hugo, 1802-1885 -

Los retos medioambientales que tiene que afrontar España de cara a la próxima década pone a nuestro país en una gran encrucijada. Por un lado, tiene que perseguir la consecución de los objetivos medioambientales impuestos desde Europa para no dejar a nuestro país en desfase respecto al resto de países de la Unión Europea y no tener que asumir multas millonarias, a las que, actualmente, ya tiene que hacer frente. Por otro lado, tiene que dar respuesta al problema de la sobrecarga de los vertederos, a la saturación de los ríos y al aumento de la presión hídrica cada año.



Figura 1. Evolución de la población española. Fuente: INE: Cifras de población.

Lo único que ha impedido que los problemas, que estas ineficiencias causan, tengan un mayor impacto y se agraven a mayor velocidad, es el estancamiento demográfico que sufre nuestro país, golpeado en la pasada década por una profunda crisis económica que ha permitido un cierto amago de la cantidad

de los residuos generados al año y las aguas residuales vertidas. Sin embargo, la interconexión de los distintos factores hace que la mencionada crisis económica afecte en la consecución de los objetivos propuestos, ante el descenso de la inversión pública para estos fines.

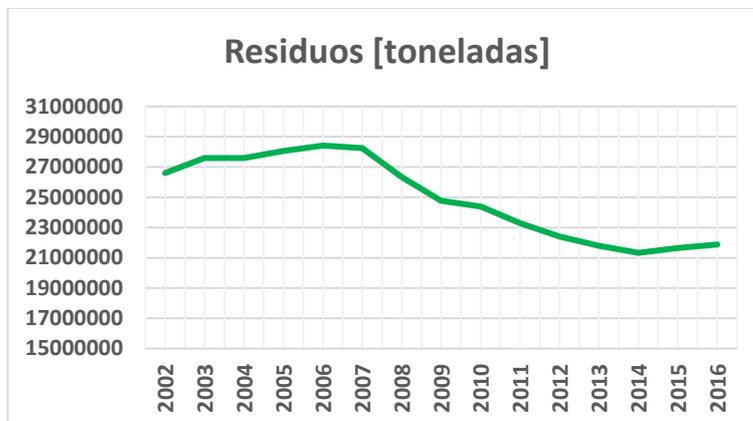


Figura 2. Evolución de la generación de residuos en toneladas en España. Fuente: INE: Estadísticas sobre generación de residuos.

Hay que destacar que donde más dificultades hay para asumir los retos ambientales es en las zonas rurales, donde vive un cuarto de la población española de forma dispersa, en la mayor parte del territorio, y donde los recursos económicos son mucho más limitados. Es por eso, que muchas de las EDAR, que se construyeron en poblaciones pequeñas antes de la crisis, tuvieron que cesar su funcionamiento, ya que cuanto más pequeño es el municipio, el coste de operar y mantener las instalaciones de gestión de RSU y aguas residuales es mayor, representando en algunos casos hasta el 25% del presupuesto municipal. El camino que queda por recorrer es de enorme envergadura, si se quiere asegurar la consecución de los objetivos fijados.

En el terreno de la gestión de las aguas residuales, si se pretende alcanzar los objetivos habría que tener en operación 2647 depuradoras de aguas residuales en 2027, de las 2041 que hay actualmente en funcionamiento (ver figura 3), con el continuo aumento de la factura del consumo de agua (ver figura 5), donde la proporción correspondiente a depuración cada vez es mayor (ver figura 4).

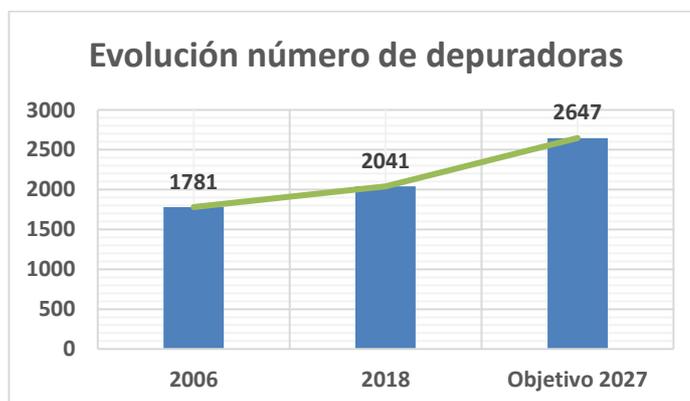


Figura 3. Evolución del número de depuradoras. Fuente: Eurostat y AEAS.

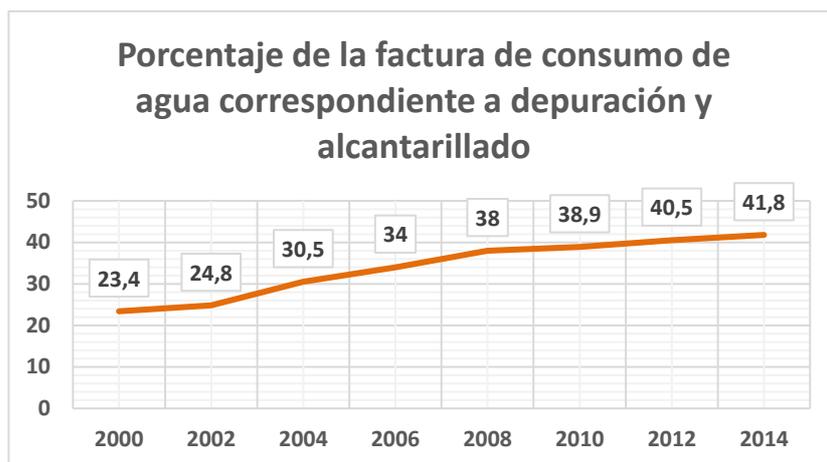


Figura 4. Porcentaje de la factura de consumo de agua urbana correspondiente a la depuración y al alcantarillado. Fuente: INE: Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua (2000-2014).

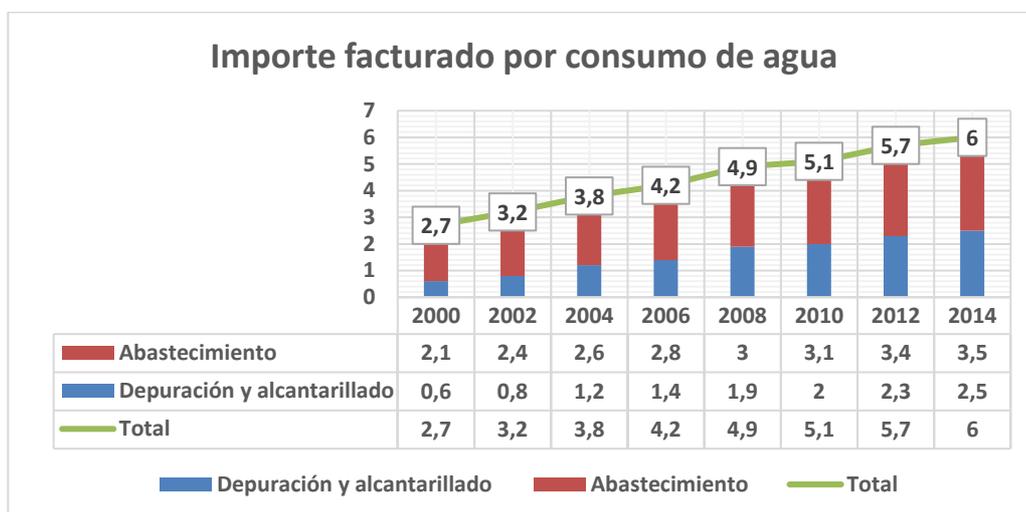


Figura 5. Importe total facturado por consumo de agua y su desglose. Fuente: INE: Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua (2000-2014).

En la gestión de los RSU, la apuesta de España por el depósito de los residuos en vertederos nos está llevando a un callejón sin salida, ya que, en 2016, el vertido de residuos representaba el 54.1% de los tratamientos de gestión de RSU (ver figura 6), cuando el objetivo de Europa en 2035 es que no se supere el 10% de vertido y que el reciclaje represente más del 65% de la gestión de los RSU; además, existen comunidades autónomas, como Asturias, Madrid o Valencia, que están teniendo graves problemas por la superación de la capacidad de sus vertederos. Por tanto, la búsqueda comprometida de estos objetivos llevará a las zonas urbanas a tener serias dificultades en la gestión, por lo que esta situación podría asfixiar a las zonas rurales, que también tienen que responder al problema de la despoblación.

El objetivo primordial de este trabajo es aportar y exponer, desde el punto de vista energético, el camino más fácil a las administraciones locales, sobre todo las rurales, en el reto de llegar a la meta de

una economía circular y sostenible, estableciendo para ello una metodología de ahorro y eficiencia energética.

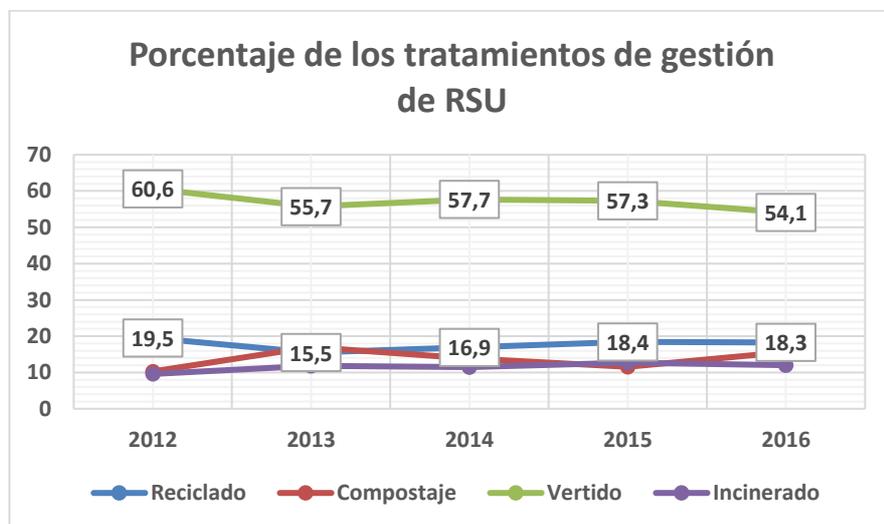


Figura 6. Porcentaje de los distintos tratamientos de gestión de RSU. Fuente: INE: Memoria anual de generación de residuos.

2 AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDAR

Olvidamos que el ciclo del agua y el ciclo de la vida son uno mismo.

- Jacques Y. Cousteau -

En los últimos años, se observa con preocupación como el vertido de las aguas residuales afectan directamente al deterioro del medio ambiente, saturando nuestros ríos, lagos y mares, poniendo en peligro la conservación de la flora y la fauna en el medio natural, y afectando a la salud humana y a la normalidad de las actividades que se realizan. Esta preocupación lleva a replantearse los límites que tiene llevar a cabo ciertos procesos, para conseguir el menor impacto posible sobre el entorno y, así, lograr un desarrollo sostenible.

Uno de esos límites, en el que se va a centrar este bloque, para el caso de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), es la energía, tratada como un recurso limitado. A fin de cuentas, se trata de evaluar, reducir y aprovechar la cantidad de energía que hay que añadirle al agua residual para obtener un agua completamente tratada.

Esta búsqueda del ahorro y eficiencia energética en EDAR es positiva, tanto para la empresa que gestiona la planta de tratamiento de aguas residuales, como para el medio ambiente. Además, si la empresa es pública es beneficioso para los contribuyentes que la sustentan. El fundamento de este beneficio parte del ahorro y la eficiencia energética de la depuración de las aguas residuales, es decir, se consigue hacer lo mismo con menos energía, lo que reduce los costes, aumenta la competitividad de la empresa y reduce la utilización de recursos del medio ambiente.



Figura 7. Vista aérea de la EDAR de Tablada. Fuente: Google maps.

La optimización energética de cualquier proceso, que para este bloque será la depuración de aguas residuales, puede tomarse como objetivo, pero no puede penalizar el objetivo principal de la planta, ya que prevalece la prioridad de depurar el agua adecuadamente frente al ahorro y eficiencia energética del proceso.

Este paso hacia la consideración energética de la depuración presenta a menudo muchas dificultades de distinto carácter, que conlleva, en la mayoría de los casos, a la falta de voluntad para llevar a cabo esta mejora. Por eso, es necesario el establecimiento de una metodología que simplifique la realización del proyecto, señale los obstáculos a superar y diga las formas que hay de hacerlo. Sobre este punto se va a desarrollar el documento.

La metodología seguida en el ahorro y eficiencia energética de una EDAR consiste en determinar el consumo de la EDAR, hallar dónde se consume más, plantear métodos para reducir el consumo con el fin de llegar al punto de diseño de la planta, y entonces optimizar procesos para alcanzar el punto de funcionamiento óptimo. Tras esto se pueden incorporar nuevas tecnologías para avanzar hasta el punto más actualizado tecnológicamente. Por último, se trata la utilización de los productos de la depuración como fuente de energía y de ingresos. Todo ello asumiendo la existencia de barreras económicas, técnicas y legislativas que obstaculizan realizar con mayor facilidad la citada metodología.

2.1. EVALUACIÓN DEL CONSUMO

Para poder optimizar cualquier proceso, se debe comenzar por la evaluación de su consumo, es decir, conocer la situación de partida, la que se pretende mejorar. Este análisis del consumo debe tener en cuenta todos los puntos de aporte de energía, sea cual sea la naturaleza de ésta. Así, se conocerá qué cantidad y qué tipo de energía se emplea en cada fase del proceso, pudiendo entonces adoptar medidas para una optimización eficaz del proceso global.

No se deben dar soluciones parciales, que no tengan en cuenta íntegramente todo el proceso, ya que pueden obtenerse mejoras en una zona y que esto repercute negativamente en otras, quedándose en el mismo punto de partida o incluso retroceder en cuanto a la optimización global del proceso.

A la hora de hablar del modo de evaluar energéticamente una EDAR, existe una gran diversidad de plantas, lo que impide estandarizar los consumos producidos. A pesar de ello, la metodología para determinar los consumos es siempre igual, comenzar por el principio de la instalación analizando cada proceso, sin descartar ninguno, y acabar tratando el proceso en su totalidad.

A continuación, se van a abordar los consumos para una EDAR típica (Fernández Herrera, 1995), estos no serán siempre así, dependerán de las características de cada planta de depuración, lo que sí se repetirá habitualmente es la ubicación de los consumos mayores, que a fin de cuentas es donde el potencial de ahorro energético es mayor:

- **Pretratamientos**

Con este tratamiento se busca eliminar sólidos gruesos, arenas y grasas. En este proceso hay un consumo importante de energía, que puede llegar hasta un 25% del total. Este consumo se centra sobre todo en el bombeo primario para la totalidad del caudal de forma continua (para la mayoría de los casos es imprescindible) y en los soplantes utilizadas en el aporte de aire para favorecer el proceso de desarenado. La energía empleada en los sistemas de limpieza de las rejillas de la zona de desbaste y el bombeo de arenas o grasas en el desarenado es despreciable.

- **Tratamiento primario**

En este proceso se eliminan del agua los sólidos en suspensión y parte de la materia orgánica. La energía consumida en esta etapa de la depuración es insignificante, pues se limita al bombeo discontinuo de fangos procedentes de la sección de decantación y al movimiento continuo del puente.

- **Tratamiento secundario**

El objetivo del tratamiento secundario es reducir la materia orgánica disuelta y coloidal, convirtiéndola mediante microorganismos en materia sedimentable que pueda ser separada del agua con medios físicos como la sedimentación y filtración (decantador secundario).

En la mayoría de los casos, el tratamiento secundario representa el mayor consumo de energía de toda la instalación, debido a los requerimientos de oxígeno y agitación en esta etapa de la depuración. Para

aportar el oxígeno y agitar se suelen emplear turbinas superficiales, que son grandes consumidoras de energías. No es nada extraño que más de la mitad del consumo energético total de un EDAR se produzca en este punto. Los consumos de energía para el bombeo de fangos y el movimiento del puente del decantador secundario, como para el tratamiento primario, son irrelevantes.

- **Tratamientos terciarios**

Los tratamientos finales se aplican al agua procedente del tratamiento secundario antes de que salga de la instalación como agua depurada. Su objetivo es la desinfección y eliminación de posibles patógenos del agua tratada, normalmente los procesos empleados suelen consistir en la adición de cloro o en el tratamiento con radiación ultravioleta. Estos tratamientos finales se llevan a cabo según las características del agua depurada resultante y las aplicaciones para las que se va a usar. El consumo energético de los tratamientos finales es reducido.

- **Línea de fangos**

En esta parte de la EDAR, se estabilizan los fangos procedentes de los procesos de decantación mediante una digestión normalmente anaerobia, y a partir de la cual se produce biogás. Tras la estabilización, el contenido de agua de estos fangos sigue siendo elevado, por lo que se realiza un proceso de deshidratación (eras de secado, sistemas de centrifugación o sistemas de filtros banda). Si se descarta el uso posterior de estos fangos deshidratados, se pasa a su eliminación mediante depósito en vertederos o incineración. La línea de fangos puede representar una parte importante del consumo energético de la instalación, hasta el 25% de la energía total.

En la primera fase se busca el espesamiento de los fangos por decantación o flotación. El consumo energético se reduce a los bombeos necesarios para transportar los fangos, por lo que este consumo es reducido.

La siguiente fase consiste en la estabilización de los fangos, llevada a cabo mediante una digestión anaerobia. Esta fase requiere unas condiciones adecuadas de homogeneidad y temperatura en torno a 35 °C. Debido a la necesidad de mantener unas condiciones de homogeneidad mediante agitación y de temperatura aportando energía térmica, el consumo energético en esta parte es elevado. Aunque cabe destacar que en esta digestión se produce un gas combustible rico en metano, una fuente de energía altamente aprovechable para autoabastecer los consumos de la estabilización de los fangos, así como los de gran parte de la instalación.

Tras la fase de estabilización, el contenido en agua de los fangos sigue siendo elevado, por lo que se procede a su espesamiento y secado para poder eliminarlos fácilmente. Los procesos que se realizan se basan en concentración mediante centrifugación, filtros prensa, filtros banda, etc. Estos procesos tienen un consumo energético alto, que aumentaría más si se decide la eliminación final de los fangos deshidratados mediante incineración.

• **Servicios auxiliares**

Aunque hay que tenerlo en cuenta porque puede ser importante en algunas situaciones, el consumo energético de los servicios auxiliares (iluminación exterior, riego de zonas verdes, climatización de oficinas y laboratorios) suele ser pequeño.

En la tabla 1, en la figura 8 y en la figura 9 se considera el consumo energético de una EDAR de fangos activos de baja carga, de aireación prolongada y sin digestión anaerobia, diseñada para tratar un caudal medio de 12000 m³/día, con un caudal máximo de 20000 m³/día y con una potencia total instalada de 400 kW:

	POTENCIA UNITARIA kW	INSTALADOS	FUNCIONANDO	HORAS	KWh/DÍA
BOMBEO DE CABECERA	10	4	3	24	576,00
PRETRATAMIENTO	32,75	1	1	6	157,20
TRATAMIENTO BIOLÓGICO					
Soplantes biológico	160,00	2	1	21	2.688,00
Aceleradores de corriente	5	5	4	24	384,00
Decantador secundario	1,75	2	2	22	61,60
Recirculación externa de fangos	12,00	3	2	22	422,40
Recirculación interna	8,00	3	2	15	192,00
FANGOS					
Decantadora Centrifuga	75,00	1	1	5	300,00
Resto	20,00	1	1	5	80,00
DESODORIZACION	40,00	1	1	9,00	288,00
ALUMBRADOS, TOMAS CORRIENTES	21,67	1	1	10,00	173,33
TOTAL DEL CONSUMO DIARIO (kW-h/día)					5.322,53

Tabla 1. Potencias y consumos de los equipos de la EDAR de caudal medio de 12.000 m³/día. Fuente: (Almazán Lope, 2014).

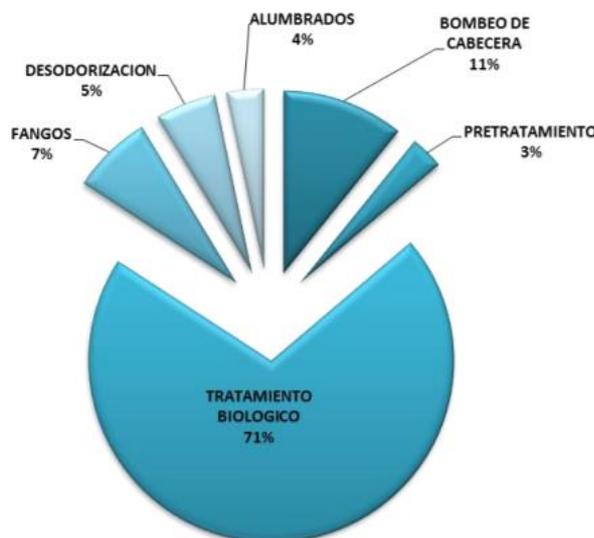


Figura 8. Gráfico de la distribución del consumo de energía por procesos en una EDAR con un caudal medio de 12.000 m³/día. Fuente: (Almazán Lope, 2014).

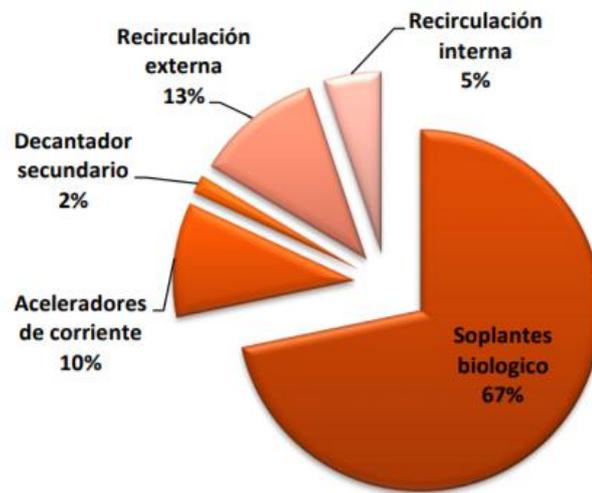


Figura 9. Gráfico de la distribución del consumo de energía en el tratamiento biológico en una EDAR con un caudal medio de 12.000 m³/día. Fuente: (Almazán Lope, 2014).

2.2. ÍNDICES Y POTENCIAL DE AHORRO

Conocer los consumos energéticos de la planta en cuestión es imprescindible para dimensionarla, es decir, darle una magnitud que la caracterice. Sin embargo, en el ahorro energético y la eficiencia es muy importante establecer una comparativa que permita distinguir la “calidad energética” entre las distintas plantas de tratamiento de aguas residuales, para saber la magnitud que dista del valor óptimo, establecido previamente, y así conocer el potencial de ahorro. Para ello, se van a utilizar los índices de eficiencia energética (IEE), que establecen una relación entre el consumo necesario para llevar a cabo el proceso de tratamiento de agua residual y el servicio prestado o el objetivo alcanzado. Un IEE sería, por ejemplo, el cociente entre el consumo eléctrico de la EDAR y los metros cúbicos de agua tratada, o al revés. A continuación, se muestran distintos parámetros energéticos de las EDAR que gestiona Emasesa (tabla 2), los IEE escogidos, el cálculo de los distintos IEE y el análisis y la comparación entre las distintas plantas.

Planta	Caudal [m ³ /día]	Habitantes equivalentes	Consumo total [MWh]	Consumo de la red [MWh]	Producción [MWh]
EDAR ESTE Ranilla	90000	350000	6781,05	5190,1	1590,95
EDAR NORTE San Jerónimo	90000	350000	5974,85	2657,7	3317,15
EDAR SUR Copero	255000	950000	13521,55	2465,3	11056,25
EDAR OESTE Tablada	50000	200000	3291,65	1765,1	1526,55
EDAR Mairena - Viso del Alcor	9220	41000	568,5	564,4	4,1
EDAR El Ronquillo	428	2316			

Tabla 2. Valores de los parámetros energéticos y de caudal de las EDAR de Emasesa. Fuente: Emasesa.

$$IEE1 = \frac{\text{Consumo eléctrico total anual}}{\text{Caudal anual}}$$

$$IEE2 = \frac{\text{Consumo eléctrico anual de la red}}{\text{Caudal anual}}$$

$$IEE3 = \frac{\text{Producción eléctrica anual}}{\text{Caudal anual}}$$

$$IEE4 = \frac{\text{Producción eléctrica anual}}{\text{Consumo eléctrico total anual}}$$

El IEE4 es el porcentaje de autosuficiencia energética

Planta	IEE1 [kWh/m ³]	IEE2 [kWh/m ³]	IEE3 [kWh/m ³]	IEE4 [%]
EDAR ESTE Ranilla	0,2064	0,1580	0,0484	23,46
EDAR NORTE San Jerónimo	0,1819	0,0809	0,1010	55,52
EDAR SUR Copero	0,1453	0,0265	0,1188	81,77
EDAR OESTE Tablada	0,1804	0,0967	0,0836	46,38
EDAR Mairena - Viso del Alcor	0,1614	0,1603	0,0012	0,72
EDAR El Ronquillo				

Tabla 3. Índices de eficiencia energética para las distintas EDAR que gestiona Emasesa, en rojo los peores valores, en verde los mejores valores, en amarillo los valores medios. Fuente: Elaboración propia.

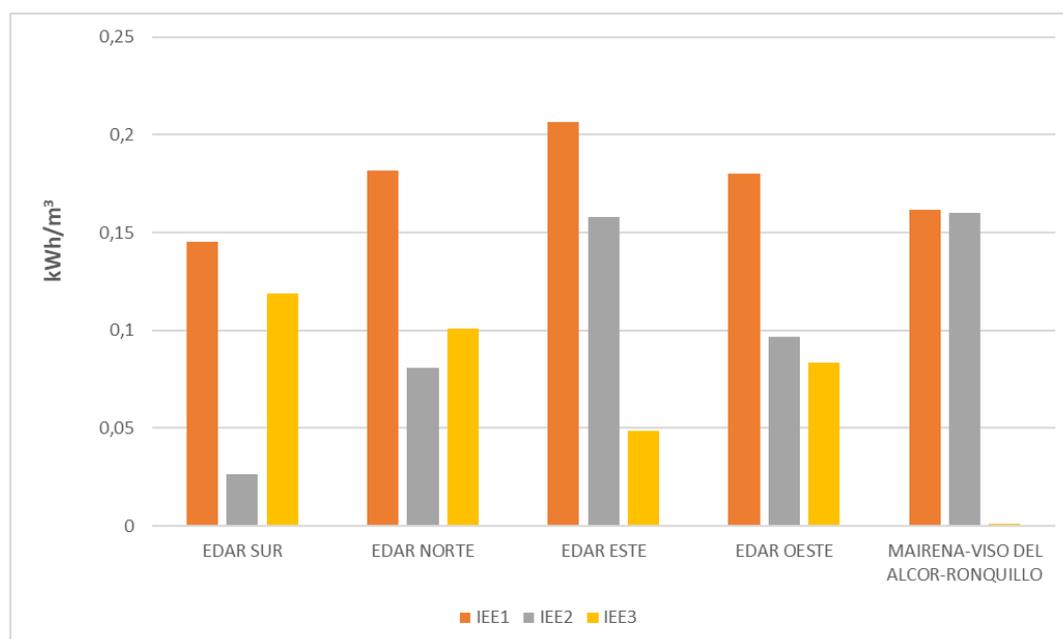


Figura 10. Índices de eficiencia energética para las EDAR que gestiona Emasesa, en la gráfica, kWh/m³ frente a tamaño de la planta. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 3 y en la figura 10, los índices de eficiencia energética (IEE) permiten realizar la comparativa entre plantas muy distintas, para saber cuál tiene una mejor “calidad energética”, en el caso anterior correspondería con la EDAR SUR Copero. Sin embargo, el potencial de ahorro para cada planta es distinto, ya que este potencial será la medida entre el valor del IEE actual y el valor de referencia óptimo. La referencia óptima, es decir, a lo que aspira a mejorar la planta, va en función de las características de la propia instalación, y se obtiene de la planta con la mejor “calidad energética”, fruto de la comparación mediante IEE de plantas similares. Es importante destacar que la referencia se obtiene de la comparación entre plantas similares, ya que existen distintos aspectos que afectan al potencial de ahorro, como pueden ser el contenido de materia orgánica en el agua residual, la calidad del agua residual, el tamaño de la instalación, la rentabilidad, etc. Por ejemplo, la EDAR ESTE no podría aspirar íntegramente a obtener los mismos IEE que la EDAR SUR, ya que se va a encontrar con una serie de obstáculos insalvables debido a la diferencia entre ambas instalaciones, pero sí podría aspirar a conseguir los valores de los IEE de la EDAR NORTE que es de características parecidas, por tanto, la referencia óptima para la EDAR ESTE podría corresponder con los IEE de la EDAR NORTE, y su potencial de ahorro, la diferencia entre ambos IEE.

2.3. REDUCCIÓN DEL CONSUMO

Una vez que se conoce el consumo de energía, cómo se distribuye en la EDAR, los IEE en comparación con otras instalaciones y el potencial de ahorro para saber cuál es la meta que alcanzar, se procede a reducir dicho consumo hasta llegar al mínimo que permite el diseño de la planta de tratamiento siguiendo los siguientes puntos, que no van a suponer ningún cambio en las infraestructuras de la instalación.

2.3.1. Concienciación para reducir el consumo de agua

Aunque este punto iría antes de determinar el consumo de la EDAR, es fundamental hacer un uso racional del agua potable que se usa y que va a acabar depurándose en una EDAR (o no), sobre todo por ser un recurso agotable, pero también por los costes económicos y de infraestructuras que genera su depuración, al fin y al cabo, reducir el consumo de agua repercute sobre el medio ambiente y sobre nuestro bolsillo en forma de factura o impuestos. Para realizar un uso racional del agua es necesario estar concienciado, es decir, darle valor a este recurso. Por eso, deben abordarse temas que incumben a la gestión del agua y a la importancia que ésta tiene como recurso desde la escuela, pero también en forma de campañas publicitarias, tal y como se muestra en la figura 11 y en la figura 12. Con este paso se busca la reducción de la demanda de depuración de aguas residuales, que va de la mano del consumo energético en las distintas plantas de depuración.

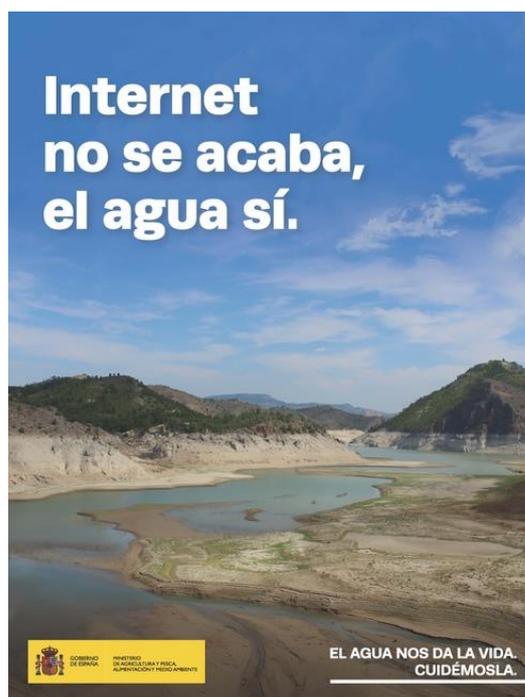


Figura 11. Campaña del Gobierno para concienciar sobre el consumo del agua en 2017, el segundo año más seco desde 1965. Fuente: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

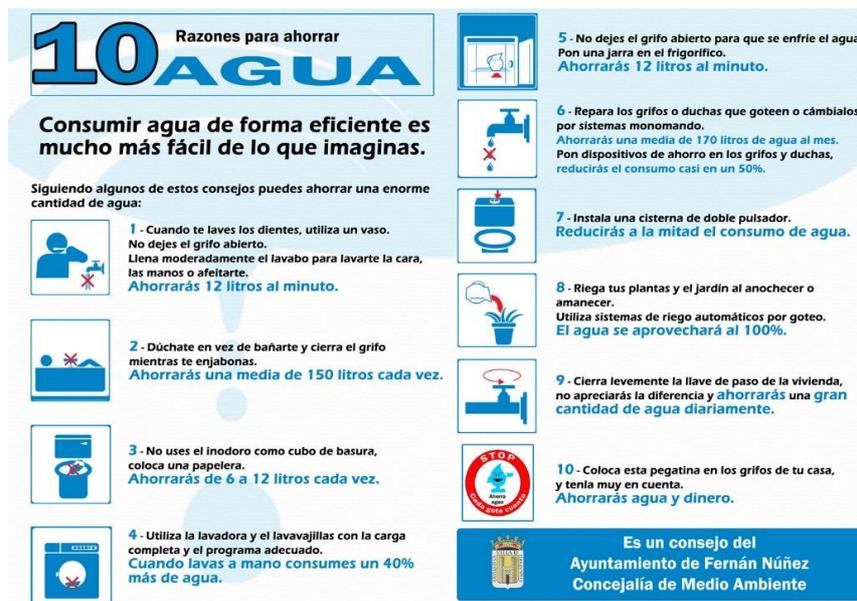


Figura 12. Campaña del Ayuntamiento de Fernán Núñez para concienciar sobre el consumo de agua.

Fuente: Ayuntamiento de Fernán Núñez.

2.3.2. Mantenimiento y mejoras operacionales

El objetivo de que la planta trabaje en su punto de consumo mínimo de diseño se alcanza realizando un correcto mantenimiento y sustitución de los equipos deteriorados, además de una serie de mejoras operacionales. Las mejoras operacionales son el resultado, no sólo de la madurez y experiencia en la gestión de la EDAR, sino también de ensayos con la propia planta, que puede responder negativa o satisfactoriamente en términos de operación. A continuación, y a modo de ejemplo, se muestra una serie de mejoras que se realizaron con éxito en la EDAR de Mairena y El Viso del Alcor (Carpes Hortal, et al., 2009), EDAR de aireación prolongada, extrapolables a otras depuradoras (aunque ciertamente no se sabe si dichas mejoras en otras plantas de depuración tendrán resultados mejores o peores que los de la citada anteriormente):

- **Adaptación de la edad del fango a la temperatura del reactor**

La configuración habitual del proceso que ocurre en el reactor biológico se suele fijar constante, no teniendo en cuenta ningún factor que lo aleje del funcionamiento óptimo. En este caso, la concentración de fangos y la edad del fango suelen permanecer constantes independientemente de la temperatura.

Al analizar los requerimientos de oxígeno y trabajar con una edad del fango igual a la edad necesaria para la estabilización de fangos, se obtiene que operar ajustando la edad del fango a la temperatura hace que disminuya la concentración de sólidos en el reactor conforme aumenta la temperatura, consiguiendo, a su vez, reducir el consumo global de energía hasta casi un 10% en verano en la EDAR

de Mairena y El Viso del Alcor. De la misma manera, controlando el consumo de oxígeno con la temperatura, la edad del fango disminuye y la concentración de sólidos también. En la EDAR de Mairena y El Viso del Alcor, al pasar de 9°C a 31°C, la edad del fango pasa de 31 a 6 días y la concentración de sólidos de 5000 mg/l a 1000 mg/l. En cómputo general, se obtiene una reducción anual del consumo energético del 5,25% en la aireación en la EDAR citada.

- **Control de la aireación**

Se trata de planificar el control de oxígeno para que su concentración se mantenga entre 1 y 2 mg/l, con el objetivo de mantener una nitrificación estable. Esta planificación consiste en fijar un valor de oxígeno y, si tras un periodo de tiempo determinado no se alcanza el valor fijado, se pone en marcha el segundo rotor, siguiendo el mismo paso para arrancar el tercer rotor; una vez alcanzado el valor fijado de oxígeno, se detienen los rotores que estén funcionando; cuando vuelva a bajar el valor de oxígeno por debajo del establecido, se repiten los pasos anteriores.

Para la EDAR de Mairena y El Viso del Alcor, esta medida supone que se reduzcan las horas de funcionamiento, reduciéndose a su vez el consumo energético en más de un 22%. Una ventaja adicional que esta medida presenta es que, al alternar fases aerobias y anaerobias, aumenta la eliminación de los compuestos nitrogenados por procesos de nitrificación-desnitrificación.

- **Modificación de la recirculación**

Con los trabajos de Billmeier se demuestra que la calidad del agua que sale del decantador depende de la cantidad total de agua enviada al decantador y de la calidad y cantidad total de biomasa enviada al decantador. Con esto, se puede conseguir una mayor calidad del agua a la salida, manteniendo al mínimo la carga volumétrica enviada al decantador a partir de la máxima reducción de la relación de recirculación.

Por tanto, si se reduce al máximo el caudal de recirculación, aumenta la calidad del agua de salida y, además, se reduce el consumo energético de los bombeos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que hay un valor mínimo de la recirculación para alcanzar una determinada edad del fango y evitar el lavado del reactor biológico.

Para la EDAR de Mairena y El Viso del Alcor, al reducir la relación de recirculación de un 150% a un 30%, los costes de bombeo disminuyeron un 80%, lo que representa un 6,9% del coste global del tratamiento secundario.

- **Aceleradores de corriente**

El objetivo de los aceleradores de corriente en el reactor biológico es producir el flujo del licor mixto y evitar que haya zonas muertas o de baja velocidad de flujo y la consiguiente decantación de los microorganismos. A la hora de incorporar los aceleradores de corriente al diseño del reactor, no existe un criterio establecido, por lo que el número de aceleradores de corriente instalados varía mucho entre distintas instalaciones, ya que depende de la decisión tomada en el diseño de la EDAR.

Para la EDAR de Mairena y El Viso del Alcor se dispone de dos aceleradores de corriente por reactor y se probó dejar solo uno de ellos en funcionamiento para ver el efecto del descenso de la agitación. El resultado, tras varios meses, fue que las condiciones de los reactores habían permanecido inalteradas, sin zonas muertas o de baja velocidad de flujo, y con homogeneidad en la concentración de microorganismos, independientemente de la profundidad. Por tanto, al reducir los equipos de vehiculación del licor mixto en funcionamiento a la mitad, el consumo energético de estos también se reduce a la mitad, así, si antes los equipos citados representaban el 9% del consumo global del tratamiento secundario, después de esta medida, representaban un 4,5%, a lo que habría que añadirle la disminución de costes de mantenimiento y el aumento de su vida útil.

2.4. OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO

Una vez que se alcanza el punto de consumo mínimo de diseño de la planta, se busca mejorar la eficiencia de los equipos, de los procesos, etc., sin alejarse demasiado del diseño original de la planta de tratamiento, todo ello para llegar al punto óptimo de consumo, es decir, conseguir hacer el mismo proceso con menor cantidad de energía. Estas mejoras de optimización se centran en donde el consumo energético es mayor, que es en el sistema de agitación y oxigenación del tratamiento biológico, aunque no se puede despreciar al resto de la instalación. Las actuaciones que podrían llevarse a cabo para la optimización de la planta comprenden un gran rango, por eso, a continuación, se presentan, a modo de ejemplo, las más destacables en la optimización del consumo (Almazán Lope, 2014):

- Independizar la aireación de la agitación en los reactores de fangos activados

La mayoría de los equipos en los reactores biológicos realizan la tarea de oxigenar y mezclar para homogeneizar a la vez, el problema radica en que los sistemas de aireación no trabajan bien para la mezcla, por lo que utilizarlos para ese proceso supone un coste mayor de energía. Esta medida trata de separar la mezcla y la oxigenación para que cada operación la desempeñe el equipo más adecuado a su propósito.

- Cambiar la tipología de aireación para mejorar la eficiencia energética

«El cambio de aireación superficial a aireación por burbujas puede significar un ahorro energético muy importante, por dos vías: mayor rendimiento del sistema de aireación y mayores posibilidades de control del proceso».

- Implantar equipos de aireación más eficientes

«El cambio de los aireadores superficiales por otros de alto rendimiento puede significar un ahorro energético importante (25 – 90%). Compresores de alto rendimiento pueden tener un 10 - 15% más de rendimiento».

- Implantación del control de procesos por sensores

Implementar sensores en la instalación, para controlar los parámetros de los distintos procesos en tiempo real, puede reducir el consumo entre un 25% y un 55%, aunque requiere equipos que puedan variar su carga de trabajo o incluso detenerse y arrancar en un corto periodo de tiempo.

- Empleo de la lógica difusa en el control de procesos

Consiste en anticiparse a las condiciones de operación que van a producirse, para ajustarse a ellas. Esto se realiza mediante el análisis del proceso que, aunque pueda variar, suele seguir patrones de comportamiento que se repiten de igual forma para cada cierto periodo de tiempo, en contraposición con la configuración fija que habitualmente tiene el control del proceso.

- Medidas de ahorro en el uso de motores eléctricos

«A partir de 2011 sólo se pueden comercializar en Europa motores IE2 o superior, según la Directiva 2005/32/CE RD640/2009. Para motores de 7,5 a 375 kW, en enero de 2015 la exigencia se aumenta a IE3 o IE2 cuando esté accionado por convertidor de frecuencia; y lo mismo en 2017 para motores de 0,75 a 375 kW [...].

Las medidas de ahorro en el uso de motores eléctricos más extendidas son: el uso de motores de alta eficiencia, una selección adecuada de los motores, realizar una operación racional de los motores eléctricos, así como mejorar las condiciones de operación de los motores eléctricos.

Adoptando estas medidas, de media se reduce su pérdida de energía en más de un 40%, incrementando además la vida del motor: mejor funcionamiento en condiciones ambientales críticas y menor mantenimiento preventivo junto con menores vibraciones, entre otras. El incremento de la inversión en estos motores puede ser amortizado durante la vida del motor, dado que, sólo el 1% del coste de toda su vida útil pertenece al precio de compra».

- Optimización de los bombeos

Se trata de adaptar los bombeos al caudal y presión necesarios mediante sistemas de control de frecuencia, trabajando en su punto óptimo de rendimiento, en lugar de tener bombas sobredimensionadas que estén estranguladas en la impulsión para ajustarlas al caudal requerido. Esta medida, además de hacer disminuir el consumo energético del bombeo, mejora su eficiencia.

- Instalación de turbinas en saltos de agua

Con esta medida se busca aprovechar los desniveles que haya en la instalación para, mediante una turbina hidráulica, generar electricidad a partir del salto y caudal disponible, siempre que sea viable. A menudo, coincide con el desagüe de la planta que es donde el salto de agua suele ser mayor.

Las turbinas, que por sus características son más convenientes para estas circunstancias, son las diseñadas para saltos de agua y caudales pequeños. Para una turbina de 700 o 1000 W, es necesario un salto de agua de en torno a 2,5 metros y un caudal de 50 l/s.

Además, la instalación de estos equipos presenta una ventaja fundamental que la diferencia del resto, la poca variabilidad e incertidumbre del caudal en el desagüe.

Las turbinas utilizadas en este ámbito tienen unas potencias de entre 20 y 350 kW.

Destaca el proyecto de aprovechamiento del salto de agua de 3,2 metros a la salida de la EDAR Sur de Madrid (da servicio a Vicálvaro, Puente de Vallecas y Villa de Vallecas) mediante dos turbinas que generan electricidad, donde cada una tiene una potencia de 85 kW para un caudal de diseño de 3,5 m³/s (ver Figura 13). La energía producida se destina para autoconsumo. (Madrid Subterra, 2017)



Figura 13. Turbinas en el desagüe de la EDAR Sur de Madrid, producen 1500 MWh al año. Fuente: (Madrid Subterra, 2017).

- Aprovechar el 100% del biogás de la digestión para generación eléctrica

Ante la oportunidad que da la disponibilidad de un recurso energético como es el biogás, no aprovecharlo en su totalidad es un despilfarro. Por eso, su uso no se puede limitar a abastecer los requerimientos térmicos de los digestores anaerobios, sino que debe abarcar también las demás necesidades térmicas y eléctricas al máximo posible que permite la cantidad producida de biogás.

- Implantación de sistemas de control por sensores para regular el nivel de ventilación en naves cerradas

En el control de olores se suelen utilizar sistemas de tratamiento de aire sobredimensionados y con una configuración fija de operación para garantizar la calidad del gran volumen de aire tratado. Frente a esto, se puede establecer una configuración variable, para que los sistemas en cuestión actúen de la forma óptima, según la concentración de ácido sulfhídrico y de amonio en el aire a tratar.

- Aumentar la desodorización confinada para reducir el número de renovaciones de aire a extraer

La potencia que requieren los ventiladores de desodorización va de la mano con las renovaciones de aire de los edificios que se lleven a cabo. Por lo que, cuanto más confinada esté la instalación, menor serán las renovaciones de aire a realizar y, por tanto, menor la potencia a consumir. (Almazán Lope, 2014).

2.5. NUEVAS TECNOLOGÍAS

En este apartado, se trata de alcanzar el punto tecnológico, es decir, actualizar la instalación a la tecnología más avanzada. Aunque alcanzar el punto tecnológico reduce aún más el consumo energético, es inviable económicamente en la mayoría de los casos, ya que los equipos se renuevan solo si se estropean o su deterioro afecta de forma notable al proceso que llevan a cabo, aunque también si el ahorro que supone remplazarlos es mayor que el coste de la sustitución.

Las investigaciones actuales en la tecnología de depuración de aguas residuales se centran en la valorización de los residuos generados, en la recuperación de energía y en el desarrollo de nuevos equipos y procesos. A continuación, se expone una serie de ejemplos de nuevas tecnologías aplicadas al ámbito de la depuración (Almazán Lope, 2014):

- Aplicación de la tecnología MBR (Biorreactor de membranas) en la depuración urbana

Con la tecnología de biorreactores de membrana se busca mejorar las deficiencias de la separación entre fangos y agua tratada en la depuración convencional, ya que reduce el volumen de los reactores debido a las mayores concentraciones de fangos, logrando la completa separación entre sólidos y agua. El inconveniente que presenta es su mayor consumo de energía frente a los sistemas convencionales, que es, dentro del desarrollo de esta nueva tecnología, el objetivo a superar.

- Cogeneración

La cogeneración consiste en la producción simultánea de energía eléctrica y energía térmica, a partir del biogás combustible que se produce en el proceso de digestión anaerobia, con el objetivo de tener un sistema de producción energética de alta eficiencia.

La cogeneración se realiza para satisfacer las distintas demandas energéticas de la instalación, como son la demanda eléctrica para la iluminación, control y bombeo, la demanda térmica de los digestores anaerobios, la demanda térmica para el secado de los fangos generados o la demanda térmica de los edificios de oficinas.

- Aplicación y desarrollo de tecnologías para mejorar la biodisponibilidad de los fangos

«La biodigestión se alimenta con los fangos primarios y secundarios de la depuración aerobia. La desintegración de la biomasa puede mejorar la disponibilidad biológica del sustrato y de esta manera incrementar la producción de biogás de la digestión. La desintegración se puede realizar con procesos mecánicos, sónicos y/o térmicos. Estos procesos pueden incrementar la biodisponibilidad en un 30% y reducen el tiempo de digestión a la mitad».

- Implantación de sistemas de Ciclo Rankine Orgánico para optimizar el aprovechamiento energético de biogás

«La demanda de calor de los digestores suele ser inferior al calor disponible en la cogeneración de la totalidad del biogás. El rendimiento energético global puede incrementarse mediante un sistema de Ciclo Rankine Orgánico (ORC) que aprovecha el calor de los gases de combustión. Las plantas existentes de ORC operan en rangos de 160 – 1.500 kW, aunque se está preparando la entrada en el mercado de unidades de 3 – 15 kW. El rendimiento eléctrico de un ORC está en el orden de 10 – 20%».

- Mejorar la fiabilidad de sensores para el control de procesos

Existen desarrollos e investigaciones en el campo de los sensores para aumentar su fiabilidad, bien mediante su nuevo diseño o con sistemas de limpieza y calibración automática, ya que una baja fiabilidad de los datos que ofrecen los sensores de las EDAR, con los que se controlan los distintos procesos, afecta de forma significativa al funcionamiento y al consumo energético de la planta.

Otros ejemplos de nuevas tecnologías para la depuración también pueden ser los siguientes:

- Integración de energías renovables para la producción de energía

Se trata de implementar nuevas tecnologías para la producción de energía a partir de fuentes renovables en espacios disponibles que no tengan ningún uso relevante, como el tejado de los edificios de oficinas y laboratorios o zonas de jardín, donde se podría producir energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos o energía térmica mediante captadores solares.

- Aplicación de los residuos en el desarrollo de nuevos materiales

Aunque en la aplicación de los lodos de depuradora está bastante extendido su uso como fertilizante en la agricultura y ganadería, existen nuevas perspectivas que están en desarrollo, como su aplicación en la fabricación de nuevos materiales, sobre todo en el ámbito de la construcción.

2.6. APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA DEPURACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS DEPURADAS

Al llevar a cabo los distintos procesos para la depuración de aguas residuales se obtiene una serie de subproductos (biogás, lodos y agua tratada) que a menudo son considerados como residuos, para los que su único fin es la eliminación. Dar una aplicación y un uso a estos subproductos, es decir, valorizarlos, supone abrir puertas al autoconsumo y a la autofinanciación de la instalación, lo que aumenta significativamente la competitividad de la planta de depuración, además de los efectos medioambientales, tecnológicos y de investigación y desarrollo que conlleva esta nueva perspectiva. A continuación, se presentan los campos de aplicación de estos subproductos.

2.6.1. Biogás

Las EDAR con procesos de digestión anaerobia en la línea de fangos, producen un gas combustible (biogás), compuesto mayoritariamente de metano (55% al 70%). La composición de este gas combustible indica la calidad de la digestión, siendo normal si el contenido en metano se sitúa entre el 60% y el 65%, con un poder calorífico cercano a las 5500 kcal/Nm³, lo que lo hace completamente utilizable.

Este biogás se puede utilizar para mantener la temperatura adecuada en los digestores, así como para producir energía eléctrica. El exceso de biogás puede también eliminarse mediante su combustión en antorcha.

- Cogeneración de energía eléctrica y térmica

A la hora de elegir el sistema adecuado para producir calor y electricidad conjuntamente mediante el biogás (cogeneración) habrá que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de combustible: gaseoso con composición mayoritaria de metano, aunque también contiene vapor de agua y ácido sulfhídrico, que puede contribuir a la corrosión de los equipos.
- Potencia energética disponible, es decir, el biogás disponible (depende de su producción).
- Relación entre energía eléctrica y energía térmica demandada, hay que tener en cuenta que la demanda de energía eléctrica es mayor que la demanda de energía térmica, por tanto, la cogeneración deberá tener un alto rendimiento eléctrico.

- Parámetros económicos: rentabilidad, inversión inicial, mantenimiento, periodo de retorno, etc.
- Equipos disponibles: gama de potencias existentes, disponibilidad, etc.

Los sistemas de cogeneración posibles pueden basarse en caldera de vapor, turbina de gas, ciclo combinado o motores alternativos de combustión interna. De estas opciones, a excepción de instalaciones de gran tamaño, la más adecuada y la más común es la de motores alternativos de combustión interna, una tecnología suficientemente desarrollada.

Según el tipo de combustible, en este caso el biogás, se adapta a cualquiera de los sistemas de cogeneración mencionados.

La potencia energética disponible, que depende de la producción de biogás y del contenido en metano que presenta, es relativamente pequeña para turbinas de gas y turbinas de vapor, pero muy habitual para motores de combustión interna. Una EDAR de 100000 habitantes equivalentes puede tener una disponibilidad de biogás de 2000 Nm³/día.

Para la ratio entre energía eléctrica y térmica, se buscan los sistemas en los que la parte que representa la energía eléctrica en dicha ratio sea máxima, esta condición la cumplen fácilmente los motores de combustión interna con rendimientos eléctricos entre el 25% y el 35%, algo no tan común en los otros sistemas de cogeneración.

En cuanto al aspecto económico, debe tenerse en cuenta la inversión inicial (habitualmente menor para los motores de combustión interna), los costes de mantenimiento, la necesidad de inversiones auxiliares, etc.

Otro punto para tener en cuenta a la hora de elegir el sistema de cogeneración más adecuado es la variedad de potencias existentes en el mercado. Mientras que los sistemas basados en turbinas de gas o turbinas de vapor comienzan a estar disponibles a partir de 400 kW, los motores alternativos de combustión interna se sitúan dentro de un amplio rango de potencias, desde 15 kW hasta 15000 kW.

Los motores de combustión interna tienen un valor típico de rendimiento global elevado, en torno al 86%, de este valor un 32% corresponde a la energía eléctrica y el 54% restante a la energía térmica.

- Potencial de generación del biogás

El potencial para generar biogás que presenta una EDAR va a depender, en primer lugar, de si se realiza en su instalación la digestión anaerobia de fangos o no (entonces el potencial sería nulo) y, en segundo lugar, del caudal de agua tratado, de los sólidos en suspensión, de la DBO₅, de la cantidad de fangos primarios y secundarios, de la materia volátil de los fangos y de la reducción de materia volátil en la digestión anaerobia.

Puede llegar a obtenerse entre 0,07 y 0,09 Nm³ de biogás por cada m³ de agua depurada (385 y 495

kcal por m³ de agua depurada).

El consumo de electricidad puede situarse entre 0,25 y 0,35 kWh por m³ de agua depurada en una instalación típica, lo que puede abastecer completamente la demanda de energía térmica y en torno al 45% de la demanda de energía eléctrica.

- Factores económicos

La cogeneración supone la reducción del consumo energético, que puede conllevar a la reducción de la potencia contratada, además, cabe la posibilidad de almacenar la energía en forma de biogás para utilizarla en el mejor momento (las horas donde la energía eléctrica tenga un coste mayor). Todo ello, de acuerdo con una planificación, puede modificar considerablemente la curva de demanda de electricidad de la instalación, por ejemplo, trabajando de forma discontinua para suplir energía en las horas punta, reduciendo la carga máxima. Esto permite contemplar otras tarifas de menor coste, donde el precio del kWh sea mucho menor.

Sin embargo, una instalación de este tipo requiere una inversión importante, a lo que se suman los costes procedentes de su mantenimiento, ya que cada determinado número de horas de funcionamiento deben realizarse labores de mantenimiento (cambio de aceite, filtros, bujías, etc.) y con una periodicidad mayor se llevan a cabo revisiones generales, incluso sustitución de partes del motor. La clave está en que estos costes no superen al ahorro obtenido del descenso del consumo energético y su periodo de retorno interese a quién vaya a realizar la inversión. (Fernández Herrera, 1995)

2.6.2. Lodos de depuración

Los lodos producidos en los procesos de depuración son habitualmente tratados como residuos, procediéndose a su eliminación, tras procesos de estabilización y deshidratación, mediante su depósito en vertederos o la incineración. Sin embargo, el hecho de revalorizarlos como subproductos, con usos a los que aplicarlos, abre un horizonte de posibilidades para aprovechar este recurso económicamente, lo que es beneficioso para la instalación, pero también para el consumidor que puede encontrar un producto de alta calidad a un precio más bajo. Además, supone una reducción del impacto ambiental de los fangos hasta casi anularlo, un punto a favor de la economía circular y sostenible.

Según datos del Registro Nacional de Lodos el destino final mayoritario es su utilización agrícola (alrededor del 80%), donde destaca el proceso de compostaje para su uso como fertilizante. Un destino final novedoso y con perspectivas de futuro es el empleo de los fangos en el campo de los materiales de construcción. Utilizar los fangos requiere aplicarle un tratamiento para reducir su contenido en agua, en patógenos y asegurar la estabilidad de la materia orgánica para conseguir una empleabilidad adecuada y ambientalmente segura.

- Compostaje

Aplicar directamente los lodos provenientes de la depuradora al terreno, es decir, un producto de elevado contenido en materia orgánica e inestable conllevaría un rápido crecimiento vegetal, pero no sería duradero y además se caería en el riesgo de producir excesos de nitrógeno y fósforo en el terreno.

Para salvaguardar estos riesgos y hacer más duradero el efecto, se realiza el proceso de compostaje, que es la descomposición biológica y estabilización de substratos orgánicos, de la que se obtiene un producto final estabilizado, higienizado y rico en sustancias húmicas, suficientemente estable para el almacenamiento y la utilización en los suelos sin impactos negativos sobre el entorno.

En este proceso, como en cualquier otro, debe controlarse el producto del que se parte, cada paso del proceso y las características finales (destaca el control de su contenido en metales), así como tener en cuenta todas las limitaciones que presenta (políticas, económicas, tecnológicas, etc.).

El compostaje se lleva a cabo de dos fases, descomposición y maduración:

- Descomposición: depende de las características del producto inicial y de las condiciones de trabajo. Debe realizarse en condiciones adecuadas para evitar problemas de lixiviados, malos olores y de calidad del producto final. Puede dividirse en tres etapas, que pueden durar desde unas pocas semanas a varios meses.
 - o Etapa mesofílica, donde se descomponen los compuestos más fácilmente degradables, aumenta la temperatura y desciende el pH.
 - o Etapa termofílica, aquí la temperatura supera los 40 °C, la mayoría de patógenos humanos y vegetales son eliminados y el pH se va alcalinizando.
 - o Tercera etapa, la temperatura desciende y los hongos termofílicos reinvaden el proceso, alterando la celulosa y la hemicelulosa.
- Maduración: depende no solo del producto inicial, sino también de las etapas anteriores y del uso final al que se va a destinar. Requiere de algunas semanas a varios meses. En ésta, apenas se libera calor y el pH se mantiene alcalino, obteniéndose un producto final más o menos estable en función de la duración de la fase de maduración (Soliva & Huerta, 2004).
- Lodos en materiales de construcción

El uso de lodos en materiales de construcción está todavía en investigación para distintas fabricaciones, como ladrillos, árido ligero, cemento, morteros u hormigón. En el caso de la fabricación de ladrillos, tras los procesos de cocción, los materiales orgánicos de los fangos se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que dan lugar a unas interesantes propiedades de aislamiento térmico. El máximo porcentaje de lodos que se podría añadir a la arcilla cerámica sería del 40%, siendo las proporciones óptimas entre el 10% y el 20% para que el ladrillo no pierda calidad.

Además, se puede tener en cuenta la utilización de cenizas procedentes de la incineración de lodos como sustitutivo a las cenizas normalmente utilizadas en la industria cementera y que proceden de centrales termoeléctricas de carbón, así como en la fabricación de distintos materiales, como es el caso de la lana de roca, un material que sirve como aislante frente al ruido y al fuego. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013)

2.6.3. Reutilización de las aguas depuradas

La reutilización de las aguas depuradas supone su revalorización, es decir, un producto que en la mayoría de los casos se reconduce a los ríos o mares para deshacerse de él, se puede dirigir hacia su uso en distintas aplicaciones. Esto conlleva una serie de aspectos positivos, como son aumentar el recurso hídrico disponible, la reducción de la contaminación o la regulación más efectiva del caudal. Aun así, presenta desventajas como el transporte, el almacenamiento, la necesidad de una inversión económica y los obstáculos de la propia legislación que lo regula.

El agua depurada proveniente de las EDAR tendrá que cumplir unas características dependiendo del uso para el que se destine, por lo que el proceso de depuración tendrá que ser más exhaustivo para los casos que así lo exijan, esto puede suponer un impacto significativo en el consumo energético de la planta que hay que tener en cuenta a la hora de decidir apostar por la reutilización del agua residual.

En cuanto a su uso, hay un amplio rango, siempre que no se destine al uso humano, en instalaciones hospitalarias, en la industria alimentaria, en el cultivo de moluscos filtradores y como agua de baño, que está prohibido por ley (Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas). Algunos ejemplos del empleo de agua depurada son los siguientes: en riego de jardines, limpieza de calles, extinción de incendios, riego de plantaciones, acuicultura, como agua de proceso y limpieza en la industria, en torres de refrigeración, estanques, fuentes ornamentales, campos de golf, recarga de acuíferos, mantenimiento de humedales, etc. Una aplicación más novedosa es la utilización de aguas residuales en el *district heating and cooling*, es decir, utilizar el calor contenido en las aguas residuales urbanas como fuente de calefacción y refrigeración, mediante intercambiadores de calor, que reducirían el diferencial térmico objetivo que el sistema debe superar para alcanzar la temperatura deseada. Algunas estimaciones realizadas por expertos consideran que las aguas residuales producidas por 100 personas permiten proporcionar calefacción a 10 habitantes. Extrapolando esa cifra a la ciudad de Madrid, podríamos decir que en la capital existe un potencial de generación de energía para la calefacción de 125.000 hogares. En España se considera que podría abastecer a 1800000 hogares. Esta aplicación ya es una realidad en la que es la mayor bomba de calor del mundo, en el parque Katri Vala (Helsinki).

De cara al futuro, la reutilización de aguas residuales va a ser clave, ya que se espera que el consumo global de agua aumente un 50% para 2030, al mismo tiempo que la frecuencia y la magnitud de las sequías se agrava debido al cambio climático. Además, favorecería a la agricultura y a la disminución de la presión sobre los recursos naturales, un punto esencial en el camino hacia una economía y un consumo sostenible.

2.7. BARRERAS LEGISLATIVAS

A la hora de aprovechar los subproductos obtenidos de la depuración (biogás y lodos) y reutilizar las aguas residuales, hay una normativa que las regula y que a menudo obstaculiza la apuesta por estas alternativas. Poner obstáculos al aprovechamiento de estos recursos, que no es más que impedir la revalorización de los residuos de la depuración, supone tener que almacenarlos y/o eliminarlos

considerándolos como residuos. Para el caso del biogás, se procedería a su quema en la antorcha, lo que es sinónimo de emisión de gases de efecto invernadero y una pérdida de energía que se expulsa al ambiente y que no se utiliza en los procesos de la depuración, teniendo en su lugar que abastecerse de la red, lo que aumenta el consumo energético y el impacto negativo sobre el ambiente. Para los lodos de depuración, el no aprovecharlos supone un aumento de los gastos, ya que no solo se dejaría de recibir ingresos por venderlos, sino que además habría que eliminarlos o almacenarlos teniendo que invertir en instalaciones, manos de obra, mantenimiento y consumo de energía y agua. En cuanto al empleo del agua depurada, poner trabas a su uso implica reducir el recurso hídrico disponible, algo que podría marcar la diferencia a la hora de afrontar sequías, reducir la presión sobre los recursos naturales (agotables), controlar el caudal o reducir la contaminación de ríos y mares, además de limitar las aspiraciones a una economía circular y sostenible. A continuación, se enumera y comenta la normativa que regula estas actividades. La normativa contemplada en los párrafos siguientes es a escala nacional, que en muchos casos viene determinada desde los órganos legislativos europeos, por lo que, a la hora de llevar a cabo las actividades mencionadas, habría que profundizar en la normativa autonómica también, ya que cada autonomía tiene sus propios requisitos en las competencias que poseen y que varían demasiado como para considerar en este documento cada una de las distintas leyes para cada comunidad autónoma.

2.7.1. Normativa sobre utilización del biogás

- **Ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales.**

Es una ley que se fijó dentro del marco legislativo europeo, que establece en el artículo 50, epígrafe 1.10.1., la aplicación de un tipo impositivo al biogás utilizado como hidrocarburo combustible para satisfacer la demanda de un proceso. El tipo impositivo es de 0,65 €/GJ, siendo la cantidad de energía de referencia (GJ) la del gas destinado a la cogeneración, donde está exento el gas quemado en antorcha para su eliminación, algo completamente incoherente, ya que se promueve la eliminación del biogás mediante su combustión y posterior emisión a la atmósfera, en vez, de incentivar su uso aprovechando un recurso que se produce en la propia EDAR y que reduciría el consumo de energía eléctrica necesario. Por tanto, es una ley que beneficia solamente a las empresas de generación y distribución de energía eléctrica, dejando a un lado las necesidades de hacer más competitivas a las plantas de depuración de aguas residuales, así como las necesidades energéticas y medioambientales, que sí repercuten a toda la sociedad.

Con el Real Decreto 1165/1995, de 7 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de los Impuestos Especiales, se unificó la ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales, con sus sucesivas modificaciones para evitar la situación de dispersión de las normas reglamentarias en materia de impuestos especiales.

- **Ley 15/2012 de 27 de diciembre, de medidas fiscales para la sostenibilidad energética.**

Con esta ley se establece un impuesto del 7% del importe total de lo que percibe el contribuyente por la producción e incorporación al sistema eléctrico de energía eléctrica. Esta ley solo afecta si la energía eléctrica producida se incorpora a la red eléctrica, que tiene una repercusión directa sobre los costes que asume el consumidor final de energía eléctrica.

- **RD-ley 2/2013, de 1 de febrero, de medidas urgentes en el sistema eléctrico y en el sector financiero.**

Este Real Decreto-ley supone la modificación del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, en este se establecían unas primas y tarifas reguladas para incentivar la producción de energía en régimen especial para incorporar a la red eléctrica, con el fin de fomentar las energías renovables y reducir la dependencia energética exterior. Con el Real Decreto-ley del 1 de febrero se anulan todas las primas de referencia que sí contemplaba el Real Decreto del 25 de mayo de 2007, poniendo en una situación más adversa a actividades de producción de energía eléctrica en régimen especial, como es el caso del aprovechamiento del biogás para producción de electricidad y su incorporación a la red.

- **Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.**

Según el Artículo 1, «constituye el objeto de este real decreto la regulación del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos».

- **Orden IET/1045/2014, de 16 de junio, por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.**

Según el artículo 1 de esta orden, se establecen las siguientes metas:

«1. Constituye el objeto de esta orden el establecimiento de los parámetros retributivos de las instalaciones tipo correspondientes a las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de esta orden para el primer semiperiodo regulatorio definido en la disposición adicional primera del Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos, sin perjuicio de lo previsto en su artículo 20.

2. Asimismo, se fija la equivalencia entre las categorías, grupos y subgrupos definidos con anterioridad a la entrada en vigor del Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos y las nuevas categorías, grupos y subgrupos establecidos en el citado real decreto, fijando para cada uno

de estos últimos las diferentes instalaciones tipo y sus códigos correspondientes a efectos de la determinación del régimen retributivo aplicable.

3. Finalmente, se completan los criterios para el cálculo de la retribución de las instalaciones híbridas definidas en el artículo 4 del Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, de conformidad con el artículo 25 del referido real decreto».

Esta orden se complementa con la orden IET/1344/2015, de 2 de julio, por la que se aprueban las instalaciones tipo y sus correspondientes parámetros retributivos, aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

- **Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.**

Según el artículo 1, «El Real Decreto tiene por objeto el establecimiento de las condiciones administrativas, técnicas y económicas para las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica definidas en el artículo 9 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico».

Los aspectos relativos a las configuraciones de medida, las limitaciones del máximo de potencia de generación instalada hasta la potencia contratada o los relativos al pago de cargos por la energía autoconsumida fueron modificados por el Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica, al considerarlos, desde el Ministerio para la Transición Ecológica, obstáculos para la expansión del autoconsumo y promover, de esta manera, el autoconsumo.

- **Real Decreto 773/2017, de 28 de julio, por el que se modifican diversos reales decretos en materia de productos y emisiones industriales.**

Con este Real Decreto se modifican otros 5 reales decretos: Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación; Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire; Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas; Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas; Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico. Con toda esta normativa se pretende regular y establecer límites en el ámbito de emisiones a la atmósfera y calidad del aire, así como clasificar distintas sustancias que pueden ser peligrosas, es decir, es una normativa con el fin de la protección medioambiental, que impone una serie de requerimientos que hay que cumplir, pero que son necesarios para el objetivo de alcanzar una economía circular y sostenible.

La mayor parte de la normativa corresponde al establecimiento de los pasos y a la regulación a seguir en el ámbito jurídico, económico, administrativo y ambiental. En la mayoría de los casos es un proceso laborioso recopilar todos los permisos e información requerida, así como esperar a la sentencia favorable de las distintas instituciones que deben aprobar los numerosos permisos a conceder. Además, la extensa legislación en este campo, a lo que se añade el solapamiento entre distintas leyes y sus numerosas modificaciones en el tiempo, hacen que sea dispersa y poco clara a la hora de interpretar qué se debe hacer en cada situación.

Otro aspecto que destacar es la imposición de impuestos al biogás por su uso energético, y que a veces hacen que resulte más interesante su eliminación mediante combustión en antorcha que su aprovechamiento en la producción de energía, algo insostenible y que debería analizarse para introducir cambios y mejoras. Todo esto refleja lo interesante que puede llegar a ser este recurso energético que es clave y estratégico, debido a su exhaustivo seguimiento y control, la modificación continua de la normativa que lo regula según los intereses a los que sirve y la aplicación de impuestos por la utilización energética de este subproducto de la depuración.

2.7.2. Normativa sobre lodos de depuración

- **Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.**

Según el Real Decreto, éste se elabora porque es «necesario establecer un marco normativo que permita compaginar la producción de los lodos de depuración y su utilización agraria en España con la protección eficaz de los factores físicos y bióticos afectados por el proceso de producción agraria».

En el artículo 3 de este decreto se establece que:

«1. Los suelos sobre los que podrán aplicarse los lodos tratados deberán de presentar una concentración de metales pesados inferior a la establecida en el anexo I A.

2. Los lodos tratados a utilizar en los suelos no excederán en cuanto al contenido en metales pesados, de los valores límites expresados en el anexo I B.

3. Las cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por hectárea y año serán las que, de acuerdo con el contenido en metales pesados de los suelos y lodos a aplicar, no rebasen los valores límite de incorporación de los metales pesados establecidos en el anexo I C.

4. Las técnicas analíticas y de muestreo a utilizar, así como las determinaciones a realizar sobre lodos y suelos serán, al menos, las establecidas en los anexos II A, II B y II C, del presente Real Decreto.

5. En todo caso, se establecen las siguientes prohibiciones:

a) Aplicar lodos tratados en praderas, pastizales y demás aprovechamientos a utilizar en pastoreo directo por el ganado, con una antelación menor de tres semanas respecto a la fecha de comienzo del citado aprovechamiento directo.

b) Aplicar lodos tratados en cultivos hortícolas y frutícolas durante su ciclo vegetativo, con la excepción de los cultivos de árboles frutales, o en un plazo menor de diez meses antes de la recolección y durante la recolección misma, cuando se trate de cultivos hortícolas o frutícolas cuyos órganos o partes vegetativas a comercializar y consumir en fresco estén normalmente en contacto directo con el suelo».

En resumen, en este Real Decreto se establecen los límites de metales pesados contenidos en los lodos de depuración a utilizar y en el suelo sobre los que se van a aplicar, para no afectar a la producción agraria. Además, se establecen los métodos analíticos y de muestreo para hacer un seguimiento adecuado del contenido en metales pesados. Todo esto es necesario para una correcta aplicación de los lodos.

- **Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.**

El artículo 1 de esta normativa dice: «Esta orden tiene por objeto actualizar el contenido del Registro Nacional de Lodos y la información que deben proporcionar las instalaciones depuradoras de aguas residuales, las instalaciones de tratamiento de los lodos de depuración y los gestores que realizan la aplicación en las explotaciones agrícolas de los lodos de depuración tratados, de acuerdo con lo dispuesto en el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de lodos de depuración en el sector agrario».

- **Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.**

Con este Real Decreto se regulan los límites de emisión a la hora de proceder a la incineración de los lodos o a la coincineración en cementeras.

- **Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.**

Según el artículo 1 de este Real Decreto, «el objeto del presente Real Decreto es el establecimiento de un marco jurídico y técnico adecuado para las actividades de eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, al tiempo que regula las características de éstos y su correcta gestión y explotación, todo ello teniendo en cuenta el principio de jerarquía en la gestión de residuos recogido en el artículo 1.1 de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, y con la finalidad de proteger la salud de las personas y el medio ambiente».

Por tanto, con esta normativa se regula la eliminación de lodos mediante su depósito en vertederos.

Como se puede observar, hay un vacío legal en el uso de los lodos de depuración fuera del ámbito de la aplicación en la agricultura o su eliminación mediante su depósito en vertederos o incineración, como es el caso de su empleo como material de construcción. Aunque a menudo se produce este desfase entre la legislación y los nuevos avances tecnológicos, es necesario la actualización regular de las distintas normativas, para que, así, no se limite la investigación y el desarrollo de nuevas alternativas, además de las inversiones económicas que requieren. Sin embargo, no siempre es positivo el constante cambio de legislación, ya que puede ir de un punto más restrictivo a otro menos restrictivo, o al revés, según quién o cuándo se legisle, aunque idealmente la legislación debería tener una tendencia positiva hacia la mejora de las condiciones aplicadas, y no dar pasos hacia atrás, como ha ocurrido en muchos casos, por ejemplo, en el sector de las energías renovables.

2.7.3. Normativa sobre reutilización de aguas depuradas

La legislación que regula la reutilización de aguas residuales corresponde con el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

El artículo 1 de este Real Decreto establece: «Este real decreto tiene por objeto establecer el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas, de acuerdo con el artículo 109.1 del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio».

En éste, se regula el uso de aguas depuradas para los ámbitos urbano (riego de jardines, descarga de sanitarios, baldeo de calles, incendios), agrícola (pastos, acuicultura, riego de plantaciones), industrial (agua de proceso y limpieza, uso en torres de refrigeración), recreativo (estanques, fuentes ornamentales, campos de golf) y ambiental (recarga de acuíferos, mantenimiento de humedales, caudal mínimo), y se prohíbe su uso para consumo humano, en instalaciones hospitalarias, en la industria alimentaria, en el cultivo de moluscos filtradores y como agua de baño. Esta ley regula de forma adecuada y necesaria el uso del agua depurada para evitar otros riesgos, sin embargo, siempre se puede mejorar en cuanto a los procesos burocráticos de solicitud y aceptación de ésta, así como aplicar las nuevas tecnologías de control a los procesos de seguimiento por muestreo y análisis de las aguas depuradas. Además, la prohibición de aguas depuradas para ciertos usos impide avanzar en la tecnología y los medios para conseguir un agua depurada que cumpla unos requisitos mínimos y de calidad para su aprovechamiento en estos usos prohibidos sin que suponga ningún riesgo, como, por ejemplo, para el agua de baño.

3 AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RSU Y VERTEDEROS

Lo que más nos diferencia de otras épocas y de otras culturas, lo que más nos preocupa, y lo que realmente más puede transformar radicalmente la posición de la humanidad en el presente es la basura.

- Félix Rodríguez de la Fuente, 1972 -

En la búsqueda del menor impacto posible sobre el entorno, en favor del desarrollo sostenible, se plantean también los límites de las plantas de reciclaje de RSU y los vertederos, no sólo para hacerlos más eficientes y que tengan un menor efecto sobre el medio ambiente, sino para aumentar su viabilidad en el sentido de reducción de costes de operación y de consumos energéticos y, consecuentemente, con la intención de disminuir la dificultad con la que la Administración proyecta, ejecuta y opera dichas instalaciones medioambientales para la gestión de RSU en nuestro territorio.

Con el anterior pretexto, los apartados que se desarrollen de este punto en adelante se enfocarán en la gestión energética de las plantas de reciclaje de RSU y vertederos. Por eso, se pretende marcar los pasos que definan la metodología para el ahorro y la eficiencia energética en las citadas instalaciones, partiendo de la determinación de los consumos y, así, conocer dónde se encuentran los mayores focos de consumo energético, seguido de la proposición de medidas correctoras en la operación que permitan alcanzar el punto de diseño de la planta, continuar con la optimización de los procesos para llegar al punto de funcionamiento óptimo y, finalmente, introducir nuevas tecnologías para avanzar hasta el punto más actualizado tecnológicamente. Por último, se añade como paso la valorización energética de los subproductos obtenidos en la planta de reciclaje de RSU y en el vertedero para añadir un margen mayor a la gestión energética. Todos los pasos anteriores deben tener en cuenta la existencia de barreras económicas, técnicas y legislativas que impiden en cierta medida una implementación sencilla de la citada metodología.



Figura 14. Complejo medioambiental La Vega. Fuente: (Mancomunidad La Vega, 2016).

Los beneficios que conllevaría adoptar una serie de medidas para el ahorro y la eficiencia energética son evidentes, pues supone la reducción de costes económicos, energéticos y medioambientales y el aumento de la eficiencia de las instalaciones, lo que las hace más competitivas. Sin embargo, la ambición por el ahorro y la eficiencia energética no puede perjudicar al proceso de gestión de RSU, a este límite se suman los obstáculos económicos, técnicos y legislativos. Con el fin de superar de la mejor manera las dificultades que se presentan, se busca establecer una metodología que simplifique la ejecución del proyecto y señale el camino, indicando dónde hay que priorizar la acción.

3.1 EVALUACIÓN DEL CONSUMO Y LOS PROCESOS

Todo el conjunto de pasos que hay que dar para el ahorro y eficiencia energética se puede resumir en la adopción de medidas para conseguir hacer el mismo proceso con una cantidad de energía menor, sin afectar al objetivo principal, que es la gestión de residuos. Sin embargo, para poder adoptar medidas, se requiere del conocimiento y el análisis de la situación inicial, es decir, saber todos los puntos de consumo energético, el tipo de energía consumida, la cantidad de energía, etc. Es por esto, por lo que el primer paso debe ser la evaluación del consumo y el conocimiento de los procesos que se llevan a cabo. Sin este primer paso, no se podrá llegar a adoptar las medidas más eficaces que se ajusten a las características de las instalaciones y de los procesos que se llevan a cabo en ellas.

La evaluación del consumo y de los procesos exige que el análisis sea lo más profundo y preciso posible, ya que cuanto más se aleje de la consideración del mayor número de factores que tienen efecto sobre los procesos y la planta, más erróneo será el análisis y menos realistas y eficaces serán las medidas que en un futuro se apliquen para mejorar energéticamente los procesos y la planta.

Aunque, hay que señalar la dificultad y, a veces, la imposibilidad, de reunir todos los datos necesarios, por lo que, si este primer paso no se puede realizar con la mayor satisfacción, cobra especial importancia en la toma de decisiones la experiencia y la intuición desarrollada a lo largo del tiempo, a través del trabajo diario en este tipo de instalaciones.

A continuación, se exponen los seis elementos que forman el sistema de gestión de residuos (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2007):

- **Generación de residuos:** es el inicio de la cadena de gestión y donde se puede conocer la información necesaria para el diseño de las siguientes etapas (cantidad de residuos generada, composición, etc.).
- **Prerrecogida:** comprende la separación y almacenamiento que se realiza en origen por quien genera los residuos, previo a depositar los residuos en el punto de recogida. Añade matices a la consideración de los pasos siguientes, como pueden ser, por ejemplo, el lugar de recogida y la facilidad de acceso o las condiciones higiénicas que presenta.
- **Recogida:** se caracteriza por el traslado de los residuos desde los distintos puntos de recogida hasta la estación de transferencia, el lugar de tratamiento o el lugar de eliminación.
- **Transferencia y transporte:** se trata del traslado de los residuos desde los puntos de recogida hasta la estación de transferencia y, desde ahí y tras haber compactado el volumen de residuos, se traslada en un camión de mayor capacidad hasta el lugar de tratamiento o el lugar de eliminación.
- **Tratamiento:** consiste en las etapas de separación, procesado y transformación de los residuos. De aquí se obtienen, por un lado, subproductos que tienen un determinado uso, y, por otro lado, una parte de rechazo que se envía a un vertedero o a la que se aplica un tratamiento térmico.
- **Evacuación:** es el punto final para los rechazos del elemento anterior del sistema de gestión, que suele ser un vertedero controlado.

Aunque la anterior división de un sistema de gestión sea la que normalmente se realiza, a la hora de determinar y analizar los consumos y procesos, que ya de por sí es complejo, esta separación en subsistema del conjunto del sistema de gestión de residuos hace todavía más difícil la tarea de evaluar los consumos energéticos y los procesos. Por tanto, con la perspectiva de llevar a cabo dicha evaluación de la forma más sencilla posible, se va a plantear una división que desde el punto de vista energético es más eficaz, ya que busca centrarse en los puntos de mayor consumo, que, a fin de cuentas, es donde el ahorro y la eficiencia energética puede sacar mayor beneficio.

Los subsistemas en los que se va a dividir a partir de aquí la globalidad del proceso de gestión de residuos son los cuatro siguientes: transporte de los residuos, separación y compactación,

tratamientos de reciclado y de obtención de subproductos y eliminación final. A continuación, se abordará cada elemento por separado:

3.1.1 Transporte de los residuos

En este bloque se incluyen todos los traslados que se realizan del residuo, desde la generación hasta la estación de transferencia, la planta de tratamiento o el lugar de eliminación. El tipo de energía que se emplea casi en su totalidad es el combustible de los camiones que transportan los residuos, es decir, energía química. Una mínima parte, que podría considerarse despreciable, es la energía eléctrica de los compresores de los sistemas de recogida neumática o el caso de los camiones eléctricos, si los hubiera.



Figura 15. Camión de recogida de los residuos para su traslado a la planta de tratamiento. Fuente: (Madridiario, 2017).

Se estima que en torno al 70% del coste de la gestión de los residuos va destinado a la logística y al transporte de los mismos, una cifra económica, que hace entrever el gran impacto energético que también tiene.

Este bloque asume la mayor parte del consumo energético y, por tanto, es donde deberían ir las principales medidas de ahorro y eficiencia energética. Esta situación se debe a que la cantidad de residuos generada es bastante grande, va aumentando con el tiempo y se combina con la enorme distribución en el territorio de los distintos puntos de recogida. Además, se le añaden otras circunstancias, respecto a si la recogida es selectiva o no, o bien la problemática de transportar residuos que son envases y recipientes vacíos, ya que, si no se realiza ningún tipo de proceso de compactación, se estaría transportando un volumen mayoritario de aire contenido en dichos envases y recipientes.

3.1.2 Separación y compactación

En este paso el consumo energético se encontraría en la energía eléctrica que emplea la maquinaria para la separación de los residuos en distintos tipos y su posterior compactación. El consumo energético no puede ser comparable con el que se produce en el bloque de transporte, ya que, siendo la cantidad de residuos la misma, la gran diferencia es que en este bloque los residuos están concentrados en el mismo punto, es decir, en la planta de reciclaje, al contrario de la gran dispersión en el territorio del bloque anterior.



Figura 16. Contenedores para la recogida selectiva de residuos. Fuente: (UH Noticias, 2017).

Cabe destacar el auge de la recogida selectiva en los últimos tiempos, pues supone la separación en origen de los residuos por parte de quienes lo generan. Principalmente, los residuos se separan en vidrio, papel, envases y restos, como en la figura 16. Este aspecto supone un ahorro energético posterior en la separación que se debería de efectuar en la planta de reciclaje. Sin embargo, a primera vista se podría asociar a un aumento de los costes económicos y energéticos por el hecho de tener que transportar por separado las cuatro fracciones en los que se ha dividido el residuo en origen. También es cierto que la necesidad de multiplicar por cuatro los contenedores en origen (matizando que no es del todo multiplicar por cuatro los contenedores, ya que los tres contenedores, de vidrio, papel y envases, no requieren que estén tan distribuidos como el de fracción orgánica por la proporción de volumen generado) y de haber, al menos, dos tipos de camiones de recogida, aumenta la inversión inicial. Sin embargo, el hecho de que tenga que haber distintas recogidas para cada tipo de residuo en los que se ha separado, cada una tiene su periodicidad de recogida, puesto que, como es habitual, la fracción orgánica se recogería diariamente y los otros tipos semanalmente (dependiendo de la cantidad generada normalmente en cada zona), lo que hace que el transporte de fracción orgánica sea más eficiente al disponer de mayor capacidad de transporte y no añadir la problemática de la contención de aire en los envases y vidrios, suponiendo un ahorro añadido.

En el cómputo general, una correcta ejecución y planificación de la recogida selectiva hace que, con la suma de ahorros que conllevan la separación en origen de los residuos en el tiempo de vida

de los medios añadidos frente a la inversión inicial, sea interesante en términos económicos y energéticos.

A continuación, se exponen, en la tabla 4 y en las figuras 17 y 18, los datos promedio de las proporciones en los que se dividen los residuos dependiendo si el país está desarrollado o en vías de desarrollo. Es fácil ver que el desarrollo repercute de manera relevante en el aumento de plásticos, vidrio, metales, papel y cartón, que en la mayoría de los casos corresponden con envases excesivos sean del material que sean. A fin de cuentas, una desventaja del desarrollo es que genera la cultura del derroche.

Datos promedio [%]	Materia orgánica	Papel y cartón	Metales	Vidrio	Plásticos	Otros
Países en vías de desarrollo	69.1	2.6	1.2	2.4	5.6	19.1
Países desarrollados	47.5	15.3	5.8	11.6	13.0	6.8

Tabla 4. Comparación de datos en cuanto a las fracciones de los residuos municipales. Fuente: (FAO, 1998).



Figura 17. Datos promedio de las fracciones de los residuos municipales en países en vías de desarrollo. Fuente: (FAO, 1998).



Figura 18. Datos promedio de las fracciones de los residuos municipales en países desarrollados.
Fuente: (FAO, 1998).

3.1.3 Tratamientos de reciclado y de obtención de subproductos

En este bloque, el consumo energético cobra importancia cuando los procesos para el reciclaje de algún tipo de residuo consisten en un tratamiento térmico u otros específicos con alta demanda de energía, como puede ser la necesidad de aumentar a 65 °C la temperatura del agua del púlper, para facilitar la transformación de las hojas de papel en una pasta.

La ventaja con la que cuenta este bloque es que el “reciclaje” de la materia orgánica, que es la mayor fracción de los residuos, no requiere de gran cantidad de energía, aunque su consumo energético también depende del sistema que se aplique. Por tanto, de forma minoritaria, quedan otros procesos, específicos para cada tipo de elemento que se vaya a reciclar, que en algunos casos van a consumir gran cantidad de energía y en otros casos, no.

Otro aspecto fundamental es que cuando el coste medioambiental o la imposibilidad técnica o económica supera al beneficio medioambiental, que es la principal intención del reciclaje, se elude este paso y se da un salto desde el anterior bloque al siguiente.

A continuación, se comentan los procesos de reciclaje de cada fracción típica en los que se han dividido los residuos (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2007) (Elías Castells & Bordas Alsina, 2017):

- **Reciclaje de vidrio**

El vidrio es totalmente reciclable, es decir, se puede obtener un elemento de vidrio de las mismas características que el que se dejó en el contenedor de residuos. Además, el vidrio es un material ecológico, ya que su fabricación es compatible con el ambiente, y es fácil de identificar, separar y clasificar, facilitando su reciclaje.

El proceso de reciclaje del vidrio comienza retirando del proceso tapones y elementos férricos, sometiéndolo a un campo magnético. Tras esto, se tritura y transporta por vibración, desprendiéndose el papel de las etiquetas, que se aspiran con un ciclón con exclusiva, red de tuberías y toberas de aspiración. Mientras que el producto tenga un tamaño de entre 10 y 60 milímetros, se realiza una clasificación óptica, donde se eliminan trozos de cerámica, piedras, porcelana y metal no férrico. Una vez que el tamaño es inferior a los 10 milímetros, se almacena.

Cuando se decide emplear el vidrio almacenado, que está fragmentado y desprovisto de contaminantes del proceso, se mezcla con arena sílice, piedra caliza, carbonato de soda, sulfato de sodio y alúmina, esta mezcla se funde a altas temperaturas (por encima de los 1000 °C) y con moldes se obtienen las botellas y envases determinados. Por último, se dejan enfriar para obtener el producto final.

El vidrio reciclado baja la temperatura de fundición y necesita un 26% menos de energía, contamina un 20% menos el aire y un 50% menos el agua.

- **Reciclaje de papel**

El proceso de reciclaje del papel es más beneficioso que su eliminación mediante incineración, pero conlleva también efectos perjudiciales para el medioambiente por el gran uso de químicos, como es el caso de la etapa de destintado, que es la actividad más contaminante del sector.

El proceso de reciclaje del papel comienza introduciendo los fardos de papel desechado en un púlper, donde se mezclan con agua y se agita mecánicamente hasta que se obtiene una pasta, al mismo tiempo que las impurezas más pesadas caen al fondo y se descartan. Al agua del púlper, que se calienta a 65 °C, se le añaden productos químicos para facilitar la obtención de la pasta mencionada. La pasta obtenida en el púlper se pasa por una serie de depuradores centrífugos para obtener las fibras vegetales útiles. El paso del destintado se realiza con la combinación de acciones mecánicas y químicas. Tras esto, la fibra se deposita en una cinta, en la que sedimentan las fibras formando una lámina húmeda, se elimina el resto de agua por gravedad, presión y secado, obteniendo el producto final.

Más del 80% del papel que se desecha puede ser reciclado. El papel reciclado, que se obtendría, consumiría el 10% del agua y el 55% de la energía utilizada para el papel original, así como que contaminaría tres cuartas partes menos.

- **Reciclaje de plástico**

El proceso de reciclaje de los plásticos consiste en la sucesión de etapas hasta obtener el producto requerido, este producto tendrá un mayor valor económico y energético cuanto mayor sea el número de etapas dadas. El proceso empieza con la selección de aquellos productos plásticos que pueden usarse en el estado en el que están y sólo precisan de una etapa de lavado, pasando los rechazos a la siguiente etapa. El lavado de los plásticos se realiza en cualquier caso. La etapa siguiente opta entre separar los plásticos para tratarlos por separado o todos juntos, si se realiza la separación, se buscan los plásticos más valorados, siendo lo habitual

separarlos en PVC, PET, PE y ABS. Tras esto, se comprimen en balas o se trituran (supone un coste energético mayor) y se almacenan. Una vez llegados a este punto, caben dos opciones, fabricar nuevos perfiles mediante una extrusora, que requiere calentamiento y agregar aditivos para contrarrestar la degradación del plástico, o la otra opción es emplear el residuo plástico como combustible, ya que este proviene del petróleo y tiene un valor energético por encima de los 40 MJ/kg (la leña tiene 16 MJ/kg), aunque esta última opción pueda parecer muy contaminante, supondría evitar la quema de 1,4 toneladas de carbón por cada tonelada de residuo plástico, reduciendo las emisiones contaminantes y el material depositado en vertederos.

- **Reciclaje de metales**

El reciclaje de metales se divide en dos caminos para distinguir entre metales ferrosos y metales no ferrosos. El reciclaje de metales es el que más energía consume de todos los procesos de reciclaje, debido a la alta demanda de calentamiento que requiere, aunque es el reciclaje con el que más beneficio económico se obtiene y es el más rentable e interesante de los distintos productos existentes para reciclar.

Para los metales ferrosos, la separación es sencilla ya que basta con el empleo de imanes. Posteriormente, se almacenan, se prensan, se trituran y se limpian de elementos extraños para, después, fundirlo y darle un determinado uso. Su reciclaje supone un ahorro energético del 62% respecto a la producción original con mineral de hierro.

Los metales no ferrosos sobre todo suelen ser aluminio, aunque también hay pequeñas porciones de cobre, plomo, oro y platino. Su reciclaje puede suponer hasta el 96% del ahorro de energía respecto a la producción original. Aunque su proceso de reciclaje asume enormes costes económicos y energéticos, conlleva ahorros mayores. Su reciclaje comienza por una etapa de secado y quemado para eliminar la pintura y contaminantes superficiales, seguido de un proceso de compactado para reducir el volumen considerablemente, después, se realiza un proceso de fusión, donde se debe alcanzar una temperatura de 740 °C aproximadamente (gran demanda energética), aquí se consigue separar la escoria del metal, se homogeniza y se acaba enfriando en forma de lingotes, para su posterior uso en la creación de nuevos productos.

- **Compostaje y metanización**

El compostaje es la transformación de la materia orgánica presente en los RSU (es la porción mayoritaria) en un producto estable llamado compost, que se emplea en el ámbito de la agricultura y jardinería como fertilizante. Esta transformación es, a fin de cuentas, una fermentación controlada, a partir de reacciones aerobias con el fin de estabilizar e higienizar el producto que al final del proceso se podrá emplear como fertilizante, atendiendo a las garantías de seguridad e higiene.

Si la porción fermentable está muy contaminada y puede suponer un riesgo de contaminación de los terrenos donde se aplique el compost en un futuro, se puede recurrir a la metanización de la fracción orgánica, que consiste en la obtención de metano mediante la digestión anaerobia de la materia orgánica, tal y como se explicará más adelante. Este gas combustible supone un

añadido de alto valor energético, ante la posibilidad de emplearlo en motores de cogeneración para producir calor y electricidad.



Figura 19. Planta de compostaje. Fuente: (Tallón, 2019).

Los principales puntos de consumo en los sistemas de compostaje se sitúan en los sistemas de aireación forzada y en los sistemas de agitación y volteo de las pilas de compostaje, si los hay, es decir, si el sistema de aireación y el sistema de volteo se reducen a la remoción de la pila de compostaje con un tractor pala, los consumos se reducen considerablemente, aunque la eficacia del proceso se ve perjudicada. Los sistemas de compostaje existentes son dos, en pilas de compostaje y en reactores.

3.1.4 Eliminación final

Tras la aplicación de todos los tratamientos y etapas posibles para su reciclaje, aparece una cantidad final de residuos, fruto de los sucesivos rechazos en cada proceso de reciclaje. Las formas más habituales de eliminación final de residuos son la incineración y la deposición en vertederos controlados, aunque hay otros menos usuales como son la pirólisis y la gasificación de los RSU.

La incineración requiere de una elevada demanda de energía para activar el proceso y, dependiendo del material incinerado, requerirá o no de una gran demanda de energía para mantener el proceso, por ejemplo, la energía de mantenimiento va a ser nula para residuos plásticos porque son combustibles. La incineración añade un gran problema de contaminación atmosférica, aunque abre un abanico de posibilidades cuando se trata de recuperar la energía de la caldera.

La deposición en vertederos controlados supone un consumo energético menor que la incineración, aunque necesita de un espacio elevado para llevarse a cabo, a parte de la contaminación que conlleva. Además, surge la problemática de disponer de un sistema de recogida de lixiviados,

aunque esto también supone una gran oportunidad debido a la posibilidad de aprovechar el metano, que se puede generar con el alto contenido de materia orgánica procedente de los lixiviados, para la producción de electricidad y calor en instalaciones de cogeneración.



Figura 20. Vertedero controlado en Málaga. Fuente: (Grupotec, 2014).

3.2 ÍNDICES Y POTENCIAL DE AHORRO

La evaluación del consumo energético da a conocer la magnitud energética de la planta evaluada, aunque no establece unos resultados comparativos, ni da un calor referenciado de cuál es la “calidad energética” de dicha planta respecto a otras, para conocer el estado en el que se encuentra energéticamente, poder saber su máximo y conocer el camino hasta el ideal, aunque nunca se alcance del todo. Por esta razón, en el ahorro y la eficiencia energética es importante establecer unos índices de eficiencia energética (IEE) que son la relación entre la ganancia o el coste energético de la gestión de los residuos y el servicio prestado o el objetivo alcanzado. Unos ejemplos de IEE pueden ser el cociente entre el consumo de combustible de los camiones de recogida y el peso o el volumen de los residuos recogidos, o el consumo de energía en la planta y el volumen o el peso de residuos gestionados en ella, o la electricidad producida mediante el biogás y el volumen de residuos tratados. Los IEE pueden ser dimensionales o adimensionales.

Una vez que se obtienen los resultados de los IEE, se puede comparar con otras plantas de reciclaje para ver si su situación energética es mejor o no. A partir de aquí, y solo con la comparativa entre plantas de reciclaje de características similares, se pueden establecer las referencias óptimas de la planta con la que se esté trabajando para cada IEE calculado, ya que obtener el máximo posible, a través de la comparación con plantas muy distintas, es erróneo, porque el máximo establecido

nunca se podría alcanzar, ni acercarse a él, por las diferencias tecnológicas que existirían, al ser plantas tan distintas.

Al tener el valor óptimo de los IEE y los IEE con su valor actual, se obtiene la diferencia entre ambos, que es el potencial de ahorro, con el que se van perfilando las medidas a adoptar, ya que si el potencial de ahorro es grande, no sólo será bastante interesante aplicar medidas de ahorro y eficiencia energética, sino que habrá un amplio rango de medidas y, además, será más fácil obtener unos resultados positivos que no perjudiquen al proceso, al haber mayor margen de ahorro y eficiencia energética. En cambio, si los IEE se encuentran cerca de sus valores óptimos, las medidas serán escasas y muy específicas, es más probable que la toma de medidas perjudique al proceso de gestión de residuos y se acabe empeorando la “calidad energética”, al ser el margen de actuación tan estrecho y, por tanto, la adopción de estas medidas no será interesante o, directamente, no se contemplará.

3.3 REDUCCIÓN DEL CONSUMO

En este apartado comienza el planteamiento de medidas para el ahorro y la eficiencia energética de las instalaciones de reciclaje y los vertederos, una vez que se han caracterizado energéticamente en los apartados anteriores.

Las medidas de reducción de consumo, consideradas en este apartado, están fundamentadas en alcanzar el punto de diseño de mínima energía de la planta, mediante la adopción de medidas de reparación y mantenimiento, de mejoras operacionales y de reducción de la cantidad de residuos a gestionar.

En primer lugar, en el diseño previo de las instalaciones, es primordial la ubicación, ya que si el transporte de los residuos hasta las instalaciones de tratamiento y eliminación es donde el coste energético es mayor, por lo que si las distancias de recorrido de recogida son más largas de lo que serían si se ubicase en otro emplazamiento, teniendo en cuenta todos los factores, estaría aumentando considerablemente el consumo energético, aunque la variación de distancia fuese pequeña, debido a que el volumen de residuos gestionados suele ser bastante grande.

El siguiente paso es la reducción del consumo, a partir del descenso de residuos a gestionar, es decir, si no se tiene que gestionar el residuo que antes sí se gestionaba, no hay que aportar el coste económico y energético que antes suponía. Aquí cobra especial importancia la implicación ciudadana, que se fomenta mediante la educación ambiental en la escuela y con campañas de concienciación. Por ejemplo, es habitual encontrarse campañas que exponen el concepto de “las tres erres”, como la que se muestra en la figura 21, reducir, reutilizar y reciclar, es decir, con el primer paso, reducir el consumo en el hogar, se consigue reducir la cantidad de residuos generados; con el segundo paso, reutilizar, aumentamos la vida útil de los elementos que adquirimos, reducimos su consumo y retrasamos su gestión como residuo; y en el tercer paso, reciclar, es ya abordar, en las instalaciones que estudiamos en este documento, la transformación de estos residuos en subproductos útiles. Otro aspecto muy importante que influye en este paso es la

legislación, es decir, la existencia de una legislación realista, que haga responder, en sus responsabilidades, a los que generan los residuos y en la que quede reflejada el compromiso por el medio ambiente, para tratar de abordar temas como la limitación de los envases de nuestros productos y evitar el exceso de envoltorios.



Figura 21. Campaña de concienciación en Calahorra. Fuente: (Calahorra Limpia, 2019).

Las medidas relacionadas con la reparación y el mantenimiento de las instalaciones son todas aquellas que evitan que el paso del tiempo y sobre todo el envejecimiento de la maquinaria merme la eficacia de los procesos que se llevan a cabo, y que, por tanto, tengan su repercusión en el consumo energético. Unos ejemplos serían el engrase de la maquinaria, la sustitución de cualquier máquina, si el diferencial de coste de mantenerla trabajando es mayor que el de sustituirla por otra de características similares, o la limpieza, en el caso de que la suciedad proveniente de los residuos se vaya acumulando en ciertas zonas.

Como último bloque de medidas en el apartado de reducción del consumo se encuentran las que tienen que ver con las mejoras operacionales, estas medidas son las más difíciles de precisar, ya que son fruto de la experiencia y el conocimiento exhaustivo de las instalaciones, debido a que son medidas que responden a las características de las instalaciones en las que se planteen y que, al aplicarlas en otras instalaciones, pueden tener un efecto positivo también, o justo el contrario.

Algunos ejemplos de mejoras operacionales son los siguientes:

- Los residuos recogidos en los contenedores de restos, en la mayoría de los casos, suelen estar recogidos en bolsas de basura; en la recepción de estos residuos y para su tratamiento, es necesario verter el contenido de las bolsas de basura, para ello se precisa de un material cortante para abrirlas mediante su rotura. Sin embargo, el material cortante no siempre es eficaz, por ello, es necesario plantearse su recambio o sustitución por un material de mejores características, evitando que el proceso no se lleve a cabo adecuadamente y el coste y el consumo energético aumente.

- Otra mejora operacional consistiría en la adaptación de la frecuencia de actuación de los procesos que no son continuos y su intermitencia tiene una frecuencia que se puede regular a las características de los residuos recibidos en la planta en ese momento.
- Aunque es parecido a la mejora operacional anterior, no es lo mismo, ésta consistiría en establecer la velocidad de la maquinaria en su punto óptimo de diseño, evitando así los consumos extras por infracarga o sobrecarga.
- El volumen gestionado por unidad de tiempo también influye en el consumo de las instalaciones, siendo tan perjudicial saturar las instalaciones como hacerlas trabajar por debajo de su punto de operación de diseño, por lo que adecuar el volumen gestionado por unidad de tiempo a las instalaciones con las que se está trabajando se puede considerar una medida de reducción del consumo.

3.4 OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO

Este apartado de optimización del consumo energético supone la continuación del planteamiento de medidas para el ahorro y la eficiencia energética en plantas de reciclaje y vertederos, basándose en la optimización de las instalaciones y los procesos, es decir, conseguir hacer el mismo proceso con la tecnología existente en la planta consumiendo menos energía. Este paso se da una vez que se han aplicado y obtenido resultados de las medidas para la reducción del consumo del apartado anterior.

Estas medidas de optimización del consumo energético llevan a las instalaciones hasta su punto energético óptimo, en el que se aprovechan al máximo todas las oportunidades que ofrece la planta, sin entrar en innovaciones y actualizaciones tecnológicas de los sistemas de reciclaje y eliminación de residuos, que corresponde al siguiente apartado.

Las medidas para la optimización del consumo energético se centran en los puntos donde más demanda de energía existe, ya que es donde se puede sacar mayor provecho y tiene menos posibilidades de que afecte negativamente al proceso de gestión de residuos. Aunque el rango de medidas que se pueden tomar es muy amplio, a continuación, se exponen algunos ejemplos:

- Una medida importante sería aquella encargada de optimizar el recorrido de los camiones de basura y el emplazamiento de los puntos de recogida de residuos, ya que supondría la reducción de distancias recorridas, de consumo de combustible y, al ser donde se centra la mayor parte del consumo, la reducción considerable del consumo al aumentar la eficiencia energética tras su optimización.
- Otra medida, que se puede aplicar al transporte de residuos, es adaptar la recogida en los lugares donde más población se concentra, con la recogida neumática, que consiste en la recogida a través de una red de tuberías que succionan la basura (ver figura 22), y el establecimiento de estaciones de transferencia, aquí se concentra un volumen considerable

de residuos y se puede compactar, tras esto, se transporta con unos camiones de mayor capacidad que los habituales en la recogida urbana de residuos, optimizando la recogida.

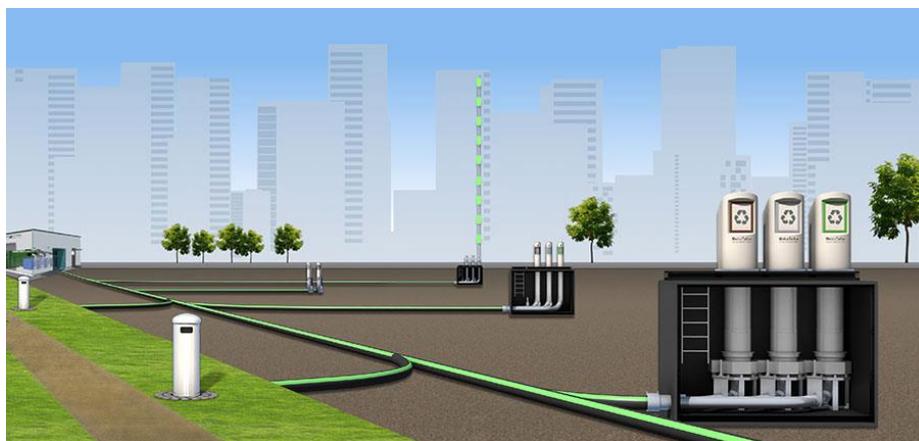


Figura 22. Dibujo de recogida neumática. Fuente: (Residuos Profesional, 2015).

- Dentro de las instalaciones de la planta de reciclaje, donde se terminan de separar los residuos no separados y se realiza el reciclaje, los consumos energéticos corresponden a la maquinaria, por lo que también se enfoca en ella la optimización energética de la gestión de residuos, aplicando medidas que consisten en la relación de buenas prácticas en el ámbito energético, como puede ser evitar llevar a las máquinas hasta su límite, forzando incluso su actuación, o evitar emplear maquinaria para un fin diferente del que se diseñó. Otra propuesta, dentro de este comentario, es la sustitución de la maquinaria existente por otra más eficiente, esta medida estará contemplada dentro de este apartado siempre que no suponga una innovación tecnológica y se recurra a la misma tipología de maquinaria por la que se sustituye. Esta última opción estará afectada especialmente por el ahorro económico que supone la sustitución frente al coste económico de la sustitución.
- El modo de actuación de la maquinaria que funciona en la planta suele ser fijo y predeterminado, por lo que, en ciertos momentos, la maquinaria no actúa de la manera más óptima porque está respondiendo a una situación preestablecida que no se corresponde a la que se está dando en la planta, por ello, implementar en las instalaciones sensores, para hacer un control continuo de la maquinaria de la planta, hace que dicha maquinaria trabaje de una forma mucho más eficaz y no exista un exceso de consumo energético que se pueda evitar.
- La gestión de los residuos una vez que llega a la planta de reciclaje, se desarrolla en naves industriales hasta que sale de ellas para su utilización como nuevos subproductos o su eliminación en vertederos, es decir, hay una parte del proceso de gestión de residuos que se desarrolla en espacios cerrados, donde el mal olor y los gases que emana de los residuos exige la ventilación de las instalaciones. La medida, que se expone para este caso, es tratar de regular la ventilación con control por sensores para optimizar la ventilación, al mismo tiempo que se trata de confinar al máximo posible el volumen a ventilar, teniendo en cuenta

todos los factores, para reducir el número de renovaciones de aire a extraer y, con ello, el consumo energético de los sistemas de ventilación.

- En la gestión de residuos intervienen muchos factores, sin embargo, al ser una actividad a gran escala, se pueden realizar previsiones de generación de residuos y de proporción de cada fracción en los que se divide de forma estacional haciendo uso de la lógica difusa, que permite establecer unos patrones de comportamiento, por lo que la gestión de los residuos se puede adelantar a los hechos, evitando que sea una gestión fija y que no tenga en cuenta las variaciones temporales de los distintos factores que intervienen.
- En los procesos de reciclaje y eliminación de residuos en los que se requiere un tratamiento térmico, como es el caso de la incineración, adoptar medidas para la recuperación energética en dichos procesos hace que el proceso sea mucho más eficiente y óptimo, ya que se aprovecharía energía en forma de calor, que normalmente se pierde en el ambiente, captándolo y empleándolo en otros procesos.
- En el vertedero, la acumulación de residuos de materia orgánica en unas condiciones anaerobias hace que se produzca un proceso de fermentación que libera mayoritariamente metano, un gas combustible con un alto valor energético, también, si el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos, en vez de ser el compostaje, es una metanización, se obtiene este gas combustible, comúnmente llamado biogás. Una medida muy interesante, por sus oportunidades económicas y energéticas, es aprovechar el biogás con una red de captación y una instalación de cogeneración para producir electricidad y calor, como la presentada en la figura 23. En 2011, 40 vertederos españoles ya contaban con plantas de generación eléctrica a partir de biogás (Anon., 2011).



Figura 23. Esquema de una instalación de aprovechamiento energético del biogás producido en el vertedero. Fuente: (Home Jerez, 2014).

3.5 NUEVAS TECNOLOGÍAS

En la adopción de medidas para el ahorro y la eficiencia energética, una vez que se ha reducido el consumo, mediante la reducción de residuos generados, el mantenimiento de las instalaciones y las mejoras operacionales, y se han optimizado todos los procesos, queda incorporar las actualizaciones tecnológicas en el ámbito de la gestión de residuos, es decir, llevar a las instalaciones hasta la versión más actualizada de su tecnología y, por consiguiente, a su mejor versión, más eficaz y eficiente.

La actualización tecnológica de las instalaciones está ligada casi en su totalidad a cuestiones económicas, ya que solo se llevará a cabo la incorporación de nuevas tecnologías en la planta, si el ahorro económico que conlleva dicha actualización es interesante frente a la inversión que requiere o si, por razones de imposibilidad de reparación de alguna máquina estropeada, se precisa su sustitución.

El campo de investigación de la gestión de los residuos se centra en la incorporación de las energías renovables, en el transporte de residuos y la problemática que añaden los envases vacíos, al hacer transportar mayoritariamente aire, y en nuevos tratamientos de reciclaje para la obtención de nuevos subproductos y materias primas.

A continuación, se menciona una serie de innovaciones para la gestión de los residuos:

- La incorporación de vehículos eléctricos en el transporte de residuos, como el que se muestra en la figura 24, implica tener camiones de recogida de la basura en el que el rendimiento del motor, al ser eléctrico, es bastante mayor que el del motor de combustión habitual. El inconveniente viene de la mano del origen de la energía eléctrica utilizada y el desarrollo de esta tecnología, ya que la red de infraestructuras de recarga eléctrica no está del todo extendida, la autonomía del vehículo no es la adecuada, la velocidad de la carga eléctrica no es elevada y el origen de la electricidad tiene una proporción baja de renovables. Sin embargo, las perspectivas de futuro en torno a esta opción son elevadas, gracias a la investigación, a la inversión de la Administración Pública y el aumento de las energías renovables en la proporción de producción de energía eléctrica.



Figura 24. Camión de la basura eléctrico y punto de recarga. Fuente: (Endesa, 2017).

- La solución al problema que supone que en el transporte de envases y recipientes se transporte un gran volumen de aire, lo que conlleva que el transporte de envases se convierte en un proceso muy ineficiente, consiste en añadir al diseño de contenedores un mecanismo manual o automático para compactar los envases. El diseño de contenedores es un paso básico, pero se puede complementar con el mecanismo para compactar envases, comentado anteriormente, o con la incorporación de sistemas electrónicos para medir el llenado del contenedor para, a través de un programa informático, optimizar la ruta y evitar que en el recorrido de recogida haya contenedores vacíos o sin estar suficientemente llenos.
- La incorporación de energías renovables en las instalaciones de las plantas de reciclaje y de los vertederos supone abrir un nuevo horizonte en la gestión energética de las instalaciones, ya que se estaría produciendo energía en ellas para autoabastecerse o para venderla. Un elemento clave a favor de instalar paneles fotovoltaicos, para la producción de electricidad en las instalaciones de reciclaje y eliminación de residuos, es su enorme extensión, a las que no se les da ningún uso, como es el caso de la gran superficie del tejado de las naves industriales donde se reciben los residuos para su tratamiento de reciclaje, tras su recogida, o la gran extensión de los vertederos.
- En el ámbito del reciclaje, la investigación tecnológica siempre está trabajando con nuevos procesos y tratamientos de conversión de los residuos para conseguir nuevos subproductos y materias primas útiles, de esta manera, se consigue que haya una menor fracción de rechazo en la planta de reciclaje que acaba depositada en el vertedero y se abre un rango mayor de posibilidades, al tener más opciones en los que convertir los residuos. Un ejemplo de tratamiento de reciclaje novedoso y en desarrollo es la transformación de la fracción resto en alcohol. La empresa canadiense Enerkem convierte 100000 toneladas CDR de fracción orgánica de los residuos en 52 millones de litros de metanol; el proceso consiste en la gasificación de CDR de la fracción resto de los residuos recogidos de un núcleo urbano mediante un reactor de lecho fluidizado que utiliza oxígeno y vapor de agua, la relación CO/H₂ corresponde a la relación estequiométrica del metanol, el producto químico más vendido del mundo, tras esto, con sucesivas reacciones catalíticas se consigue etanol (Elías Castells & Bordas Alsina, 2017).

3.6 APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS

A lo largo de las distintas etapas en la gestión de los RSU, se van generando una serie de subproductos susceptibles de ser explotados energéticamente, si se dan los pasos y se ponen los medios para su aprovechamiento, de otra manera, el camino es su eliminación o almacenamiento, generando costes extras, añadidos a la pérdida que conlleva no utilizarlos.

Elegir el camino del aprovechamiento implica encaminar a la planta de reciclaje y al vertedero hacia el autoconsumo y la autofinanciación de las instalaciones, aumentando la competitividad,

fomentando la investigación y el desarrollo tecnológico en el campo de la gestión de los residuos y teniendo efectos positivos sobre el medioambiente.

El aprovechamiento energético y económico de los subproductos, que se producen en la gestión de los RSU, es el último escalón en la adopción de medidas para el ahorro y la eficiencia energética, tras haber reducido el consumo energético y optimizado los procesos que se dan en la gestión de los residuos. Se deja como último paso por ser un añadido complementario e independiente a los procesos desarrollados en las instalaciones, pues, al no tener relación ni intervención en ellos, no tiene efectos sobre su eficacia.

A continuación, se enumeran y comentan los subproductos de la gestión de RSU que pueden ser aprovechados energéticamente y económicamente (Elías Castells & Bordas Alsina, 2017):

3.6.1 Biogás

El biogás, como ya se ha comentado en este documento anteriormente, es un gas combustible, en este caso, producido en la digestión anaerobia de la materia orgánica procedente de los RSU. Esta digestión anaerobia se produce sin intervención humana en los vertederos, pero también se puede producir con la intervención humana al tratar, en plantas de tratamiento, la fracción orgánica (tras su separación y previa deposición en vertederos o aplicación de tratamientos de compostaje) o los lixiviados procedentes de los vertederos.

- **Captación en vertedero**

La generación de biogás en el seno de vertedero se debe a las diferentes reacciones que se dan en condiciones anaerobias, donde la humedad es un factor clave. La evolución de generación del gas combustible puede durar 15 años generalmente, donde las composiciones de las distintas sustancias que intervienen en la reacción van variando a lo largo del tiempo, siguiendo las características de la imagen de la figura 25.

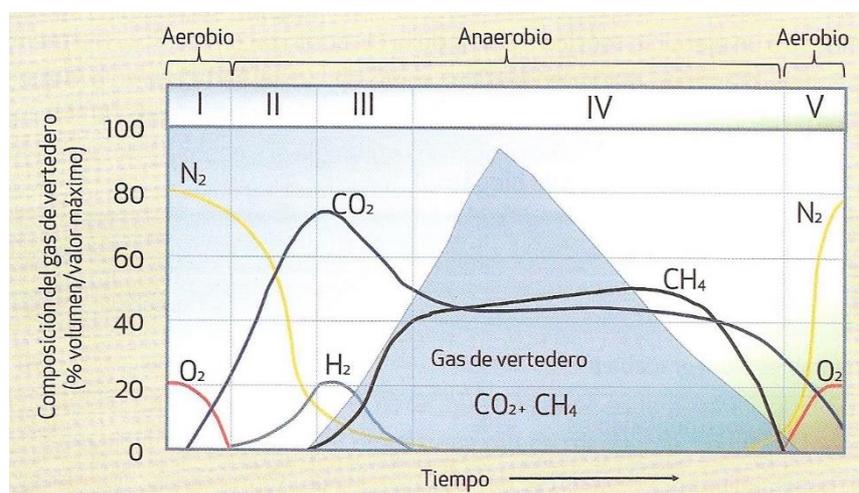


Figura 25. Evolución de los componentes de un gas de vertedero. Fuente: (Elías Castells & Bordas Alsina, 2017)

El biogás producido suele rondar entre el 40% y el 60% del total de la materia fermentable, a esto se le añade que, con unas instalaciones adecuadas de captación de biogás y en un vertedero diseñado para tal uso, se puede captar entre el 50% y el 80% del biogás que se produce en el vertedero.

El biogás generado en vertederos presenta un problema con la presencia de siloxanos y sulfuro de hidrógeno, debido a la presencia de sulfatos y silicatos en el proceso de producción del gas combustible, ya que estas sustancias son un impedimento para emplear el biogás en motores de cogeneración, puesto que acaban estropeándolos. Por eso, se precisa del acondicionamiento del biogás tras su captación con métodos en seco, adsorbentes, métodos con flujo líquido, métodos con solvente físico, métodos que usan membranas o procesos biológicos, para retirar los siloxanos y el sulfuro de hidrógeno.

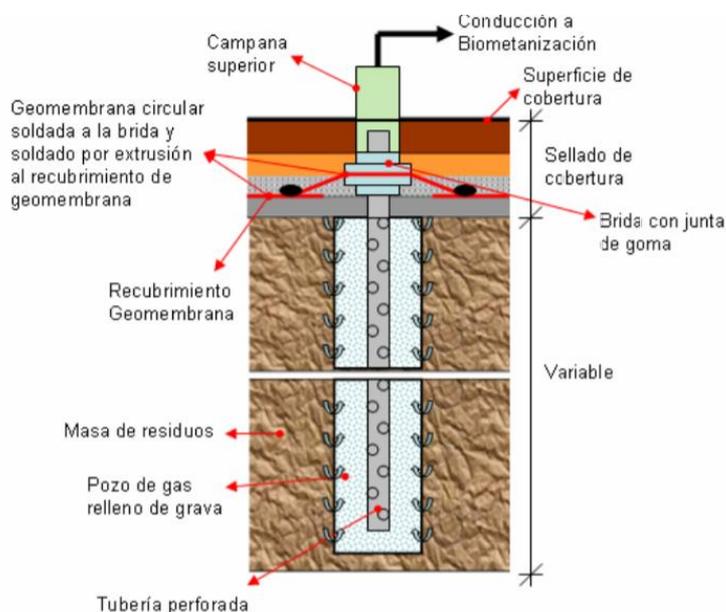


Figura 26. Detalle de pozo de extracción de biogás. Fuente: (Lang-Lenton Barrera & de Bethencourt Gallego, 2008).

Como ya se ha comentado, previo al acondicionamiento del biogás, es necesaria su captación, ésta se lleva a cabo, tras haber realizado un estudio de campo, con la perforación de pozos verticales. Estos pozos (ver figura 26) captan biogás en una zona de alrededor de 50 metros de diámetro, a partir de tubos de PVC de 300 milímetros de diámetro que disponen de unos agujeros de en torno a 5 milímetros para permitir el acceso de biogás al tubo, al mismo tiempo que se rodea y protege con un espesor de grava para facilitar el flujo del gas. La parte superior del tubo está tapada con un tapón de metal y la superficie de alrededor del pozo se sella con arena y plástico térmico. Cada pozo de captación se conecta a una línea de conducción del biogás, como en la figura 27, consistente en una tubería de polietileno de alta densidad de 90 milímetros. Un turboaspirador se encarga de aspirar el biogás del colector general.



Figura 27. Pozos de captación y conexión para el drenaje del biogás del vertedero hacia la planta de valorización energética. Fuente: (ENC Energy, 2016).

- **Metanización**

Esta opción es una alternativa frente al compostaje, cuando la fracción orgánica de los residuos está muy contaminada. En este tratamiento, que llamamos metanización, se consigue obtener gas metano (biogás) de los residuos orgánicos, el objetivo de conseguir este gas combustible es producir calor o electricidad mediante su uso en motores de cogeneración, lo que supone un gran recurso energético añadido.

Según la humedad, la metanización puede ser húmeda (se debe añadir agua hasta alcanzar el 15% del contenido de los residuos) o seca (el contenido de sólidos recibidos está entre el 20% y el 40%).

El principio de funcionamiento de una planta metanizadora se compone de cuatro pasos. En el primer paso, se separa y tría la materia fermentable para reducir su tamaño. En el segundo paso, se introduce en el tanque de hidrólisis, donde se añade agua, se desintegra la materia fermentable y se eliminan contaminantes del proceso (oxígeno, trozos de metales, plásticos, etc.). El tercer paso consiste en alimentar el digestor anaerobio, de aquí se obtiene el gas que contiene metano mayoritariamente. Tras esto, en el cuarto paso, se procede al lavado del biogás, separando el metano del resto de gases (CO_2 , sulfuro de hidrógeno, etc.), se comprime y se almacena hasta su utilización.

- **Tratamiento de lixiviados**

Los lixiviados, que son las aguas residuales que se generan en los vertederos, tienen un alto contenido en materia orgánica debido a su origen, siendo habitual que la DQO sea de 1000 a 15000 mg/l y la DBO sea de 100 a 3000 mg/l. El vertido de estos lixiviados en un río, lago o laguna supondría la destrucción de su flora y fauna acuática. Por eso, se requiere del diseño e instalación en el vertedero de un sistema de tuberías de recogida y aislamiento del terreno base.

Una vez se recogen los lixiviados, es necesario su tratamiento para su eliminación y depuración. Entre los distintos tratamientos, el más interesante desde el punto de vista del Ahorro y Eficiencia Energética es el tratamiento biológico en un digestor anaerobio donde estabilizar los lixiviados y obtener biogás para su posterior uso en motores de combustión. Aunque este tratamiento ofrezca

un producto con alto valor energético, no soluciona totalmente el problema de acumulación y eliminación de lixiviados.

3.6.2 Productos reciclados

Otros productos que se obtienen en las plantas de reciclaje de forma mayoritaria son los obtenidos al final del proceso de reciclaje de cada tipo de residuo (papel, plástico, metales, etc.). Éstos son aprovechados económicamente, en la mayoría de los casos, al venderlos como materia prima para volver a fabricar nuevos productos, pero también hay una parte de ellos, de tipo plásticos y residuos vegetales, que se pueden emplear como combustible, con el fin de producir calor o electricidad.

La variedad de productos y materias primas que se obtienen tras la gestión y el reciclaje de los RSU es inmensa, pero, sobre todo, destaca la materia prima de los metales no ferrosos al final del reciclaje, por su alto valor económico.

La innovación e investigación en el sector del reciclaje hace que cada vez pueda ser mayor la fracción reciclada de los residuos y obtener una variedad más amplia de nuevas materias primas y productos.

3.6.3 Compost

El compost es un producto fertilizante que se puede aplicar en la agricultura y la jardinería y que es fruto de los sucesivos tratamientos de estabilización e higienización de la materia orgánica contenida en los RSU. El proceso de compostaje, para este caso, es el mismo que el ya explicado en el compostaje de lodos de depuración, en el apartado de aprovechamiento de subproductos en el bloque de Ahorro y Eficiencia Energética en EDAR.

El proceso de compostaje es necesario para poder aplicar en el terreno el producto con alto contenido en materia orgánica, sino se estaría incurriendo en el riesgo de saturar y contaminar el terreno donde se aplica, con la consecuencia de acabar con la vegetación existente. Este proceso, al tratar con materia orgánica que es inestable, debe controlar una serie de parámetros como es la humedad, la temperatura, el contenido en metales, la cantidad de oxígeno y las demandas de aireación, para llevar a cabo correctamente el compostaje.

El compostaje se divide en dos fases, una de descomposición y otra de maduración. En la primera, la de descomposición, los distintos organismos y bacterias descomponen la materia orgánica, al ser desarrolladas las reacciones en un medio aerobio, las reacciones son exotérmicas y aumenta la temperatura, que puede alcanzar hasta los 70 °C. La segunda etapa es menos activa, en este punto la temperatura ya ha descendido y se espera hasta obtener el producto final.



Figura 28. Pila de compostaje con aireación forzada. Fuente: (Fernández López, 2011).

3.6.4 Energía recuperable en la incineración

Una forma de eliminar los RSU es mediante su incineración. Este proceso, por la gran cantidad de energía que libera, se ha asociado tradicionalmente con el aprovechamiento energético de los residuos para producir calor y electricidad, sobre todo en los países con clima frío. Sin embargo, supone la emisión de grandes cantidades de gases contaminantes y, por consiguiente, tiene efectos nocivos sobre el medio ambiente, aun así, a medida que ha pasado el tiempo, se han ido restringiendo las emisiones y se ha obligado a los gestores de las incineradoras a instalar una línea de tratamiento de gases.



Figura 29. Planta incineradora de residuos. Fuente: (Campos, 2017).

El PCI útil medio de los residuos se estima en torno a los 2.32 kWh/kg, lo que sería la energía térmica liberada en su incineración, la temperatura de salida de los gases de la caldera suele ser 160 °C aproximadamente y el rendimiento global de la caldera de recuperación cercano al 86%, por lo que de los 2.32 kWh/kg liberados se recuperan 2.00 kWh/kg. Este calor recuperado se puede emplear para generar vapor de agua recalentado para mover una turbina (ciclo de Rankine) y producir electricidad, que, con el rendimiento del ciclo de potencia, se obtendrían alrededor de 0.534 kWh/kg de los 2.32 kWh/kg iniciales liberados. Por tanto, mediante la incineración de la energía contenida en los residuos, un 86% se aprovecharía en forma de calor o más de un 20% si se aprovecha para generar electricidad, datos que hacen muy interesante esta opción, aunque también habría que considerar el importante impacto medioambiental.

3.7 BARRERAS LEGISLATIVAS

La gestión de residuos tiene también su recorrido para integrarse dentro del modelo de economía circular y sostenible, este camino, en el que el ahorro y eficiencia energético es un eslabón importante en la cadena para optimizar procesos, reducir consumo energético y valorizar energéticamente los subproductos generados, presenta grandes obstáculos que pueden dividirse en técnicos, económicos y legislativos.

De los obstáculos técnicos se encarga la investigación y el desarrollo y va muy unido a los obstáculos económicos. Sin embargo, los obstáculos legislativos dependen de la iniciativa política de quien legisla, y pueden repercutir en la facilidad de superar las barreras técnicas y económicas. Por eso, ya que quitar las barreras legislativas sería el primer paso para desbloquear una situación de estancamiento, este apartado se centra en ellas.

Las barreras legislativas están relacionadas sobre todo con la dificultad añadida al aprovechamiento energético de los subproductos que se generan en la planta, al retraso temporal por la gran carga de burocracia o a la imposición débil e insuficiente de objetivos. A continuación, se presentan los principales textos legislativos a nivel nacional en el ámbito de la gestión de RSU, que suelen ser trasposiciones de directivas europeas. Si se pretende profundizar en el tema legislativo, habría que considerar la legislación de la comunidad autónoma en la que se trabaja, que no se considera en este documento por la gran extensión de normativa relacionada con la gestión de RSU para cada una de las comunidades autónomas existentes.

- **Ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales.**

Esta ley, ya comentada en el apartado de barreras legislativas del bloque de Ahorro y Eficiencia Energética en EDAR, establece un impuesto de 0.65€ por cada gigajulio de energía empleada en la cogeneración proveniente del biogás procedente del tratamiento de la fracción orgánica de residuos y del vertedero, donde el gas quemado en antorcha para su eliminación está exento de este impuesto. Por lo que esta ley promueve la eliminación del biogás mediante su combustión y emisión a la atmósfera, es decir, no anima a aprovechar un recurso energético que se produce en

las propias instalaciones y que su uso conllevaría reducir el consumo de energía eléctrica de la red y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, haciendo a las instalaciones de reciclaje y eliminación de residuos más competitivas, más autónomas y menos contaminantes, justo lo contrario de lo que pretende esta ley.

- **Ley 15/2012, de 27 de diciembre, de medidas fiscales para la sostenibilidad energética.**

Con esta ley se añade un impuesto del 7% del importe total que percibe quien produce e incorpora a la red eléctrica energía eléctrica producida en las instalaciones que gestiona, aplicándose el impuesto solamente si dicha energía eléctrica producida se incorpora al sistema eléctrico. Esta ley no distingue por categorías, según las características de las instalaciones donde se produce la electricidad, no incentivando la aportación de energía renovable a la red.

- **RD-ley 2/2013, de 1 de febrero, de medidas urgentes en el sistema eléctrico y en el sector financiero.**

Este Real Decreto-ley modifica al Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Esta modificación conlleva la supresión de las primas y tarifas reguladas para la producción de energía renovable, por lo que se acota más la capacidad y la iniciativa de producir electricidad a partir de fuentes renovables, como es el biogás producido en las instalaciones de gestión de residuos.

- **Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.**

Este Real Decreto regula jurídica y económicamente la producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos. Este documento legislativo se complementa con la Orden IET/1045/2014, de 16 de junio, por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

- **Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción de autoconsumo.**

Tal y como queda reflejado en el comentario a este Real Decreto dentro del apartado de barreras legislativas del bloque de Ahorro y Eficiencia Energética en EDAR, el objeto de este Real Decreto es *“el establecimiento de las condiciones administrativas, técnicas y económicas para las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica definidas en el artículo 9 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico”*. Sin embargo, los aspectos relativos a las configuraciones

de medida, las limitaciones del máximo de potencia de generación instalada hasta la potencia contratada o los relativos al pago de cargos por la energía autoconsumida, son considerados obstáculos para la expansión del autoconsumo, según el Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. Con el Real Decreto-ley 15/2018, el Ministerio para la Transición Ecológica modifica el Real Decreto 900/2015 para salvaguardar los obstáculos mencionados y fomentar el autoconsumo.

Las leyes comentadas anteriormente regulan la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y el uso de recursos, como es el biogás que se puede obtener mediante metanización de la fracción orgánica de los residuos o captación directa del vertedero. Estas suponen la principal barrera legislativa al ahorro y eficiencia energética, en el apartado del aprovechamiento de los subproductos, tal y como queda reflejado en los comentarios a cada texto legislativo.

- **Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.**

El objeto de esta ley queda expuesto en el artículo 1 dentro del capítulo I de disposiciones generales, *“Esta Ley tiene por objeto regular la gestión de los residuos impulsando medidas que prevengan su generación y mitiguen los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente asociados a su generación y gestión, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos. Tiene asimismo como objeto regular el régimen jurídico de los suelos contaminados”*.

Esta ley, que deroga y sustituye a su predecesora de 1998, es extensa a la vez que demasiado genérica, siendo incapaz de profundizar y ser clara en temas cruciales para la gestión de residuos y dirigir el rumbo a un cambio de modelo productivo basado en la economía sostenible y circular. Por lo que esta ley no da una respuesta adecuada al reto que nuestra sociedad tiene con los residuos y su impacto en el medioambiente, cada vez más agravado por el aumento de la población y la generación de residuos por persona. Por eso, necesita matizar cada aspecto en los que esta ley no entra en detalle, haciendo uso de reales decretos, donde se desarrolla cada tema de forma más precisa.

Uno de los tres motivos que justifican la calificación a esta ley de imprecisa en el párrafo anterior está en el artículo 31 sobre concepto y obligaciones dentro del título IV de responsabilidad ampliada del productor del producto, donde en el punto 2.a) y 2.b) se dice que *“Diseñar productos de manera que a lo largo de todo su ciclo de vida se reduzca su impacto ambiental y la generación de residuos, tanto en su fabricación como en su uso posterior, y de manera que se asegure que la valorización y eliminación de los productos que se han convertido en residuos se desarrolle de conformidad con lo establecido en esta Ley”* y *“Desarrollar, producir, etiquetar y comercializar productos aptos para usos múltiples, duraderos técnicamente y que, tras haberse convertido en residuos, sea fácil y clara su separación y puedan ser preparados para su reutilización o reciclado de una forma adecuada y sin riesgos y a una valorización y eliminación compatible con el medio ambiente”*, respectivamente. Es evidente que el cumplimiento de estos dos puntos ni se ha vigilado, ni se ha perseguido, pues cada vez son más los productos que, por comodidad y beneficio

económico, nos encontramos en los supermercados no solo no cumpliendo lo establecido en la ley, sino haciendo justo lo contrario. Un ejemplo claro es el de las toallitas, con los conocidos problemas que generan en la red de desagüe, debido a la confusión de su etiquetado y calificación, en muchos casos, catalogado de biodegradable. Otro ejemplo, entre otros muchos, es el del innecesario pelado de fruta antes de su venta, para protegerlo con un envase de plástico, por lo que no se considera el punto 2.a).

El segundo motivo queda plasmado en el primer punto del artículo 11 de costes de la gestión de los residuos, donde se establece que *“De acuerdo con el principio de quien contamina paga, los costes relativos a la gestión de los residuos tendrán que correr a cargo del productor inicial de residuos, del poseedor actual o del anterior poseedor de residuos de acuerdo con lo establecido en los artículos 42 y 45.2”*. Este punto no se cumple por la forma de trasladar los costes a la ciudadanía desde la empresa que gestiona los residuos, es decir, si tu vecino genera el doble de los residuos que tú, pagáis lo mismo, o de forma más clara, si un turista visita tu ciudad, los costes asociados a los residuos que genera no los paga él o ella, los pagan los habitantes de la ciudad donde los desecha. Esto se debe principalmente al concepto erróneo de pagar por la gestión de los residuos al final del ciclo. Si, en cambio, los costes que conlleva reciclar un producto en concreto se cobrasen a la vez que se compra el producto, se estaría evitando la situación expuesta en la que alguien de tu misma ciudad que genere más residuos que tú, pague lo mismo para su gestión, siempre atendiendo a los principios de igualdad y primera necesidad, consiguiendo así reducir considerablemente o incluso evitando el cobro periódico por la gestión de residuos. Por otro lado, plantear el cobro de una tasa al turismo, como ya se hace exitosamente en las distintas ciudades italianas, evitaría que quien visita una determinada ciudad se desentienda de los costes de la gestión de los residuos que genera.

El último motivo para calificar a esta ley de ineficaz está en el artículo 3 de definiciones, ya que establece que *“Residuo”* es *“cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar”* sin incorporar en la definición la necesidad u obligación de gestionarlo e incorporarlo al ciclo de producción mediante su reciclaje o valorización. ¿De qué forma se puede entender que el objeto de esta ley sea mitigar los impactos sobre la salud humana y el medio ambiente sino incluye en la definición de residuo la necesidad de gestionarlo e incorporarlo al ciclo de producción para avanzar hacia una economía circular y sostenible? Es decir, sin un cambio de concepto, los residuos seguirán siendo desechos que se acumulan por dejación, y no el elemento de unión dentro de un ciclo entre un producto utilizado y un nuevo producto o materia prima. Las leyes se interpretan, y en cualquier interpretación de la definición de residuo no cabe la obligación ni la necesidad de gestionarlo, por tanto, esta ley no es capaz de responder ni a su propio objetivo, establecido en el artículo 1.

- **Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.**

Según el artículo 1 del capítulo I de disposiciones generales, *“Esta Ley tiene por objeto prevenir y reducir el impacto sobre el medio ambiente de los envases y la gestión de los residuos de envases a lo largo de todo su ciclo de vida”*

Esta ley plantea, en primer lugar, medidas para prevenir la producción de residuos de envases y, en segundo lugar, medidas para la reutilización de los envases, su reciclaje y valorización. Sin embargo, no recoge un punto esencial, que es la limitación de envases por producto, es decir, establecer una proporción límite en peso o en volumen de los envases respecto al del producto que envuelven, con excepciones a productos que por higiene precisen de un envase que rebase dichos límites. Así, se estaría evitando el exceso de envases que se producen y que tienen efectos devastadores sobre el medio ambiente, sobre todo en ríos y mares.

Otro aspecto para considerar es que esta ley, modificada mediante el Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, establece objetivos a alcanzar antes del 31 de diciembre de 2008, es decir, hace más de 10 años que deberían haberse cumplido si no se han cumplido, y, si se han cumplido, hace más de 10 años que tendría que haber algún objetivo respecto a los envases y los residuos de envases. Tal vez por eso se haya convertido en los últimos años en un tema preocupante la generación de residuos provenientes de los envases, ya que no ha habido una hoja de ruta marcada estos últimos 10 años. En 2018 se abrió una consulta pública por parte del Ministerio para la Transición Ecológica para volver a modificar la Ley 11/1997, actualmente el proyecto de Real Decreto no está aprobado.

En el ámbito del ahorro y eficiencia energética, las últimas dos leyes comentadas anteriormente tienen repercusión en la cuestión de prevenir la generación de residuos y facilitar su gestión, por lo que se estaría evitando el consumo energético que conllevarían los residuos generados que no se evitan y que, mediante su prevención, se podrían haber evitado. Además, encontrar un proceso de reciclaje más sencillo supone, por consiguiente, un ahorro energético respecto al consumo de un proceso de reciclaje más complejo y con más etapas.

- **Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.**

Este Plan Estatal recoge la situación actual de la gestión de residuos y proyecta los objetivos a cumplir en el año 2020, siguiendo los principios de economía circular y sostenible, entre otros muchos planteamientos. Los objetivos para 2020 los divide en tres, de preparación para la reutilización y reciclado (mínimo), de otro tipo de valorización (incluida la energética) y de eliminación. Sin embargo, los objetivos en el bloque de otro tipo de valorización no son concisos, ya que solo establece incrementar la valorización energética, sin precisar ninguna referencia ni proporción. A pesar de todo, este texto es bastante amplio y responde a la necesidad y a la obligación de diseñar una hoja de ruta factible para la gestión de residuos.

- **Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.**

Este Real Decreto ya está comentado en el apartado de barreras legislativas del segundo bloque de Ahorro y Eficiencia Energética en EDAR, aunque este Real Decreto tiene un impacto mayor en este bloque porque el volumen de RSU que acaba en un vertedero es mucho mayor que el de los lodos que provienen de una EDAR. Del comentario mencionado solamente destaca que esta ley establece las características y requisitos técnicos y jurídicos para la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero. Aunque, realmente, lo que destaca es lo que no está establecido en él, es decir, no hay ninguna restricción ni solución de cara al gran problema que tiene España con la acumulación de residuos en los vertederos como forma de eliminación, ya que en ciertas zonas la capacidad de vertido es superada con creces. Esto se debe a que, en España, el 55% de residuos que se generan acaban en un vertedero frente a países europeos, como Suecia, Bélgica, Dinamarca, Alemania o Países Bajos, donde ese porcentaje no alcanza ni el 1%, gracias a su apuesta por la valorización energética. En Inglaterra se atajó este asunto imponiendo un impuesto de 95 libras por tonelada de residuos llevada al vertedero, en Alemania directamente está prohibido llevar basura a los vertederos, consiguiendo que sea más factible la valorización de los residuos antes que su depósito en vertederos (Miranda, 2019).

- **Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.**

Al igual que el Real Decreto anterior, pero esta vez para la incineración de residuos, es un documento legislativo que es irrelevante en el ámbito del ahorro y la eficiencia energética, ya que su objeto es establecer los criterios técnicos y jurídicos para que la incineración de residuos se lleve a cabo correctamente, cumpliendo los patrones de seguridad y protección a la salud humana y al medio ambiente, fijándose en la concentración de contaminantes y emisiones.

- **Real Decreto 773/2017, de 28 de julio, por el que se modifican diversos reales decretos en materia de productos y emisiones industriales.**

Esta ley, comentada en el apartado de barreras legislativas del bloque de Ahorro y Eficiencia Energética, modifica otros 5 Reales Decretos para establecer de manera concisa, la regulación, los requisitos y límites, en el ámbito de las emisiones a la atmósfera y calidad del aire.

- **Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.**

Este Real Decreto regula los fertilizantes que no corresponden con los “abonos CE”, es decir, los fertilizantes que provienen de otras fuentes, como es el caso del proceso de compostaje de lodos de depuradora o de la fracción orgánica de los residuos. Con el fin de clasificar el fertilizante obtenido y comprobar su seguridad para su uso, este Real Decreto establece los límites y criterios sobre contenido orgánico, humedad, granulometría, presencia de *Salmonella*, *Escherichia coli*, furfural y polifenoles.

- **Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, operaciones valorización y eliminación de residuos y lista residuos.**

Esta orden se limita a recoger, en forma de listado, las distintas operaciones de valorización y eliminación de residuos, y presentar la lista de residuos, de acuerdo con lo establecido por la Comisión Europea.

Las seis últimas referencias a textos legislativos no tienen una implicación directa en el ahorro y la eficiencia energética, aunque sí a largo plazo, como es el caso del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos o el Real Decreto que regula el depósito de residuos en vertederos, ya que se centran en regular los límites y criterios a seguir, para llevar a cabo una correcta gestión de los residuos, sin que haya efectos nocivos sobre la salud humana y el medio ambiente. A largo plazo, esta legislación sí tendría repercusión en el ahorro y la eficiencia energética, porque pretende dar los pasos hacia un modelo sostenible, donde el reciclaje y la valorización energética tengan un peso importante, frente a la eliminación final de residuos mediante depósito en vertederos.

4 CONCLUSIÓN

Tirar a la basura es un gesto de poder

- Martín Caparrós, 1957 -

El poder es como un explosivo: o se maneja con cuidado, o estalla

- Enrique Tierno Galván, 1918-1986 -

Con la metodología establecida se trata de abordar un problema complejo, como es la aplicación del ahorro y la eficiencia energética en estaciones depuradoras de aguas residuales, plantas de tratamiento de RSU y vertederos, de una forma clara, sencilla y realista, para facilitar el recorrido hacia una economía circular y sostenible, donde estas instalaciones sean viables y competitivas.

Los pasos fijados para alcanzar el objetivo empiezan con la premisa de conocer de dónde se parte, mediante la evaluación del consumo, que no es más que la cuantificación y medida de la energía que requiere el proceso de depuración y gestión de RSU. Tras esto, se procede a comparar la “calidad energética” de la planta en cuestión con otras instalaciones de características similares, a través de los índices de eficiencia energética, para poder buscar una referencia que establezca la meta a alcanzar, es decir, el potencial de ahorro como el camino a recorrer hasta conseguir la “calidad energética” óptima.

Una vez que se sabe dónde se está y hacia dónde hay que ir, el siguiente paso será actuar, o lo que es lo mismo, aplicar medidas para reducir y optimizar el consumo y actualizar el diseño de la instalación a su mejor versión, siguiendo el orden que aparece en el trabajo. Hay que enfocar estos pasos, sobre todo, en el punto donde más se consume, que suele ser en el tratamiento secundario para las EDAR o el transporte de residuos en la gestión de RSU, sin dejar de lado la globalidad del proceso, para evitar que una medida dé un buen resultado en una parte del proceso, pero tenga un efecto negativo en el proceso en general. Además, hay que tener en cuenta que el objetivo de las EDAR es depurar el agua residual y el de las plantas de tratamiento y vertederos es reciclar, valorizar o eliminar los RSU, por tanto, esto prevalece sobre el ahorro y la eficiencia energética.

Para reducir el consumo energético se toman medidas de mantenimiento y mejoras operacionales, que no afectan al diseño original de la planta. Estas medidas están estrechamente vinculadas con la experiencia en la gestión de la instalación. Además, es importante la reducción de la demanda de agua a tratar, que va de la mano del consumo energético en las distintas plantas existentes. Esto último se

consigue desde la concienciación de que el agua es un recurso limitado, dándole valor, y de que la gestión de residuos es limitada y la acumulación de RSU tiene efectos nocivos sobre el medio ambiente.

Tras alcanzar el valor mínimo de consumo energético de diseño, se busca optimizarlo energéticamente, es decir, hacer lo mismo con menos energía. Esto se alcanza con medidas como la implementación del control automático del proceso, equipos de bombeo más eficientes, lógica difusa, etc., dependiendo de la instalación.

Finalmente, incorporar al diseño de la planta nuevas tecnologías supone avanzar y hacer crecer a la instalación para que sea mejor y más competitiva, pero también para no dejar de lado y desarrollar nuevas investigaciones en este sector. El mayor obstáculo al que se enfrenta este paso es la cuestión económica, que es, a fin de cuentas, quién decide si se implementan o no nuevas tecnologías a la instalación.

Otro asunto, que no se puede obviar, si se está hablando de energía, es el aprovechamiento de los subproductos generados en las instalaciones. Se trata de valorizar un recurso que normalmente se considera un residuo y cuya gestión se basa únicamente en su eliminación. Dar un uso a estos subproductos, para sacarle rédito económico y energético, abre un horizonte de posibilidades. Entre éstos, se encuentra el biogás, un combustible perfectamente utilizable para la producción de energía térmica y eléctrica, y con la que se puede dar un gran paso hacia el autoabastecimiento energético de las EDAR, las plantas de tratamiento de RSU y los vertederos. Los otros subproductos son los lodos de depuración y el compost, con los que, a partir de su uso en la agricultura, ganadería y en el ámbito de los materiales se puede obtener un beneficio económico; el agua residual depurada, con la que, mediante su reincorporación a la red, se obtiene también un beneficio económico para la planta y un gran beneficio para la sociedad, ya que aumenta el recurso hídrico disponible, reduciendo la presión sobre las fuentes de agua naturales y aumentando la gestionabilidad del agua en momentos críticos; los productos y materias primas obtenidos a partir del reciclaje que abaratan y reducen los consumos energéticos en los procesos de fabricación de nuevos productos; y la energía recuperable en la incineración, que puede aprovecharse para generar electricidad y calor, al tiempo que se eliminan los residuos.

El aprovechamiento de estos subproductos está condicionado por factores económicos, técnicos y legislativos. Sin embargo, mientras que los factores económicos y técnicos corresponden a una realidad impuesta por la naturaleza del proyecto y se solucionan mediante el estudio de distintas y nuevas posibilidades, el factor legislativo corresponde a una realidad impuesta por los poderes del Estado, y depende de éstos que la legislación sea o no un obstáculo ante el desarrollo de nuevas alternativas, bien porque no está actualizada o bien porque no considera de interés estas opciones frente a otras ya establecidas.

Por tanto, se han fijado los pasos en la metodología a seguir para la aplicación del ahorro y la eficiencia energética en las estaciones depuradoras de aguas residuales, las plantas de tratamiento de RSU y vertederos, contemplando los obstáculos y las posibilidades existentes en la instalación, cumpliendo, de esta manera, el objetivo del proyecto, que se puede resumir en señalar el camino, a través del ahorro y la eficiencia energética, para que las instalaciones medioambientales sean competitivas y viables

para las administraciones locales.

REFERENCIAS

Agencia Andaluza de la Energía, 2011. *Estudio Básico del Biogás*. [En línea]

Available at:

https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf
[Último acceso: 20 10 2018].

Almazán Lope, J., 2014. Análisis de la mejora de la eficiencia energética de los procesos de una EDAR. *Universitat Politècnica de València, Trabajo de Fin de Máster*.

Anon., 2011. *Ecoticias*. [En línea]

Available at: <https://www.ecoticias.com/biocombustibles/52321/noticias-informacion-medio-ambiente-medioambiente-medioambiental-ambiental-contaminacion-climatico-calentamiento-ecologia-responsabilidad-rsc-eco-sostenible-co2-energias-renovables-eolica-geotermica-solar-te>
[Último acceso: 29 08 2019].

Autor, 2012. Este es el ejemplo de una cita. *Tesis Doctoral*, 2(13).

Autor, O., 2001. Otra cita distinta. *revista*, p. 12.

BIOGÁS3 Consortium, 2014. *Marco europeo legislativo y financiero para la implementación de plantas de biogás a pequeña escala en empresas agroalimentarias y de bebidas*. [En línea]

Available at:

http://www.biogas3.eu/documentos/BIOGAS3_D22_Legislative%20and%20financiar%20framework%20ES.pdf
[Último acceso: 20 10 2018].

Blasco, M., 2014. *Acogen*. [En línea]

Available at: <http://www.acogen.es/post/12.micropower.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].

Calahorra Limpia, 2019. *Calahorra Limpia*. [En línea]

Available at: <https://www.calahorralimpia.es/index.php/conoces-la-regla-de-las-tres-erres>
[Último acceso: 01 09 2019].

Campos, B., 2017. *Cadena Ser*. [En línea]

Available at: https://cadenaser.com/emisora/2017/07/13/ser_madrid_oeste/1499924954_858469.html
[Último acceso: 01 09 2019].

Campuzano, L., 2017. *Arola. El escalofriante escenario impuesto a los fabricantes de biogás*. [En línea]

Available at: <https://www.arola.es/escenario-impuesto-fabricantes-de-biogas/>
[Último acceso: 20 10 2018].

Carpes Hortal, G., Rancaño Pérez, A. & Matas Ramos, E., 2009. Optimización energética en la EDAR de Mairena y el Viso del Alcor. *Infoenviro*, pp. 117-121.

Colomer Mendoza, F. J. & Gallardo Izquierdo, A., 2007. *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, 2003. *Los Residuos Urbanos y Asimilables*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente.

- Elías Castells, X. & Bordas Alsina, S., 2017. *Valorización y tratamiento de residuos municipales. Nuevas tendencias*. Madrid: Suez.
- ENC Energy, 2016. *ENC Energy*. [En línea]
Available at: <https://www.encenergy.com/es/tecnologias-y-soluciones/soluciones-vertederos-biogas/desgasificacion-de-vertederos-y-quema-de-biogas/>
[Último acceso: 01 09 2019].
- Endesa, 2017. *Endesa Vehículo Eléctrico*. [En línea]
Available at: <https://endesavehiculoelectrico.com/ciudades-limpias-de-residuos-y-emisiones/>
[Último acceso: 01 09 2019].
- España. BOE, 1972. *Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1972-1885>
[Último acceso: 02 08 2019].
- España. BOE, 1975. *Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/1975/04/22/pdfs/A08391-08416.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].
- España. BOE, 1990. *Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/1990/11/01/pdfs/A32339-32340.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].
- España. BOE, 1992. *Ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/buscar/pdf/1992/BOE-A-1992-28741-consolidado.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].
- España. BOE, 1995. *Real Decreto 1165/1995, de 7 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de los Impuestos Especiales*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/buscar/pdf/1995/BOE-A-1995-18266-consolidado.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].
- España. BOE, 1995. *Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/1995/06/05/pdfs/A16544-16547.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].
- España. BOE, 1997. *Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/eli/es/l/1997/04/24/11>
[Último acceso: 29 08 2019].
- España. BOE, 1998. *Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/eli/es/l/1998/04/21/10>
[Último acceso: 02 08 2019].
- España. BOE, 2001. *Real Decreto 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2001/BOE-A-2001-14276-consolidado.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].
- España. BOE, 2001. *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2002/BOE-A-2002-1697-consolidado.pdf>
[Último acceso: 20 10 2018].
- España. BOE, 2002. *Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación*. [En línea]
Available at: <https://www.boe.es/eli/es/l/2002/07/01/16>
[Último acceso: 02 08 2019].

España. BOE, 2002. *Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/eli/es/o/2002/02/08/mam304>

[Último acceso: 29 08 2019].

España. BOE, 2003. *Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2003/05/30/653>

[Último acceso: 29 08 2019].

España. BOE, 2007. *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-21092-consolidado.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2007. *Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2007/04/21/pdfs/A17686-17703.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2007. *Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-10556-consolidado.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2011. *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/eli/es/l/2011/07/28/22>

[Último acceso: 29 08 2019].

España. BOE, 2011. *Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-1645-consolidado.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2012. *Ley 15/2012 de 27 de diciembre, de medidas fiscales para la sostenibilidad energética*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2012/12/28/pdfs/BOE-A-2012-15649.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2013. *Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/12/27/pdfs/BOE-A-2013-13645.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2013. *Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/06/14/pdfs/BOE-A-2013-6414.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2013. *RD-ley 2/2013, de 1 de febrero, de medidas urgentes en el sistema eléctrico y en el sector financiero*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/02/02/pdfs/BOE-A-2013-1117.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2013. *Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506>

[Último acceso: 29 08 2019].

España. BOE, 2013. *Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/10/19/pdfs/BOE-A-2013-10949.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2014. *Orden IET/1045/2014, de 16 de junio, por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuo*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2014/06/20/pdfs/BOE-A-2014-6495.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2014. *Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2014/06/10/pdfs/BOE-A-2014-6123.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2015. *Orden IET/1344/2015, de 2 de julio, por la que se aprueban las instalaciones tipo y sus correspondientes parámetros retributivos, aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogener*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2015/07/07/pdfs/BOE-A-2015-7593.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2015. *Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2015/10/10/pdfs/BOE-A-2015-10927.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2015. *Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el PEMAR 2016-2022*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/eli/es/res/2015/11/16/1>

[Último acceso: 29 08 2019].

España. BOE, 2017. *Real Decreto 773/2017, de 28 de julio, por el que se modifican diversos reales decretos en materia de productos y emisiones industriales*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2017/08/31/pdfs/BOE-A-2017-10054.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

España. BOE, 2018. *Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores*. [En línea]

Available at: <https://www.boe.es/eli/es/rdl/2018/10/05/15>

[Último acceso: 29 08 2019].

FAO, 1998. *FAO*. [En línea]

Available at: <http://www.fao.org/home/en/>

[Último acceso: 01 09 2019].

Fernández Herrera, E., 1995. Recuperación energética del biogás en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. *ASTER Consultores, S.L.*

Fernández López, L., 2011. *Comunidad ISM*. [En línea]

Available at: <http://www.comunidadism.es/blogs/%C2%BFpuede-ser-el-compost-una-bomba-de-relojeria>

[Último acceso: 01 09 2019].

FIDE Asesores Legales y Tributarios, 2018. *Tributación Biogás. Impuesto sobre hidrocarburos*. [En línea]

Available at: <http://fide.es/newsletter/2018/abril/jurisprudencia/biogas.pdf>

[Último acceso: 20 10 2018].

Grupotec, 2014. *Grupotec*. [En línea]

Available at: <http://84.246.212.234/proyectos/vertedero-controlado-residuos-no-peligrosos-malaga.html>

[Último acceso: 01 09 2019].

- Home Jerez, G., 2014. *Glenn Home Jerez*. [En línea]
Available at: <https://glennhomej.wordpress.com/2014/10/21/generar-electricidad-con-biogas-y-su-impacto-en-el-ambiente/>
[Último acceso: 01 09 2019].
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. IDAE, 2007. *Digestores anaerobios*. [En línea]
Available at:
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62_926d.pdf
[Último acceso: 20 10 2018].
- Lang-Lenton Barrera, H. & de Bethencourt Gallego, J. L., 2008. *Cabildo de Gran Canaria*. [En línea]
Available at:
http://descargas.grancanaria.com/medio_ambiente/estudio_viabilidad_complejo_medioambiental_Salto_del_Negro/cd_completo/PDF/Anteproyecto/Doc_1_-_memoria_y_anejos/Anejos/Anejo_n3_-_lixiviados_y_desgasificacion.pdf
[Último acceso: 01 09 2019].
- Madrid Subterra, 2017. *Cómo generar energía a partir de las aguas residuales*. [En línea]
Available at: <http://www.madridsubterra.es/como-generar-energia-a-partir-de-las-aguas-residuales/>
[Último acceso: 20 10 2018].
- Madridiario, 2017. *Madridiario*. [En línea]
Available at: <https://www.madridiario.es/444312/once-districtos-estrenaran-sistema-recogida-basuras-octubre>
[Último acceso: 01 09 2019].
- Mancomunidad La Vega, 2016. *Mancomunidad La Vega*. [En línea]
Available at: <http://web.lavegamancomunidad.es/>
[Último acceso: 01 09 2019].
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013. *Catálogo de residuos utilizables en construcción CEDEX*. [En línea]
Available at: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/30/lodos-de-depuradoras/valorizacion/aplicaciones/137/utilizacion-de-los-lodos.html>
[Último acceso: 20 10 2018].
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, 2005. *Área del Biogás. Plan de Energías Renovables en España 2005-2010*. [En línea]
Available at:
https://www.mincotur.gob.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Plan/Documentos/DocumentoCompleto/9_Cap37_AreaBiogas.pdf
[Último acceso: 20 10 2018].
- Miranda, I., 2019. *ABC*. [En línea]
Available at: https://www.abc.es/sociedad/abci-suecia-no-vertederos-y-espana-acumula-millones-toneladas-basura-cada-201905270341_noticia.html
[Último acceso: 29 08 2019].
- Perez, P., 2018. *HOLA*. [En línea]
Available at: www.hola.es
[Último acceso: 3 12 2012].
- Residuos Profesional, 2015. *Residuos Profesional*. [En línea]
Available at: <https://www.residuosprofesional.com/recogida-neumatica-satisface-usuarios/>
[Último acceso: 01 09 2019].
- Soliva, M. & Huerta, O., 2004. *Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas*. [En línea]
Available at: http://mie.esab.upc.es/ms/recerca_experimentacio/articulos_ESAB/Compostaje%20lodos.pdf
[Último acceso: 20 10 2018].

Tallón, A., 2019. *Diari de Terrassa*. [En línea]

Available at: <http://www.diarideterrassa.es/terrassa/2019/02/16/obras-modernizar-planta-compostaje-can/104132.html>

[Último acceso: 01 09 2019].

UH Noticias, 2017. *UH Noticias*. [En línea]

Available at: <https://www.ultimahora.es/noticias/part-forana/2017/05/25/269666/andratx-amplia-red-recogida-selectiva-193-nuevos-contenedores.html>

[Último acceso: 01 09 2019].

GLOSARIO

CDR: Combustibles Derivados de Residuos	52
DBO: Demanda Biológica de Oxígeno	24
DQO: Demanda Química de Oxígeno	55
EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales	2
RSU: Residuos Sólidos Urbanos	67

