



CONSUMO DE ENERGÍA PARA LA DEPURACIÓN DE AGUA EN ESPAÑA

ENERGY CONSUMPTION FOR WASTEWATER TREATMENT IN SPAIN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D. NICOLÁS MARTÍNEZ CEBRIÁN

Dirigido por:

Dr. ELOY GARCÍA CALVO

Alcalá de Henares, a 27 de mayo de 2019.

ÍNDICE:

RESÚMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	12
3. CONSUMO ENERGÉTICO EN DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL URBANA...12	
3.1 Consumo energético en función de los habitantes equivalentes.....	16
3.2 Consumo energético en función de la tecnología de depuración.....	20
3.3 Relación entre los valores límite de emisión y la energía consumida en depuración.....	32
4. TECNOLÓGICAS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS EDAR.....	34
4.1 Control energético de una EDAR.	34
4.2 Biogás de digestión anaerobia como combustible para la generación de energía eléctrica.	41
4.3 Incineración del lodo de la EDAR.....	48
4.4 Tratamiento de los retornos de la línea de fango de la EDAR.....	54
5. CONCLUSIONES	57
6. BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores promedio de consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada para las distintas tecnologías de tratamiento. (Adaptada de Ferrer et al., 2016).....	31
Tabla 2. Ratio energético para distintos tipos de EDAR. (Adaptada de Simón,2018)	31
Tabla 3. Calidades en función de los habitantes equivalentes. (Adaptada de IDAE, 2010).	32
Tabla 4. Dotaciones teóricas de la Norma ATV-A131 para el cálculo de caudales y cargas de las EDAR. (Adaptada de IDAE, 2010).....	33
Tabla 5. Consumo energético neto de EDAR de Fangos Activados y digestión anaerobia con y sin eliminación de nutrientes según tengan cogeneración y bombeo de entrada. (Adaptada de Ferrer et al., 2016).....	33
Tabla 6. Estadísticos descriptivos soplante de émbolos rotativos. (Adaptada de Castell et al., 2011).....	38
Tabla 7. Estadísticos descriptivos turbocompresor de levitación magnética. (Adaptada de Castell et al., 2011).....	38
Tabla 8. Cuantificación económica de las medidas en eficiencia energética propuestas para las instalaciones de saneamiento gestionadas por la ACA. (Adaptada de Moradas 2018)	41
Tabla 9. Coste de producción de kWh eléctrico en distintos escenarios de cogeneración con biogás combustible. (Adaptada de Aguiló, 2018).....	47
Tabla 10. Especificaciones de base seca de distintos tipos de fango de EDAR. (Adaptada de Elías, 2013).....	50
Tabla 11. Comparativa de PCI de distintos tipos de lodo de depuradora con combustibles fósiles. (Adaptada de Colomer et al, 2009)	50
Tabla 12. Costes de incineración del lodo en el Horno nº3 de la EDAR Galindo. (Adaptada de Orbe, 2017).....	53
Tabla 13. Comparación estequiométrica del proceso de nitrificación-desnitrificación frente al proceso nitrificación parcial-Anammox. (Adaptada de Vázquez et al., 2011).....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución porcentual de los costes de explotación de una EDAR. (Adaptada de Albaladejo y Trapote, 2013).....	16
Figura 2. Consumo unitario (kWh/m ³) en las EDAR en función de Log(h-e). (Adaptada de Albaladejo-Ruiz y Albadalejo-Falcó, 2015).....	18
Figura 3. Consumo unitario (MWh/t DBO ₅ tratada) en función de Log(h-e). (Adaptada de Albaladejo-Ruiz y Albadalejo-Falcó, 2015).....	18
Figura 4. Esquema general de una EDAR de Lechos Bacterianos (Adaptada de Jácome et al., 2012).....	22
Figura 5. Esquema de EDAR de aireación prolongada. (Adaptado de Huertas et al., 2013)	24
Figura 6. Esquema de una EDAR de Fangos Activados con Digestión Anaerobia y Cogeneración. (Adaptado de del Río Marrero, 2018).....	26
Figura 7. Balance energético de una EDAR. (Adaptado de Castell et al., 2011).	28
Figura 8. Esquema general de cogeneración con biogás en una EDAR. (Adaptada de Aguiló Martos 2017).....	45
Figura 9. Esquema de funcionamiento de una microturbina. (Adaptada de Aguiló Martos 2017).	46
Figura 10. Esquema general del proceso de incineración de la EDAR Galindo perteneciente al Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia. (Adaptada de Orbe 2017).	49
Figura 11. Ciclo de Rankine del proceso de recuperación de energía. (Adaptada de Orbe 2017).	52
Figura 12. Costes de incineración de lodo del Horno nº3 de la EDAR Galindo. (Adaptada de Orbe 2017).....	54

TABLA DE ABREVIATURAS

ACA: *Agencia Catalana del Agua*

AP: *Aireación Prolongada*

ATV: *Normas de la Asociación Alemana para Agua, Aguas Residuales y Residuos DWA anteriormente ATV-DVWK*

CBR: *Contactor Biológico Rotativo*

CEDEX: *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*

CHD: *Confederación Hidrográfica del Duero*

CHT: *Confederación Hidrográfica del Tajo*

CENTA: *Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua*

CYII: *Canal de Isabel II*

DA: *Digestión Anaerobia*

DBO₅: *Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días*

DQO: *Demanda Química de Oxígeno*

DMA: *Directiva Marco del Agua*

DP: *Decantación Primaria*

EDAR: *Estación Depuradora de Aguas Residuales*

EMASESA: *Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla*

EPSAR: *Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana*

ESAMUR: *Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia*

FA: *Fangos Activados*

FS: *Fosa Séptica*

h-e: *Habitantes Equivalentes*

HSFV: *Humedal Artificial Subsuperficial con Flujo Vertical*

HSFH: *Humedal Artificial Subsuperficial con Flujo Horizontal*

IFAS: *Integrated Fixes Activated Sludge*

LB: *Lechos Bacterianos*

MBBR: *Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil*

MS: *Materia Seca*

ONU: *Organización de las Naciones Unidas*

PCI: *Poder calorífico inferior*

SBR: *Reactor Biológico Secuencial*

SS: *Sólidos Suspendidos*

TI: *Tanque Imhoff*

TRH: *Tiempo de Retención Hidráulico*

UE: *Unión Europea*

UNESCO: *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*

VLE: *Valores Límite de Emisión*

RESÚMEN

La fuerte relación existente entre los dos términos que forman el binomio agua y energía ha motivado la elaboración del presente trabajo en el cual se abordan diferentes estudios realizados sobre la relación existente entre la depuración del agua residual urbana, como parte fundamental de la gestión integral del ciclo del agua, y el consumo energético que conlleva.

El trabajo presenta una primera parte donde se trata el estudio del consumo energético de las EDAR teniendo en cuenta los consumos unitarios medios en función de factores dependientes del tamaño de la planta debido al número de habitantes equivalentes atendidos, en función de la tecnología empleada en los procesos de depuración y en función de la calidad del efluente según los valores límite de emisión que impone la normativa.

En una segunda parte del trabajo se analizan diferentes tendencias para lograr una mejora en la eficiencia energética de las EDAR contemplando métodos de control de la energía que ayudan a minimizar el consumo energético en distintas partes del proceso, además se trata el uso de tecnologías para la recuperación de energía del agua residual urbana como el uso del biogás generado en la digestión del lodo para generar energía o la incineración de lodos de depuradora así como la aplicación de procesos de tratamiento de los retornos de la línea de fango para reducir el consumo energético del tratamiento biológico.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la conciencia social en materia medioambiental nos exige un constante esfuerzo por mejorar continuamente para lograr la mitigación del calentamiento global, siendo ésta una de las principales prioridades en las políticas energéticas y medioambientales de la Unión Europea.

El principal propósito de la legislación de la Unión Europea en materia de energía y cambio climático es el de introducir medidas que garanticen el cumplimiento de los compromisos asumidos por el consejo europeo en marzo de 2007 y así poder reducir las emisiones globales de gases efecto invernadero en Europa en un 20% para el año 2020 con respecto a los niveles registrados en 1990. Por otra parte, en el marco de la Política Común de la Energía (CEP), el Consejo Europeo ha promovido el objetivo de que el 20% del consumo total de energía de la UE proceda de fuentes de energía renovable antes de 2020. La revisión de la estrategia energética europea con la *Estrategia Energética 2030*, ha ampliado los objetivos marcados inicialmente proponiendo lograr la disminución de los gases de

efecto invernadero hasta en un 40% y alcanzar un 27% en la eficiencia energética, pudiendo revisar este último en el año 2020 para elevarlo al 30%.

Por tanto, el reto marcado por la Unión Europea de optimizar la eficiencia energética de las instalaciones industriales, lejos de ser un proceso discreto en el tiempo, se conforma como una cultura de trabajo íntimamente ligada al avance tecnológico. En depuración este reto es asumido por la administración y las empresas explotadoras, que, tanto desde un punto de vista medioambiental como desde un punto de vista económico, focalizan su esfuerzo fundamentalmente la optimización energética de los sistemas de saneamiento y depuración. Desde el punto de vista ambiental, la disminución del consumo energético en el sector de la depuración es clave, dada la estrecha relación de la energía con la generación de gases de efecto invernadero, dándose la paradoja de que el tratamiento del agua residual sirve para evitar daños medioambientales en los cauces de nuestros ríos, pero por otro lado genera grandes cantidades de CO₂ debido al consumo energético.

En España, el consumo energético correspondiente al transporte, la potabilización y la reutilización del agua responde al 2-3% del consumo energético total, al que si le incluimos la gestión hidrológica y la demanda agraria llega a alcanzar el 5,8% del consumo energético total nacional. Tomando estas consideraciones puede concluirse que el sector del agua es un gran consumidor de energía. Con respecto a la depuración, en España actualmente existen 2.264 EDAR de más de 2.000 h-e en funcionamiento, además de 17 instalaciones en construcción y 36 proyectadas según los datos reportados por España a la Comisión Europea el 18 de julio de 2018, información obtenida en la web de la Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente (EIONET). Estas EDAR tratan más de 3.000 hm³/año de aguas residuales urbanas que requieren un consumo energético correspondiente al 1% del consumo energético nacional (IDAE, 2010). Estas instalaciones son las principales consumidoras de energía en ciclo integral del agua, suponiendo en torno a un 65%. Por tanto, en la gestión integral del ciclo del agua, las estaciones depuradoras de aguas residuales son uno de los procesos más importantes en lo que a consumo energético se refiere, siendo además una parte esencial, pues son el punto de retorno del agua a su medio en las condiciones óptimas. Gracias a ello se realiza la eliminación de nutrientes del agua residual urbana necesaria para evitar la proliferación de algas o eutrofización de las aguas receptoras, estando regulado su vertido por la directiva Europa de aguas residuales urbanas.

Al tratarse la depuración de agua residual de un proceso energéticamente intenso, ha motivado que en la gestión de las EDAR en los últimos años se tenga como principal objetivo

la reducción del consumo energético. Cabe tener en cuenta que el consumo energético dependerá de las características de la planta, señalando entre otras el tipo de tecnología utilizada, el tamaño de la planta y la carga contaminante del influente. El destino final del agua es determinante a la hora del consumo energético de una EDAR, ya que si el agua depurada es devuelta al medio ambiente cumpliendo con las VLE marcados por la normativa, se estima un consumo energético de 0,62-0,87 kWh/m³, mientras que si en cambio el uso posterior del agua es su reutilización, el consumo se ve incrementado hasta valores entre 1,0-2,5 kWh/m³ debido a que la eliminación de patógenos requiere de un consumo energético extra. Para lograr el objetivo de obtener una disminución significativa del consumo energético se está tratando de implantar técnicas de depuración que implique menor consumo energético además de equipos cada vez más eficientes y sistemas de cogeneración capaces de producir incluso el 50 % del total de energía que consumen las instalaciones.

Una de las principales razones del cambio de enfoque de esta nueva gestión, es principalmente económica, debido al incremento en las tarifas energéticas durante los últimos años. Hay que tener presente que un elevado porcentaje de los costes operativos de una EDAR está asociado al consumo energético pudiendo representar entre el 25-56% de los costes totales de operación y mantenimiento de una instalación. El informe del 21 de mayo de 2019 realizado por la Oficina Europea de Estadística, Eurostat, refleja que España fue el segundo país de la Unión Europea donde más se incrementó el precio de la energía en el año 2018 frente a 2017, al pasar de una media de 21,8 € por cada 100 kWh a 24,8 €, lo que supone un incremento del 13,8%. Si se mide según el estándar de poder adquisitivo (PPS), un término artificial que elimina las diferencias de niveles generales de precios entre países, España es el tercer país de la Unión Europea con la electricidad más cara con 27,4 PPS. Todo ello obliga a estudiar cada vez más las posibilidades de ahorro y eficiencia energética en las EDAR mediante la aplicación de nuevos sistemas de organización de la operación de las plantas, de nuevas metodologías y tecnologías de depuración.

Este cambio de enfoque ha provocado una tendencia creciente en considerar las EDAR como sistemas de recuperación de recursos, en lugar de únicamente instalaciones para la reducción de emisión de contaminantes al medio ambiente. Lo que ha favorecido a aplicar metodologías que ayudan a la recuperación de productos con valor añadido y de energía del agua residual, lo que maximiza el potencial económico y medioambiental de este tipo de instalaciones, permitiendo reducir los costes de explotación. En este contexto de desarrollo sostenible, la energía en las EDAR debe ser considerada no sólo en términos de reducción del consumo, sino también en términos de producción y uso de energía verde.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo fin de máster tiene por objetivo fundamental el de analizar el consumo energético en depuración de agua residual urbana en España, estableciendo relaciones entre dichos consumos en función de los habitantes equivalentes a los que sirve la EDAR, en función de la tecnología de depuración empleada y las calidades impuestas en los VLE.

Además, se completa el trabajo con la realización de un estudio descriptivo de tecnologías disponibles y aplicables para lograr un aumento de la eficiencia energética y el aprovechamiento de los recursos energéticos del agua residual para lograr la autosuficiencia de las EDAR.

3. CONSUMO ENERGÉTICO EN DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL URBANA.

La creciente preocupación de la sociedad en materia medioambiental a nivel mundial exige un constante esfuerzo por la mejora de los procesos buscando la eficiencia energética en todos los sectores.

La publicación en la primera década del siglo XXI del estudio California's Water-Energy Relationship (Klein et al, 2005) destacó la importancia que tiene el consumo de energía en el Ciclo Integral del Agua. En dicho estudio se muestran los datos de la Comisión de la Energía del Estado de California del año 2001, los cuales asocian al CIA el 19% de la electricidad y el 32% del consumo de gas natural del Estado, correspondiendo de esos porcentajes el 0,8% y el 0,2% en consumo de energía eléctrica y gas natural respectivamente para tratamiento de agua residual.

En España, el binomio compuesto por agua y energía es cada vez más importante debido a la tendencia creciente de los precios de la energía con un horizonte tarifario que no ayuda a la confianza y a la actual situación de incertidumbre desde el punto de vista energético. Asumiendo que el agua se ha convertido en un recurso cada vez más escaso en relación con la demanda de la creciente población y la economía urbana, se ha intensificado la competencia por este recurso en todos los sectores productivos (Lee et al, 2015; en González et al., 2016).

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) son el punto de retorno del agua a su medio en condiciones óptimas y son los principales consumidores de energía en

el Ciclo Integral del Agua, siendo este entorno al 65%. Se deduce que es uno de los procesos más importantes en lo que a consumo energético se refiere. La optimización energética de estos procesos permitirá disminuir el consumo energético de manera importante en este sector (iAgua 2014).

En el estudio realizado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE,2010) sobre 617 EDAR en todo el territorio español se concluye que el consumo energético asociado a la depuración de las Aguas Residuales Urbanas del país supone el 1% del consumo energético nacional. Según este estudio la media nacional de la potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas es de 5,6 W/h.e. que equivale a un consumo energético de 49 kWh/(h.e. año) o 0,67 kWh/m³, pudiéndose reducir un 17,5% aplicando técnicas de optimización energética y pasar a valores próximos a 0,55 kWh/m³. En otro estudio realizado a nivel nacional titulado "Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus", Hardy et al. (2012) indica que el consumo unitario de las EDAR en España varía entre 0,41 kWh/m³ y 0,61 kWh/m³, obteniendo un valor medio de 0,53 kWh/m³, siendo éste similar a los anteriormente mencionados.

Si fijamos el foco de estudio a nivel Autonómico, en la Comunidad de Madrid, cabe destacar el estudio realizado por la empresa Canal de Isabel II (CYII), Ferrer et al. (2016), sobre la huella energética en el ciclo integral del agua determina que el consumo de energía eléctrica correspondiente a las diferentes instalaciones que comprenden el ciclo integral del agua es de un 1,5% del total de la electricidad consumida en la Comunidad. Respecto a la parte del estudio que realiza Canal de Isabel II sobre la información que obtiene de las 156 EDAR que gestiona y explota en la Comunidad de Madrid aplicando distintas tecnologías de depuración con un caudal tratado total registrado de 1.350.685 m³/d en el que se obtiene un consumo anual de 164.618.877 kWh/año y un consumo específico de 0,33 kWh/m³. Estos valores suponen el 59,1% del consumo energético total de las instalaciones gestionadas por CYII en la Comunidad de Madrid. En cambio, los resultados reflejados en el estudio realizado sobre la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería en el que se fija una intensidad energética en depuración de 0,53 kWh/m³ (Martínez, 2011). En la Región de Murcia, Simón et al. (2012) fija el consumo unitario medio en 0,55 kWh/m³, tras estudiar 90 EDAR siendo en su mayoría de Fangos Activados (FA) con aireación prolongada e incluyendo tratamiento terciario el 58% de las mismas. El valor de la intensidad energética se rebajado en el estudio de las 538 EDAR de la Comunidad Valenciana y de la Región de Murcia llevado a cabo por Albaladejo-Ruiz y Albadalejo-Falcó (2015) obteniendo un valor de consumo unitario media de las EDAR de 0,43 kWh/m³, tratándose en su mayoría de instalaciones de FA con sistemas de aireación prolongada con

procesos de eliminación de nitrógeno y fósforo y disposición de tratamiento terciario para la regeneración del agua.

A nivel municipal puede mencionarse el estudio realizado sobre el consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia se obtiene que la intensidad energética invertida en depuración de las cuatro EDAR que tratan sus efluentes de 0,54 kWh/m³ siendo la intensidad energética media del ciclo urbano de 1,124 kWh/m³ (Murgi et al, 2009; en Ferrer et al., 2016).

Tradicionalmente se ha realizado el diseño de las EDAR para cumplir con los Límites de Vertidos impuestos por la norma según los contaminantes característicos de las Aguas Residuales Urbanas. Muchos de estos diseños están sobredimensionados y han buscado la durabilidad y fiabilidad dotando de robustez a los equipos electromecánicos restándole importancia en el diseño de los procesos al consumo energético.

Actualmente los gestores del sector del agua han visto como los costes energéticos han adquirido mayor importancia en la estructura de costes de su actividad con la constante tendencia al alza del precio de la energía eléctrica obligando a las empresas a seguir estrategias de ahorro energético.

La importancia presupuestaria de la energía también queda claramente reflejada en la explotación de una EDAR, donde el coste del consumo energético se cifra entre el 15% y el 30% del total de la explotación, siendo el mayor gasto de la planta (Castell et al, 2011). Debe tenerse en cuenta que la demanda energética depende del tipo de tratamiento y del tamaño de la instalación, existiendo una economía en escala, ya que cuanto mayor es la EDAR, menores son los ratios energéticos obtenidos para un mismo tratamiento. El consumo energético puede variar entre instalaciones, dependiendo de factores como el tamaño de la instalación, el tipo de procesos, las etapas de tratamiento y la carga influente (Morenilla, 2018).

El esquema funcional de una EDAR depende de la calidad del agua bruta, mayor o menor presencia de vertidos, industriales, el tamaño de la planta, el uso de tratamientos convencionales o por la apuesta por tecnologías de bajo coste en municipio de pequeño tamaño, son factores que afectaran a la elección del tratamiento que se considere más adecuado en cada caso. A efectos prácticos, se considera tratamiento “convencional” el formado en la línea de agua por: bombeo de agua bruta, en el caso de que sea necesario, pretratamiento (desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado), seguido de tratamiento primario

(decantación), tratamiento biológico de fangos activados y desinfección. El proceso biológico más extendido es el de fangos activados, ofreciendo buenos resultados en sus distintas variantes para adaptarse a las necesidades requeridas. La línea de fangos “convencional” incluye el proceso de espesamiento gravedad y/o flotación, la estabilización o digestión del fango en exceso por vía aerobia o anaerobia y como última etapa la deshidratación para su posterior almacenamiento del fango deshidratado en silo y posterior evacuación. Para plantas de pequeñas poblaciones se suele utilizar el proceso de oxidación total en el que se prescinde de la decantación primaria y de la digestión de fangos y así conseguir la estabilización en la propia línea de agua. Además del uso del proceso de fangos activados, en pequeñas aglomeraciones urbanas pueden ser una adecuada solución el uso de otros tratamientos biológicos en plantas compactas o con tratamientos de “bajo coste” (lagunaje, humedales artificiales, filtros verdes ...), y en otros casos, los filtros percoladores, biodiscos, etc., en los que es menor el consumo de energía que en las plantas de fangos activados, conduciendo también a buenos resultados. También empieza ser habitual en pequeñas aglomeraciones urbanas el uso de tecnologías más complejas como los reactores biológicos de membranas que están logrando obtener buenos resultados a un coste que cada vez es más competitivo. Además, es bastante habitual el uso de tratamiento terciario en la misma EDAR para alcanzar los objetivos de calidad del agua regenerada según RD1620/2007. El tratamiento terciario “convencional” incluye: tratamiento físico-químico, con decantación habitualmente lamelar, filtración en medio granular y desinfección, en la mayoría de los casos mediante radiación UV. Hay instalaciones en las que actualmente se han sustituido este esquema de tratamiento terciario por el uso de membranas de micro o ultrafiltración e incluso la aplicación de ósmosis inversa según el uso posterior del agua.

La energía necesaria para el funcionamiento de una EDAR es casi exclusivamente eléctrica, siendo los objetos de consumo principales los motores de los equipos electromecánicos como bombas de transporte de agua y lodos, equipos de aireación, ya sean superficiales, sumergidos, soplantes o turbocompresores, siendo éstos los que mayor consumo demandan de la instalación.

Un examen energético de cada uno de los procesos de una EDAR puede ayudar a determinar como contribuye cada uno de ellos al consumo global de la instalación, siendo el sistema de aireación del tratamiento biológico el que mayor consumo tiene llegando a un 44% de la energía total de la instalación (Castell et al, 2011).

La repercusión del incremento del precio de las tarifas eléctricas en los costes de explota-

ción de las EDAR ha provocado que el coste de energía eléctrica que antaño se despreciaba haya pasado a ser uno de los de mayor importancia suponiendo más del 56% del total en el año 2012, como se representa en la Figura 1 (Albaladejo y Trapote, 2013). Esto obliga a estudiar cada vez más la posible disponibilidad de ahorro y eficiencia energética en las actuales y futuras EDAR mediante la aplicación de nuevos sistemas operación de las plantas desarrollados con el conocimiento actual y la búsqueda de nuevas metodologías y tecnologías.

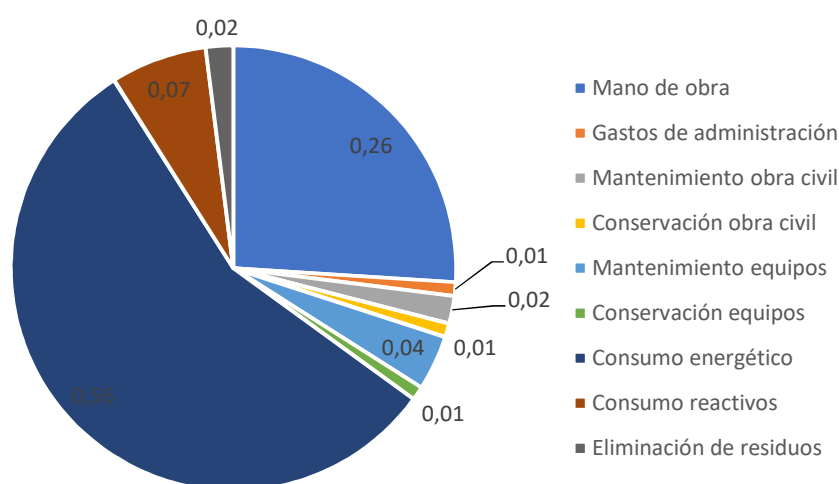


Figura 1. Distribución porcentual de los costes de explotación de una EDAR. (Adaptada de Albaladejo y Trapote, 2013).

3.1 Consumo energético en función de los habitantes equivalentes.

Para realizar el estudio de consumo energético se toma habitualmente como variable a considerar el consumo energético unitario expresado como la energía consumida por cada metro cubico de agua tratada (kWh/m^3), con el inconveniente de no considerar la carga contaminante del influente.

La carga contaminante de una EDAR se expresa en habitantes equivalentes (h-e). Este parámetro incluye la carga contaminante aportada por los habitantes físicos, así como por los comercios e industrias que vierten sobre la red de saneamiento. La proporción de los vertidos comerciales e industriales se incrementa con el tamaño del municipio, asumiéndose un valor entre un 5% y un 20% para municipios pequeños y grandes respectivamente.

Obteniendo así, una población media expresada en habitantes equivalentes según tamaño de municipio. La Directiva 91/271/CEE define la h-e como *la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO₅) de 60g de oxígeno por día*.

En el estudio de parametrización del consumo energético realizado en la Comunidad Valenciana (Albaladejo et al, 2015) sobre 453 EDAR con una media anual de caudal total depurado de 489,87 hm³ que suponen un promedio mensual de 6.041.525 h-e, se realiza la comparativa estadística para determinar una variable principal representativa para realizar la investigación, optando entre los m³ tratados o los h-e. En dicho trabajo se realiza un análisis de coeficientes de correlación entre varias variables estudiando cada una de las variables con cada una de las otras, obteniendo la mayor correlación del consumo energético de las EDAR es respecto a la variable que determina los h-e servidos, siendo este coeficiente de 0,9747, seguido del obtenido respecto la DBO₅ depurada medida en toneladas (t), siendo de 0,9741. El coeficiente de correlación que se obtiene en el estudio respecto a los m³ tratados es de 0,9385 siendo peor que los mencionados anteriormente.

Para poder manejar la gran cantidad de datos y poder acotar mejor los valores obtenidos se realiza una segmentación de las EDAR por tamaño. Para realizar la segmentación de una forma lógica se investiga dos modos de agrupación de las EDAR, siendo una opción de segmentación teniendo en cuenta los m³ tratados anualmente, mientras que la otra opción valorada es por promedio mensual de h-e tratados, siendo la segunda opción la elegida al tener mejor coeficiente de correlación al igual que en el informe del IDAE (IDAE, 2010). De esta forma se pretende realizar el estudio agrupando EDAR con características similares en tamaño. En el estudio mencionado (Albaladejo et al, 2015) se obtienen 11 segmentos diferenciados variando entre 200 h-e y 1.000.000 h-e, observándose que 47,68% de las EDAR que se corresponde con las 216 EDAR de menor tamaño (hasta los 1.000 h-e) sólo tratan un 1,53% de los habitantes totales servidos, mientras que el 2,86% de las EDAR, correspondiéndose a las de mayor tamaño (a partir de 200.000 h-e) tratan más del 56,6% del promedio de los h-e tratados.

Analizando los resultados del estudio se determina que la variable sobre la cual mejor se puede realizar la segmentación es la de h-e, ya que representa de forma reconocible el caudal a tratar como la carga contaminante de entrada que porta. Esta conclusión relevante mejora las fuertes desviaciones que se produce al tratar estadísticamente los datos únicamente desde el punto de vista del caudal tratado en m³, ya que se puede dar el caso de EDAR que traten caudales muy elevados con poca carga contaminante.

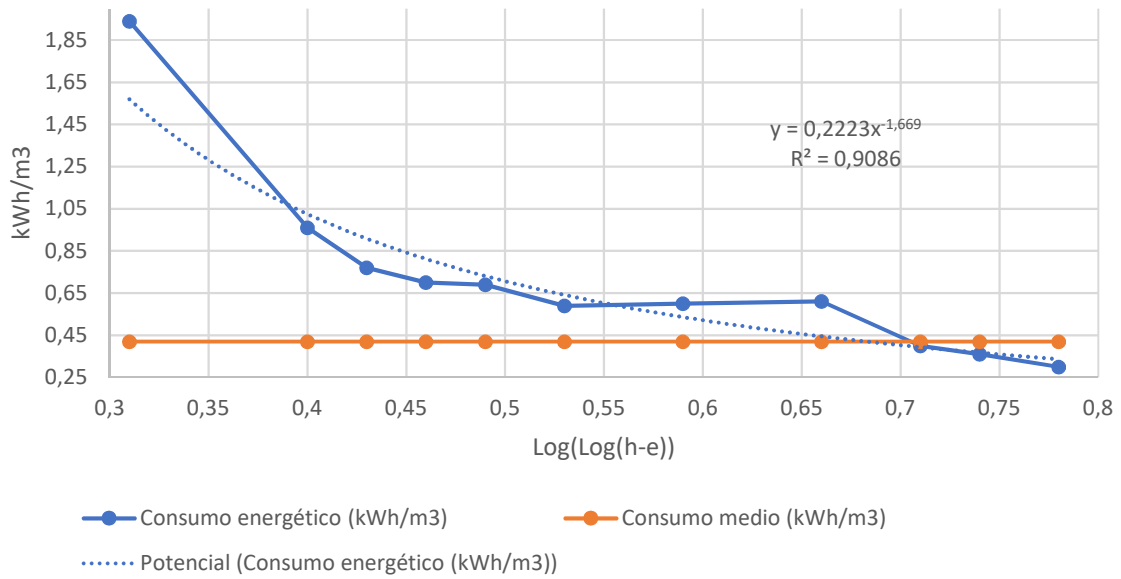


Figura 2. Consumo unitario (kWh/m³) en las EDAR en función de Log(h-e). (Adaptada de Albaladejo-Ruiz y Albadalejo-Falcó, 2015)

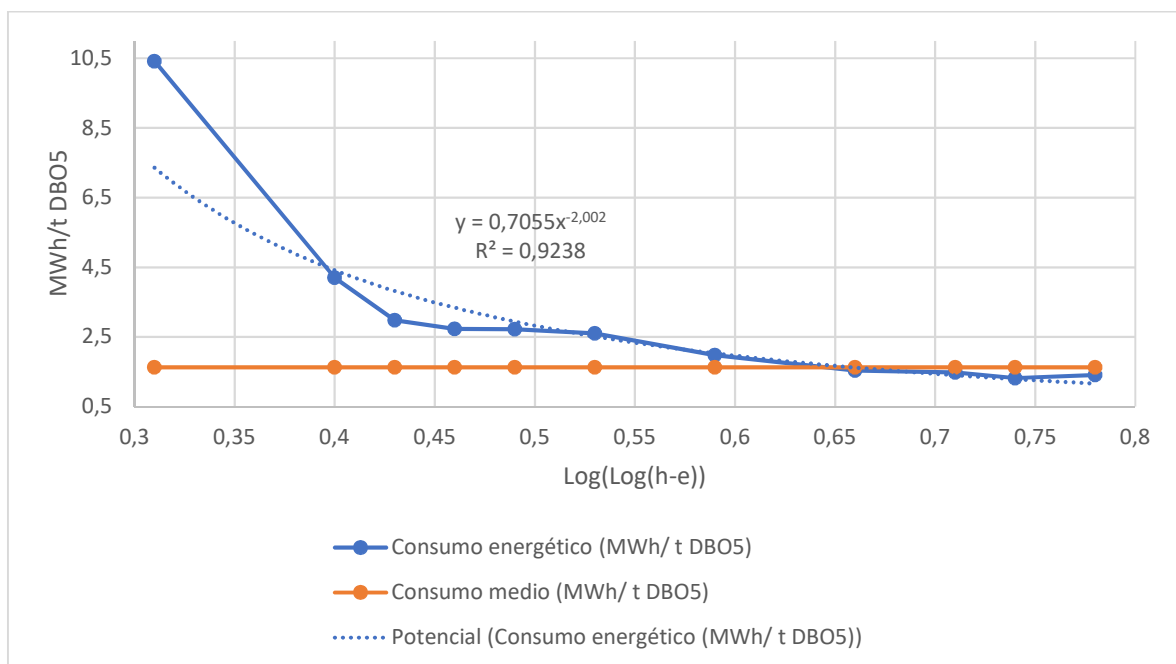


Figura 3. Consumo unitario (MWh/t DBO5 tratada) en función de Log(h-e). (Adaptada de Albaladejo-Ruiz y Albadalejo-Falcó, 2015)

El parámetro que mejor correlaciona el consumo de energía con los h-e es el de kWh/m³, obteniendo una media ponderada de 0,42 kWh/m³ con un coeficiente de correlación $R^2=0,911$. Observando la gráfica obtenida se puede determinar que las EDAR que tratan > 100.000 h-e tienen un consumo inferior a la media obtenida, mientras que las que reflejan

un consumo superior son las EDAR más pequeñas (< 2.000 h-e), lo que nos puede dar una idea de los sobre costes energéticos que implica el sobredimensionamiento de plantas pequeñas, por lo que se debe ser cuidadoso a la hora de evaluar las diferentes metodologías disponibles para seleccionar la más adecuada teniendo en cuenta el caudal y h-e a tratar tendiendo a utilizar los sistemas de depuración más eficientes energéticamente.

En las gráficas de las Figuras 2 y 3 se puede observar que el consumo energético siempre disminuye exponencialmente cuando el tamaño de las EDAR aumenta, por lo que se recomienda tender a realizar el diseño de EDAR que traten el mayor número posible de h-e para lograr una mayor eficiencia energética, por lo que en la medida de lo posible se debe intentar concentrar los caudales de aguas residuales para optimizar el consumo energético por m³ tratado, por h-e, por tonelada de DBO₅ tratada, etc. (Albaladejo-Ruíz y Albadalejo Falcó, 2015)

Así mismo se concluye que a partir de aproximadamente de los 100.00 h-e o de unos 500.000 m³ mensuales, el consumo es menor del ratio medio. El consumo energético se reduce debido a las economías de escala, y a que aumentan las posibilidades de rentabilizar la implantación de sistemas de cogeneración reutilizando el biogás producido y al aprovechamiento del calor de los gases de escape de la combustión para aumentar el rendimiento de los digestores y el secado de fangos. Además, los planificadores y diseñadores de EDAR urbanas deben tener en cuenta el ahorro conjunto en costes de empleados, costes generales y de comprar de productos en las grandes EDAR.

Para EDAR de menos de 500 h-e o menos de 1.000 m³ mensuales que no pueden concentrar los caudales para tratarlos en EDAR de mayor capacidad, se deben utilizar otras metodologías y sistemas de depuración más eficientes energéticamente, ya que el consumo se puede elevar exponencialmente, según se ha indicado anteriormente, seleccionando entre las diferentes metodologías existentes según las condiciones de contorno que se tenga, como puede ser oxidación total, tanque Imhoff, flujo pistón, etc. Aunque no sean procesos tan eficientes energéticamente buscando siempre unificar a criterios lo más medioambientalmente sostenibles que sea posible. Estos procesos también presentan ventajas al explotador como pueden ser menor coste de operación y mantenimiento en dedicación de mano de obra, eliminación de fangos o uso de productos químicos.

Se estima que la potencia total requerida para la depuración urbana en España es de 305 MW, lo que equivale a una media de 5,6 W/h-e o 49 kWh/(h-e año) o 0,67 kWh/m³, de los cuales se observa que el 28% de esa potencia se consume en municipios de menos de

5.000 h-e, correspondiéndose al 84% del número total de municipios españoles, el 44% de la potencia total estimada se consume en depuradoras que dan servicio a poblaciones situadas en la franja entre 5.000 h-e y 50.000 h-e, suponiendo un 14% de los municipios españoles, mientras que el resto del consumo supone un 28% del total se realiza depuradoras grandes de más de 50.000 h-e suponiendo el restante 2% de municipios españoles (IDAE, 2010). Estas cifras nos indican que la mayor parte de la energía destinada a depuración de aguas residuales urbanas, un 72% del total, se consume en poblaciones pequeñas o medianas con marcado carácter rural en las que se diseñan instalaciones sobredimensionadas buscando la robustez y simplificación del proceso en las que no se han realizado las inversiones necesarias para el control del proceso y aireación, mientras que el 28% restante se consume en grandes depuradoras que dan servicio a poblaciones de mayor entidad en las cuales se ajusta más el consumo unitario mediante sistemas de control de procesos.

3.2 Consumo energético en función de la tecnología de depuración.

La Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas, es una de las claves de la política ambiental de la Unión Europea. Una de las medidas que establece es que todas las aglomeraciones urbanas tienen la obligación de contar con sistemas de tratamiento de las aguas residuales.

La gran variabilidad de agrupaciones urbanas y la gran diferencia existente entre poblaciones con marcado carácter rural y carácter industrial hace compleja la elección de una tecnología de depuración u otra para su aplicación. Para poder seleccionar un tipo de tratamiento de depuración es necesario el conocimiento del tamaño de la población y los valores límite aplicables a las aguas a tratar, por lo que el tratamiento adecuado correspondiente dependerá de la calidad exigida en la masa de agua y del tamaño relativo de la población.

En la gran mayoría de los casos es necesario aplicar un tratamiento secundario con el objeto de reducir la contaminación por materia orgánica y sólidos en suspensión basando su rendimiento en la implantación de procesos biológicos. Las tecnologías de tratamiento biológico pueden clasificarse en función de la superficie del suelo necesaria para su implantación. Cuando se necesita una elevada superficie de suelo se habla de procesos extensivos. En cambio, los procesos intensivos necesitan menor superficie para poder adoptarlos. Por el contrario, la mayor o menor ocupación de suelo implica recurrir a un mayor o menos consumo de energía eléctrica, ya que las tecnologías extensivas fundamentalmente requieren menor consumo de energía eléctrica al usar fuentes naturales de energía ya que

simulan procesos naturales de depuración, mientras que las tecnologías intensivas acusan un mayor consumo energético debido a la aceleración de los procesos naturales para la depuración. (Jácome et al., 2012)

A continuación, vamos a exponer diferentes tecnologías aplicables a pequeñas poblaciones hasta 2.000 h-e las cuales requieren la misma eficacia a la hora de su diseño y explotación que las plantas para grandes poblaciones. El diseño de dichas instalaciones debe incluir equipos que requieran un mínimo mantenimiento y que requieran un mínimo tiempo del operador, deben ofrecer un funcionamiento eficaz ante un amplio rango de caudal y carga para absorber las variaciones de una pequeña población, además se deben diseñar para que tengan un consumo energético reducido y que su integración en el medio ambiente sea máxima. (Ortega et al., 2012).

Las tecnologías extensivas requieren menor empleo de equipos electromecánicos y por tanto tienen un menor consumo energético, por el contrario, necesitan una mayor superficie para su implantación funcionando habitualmente por gravedad pudiendo dar servicio a núcleos de población inferiores a 500 h-e. Este tipo de tecnología habitualmente requiere la aplicación de un pretratamiento, un tratamiento primario y un tratamiento secundario. Dependiendo del alcance de la instalación el pretratamiento se compondrá de un desbaste, desarenado y desengrasado previo al tratamiento primario, para minimizar la instalación eléctrica y consumo energético es habitual el uso de un pretratamiento con limpieza manual y desarenadores estáticos. Según el grado de complejidad del proceso, el tratamiento primario normalmente se compone por una fosa séptica o bien un tanque Imhoff o un decantador primario cilindrocónico. Para el vaciado de lodos se puede usar una purga de fondo evitando requerir de instalación eléctrica. Los tratamientos secundarios extensivos más habituales pueden ser de aplicación superficial como los Filtros Verdes, o de aplicación sub-superficial como Zanjas Filtrantes, Lechos Filtrantes, Pozos Filtrantes, Humedales Artificiales de Flujo Libre, HSFV y HSFH. También se usan procesos que imitan la depuración natural del ríos y lagos como los Lagunajes (siendo aplicable para poblaciones superiores a 3.000 h-e) o que usan métodos de filtración como los Filtros de Turba y Filtros de Arena. Las necesidades de instalación eléctrica en el tratamiento secundario dependerán de la implantación de una recirculación de parte del efluente secundario para su mezcla con el efluente primario. (Ortega et al., 2012).

Como ejemplos de consumos específicos de energía en las tecnologías extensivas podemos señalar valores próximos a 150kWh/1.000 m³ para filtros intermitentes de arena con

recirculación (Jácome et al, 2012), siendo muy bajo en los HSFV debido al bombeo intermitente de agua residual si no existe desnivel para funcionar a gravedad y nulo para los HSFH.

Como tecnologías intensivas para aglomeraciones de población superiores a 500 h-e cabe destacar la aplicación de métodos de depuración mediante el uso en el tratamiento secundario de Lechos Bacterianos, equipos compactos CBR, SBR, MBBR, IFAS y Aireaciones Prolongadas que implican el uso de equipos electromecánicos que requieren un mayor mantenimiento y consumo energético tanto en el pretratamiento como en bombeos y recirculaciones del proceso. A continuación, se detalla una breve descripción de cada uno de estos métodos y apuntamos sus consumos energéticos específicos.

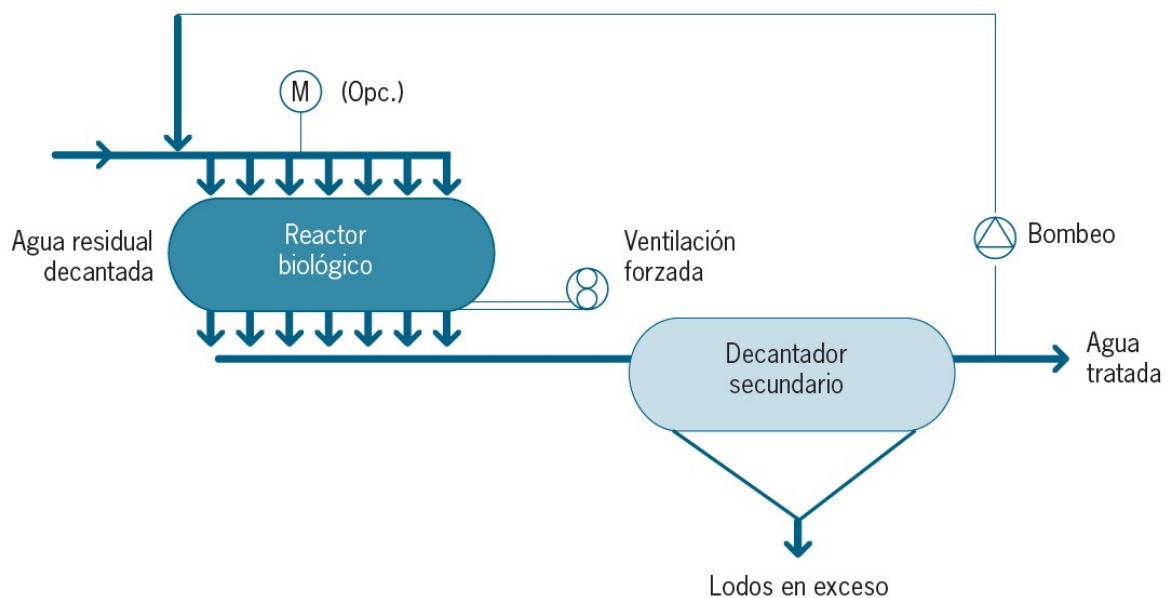


Figura 4. Esquema general de una EDAR de Lechos Bacterianos (Adaptada de Jácome et al., 2012).

En los sistemas LB como el representado la Figura 4, el ARU circula percolando a través de un material de relleno sobre cuya superficie se ha desarrollado un cultivo bacteriano llamado biopelícula con la que entra en contacto y a su vez con el aire, normalmente mediante tiro natural. El oxígeno del aire se disuelve en el líquido y se transfiere por difusión a la biopelícula junto con los nutrientes solubles. Se requiere un pretratamiento exigente y la implantación de un tratamiento primario mediante FS o TI. El consumo específico de energía ronda los 70 kWh/1.000 m³ o 0,7 kWh/kgDBO₅ eliminada.

En los sistemas CBR se realiza la depuración biológica mediante una biopelícula, pero en

este caso está adherida a un conjunto de discos de plástico dispuestos en paralelo atravesados por un eje horizontal. La configuración de los discos intenta maximizar el área superficial para mejorar la mezcla y optimizar la aireación. El eje es accionado por un motor que hace girar el conjunto de discos, disponiendo cada reactor de varias etapas. Al igual que en los LB se requiere de un pretratamiento exigente y un tratamiento primario mediante FS, TI o DP. El consumo específico de energía es de 162 kWh/1.000 m³ o 0,3-1,1 kWh/kgDBO₅ eliminada (Jácome et al., 2012). Comparativamente, se puede observar en el estudio realizado en las 7 EDAR gestionadas por CYII en la Comunidad de Madrid que incorporan un proceso de soporte sólido mediante biodiscos se obtiene un consumo energético promedio de 0,23 kWh/m³ y de 0,81 kWh/DQO eliminada (Ferrer et al., 2016), siendo similar a los valores aportados por el texto de Jácome.

El sistema SBR es un sistema de fangos activados en el que la degradación de los contaminantes y la decantación ocurren en un único reactor, en etapas temporalmente separadas en varios ciclos formados por cinco fases en las que se realiza el llenado, reacción, sedimentación, vaciado y fase inactiva. El consumo energético se estima aproximadamente 1,7 – 1,8 kWh/kgDBO₅. El aumento de consumo energético se debe a las necesidades del proceso de sistemas de aireación, sistemas mezcladores y bombas. (Ortega et al., 2012)

Los sistemas MBBR e IFAS son tecnologías a caballo entre los procesos de cultivo en suspensión y procesos de cultivo fijo aumentando la capacidad de tratamiento de reactores convencionales empleando soportes de material plástico con una elevada superficie específica sobre los que se desarrolla la biomasa en forma de biopelícula, siendo recomendados para poblaciones superiores a los 2.000 h-e. El consumo energético en los sistemas de lecho móvil se estima en 1,40-1,90 kWh/kgDBO₅ eliminada en sistemas que eliminan únicamente materia orgánica, mientras que se eleva a 3,60-4,10 kWh/kgDBO₅ eliminada para sistemas que incluyen eliminación de nitrógeno. (Ortega et al, 2012)

Los sistemas AP tienen aplicación para poblaciones en un rango comprendido entre 500 y 2.000 h-e. Siendo una tecnología que requiere personal cualificado para su operación. Este tipo de tecnología es una variante del proceso de fangos activados, constando de un pretratamiento con desbaste, desarenado y desengrasado, pasando posteriormente a una cámara de oxidación en el que se aporta aire mediante medios mecánicos, soplantes o turbinas, y una decantación secundaria, siendo necesaria una recirculación de fangos. El rango de requisitos de energía de este tipo de instalaciones va de 2,5 a 10 kWh/día, teniendo el consumo específico de energía un valor entre 1,67-2,50 kWh/DBO₅ eliminada. (Jácome et al., 2012). En el estudio realizado en las EDAR de la Comunidad de Madrid gestionadas

por la empresa CYII, de las cuales 102 incorporan el proceso de oxidación total. Para EDAR con caudales superiores a 700 m³/día se obtienen valores promedio de consumo energético de 0,72 kWh/m³ y 2,50 kWh/kgDQO aumentando estos valores cuanto menor es el caudal de tratamiento, produciéndose un aumento considerable para caudales de tratamiento inferiores a 300 m³/día, mientras que para caudales de tratamiento levados se estabiliza en torno a los 0,60 kWh/m³, siendo el valor medio del consumo energético específico de todas las EDAR sometidas a estudio de 1,25 kWh/m³. Parte importante de este consumo se produce en el proceso biológico de eliminación de materia orgánica, el cual tiene lugar por vía aerobia mediante aporte de oxígeno a los reactores con equipos electromecánicos como soplantes, turbinas, rotores y turbocompresores. Se detectan grandes diferencias en consumo energético según la tecnología de aireación empleado siendo mayor el detectado para soplantes con 0,85 kWh/m³ mientras que para las EDAR que emplean turbinas o rotores se obtiene un consumo unitario de 0,27 kWh/m³ y 0,46 kWh/m³ respectivamente, diferencia que puede ser debido a criterios de sobredimensionamiento de las instalaciones. Otro factor a considerar es si es necesario un bombeo de cabecera o la entrada de agua bruta se realiza por gravedad, suponiendo unos valores medios de consumo energético específico de 0,778 kWh/m³ para las EDAR con bombeo de cabecera mientras que en las EDAR que la entrada es por gravedad se obtienen 0,388 kWh/m³. (Ferrer et al., 2016)

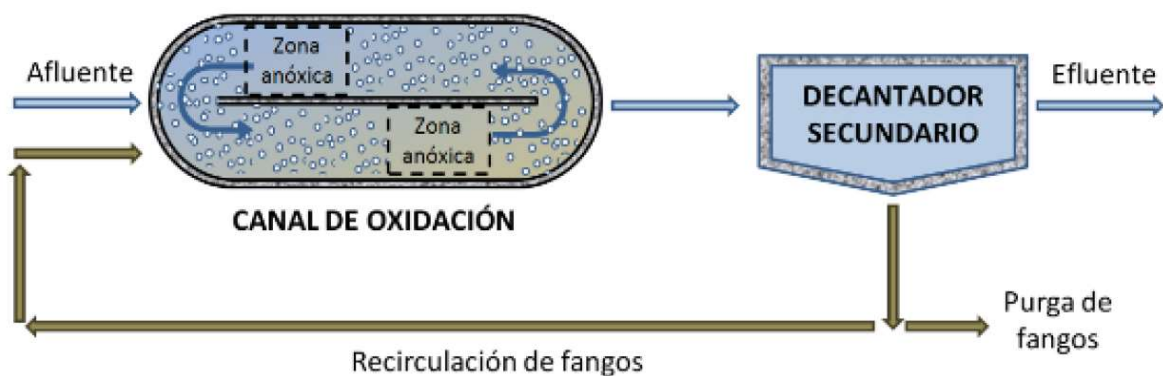


Figura 5. Esquema de EDAR de aireación prolongada. (Adaptado de Huertas et al., 2013)

La tecnología de aireación prolongada, esquema representado en la Figura 5, consigue excelentes rendimientos de depuración con una gran robustez en la operación, añadiendo además una gran capacidad de respuesta frente vertidos industriales, aportando gran fiabilidad, siendo esto un aspecto fundamental en zonas con bajos caudales circulantes, inferiores a 3.000 m³/día, en las que un posible fallo en una EDAR tendría repercusión inmediata y grave en el medio ambiente.

Cuando los caudales de tratamiento están comprendidos entre intervalos de 3.000 m³/día y 18.000 m³/día se suele recurrir a procesos de depuración que incorporan tecnologías de FA con digestión aerobia o anaerobia de fangos. La digestión aerobia es un proceso en el cual se produce la aireación, por un periodo significativo de tiempo, de una mezcla de lodo digerible del tratamiento primario y lodo del tratamiento biológico aerobio con el objetivo de la estabilización y reducción del total de lodos que se deben evacuar posteriormente. Frente a la digestión anaerobia, esta tecnología requiere menores costes de mantenimiento y menor uso de mano de obra especializada para la operación de la EDAR, pero tiene el inconveniente de un coste elevado en energía asociada al suministro de oxígeno necesario para el proceso de digestión. El consumo energético promedio según el estudio realizado por Ferrer et al. (2016) es de 0,55 kWh/m³ o 1,85 kWh/kgDQO eliminada, siendo este consumo unitario más elevado que el de otras tecnologías, debido al aporte de aire necesario, al elevado TRH y elevada edad del fango que se suele tener en este tipo de procesos.

Para poblaciones de más de 100.000 h-e y caudales de tratamiento elevados, por encima de 18.000 m³/día la tecnología de depuración más común a emplear es la de FA con DA, pudiéndose dar la opción de incluir la cogeneración de energía, si la calidad del gas generado en la digestión así lo permite. Aunque dentro de la tipología de las plantas de FA con DA se pueden presentar variaciones, podemos observar en el diagrama de flujo (ver Figura 6) una subdivisión clara de los procesos en dos líneas fundamentales, siendo éstas la línea de agua y la línea de fango. Aunque estas dos líneas de proceso son las primordiales de una instalación, también existen otras líneas auxiliares necesarias para poder explotar correctamente una EDAR, como puede ser la línea de aire y la línea de gas.

Dentro de la línea de agua se distingue varios niveles de tratamiento según se avanza en la eliminación de contaminantes mediante procesos más sencillos hasta los más complejos, siendo estos procesos el pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento secundario avanzado y tratamiento terciario. A continuación, se detalla cada una de estas etapas:

- Pretratamiento. Comprende operaciones de desbaste, desarenado y desengrasado, pudiendo incluir regulación de caudales y preaireación. Su objetivo es eliminar las materias groseras.
- Tratamiento primario. Su objetivo primordial es la eliminación de SS decantables y evitar su paso a etapas posteriores. Mediante procesos físicos en los decantadores de gravedad se elimina entre el 60-70% de SS y 30-40% de la DBO₅. Si se le aplica la adición de reactivos mediante un proceso físico-químico, se consigue eliminar entre 65-90% de SS y 50-70% de la DBO₅.

- Tratamiento secundario. El objetivo de esta etapa es la eliminación de gran parte de la contaminación orgánica en los reactores biológicos. En España el proceso más utilizado siguiendo los criterios de la Norma ATV A131 alemana es el de FA, consiguiendo eliminar entre el 85-95% de la DBO5 y SS. En los tratamientos secundarios avanzados se consigue además la eliminación de nutrientes alcanzando rendimientos entre 70-80% para el nitrógeno y fósforo por vía biológica aplicando etapas anóxica, aerobia y anaerobia en el reactor biológico. Mediante la adición de sales de hierro en el reactor biológico se consigue un rendimiento entre 80-90% en eliminación de fósforo vía físico-química. Posterior al reactor biológico, se sigue en el diagrama el decantador secundario, donde se separa el fango del agua clarificada estando ya en disposición de verterla al medio receptor o de aplicarse en la siguiente etapa del proceso.
- Tratamiento terciario. El fin de esta etapa del proceso de depuración es el de obtener una mejora del efluente depurado por exigencias del medio receptor o el de mejorar el efluente para su reutilización posterior reduciendo los valores de SS, NTU y DBO₅ mediante procesos físico-químicos, filtración, microfiltración y ultrafiltración, además de realizar la desinfección del efluente mediante la adición de reactivos como hipoclorito sódico, ozono y desinfección por rayos ultravioleta.

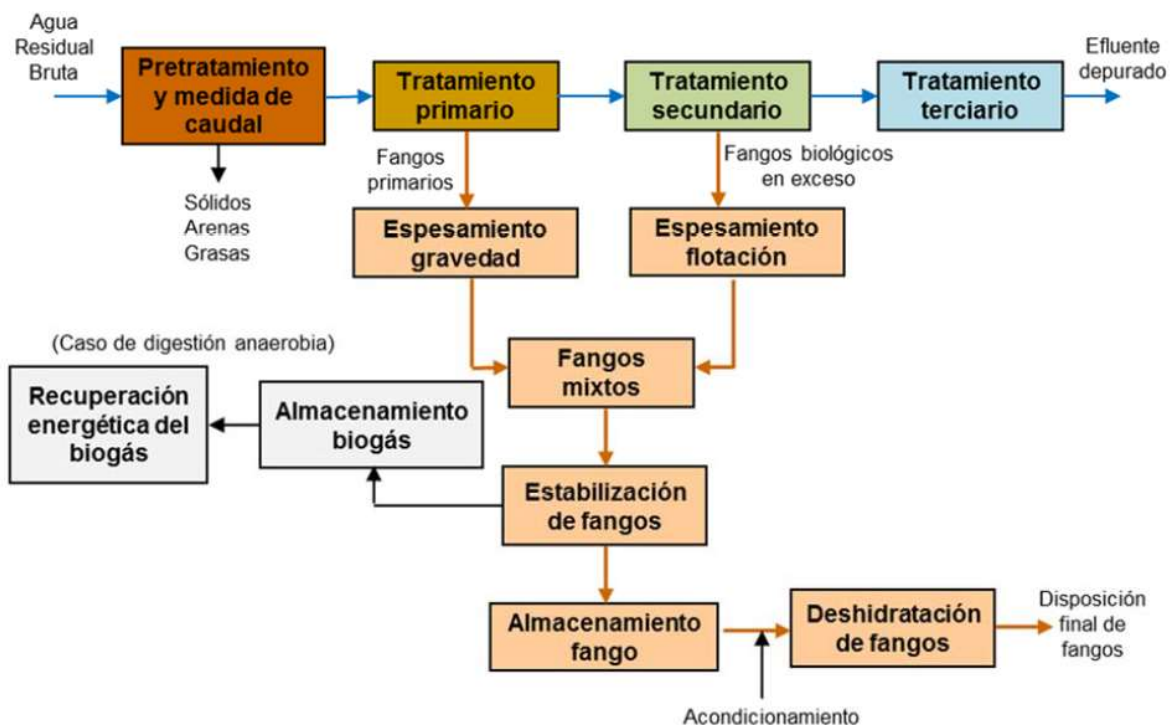


Figura 6. Esquema de una EDAR de Fangos Activados con Digestión Anaerobia y Cogeneración.

(Adaptado de del Río Marrero, 2018)

Las operaciones de la línea de fangos tienen el objetivo de reducir el contenido en materia orgánica y agua del fango y su acondicionamiento para posteriores procesos y evacuación final. Las principales etapas de la línea de fangos se detallan a continuación:

- **Espesamiento.** Etapa en la que se logra una mayor concentración de los fangos por eliminación del agua, reduciendo el volumen de los mismos. Normalmente se aplican métodos de espesamiento por gravedad para fangos primarios y espesamiento por flotación para fangos biológicos en exceso, obteniendo concentraciones entre 3-5%.
- **Estabilización.** En esta etapa se consigue la eliminación acelerada y controlada de buena parte de la materia orgánica. Aunque se puede realizar aplicando métodos de digestión aerobia o mediante estabilización química, vamos a comentar brevemente el método de DA que está relacionado con la exposición del tema a tratar. El más usado es la Digestión Anaerobia Mesófila en la que en ausencia de aire, se transforma la materia orgánica del fango en metano y dióxido de carbono, se reduce la materia volátil un 40-50% y se obtiene una producción de biogás con un 65-75% de riqueza en metano que se puede aprovechar posteriormente para aportar calor al mismo proceso de digestión y mantener la temperatura a 35°C o bien para calefacción de edificios auxiliares o para la cogeneración de energía eléctrica.
- **Deshidratación.** Su objetivo es eliminar el agua del fango hasta una sequedad que ronda 22-25% mediante el uso habitualmente de máquinas centrifugadoras, obteniendo una masa de fango deshidratado que se puede transportar más fácilmente para otras aplicaciones siendo el uso en la agricultura el más frecuente aunque también se puede reciclar para otros usos o como fuente energética en incineradoras o el depósito en vertedero como última opción según se establece en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Tras la breve descripción de cada una de las etapas de las dos líneas fundamentales de una EDAR de FA con DA nos podemos hacer una idea de la cantidad de equipos electromecánicos que entran en juego. El consumo energético varía de una instalación a otra, dependiendo de factores como el tamaño de la instalación, estado de los equipos y la carga de influente. Como se puede observar el tipo de energía requerido para una EDAR de estas características es casi exclusivamente eléctrica, necesaria para accionar los motores de bombas para transporte de líquidos y lodos, equipos de aireación, equipos de deshidratación y equipos varios. Los equipos de aireación, ya sean soplantes o turbocompresores, representan por su

potencia y uso el mayor consumo de la instalación, siguiéndoles los equipos de deshidratación, los equipos de bombeo y los equipos destinados a la desodorización y desinfección.

Al realizar un análisis energético individualizado de los diferentes procesos de una EDAR permite determinar cómo contribuye cada uno de ellos al consumo global de la instalación. Realizando un balance energético de todo el proceso en una EDAR, se puede establecer que gasta un 44% de la energía en aireación, un 23% en deshidratación y un 33% en pretratamiento como se representa en la Figura 7. (Castell et al., 2011)

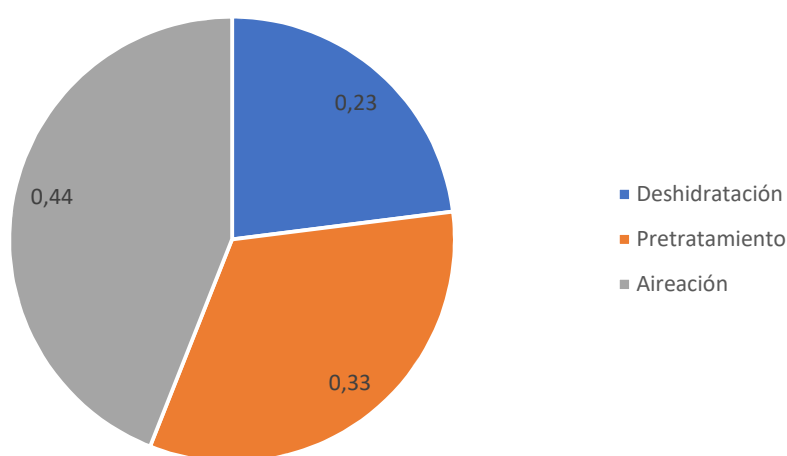


Figura 7. Balance energético de una EDAR. (Adaptado de Castell et al., 2011).

El constante incremento del precio de la energía eléctrica ha provocado que éstos se hayan convertido en los costes más significativos de la operación y mantenimiento de las EDAR. Para poder determinar la relación del consumo de energía de una EDAR con los principales parámetros característicos de funcionamiento y poder aportar un dato sobre el consumo energético específico de esta tipología de tecnología podemos remitirnos a varios estudios realizados en EDAR de FA en el territorio español. En el estudio de parametrización del consumo energético en depuradoras del levante español en el que se analizaron estadísticamente 538 plantas de la Comunidad Valenciana y la Región de Murcia entre los años 2010 y 2011 con los datos facilitados por EPSAR y ESAMUR. En dicho estudio se deduce que la mejor forma de estudiar los ratios de consumo energético es respecto a los logaritmos decimales de las características principales de una EDAR que son los m^3 tratados y los h-e servidos, obteniendo unos ratios medios ponderados de consumo energético de $0,43 \text{ kWh}/m^3$ o $2,78 \text{ kWh}/h\text{-e}$. Estos valores corresponden al conjunto total de las EDAR

estudiadas siendo la gran mayoría de aireación prolongada. Si nos fijamos al conjunto de EDAR que soportan una carga contaminante de más de 100.000 h-e los ratios varían entre 0,33-0,38 kWh/m³ o 2,25-2,43 kWh/h-e. (Albaladejo-Ruiz y Albaladejo-Falcó, 2016).

En el apartado de aguas residuales que nos encontramos en el análisis realizado por Hardy y Garrido sobre la relación entre agua y energía en España nos aporta una estimación del consumo energético de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo con una capacidad de 190.000 m³/día que incorpora recuperación de energía mediante la combustión de biogás. Además, incorpora el ratio de consumo en una planta de FA que incorpora tratamiento terciario e incluso tratamiento terciario con nitrificación descontando en cada uno de los casos la recuperación de la energía mediante biogás. Los consumos energéticos específicos obtenidos son de 0,28 kWh/m³ con una recuperación de 0,09 kWh/m³ quedando por tanto en 0,18 kWh/m³ en el caso que no incorpore tratamiento terciario. Si por el contrario incorpora tratamiento terciario el consumo energético específico obtenido sería de 0,32 kWh/m³ recuperando 0,09 kWh/m³, obteniendo por tanto un consumo neto unitario de 0,23 kWh/m³. Si además de tratamiento terciario se incorpora un proceso de eliminación de nitrógeno estos valores se ven incrementados pasando a tener un consumo de 0,42 kWh/m³ que con los 0,09 kWh/m³ que se recuperan obtenemos 0,33 kWh/m³ de consumo neto (Hardy y Garrido, 2010). Los valores aportados son aproximados ya que dependen de cada instalación dependiendo de los equipos que disponga y de las características del influente. Como casos particulares podemos citar las siete EDAR del Sistema de Saneamiento Integral de Madrid que tratan un caudal medio de 213.000 m³/día con un consumo eléctrico unitario neto entre 0,19-0,36 kWh/m³ en el año 2010, o los datos aportados por EMASESA de 0,46 kWh/m³ para el año 2004 (Hardy y Garrido, 2010).

Según el estudio del consumo energético en 453 EDAR de la Comunidad Valenciana se obtiene un resultado promedio de consumo energético de 0,42 kWh/m³ según la proporción $\text{kWh/m}^3 = 0,2218 \times (\text{Log}(\text{Log}(h-e)))^{-0,1668}$ demostrando que el ratio de consumo de energía aumenta cuando el tamaño de la EDAR disminuye en términos de h-e servidos. Para llevar a cabo el estudio se realiza una segmentación según el número promedio mensual de los datos por h-e, obteniendo 11 segmentos que van de 200 h-e a 1.000.000 h-e. Si atendemos a las 13 EDAR de mayor tamaño que tratan 3.313.544 h-e, suponiendo más del 56,60% de los 6.041.525 h-e promedio tratados en toda la Comunidad Valenciana. Si atendemos a las 8 EDAR que tratan una carga contaminante de 200.000 h-e obtenemos un consumo energético promedio de 0,40 kWh/m³, mientras que para las 4 EDAR que tratan 500.000 h-e se obtienen 0,36 kWh/m³ y 0,30 kWh/m³ para la planta mayor tamaño que trata 1.000.000 h-e (Albaladejo et al., 2015).

El estudio sobre el consumo de energía en las distintas fases del ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid realizado por Ferrer et al. (2016) se analizan los datos de caudal diario, consumo energético y características del influente y efluente correspondientes al año 2015 de las 156 EDAR que gestiona Canal de Isabel II. En este estudio se tiene en cuenta el año de construcción de la instalación, el tipo de proceso, existencia de bombeo de cabecera y de tratamientos terciarios. Dentro del total de instalaciones estudiadas se incluyen 25 EDAR con proceso de fangos activados y digestión anaerobia de fangos incluyendo el porcentaje de recuperación de energía para las 11 plantas que disponen de sistema de cogeneración. Las 25 EDAR realizan el proceso de digestión anaerobia en condiciones mesofílicas aportando la energía necesaria para mantener la temperatura a 35°C del digester a partir del biogás generado sin aumentar la huella energética de las EDAR. Los consumos energéticos promedio obtenidos para cada uno de los subconjuntos es de 0,51 kWh/m³ o 1,03 kWh/kgDQO eliminada para las EDAR con digestión anaerobia, 0,24 kWh/m³ o 0,43 kWh/kgDQO eliminada para las EDAR con sistema de cogeneración y 0,73 kWh/m³ o 1,03 kWh/kgDQO eliminada para las EDAR sin sistema de cogeneración. Por lo que se puede decir que el valor promedio del consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada en las EDAR con sistema de cogeneración es muy inferior al obtenido en las que no disponen de este sistema, por lo que es recomendable realizar un análisis económico para la instalación de un sistema de cogeneración en todas las EDAR con digestión anaerobia de fangos. Se observa una disminución del consumo energético por metro cúbico frente al caudal de tratamiento según aumenta el caudal de las EDAR sin cogeneración, mientras que en las que disponen de cogeneración el consumo energético neto es independiente del caudal tratado. Al igual que en otros estudios se indica que los principales consumos energéticos asociados a los procesos de eliminación de nutrientes corresponden a los sistemas de aireación y agitación, por lo que se recomienda la instalación de sistemas de control de la aireación y analizar la potencia de los agitadores utilizados en los reactores anóxicos y anaerobios.

A modo de conclusión del presente apartado se recomienda realizar el diseño de la EDAR para que trate el mayor número posible de h-e, para realizar un tratamiento más eficiente energéticamente intentando concentrar los caudales de aguas residuales para optimizar el consumo energético por m³ tratado o por h-e. Según lo expuesto anteriormente se puede indicar que a partir aproximadamente de 100.000 h-e o de unos 500.000 m³ mensuales tratados, el consumo es menor de los ratios medios. La reducción de consumo es debida a las sinergias que producen las economías de escala y a que aumentan las posibilidades

de rentabilizar la implantación de sistemas de cogeneración reutilizando el biogás producido. También se tienen que tener en cuenta las sinergias en coste de mano de obra y costes generales. Si además la instalación cuenta con sistema de cogeneración se puede estimar un ahorro entre el 30% y el 60% del consumo total de la instalación. Además, se recomienda la instalación de un sistema avanzado de control del sistema de aireación, ya que este sistema es el que mayor gasto energético realiza en la EDAR. Mediante la implantación de un sistema de control de la aireación se puede obtener hasta un 30% de ahorro en el consumo. Otra recomendación a tener en cuenta, es la instalación de un control del bombeo de cabecera o de agua bruta mediante variadores, con lo que se puede obtener un ahorro del 15% en consumo energético en el sistema de bombeo. (Ferrer et al., 2016).

Tabla 1. Valores promedio de consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada para las distintas tecnologías de tratamiento. (Adaptada de Ferrer et al., 2016)

Tecnología	Consumo energético kWh/m³	Consumo energético kWh/kgDQO
Soporte sólido	0,23	0,81
Oxidación total (EDAR con caudales superiores a 700 m ³ /día)	0,72	2,50
Fangos activados con digestión aerobia	0,55	2,14
Fangos activados con digestión anaerobia (sin cogeneración)	0,73	1,51
Fangos activados con digestión anaerobia (con cogeneración)	0,24	0,43

Para EDAR inferiores a 500 h-e o 1.000 m³ mensuales, que no se puedan concentrar los caudales para tratarlos en EDAR de un tamaño grande, se debe seleccionar muy bien el tipo de tecnología a utilizar buscando siempre la más eficiente y que presenten un buen coste de operación y mantenimiento, poco uso de mano de obra o baja eliminación de fangos. (Albaladejo et al., 2015).

Tabla 2. Ratio energético para distintos tipos de EDAR. (Adaptada de Simón,2018)

Tipo de tratamiento	Tamaño (h-e)	Ratio energético (kWh/m³)
Tecnologías blandas	< 2.000	0,21
Aireación prolongada	> 15.000	0,70
FA + Digestión aerobia	15.000 – 100.000	0,71
FA + DA	15.000 – 100.000	0,53
FA + DA	> 100.000	0,37

3.3 Relación entre los valores límite de emisión y la energía consumida en depuración.

Las exigencias marcadas por la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas nos establecen el tipo de tratamiento mínimo a aplicar dependiendo de la zona donde se requiera la instalación de una EDAR. En el Anexo II de la Directiva se marcan las pautas para que los estados miembros cataloguen las zonas como sensibles o menos sensibles, dependiendo de las masas de agua donde vierta el efluente de la EDAR considerando los efectos negativos que puede causar sobre el medio ambiente debido a la morfología, hidrología o condiciones hidráulicas específicas existentes en la zona. Para aglomeraciones a partir de 2.000 h-e se establecen los límites de vertido que se recogen en la Tabla 3. Las calidades asignadas a poblaciones <100 h-e se corresponden a los rendimientos normales después de un tratamiento de sedimentación con fosa séptica habitual en pequeñas poblaciones.

Tabla 3. Calidades en función de los habitantes equivalentes. (Adaptada de IDAE, 2010).

Parámetro	< 100 h-e	100 – 1.000 h-e	1.000 – 100.000 h-e	>100.000 h-e
DQO		125 mg/l	125 mg/l	125 mg/l
DBO	35%	25 mg/l	25 mg/l	25 mg/l
SST	65%	35 mg/l	35 mg/l	35 mg/l
N _{total}		-	15 mg/l	10 mg/l
P _{total}		-	2 mg/l	1 mg/l

La Directiva 91/271/CEE establece que todas las aglomeraciones de población tienen la obligación de contar con sistemas de alcantarillado asociados a un sistema de tratamiento de las aguas residuales y los vertidos de pequeñas aglomeraciones, hasta 2.000 h-e deben someterse a un tratamiento adecuado, marcando los VLE antes mencionados.

El problema que supone para la Administración Hidráulica el no disponer de límites objetivos para EDAR de pequeño tamaño a la hora de expedir autorizaciones de vertido a comunidades con pequeños núcleos urbanos, ya que hace insostenible la depuración al aplicarle los mismos límites de vertido a una aglomeración de 100 h-e que a una de 100.000 h-e. En Galicia la Administración Hidráulica afrontó técnicamente este problema generando unos límites u objetivos de vertido para poblaciones de menos de 2.000 h-e, reduciendo así los costes de implantación de una EDAR para núcleos menores de 500 h-e, siendo éstos la mayoría en la Comunidad Autónoma de Galicia. (Jácome et al., 2012).

El destino final del agua tratada en el caso del tratamiento del agua residual supone un importante punto a considerar ya que si el agua se devuelve al medio ambiente se estima un consumo de 0,62-0,87 kWh/m³, mientras que, si el agua es reutilizada, el consumo incrementa a 1,0-2,5 kWh/m³, ya que la eliminación de nutrientes y a su vez desinfección requiere un consumo energético extra (Simón et al., 2012), por lo que el consumo energético dependerá de las características de la planta, entre las que cabe señalar el tipo de tecnología utilizada, el tamaño de la planta y la carga contaminante influente así como el nivel exigido de depuración al efluente de la planta. (Metcalf et al., 2003). Para realizar el cálculo de los caudales y las cargas contaminantes de las EDAR se realiza a partir de las dotaciones teóricas de la Norma ATV-A131 alemana de la Tabla 4 adjunta. (IDAE, 2010)

Tabla 4. Dotaciones teóricas de la Norma ATV-A131 para el cálculo de caudales y cargas de las EDAR. (Adaptada de IDAE, 2010).

Dotación por h-e y día	Concentración agua residual estándar
0,2 m ³	
120 g. de DQO	600 mg/l
60 g. de DBO	300 mg/l
70 g. de SST	350 mg/l
11 g. de NH ₄	55 mg/l
1,8 g. de P _{total}	9 mg/l

Como se ha expuesto anteriormente, aproximadamente la mitad del consumo energético de una EDAR está asociado al tratamiento biológico, debido al elevado requerimiento energético de los sistemas de aireación en esta etapa.

Tabla 5. Consumo energético neto de EDAR de Fangos Activados y digestión anaerobia con y sin eliminación de nutrientes según tengan cogeneración y bombeo de entrada. (Adaptada de Ferrer et al., 2016)

Tipo de EDAR de Fangos Activos		Consumo energético neto (kWh/m³) con sistema de eliminación de nutrientes	Consumo energético neto (kWh/m³) con sistema de eliminación de nutrientes
Con cogeneración	Con bombeo	0,48	
	Sin bombeo	0,27	0,13
Sin cogeneración	Con bombeo	0,89	0,69
	Sin bombeo	0,75	0,41

Según Ferrer et al. (2016) se observa un menor consumo energético promedio en aquellas EDAR que no eliminan nutrientes. Los principales consumos energéticos asociados a los procesos de eliminación de nutrientes corresponden a los sistemas de aireación y agitación, por lo que se recomienda la instalación de sistemas de control de aireación en las

EDAR junto con el análisis de la potencia de los agitadores utilizados para la agitación de los reactores anóxicos anaerobios.

4. TECNOLÓGICAS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS EDAR.

Como se ha podido comprobar en la exposición de los apartados anteriores, el consumo energético asociado a la depuración de agua residual es elevado tanto a nivel nacional como para las empresas que realizan la explotación y mantenimiento de las EDAR, suponiendo para estas un importante porcentaje de los costes totales de explotación.

El consumo de la energía en las EDAR depende de la tecnología empleada, de la población atendida en cuanto a h-e y a las exigencias que marca la norma para la calidad del efluente.

En los siguientes apartados se desarrollan diversas medidas que se están realizando por diferentes organismos y empresas para aumentar la eficiencia energética en los procesos de depuración de agua residual. El mayor esfuerzo está centrado en lograr optimizar los sistemas de aireación de las EDAR, ya que es el mayor consumidor de energía de la instalación, tanto implantando sistemas de regulación y control como con la sustitución de equipos existentes por nuevos equipos más eficientes energéticamente, así como la implantación de sistemas de tratamiento de los retornos de la línea de fangos para reducir las necesidades de oxígeno en el tratamiento biológico y por tanto el consumo de energía en el mismo.

En los siguientes apartados también nos centraremos en como recuperar energía del agua residual, y su posterior aprovechamiento con la generación de energía eléctrica mediante el uso del biogás generado en la digestión o mediante la incineración del lodo deshidratado obtenido en el proceso de depuración y así tender hacia un mayor autoconsumo en la EDAR.

4.1 Control energético de una EDAR.

La optimización del consumo energético de una EDAR es de suma importancia para el explotador debido a que el coste energético es uno de los más importantes, situándose alrededor del 40 % del total de una EDAR de fangos activos, pudiendo ser más elevado aún debido al incremento del precio de la energía eléctrica en España durante los últimos años según el estudio realizado por Albaladejo y Trapote en el año 2013 sobre la influencia

de las tarifas eléctricas en los costes de depuración, ver Figura 1.

El consumo de energía en una EDAR varía según el tamaño de la misma, la carga contaminante de entrada, el tipo de tratamiento y la tecnología utilizada, por lo que el coste energético variará de una a otra como se puede ver en la Tabla 2. La operación de una EDAR suele realizarse en función de la curva horaria de caudal y carga contaminante por lo que se debería tener en cuenta la posibilidad de laminación de dicha curva si se dispone capacidad de almacenamiento y los costes de los distintos periodos horarios de las tarifas eléctricas. El término de potencia tiene un peso considerable en la factura eléctrica por lo que es necesario adecuar la potencia contratada a la realmente demandada por la instalación. Muchas EDAR tienen contratada una potencia que no se ajusta a sus necesidades reales, por lo que tanto por exceso como por defecto de la potencia contratada se puede incurrir en costes o penalizaciones innecesarias. (Aqualitans, 2017) Dependiendo de la potencia necesaria en la instalación se puede optar por una tarifa u otra, siendo las más usuales la tarifa 3.1.A en baja tensión con discriminación horaria en tres periodos y la tarifa 6.1 en alta tensión para potencias iguales o superiores a 50 kW. La tarifa en alta tensión requiere tener el centro de transformación en propiedad, lo que supone un coste de amortización y mantenimiento, pero aun así puede interesar en instalaciones que crean duda por la potencia instalada debido a que el término de potencia (€/kW/año) y el término de energía (€/kW/h) es inferior en cada uno de los periodos al de la tarifa de baja tensión. La medida de ajuste de la potencia contratada y adecuación de la tarifa eléctrica no supone ningún ahorro energético, aunque si puede suponer un interesante ahorro económico (Aqualitans, 2017).

La ACA dentro del marco del Programa de Ahorro y Eficiencia Energética y en el ámbito de la gestión de la contratación y comercialización de la energía, ha sacado entre diciembre de 2010 y junio de 2011 a licitación el suministro de energía eléctrica de las instalaciones de saneamiento de aguas residuales de Cataluña, englobando a 779 puntos de suministros entre EDAR, estaciones de bombeo y compostajes, que representan un consumo anual de 340 GWh. Con esta medida se obtienen ventajas al producirse ahorros económicos por agrupar volúmenes de consumo mayores al agruparlos todos en un único contrato y así se puede realizar un mejor seguimiento sobre el consumo eléctrico que cuando cada explotador negociaba la contratación de la energía y llevaba el registro de la facturación. En un futuro próximo la ACA tiene previsto incluso la compra de la energía eléctrica directamente en el pool, aunque represente un mayor riesgo por la fluctuación del mercado (Moragas, 2018).

El aumento del precio de la energía obliga a estudiar cada vez más las posibilidades de ahorro y eficiencia energética en las EDAR, aplicando nuevos sistemas de operación de la planta, nuevas metodologías y tecnologías de depuración. (Albaladejo y Trapote, 2013)

En cuanto a los consumos de las distintas fases del proceso de depuración, el mayor valor corresponde al tratamiento biológico, siendo superior al 50% del consumo total de energía eléctrica, siendo seguido por el pretratamiento, tratamiento terciario y la deshidratación de fangos, por lo que se debe tener como objetivo principal realizar una correcta gestión de la instalación de depuración para ajustar la demanda de energía necesaria para alcanzar los objetivos de calidad exigidos y el consumo real de energía. (Simón et al., 2012)

Una de las medidas a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de una EDAR debe ser la adecuación de la capacidad de los equipos a la demanda real del sistema, por lo que se debe ajustar el funcionamiento de la instalación al caudal real, ya que el de diseño puede ser muy superior repercutiendo en empeorar el rendimiento de los equipos (Simón et al., 2012). Un caso claro son los bombeos, que al funcionar de forma escalonada se consigue una optimización del consumo energético diario ya que se puede operar con equipos de menor potencia que trabajan en su punto óptimo de funcionamiento. Al igual que los equipos de aireación, al ajustar su funcionamiento a la demanda del sistema se eliminan picos de caudal de aire y se consigue una mejor transferencia de oxígeno. La modularidad de la instalación puede suponer un sobrecoste en la fase de construcción, pero queda compensado con el ahorro producido en la explotación a lo largo de la vida de la instalación debido a que el funcionamiento de los equipos será según se requiera por demanda. (González et al., 2016). Un ejemplo puede ser el tratamiento biológico, siendo recomendable la construcción de varias líneas, incluso alguna de menor tamaño que el resto, para poder adaptarse a caudales variables, sobre todo en plantas con marcado carácter estacional. (Simón et al., 2012).

Otra mejora a tener en cuenta relativa a la eficiencia energética de la instalación es la de los sistemas de distribución de aire en los procesos biológicos debido a que el mayor consumo energético en las plantas depuradoras es consecuencia del oxígeno que ha transferir al licor mezcla para la depuración, por lo que se tendrá que estudiar el tipo de difusor su distribución y la profundidad de instalación para obtener un SOTE adecuado, siendo este valor el % de los kgO_2 que son transferidos a la masa de licor mezcla por kgO_2 que es alimentado a los difusores (Simón, 2018). La acumulación de materia orgánica e inorgánica en la superficie de los difusores puede colmatar sus poros, produciendo un aumento de las pérdidas de carga en el difusor y afectando negativamente al rendimiento de transferencia

de oxígeno de la instalación. Para compensarlo, se produce un aumento en las horas de funcionamiento de los equipos de aireación y un aumento de consumo energético (Aqualitrans, 2017), por lo que es importante además de realizar un buen diseño, realizar un mantenimiento adecuado de esta instalación realizando limpiezas periódicas de los difusores de membrana para mejorar la difusión de aire ya que como hemos comentado anteriormente, entre el 50-60% del consumo energético de la EDAR es debido a la aireación en el proceso biológico (Simón et al., 2012). Se pueden llegar a alcanzar ahorros de hasta un 12% realizando una limpieza adecuada del sistema de aireación. La instalación de un sistema de control de la aireación del reactor biológico es uno de los factores que tienen más importancia para asegurar una buena calidad del agua depurada, en especial en lo referente a eliminación de nutrientes, como en la eficiencia energética. El propósito de los sistemas de control para el ajuste de las condiciones óptimas en el tratamiento secundario es el de proporcionar el flujo de aire correcto llevando el oxígeno necesario a todas las partes del sistema con las válvulas lo más abiertas posibles y al mínimo número de revoluciones de los equipos de aireación disminuyendo así el impacto en el consumo energético. El sistema de control más extendido se basa en la medición de oxígeno disuelto, aunque también se suelen ver sistemas que mide el potencial redox. En la actualidad la aparición de sondas fiables a coste asequible de amonio, nitratos y fósforo facilita la implantación sistemas de control mucho más complejos y potentes. El ahorro en consumo de energía que se puede alcanzar tomando esta medida puede ser hasta del 35% frente a procesos que no lo incorporan. (Aqualitrans, 2017)

Los equipos de producción de aire más habituales en las EDAR son las soplantes trilobulares de desplazamiento positivo de dos ejes y los turbocompresores, siendo equipos que tienen un gran consumo energético además de requerir un mantenimiento realizado por personal técnicamente especializado. Actualmente se pueden implantar nuevos equipos que los sustituyen que son más eficientes y aportan mayores prestaciones, por lo que a pesar de la importante inversión a realizar para su sustitución son altamente recomendables. Estos equipos nuevos son los turbocompresores de levitación magnética y las soplantes de tornillo.

Los turbos de levitación magnética, al igual que sus predecesores, producen aire mediante una turbina, pero en este caso en vez del uso de rodamientos y sistemas de transmisión que incurren en pérdidas por rozamiento, se le aplica al eje de la turbina un campo magnético para producir la levitación magnética y así evitar desgaste y pérdidas por rozamiento. La turbina trabaja a velocidades mayores que las del motor, por lo que para controlar el caudal y ajustar la velocidad a la que trabaja la turbina se utilizan variadores de frecuencia.

La gran ventaja de estos equipos frente a las soplantes trilobulares y turbocompresores es el reducido mantenimiento que hay que realizarles a las partes mecánicas, aunque también se puede enumerar que tienen una emisión ruido inferior, son más compactos y ligeros además de tener un mayor rango de regulación que se comprende entre el 35-100%. Estos equipos consiguen una reducción del consumo de energía entre el 17-23%, dependiendo del rango de trabajo en que funcione (Simón et al., 2012). Respecto a los costes de mantenimiento de estos equipos es de 15.771 €/5 años, estos trabajos son realizados en campo por personal especializado en los que se comprueban filtros y su cambio, válvulas de escape, estado de baterías (que se cambian cada 3 años), sistema de presión y fallos registrados en el equipo, frene a los 27.468 €/5 años que supone el mantenimiento de las soplantes lobulares en los que se incluyen los cambios de lubricante, revisiones cada 20.000 h aproximadamente por servicio técnico y la sustitución de piezas por desgaste (Castell et al., 2011).

En las Tablas 6 y 7 se presenta los resultados del estudio realizado por Castell et al, 2011 comparando consumos energéticos entre soplantes trilobulares y turbocompresores de levitación magnética en el que se analiza la varianza entre medias para determinar la representatividad estadística de la diferencia entre estas. Para el cálculo de los €/día se tomó el precio de la energía a 0,098 €/kWh. Como se puede apreciar comparando las dos tablas el consumo del turbo de levitación magnética es 0,32 kWh/kg DBO₅ eliminada menor que para la soplante y el coste en energía diario es superior en la soplante trilobular.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos soplante de émbolos rotativos. (Adaptada de Castell et al., 2011)

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
kWh/kg DBO ₅	1,1	0,63	1,57	0,306
€/día	258,08	210,14	298,08	24,183

Tabla 7. Estadísticos descriptivos turbocompresor de levitación magnética. (Adaptada de Castell et al., 2011)

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
kWh/kg DBO ₅	0,78	0,43	1,47	0,193
€/día	233,60	187,01	290,59	24,067

Las soplantes de tornillo funcionan comprimiendo el aire desde la aspiración hasta la impulsión mediante el uso de émbolos rotativos de ejes gemelos formados por dos rotores helicoidales recubiertos de teflón. Pueden trabajar a velocidades superiores a las del motor

mediante el uso de variadores de frecuencia y multiplicadores mecánicos. El ratio energético de estos equipos es de 0,364 kW/m³ frente a los 0,544 kW/m³ de las soplantes trilobulares. (Simón et al., 2012)

La operación de la planta y la selección de condiciones de trabajo de los procesos como niveles de oxígeno, nitrógeno, etc. también tienen gran influencia en el consumo energético que se puede obtener. La concentración de sólidos en licor mezcla o la edad del fango son parámetros muy importantes desde el punto de vista energético, ya que cuanto mayor sea el valor de estos parámetros, se incrementará la necesidad de la respiración endógena, y por tanto se incrementará la necesidad de aportación de aire, pero disminuirá la producción de fango, por lo que se deberá ajustar la explotación para poder jugar con el valor óptimo de estos parámetros. El número de líneas de tratamiento biológico en servicio se debe ajustar para minimizar el caudal de aire aportado a los microorganismos, aunque tener varias líneas abiertas puede suponer una menor concentración de bacterias en cada reactor mejorando la transferencia de oxígeno y por tanto reducir el consumo de energía. (Simón et al., 2012)

Un aspecto importante a tener presente en la explotación de una EDAR es el deterioro de los equipos y de las instalaciones que conlleva un consumo energético extra a lo largo de tiempo de vida de la planta, por lo que realizar buenas prácticas en las labores de mantenimiento con el fin de garantizar el buen funcionamiento de los equipos y reducir los efectos que tiene el deterioro de los mismos en el consumo energético. (Castellet et al., 2016) El rendimiento de los equipos se reduce a lo largo de su vida útil por lo que un mantenimiento periódico de los equipos e instalaciones nos asegura un buen funcionamiento de las instalaciones preservando los equipos operativos y así minimizar los tiempos de paradas y averías. La instalación de un sistema de control de mantenimiento en la programación del mismo SCADA en el que se establezcan consignas temporales para dar avisos a mantenimiento puede mejorar la eficacia del mantenimiento y la eficiencia energética de la instalación (González et al., 2016).

Una de las mejoras que se pueden realizar paulatinamente en las instalaciones de las EDAR que requieran inversiones menores, es la de sustituir equipos existentes según se agota su vida útil por otros de mejores características. Un ejemplo de ello es el del cambio paulatino de motores eléctricos por motores de alta eficiencia, ya que la mayor parte de los equipos instalados en una EDAR utilizan motores para su funcionamiento con lo que podemos obtener un ahorro energético de hasta un 12%. Como también puede pasar con el empleo de bombas sobredimensionadas para el caudal y la altura necesaria que hacen

que trabajen en puntos alejados del óptimo de trabajo lo que conlleva una disminución de su rendimiento. En las EDAR nos podemos encontrar con equipos que se diseñó su instalación para funcionar a velocidad constante, puede ser el caso de bombas y soplantes, por lo que si se necesita ajustar su caudal se debe realizar el ajuste de flujo por medio de dispositivos de estrangulamiento, por medio de un circuito bypass o mediante paradas continuadas. Estos métodos aumentan las pérdidas de carga o consumen energía de forma innecesaria cuando se puede solucionar mediante la instalación de variadores de frecuencia acoplados a los motores. Por lo que se recomienda la instalación de arrancadores y variadores de frecuencia en los motores para reducir los consumos y ajustar su funcionamiento a las necesidades de la planta. (Aqualitrans, 2017)

Aunque la potencia instalada en iluminación de una EDAR no es significativa en comparación con el resto de equipos instalados, si existen luminarias que funcionan un número elevado de horas por lo que aplicar tecnologías de rendimiento lumínico que gestionen su utilización e instalar nuevas lámparas o luminarias con tecnología LED, lo que puede ayudar a reducir el consumo energético en alumbrado hasta un 40% en el sistema de alumbrado. (Aqualitrans, 2017)

Otra forma de reducir el consumo energético dependiente del exterior es el de instalar una turbina o un tornillo hidrodinámico en el efluente de la EDAR si tiene disponible el desnivel suficiente para su funcionamiento. Es importante determinar bien las condiciones de caudal y salto neto para su aprovechamiento ya que la potencia eléctrica generada es proporcional a esos valores. Como ventajas de este sistema se pueden mencionar la producción de energía eléctrica estable, eficiente, barata y limpia con costes bajos de explotación y mantenimiento, aunque presenta los inconvenientes de encontrar un buen emplazamiento y el coste económico de su instalación. Un ejemplo de aplicación de este tipo de instalación en España es la EDAR de La Cartuja en Zaragoza. La planta se construyó a una cota más alta que el río para protegerla de las crecidas estacionales, por lo que se pretende aprovechar el salto de 8,50 m que existe entre la salida del agua depurada y la lámina del río Ebro. La producción de energía prevista es de 685.000 kWh/año. (González et al., 2016)

A modo de ejemplo de cuantificación de ahorro energético y económico en la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones se muestra la siguiente tabla donde se exponen las medidas de eficiencia energética resultantes de las auditorías energéticas efectuadas en las instalaciones de saneamiento de Cataluña gestionadas por la ACA. Según se muestra en la Tabla 8 mediante la implantación de las medidas de eficiencia energética propuestas se puede lograr un ahorro energético de 13.300,00 MWh/año suponiendo un ahorro

económico de 1.787.393,40 €/año, para lo cual es necesario realizar la inversión de 5.999.715,40 € con un periodo de retorno global medio de 3,36 años. (Moragas, 2018)

Tabla 8. Cuantificación económica de las medidas en eficiencia energética propuestas para las instalaciones de saneamiento gestionadas por la ACA. (Adaptada de Moradas 2018)

Medidas Eficiencia Energética	Ahorro Energético (MWh/año)	Ahorro Económico (€/año)	Inversión (€)	Periodo de retorno (años)
Instalación de convertidores	3.138,30	348.718,20	735.575,00	2,11
Optimización equipos aeración	5.403,90	550.636,00	2.424.817,00	4,40
Cambio sistema de aeración	1.430,60	272.071,30	1.162.656,00	4,27
Instalación de motores de alta eficiencia	395,20	40.290,10	146.410,80	3,63
Facturación eléctrica	67,70	157.493,10	131.232,10	0,83
Otras medidas	2.864,30	418.184,70	1.399.024,50	3,35
Totales	13.300,00	1.787.393,40	5.999.715,40	3,36

4.2 Biogás de digestión anaerobia como combustible para la generación de energía eléctrica.

El objetivo fundamental de la digestión es de estabilizar y reducir la cantidad de lodo generado en una EDAR, pero además de lograr esos objetivos se obtiene como producto un gas combustible llamado biogás, siendo su composición mayormente formada por metano (CH₄). El metano está incluido en la lista de gases de efecto invernadero según se recoge en el protocolo de Kioto y se prohíbe su emisión a la atmósfera según el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero regulado en España por la Ley 1/2005 y el RD 341/2010 traspuesta de la Directiva 2003/87/CE, por tanto se debe eliminar a través de un proceso de combustión para que sus emisiones no se contabilicen como perjudiciales para la capa de ozono.

El objetivo de realizar una explotación de las EDAR con sostenibilidad integral respecto al medio ambiente y económicamente, hace impensable desperdiciar el bio gas quemándolo en las antorchas como se venía haciendo hasta ahora. Por lo que se hace necesario aplicar la mejor tecnología disponible en el mercado para mejorar la estabilidad de producción de biogás y su calidad para obtener el máximo beneficio medioambiental y económico en su producción.

Actualmente es necesario buscar nuevos métodos de obtención de energía debido a su escasez y al importante coste económico que supone su suministro, por lo que la tendencia actual es buscar el aprovechamiento del biogás generado en los procesos de digestión anaerobia de las EDAR tanto para reducir los costes de explotación de las propias instalaciones como para ser usado como biocombustible en el exterior.

En este apartado trataremos el proceso de digestión anaerobia, siendo éste el más común en EDAR de más de 100.000 h-e, y como poder aprovecharla para la obtención de energía eléctrica y reducir los costes en la explotación de las EDAR. Gracias a este proceso se logra una importante reducción de la materia sólida y se realiza la estabilización del fango mediante la obtención de un fango digerido con reducida capacidad de generar malos olores en posteriores procesos. El fango usado en el proceso de digestión es el procedente de los tratamientos primario, en un porcentaje que fluctúa entre el 60% y el 70%, y del tratamiento biológico entre un 30% y un 40%.

El proceso de digestión anaerobia está compuesto por dos fases fundamentales, siendo la primera de ellas la hidrolización, caracterizándose por ser ácida con un pH por debajo de 6,8. En esta fase las grasas y aceites se hidrolizan dando lugar a ácidos grasos y proteínas, que al hidrolizarlas a su vez se obtienen alcoholes, amoníaco y ácidos grasos, evolucionando éstos últimos a ácidos volátiles. La segunda fase es la gasificación o metanización mediante la cual los ácidos volátiles y los alcoholes reaccionan para dar ácido acético y posteriormente metano y dióxido de carbono, que son los componentes mayoritarios del biogás, pero también se generan pequeñas cantidades de nitrógeno, sulfhídrico y oxígeno encontrándose estos componentes en proporciones entre el 1% y 5%.

Habitualmente en los digestores se trabaja con bacterias mesófilicas que viven a temperaturas comprendidas entre los 33-35°C. Trabajar con este tipo de bacterias conlleva tiempos de retención mayores en el digestor, alrededor de 20 días, pero este rango de temperaturas permite autoabastecerse energéticamente el proceso mediante la instalación de calderas de agua caliente que se alimentan con el gas producido.

El proceso de la digestión de lodos es delicado por lo que se tendrá que tener un buen control del proceso sobre parámetros físicos y químicos para la producción de biogás. A continuación, mencionaremos brevemente cada uno de ellos:

Temperatura. Es importante disponer de una población de bacterias metanogénicas estable manteniendo la temperatura constante y sin grandes fluctuaciones (0,6-1,2°C/día). Para

ello se debe asegurar un buen aislamiento del digestor y evitar pérdidas de temperatura del interior al exterior. El lodo previamente concentrado para reducir la energía calorífica necesaria, se calentará con intercambiadores de calor agua/fango para mantener la temperatura en el interior del digestor a 35°C.

Tiempo de retención. El tiempo de retención mínimo es de 10 días, ya que es el tiempo necesario para el crecimiento de las bacterias metanogénicas, aunque el tiempo de retención hidráulico suele rondar entre los 15-20 días, con una tasa de alimentación que oscila entre 1,6 y 4,8 kg/m³. Para reducir el tiempo de retención se puede pretratar el lodo antes de su entrada en el digestor mediante ultrasonidos o hidrólisis térmica.

Mezcla y homogenización del lodo. Se tiene que instalar un sistema de agitación para lograr una buena mezcla y homogenización del fango del digestor con el fango fresco que se aporta y así lograr una temperatura uniforme en todo el volumen del digestor y a la vez evitar sedimentaciones y estratificaciones indeseables dentro del digestor. Para ello se puede optar por la instalación de un agitador mecánico en el interior con el inconveniente de su limpieza, o lo que más se utiliza habitualmente, una bomba de recirculación de fango e inyectar el gas producido en la digestión a través de lanzas instaladas en la parte superior del digestor pasando previamente el gas por compresores. Este último método posee la ventaja de poder reparar las averías desde el exterior del digestor, pero representa un mayor consumo energético (entre 4-8 W/m³). (Aguiló Martos, 2017)

Para un correcto funcionamiento del digestor se deben vigilar parámetros químicos como el pH, la alcalinidad y el valor de ácidos volátiles por parte del laboratorio de la EDAR. El pH debe estar equilibrado en valores alrededor de 7 y 7,1 evitando que se vuelva ácido y que se deje de producir metano, en caso de que ocurriese se debería añadir Ca(OH)₂ para aumentar la alcalinidad a un valor cercano a 2.000 ppm. Respecto a la reducción de sólidos volátiles, suele oscilar entre 35-50%, pero cuanto mayor sea, mayor será la producción de gas. La producción de biogás se mide en m³ de biogás producido por kg de sólido volátil destruido, siendo sus valores habituales de 0,75 a 1,1 Nm³/kg. (Aguiló Martos, 2017)

Una forma de incrementar la producción de biogás y mejorar la calidad del gas producido es aplicando la tecnología de la codigestión, mediante la digestión anaerobia de lodo de depuradora urbana con dos o más sustratos que pueden tener origen variado como la industria alimentaria, farmacéutica o de la ganadería. El objetivo de la codigestión es el de introducir sustratos formados por productos orgánicos simples con elevada biodegradabilidad para incrementar la producción de biogás y así obtener una reducción de coste energético en la explotación de la EDAR. El sustrato a utilizar conviene que sea líquido, esté

tamizado y sin impropios que puedan dañar el proceso de digestión, de forma que se pueda dosificar con un ajuste fino mediante una bomba de regulación. Cabe indicar que se tiene que tener en cuenta que las conducciones y almacenamiento de biogás deben estar sobredimensionadas para poder absorber el incremento de producción de biogás que nos da valores cercanos a los $0,35 \text{ m}^3\text{NCH}_4/\text{kg DQO}$ eliminada o $0,52 \text{ Nm}^3\text{biogás}/\text{kg DQO}$ aportada por el residuo codigestión.

El biogás obtenido en el proceso de digestión tiene un PCI que se sitúa entre los valores de $5\text{-}6,5 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$, con una relación entre los poderes caloríficos superior e inferior de 0,9. El uso más habitual del biogás en una EDAR es el de su aporte a calderas de agua caliente para la calefacción del proceso de digestión y de edificios aledaños, para lo cual se necesita eliminar los condensados y ajustar la presión de alimentación por encima de 0,2 bar. Además, es necesario adecuar el gas si es rico en H_2S para evitar la corrosión del sistema. El rendimiento estándar de una caldera es del 90% llegando a obtener una energía calorífica de $4,5 \text{ kWh}/\text{m}^3$ de biogás quemado.

La tendencia actual de aprovechamiento del biogás es la de su uso para alimentar motores de combustión interna que mediante un alternador genera energía eléctrica que nos puede dar potencias eléctricas entre los 300 y 3.000 kW, siendo el rendimiento de generación de energía con biogás es de 36-38% frente al 40-42% que se obtiene con Gas Natural (Aguiló Martos, 2017). El uso de biogás en motores de combustión interna requiere un tratamiento previo para reducir la humedad relativa a valores inferiores al 30% y el contenido de H_2S por debajo de 50 ppm, además de eliminar los condensados y siloxanos presentes con el objetivo de aumentar la riqueza del gas, disminuir la corrosión y evitar la abrasión por partículas de sílice de las cámaras de combustión del motor, conllevando un mayor gasto requerido para el mantenimiento de estos equipos.

La energía térmica que desprende el motor generador se puede aprovechar para otros procesos, como el calentamiento de fangos de digestión representado en la Figura 8, mediante la instalación de circuitos de recuperación del calor procedente de los gases de escape, calor procedente de la refrigeración del bloque motor y calor procedente de la segunda etapa del intercooler, por lo que de la energía total aportada al motogenerador en forma de combustibles alrededor del 40% se transforma en energía eléctrica y como máximo un 50% se podrá recuperar en forma de energía térmica existiendo un 10% de pérdidas.

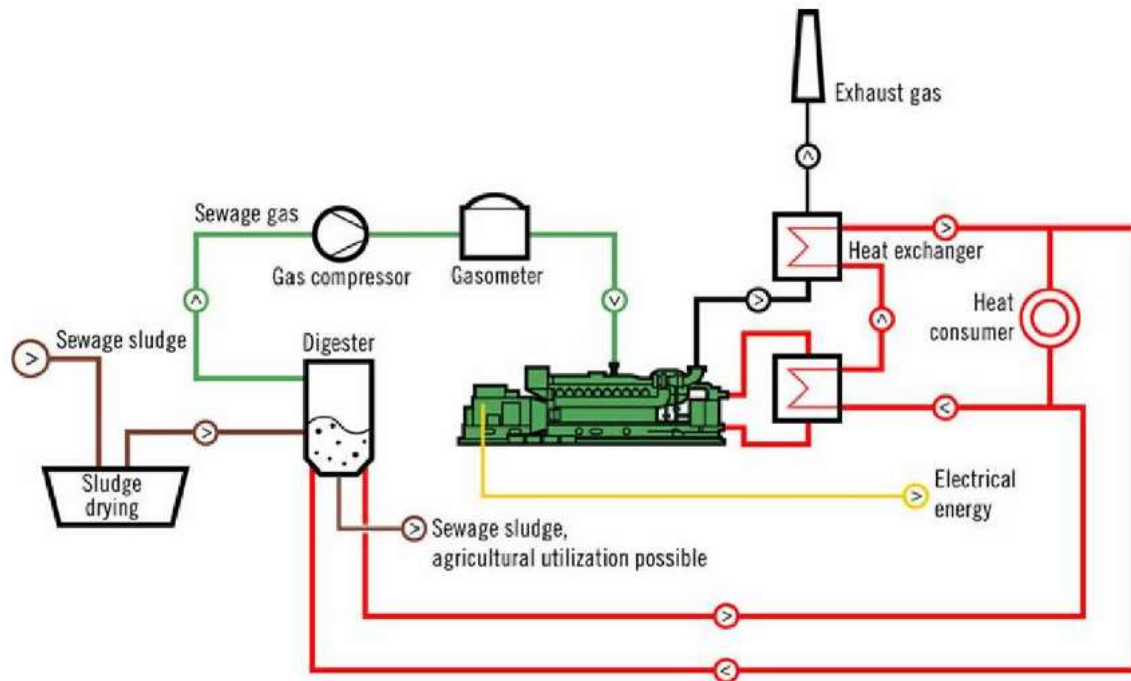


Figura 8. Esquema general de cogeneración con biogás en una EDAR. (Adaptada de Aguiló Martos 2017).

Otra tecnología disponible para generar energía eléctrica mediante el uso de biogás es el de las Microturbinas. Tiene la ventaja de ser más reducidas que los motores de combustión interna y posee menores costes de mantenimiento, aunque son especialmente sensibles a los siloxanos siendo necesaria la instalación de un filtro de carbono activo antes para asegurar su eliminación. Las microturbinas se adaptan mejor a las variaciones de demanda eléctrica de la EDAR, ya que se pueden instalar varias en paralelo y entrar en servicio según las necesidades de energía de la planta. La forma de generar energía eléctrica aplicando esta tecnología se puede explicar siguiendo el esquema de funcionamiento representado en la Figura 9. La turbina gira a altas revoluciones gracias a la expansión de los gases de combustión del biogás a alta temperatura que salen de una cámara de combustión previa. Solidario al eje de la turbina se encuentra un compresor y un generador de energía eléctrica de imanes permanentes. El compresor se encarga de introducir aire atmosférico caliente a presión en la cámara de combustión para elevar el rendimiento de la misma. El generador girará a las mismas revoluciones que la turbina, por lo que será necesario un convertidor electrónico de potencia que pasará la frecuencia de la corriente generada de 1.600 Hz a los 50 Hz de la red eléctrica española realizando a su vez el sincronismo con la red. Mediante este método se puede generar energía para potencias entre 30-300 kW. Al igual que se realizaba con los motores de combustión interna, se puede aprovechar la energía térmica desprendida para la calefacción de los fangos de digestión llegando a poder recuperarse hasta un 64% de la energía de esta forma. El rendimiento de

las turbinas es inferior al de los motores estando próximo al 30% y cuantificando en un 6% las pérdidas por rozamientos y radiación.

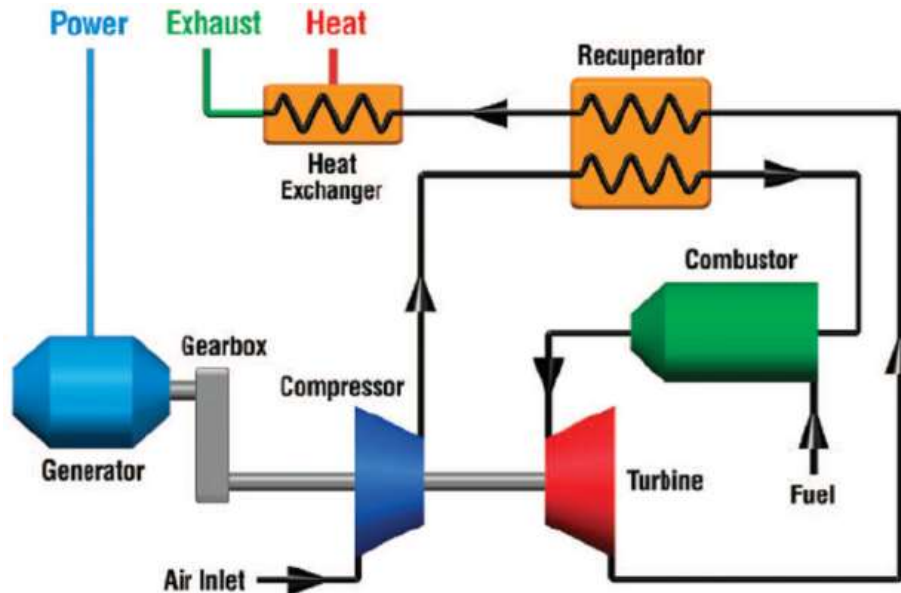


Figura 9. Esquema de funcionamiento de una microturbina. (Adaptada de Aguiló Martos 2017).

Las Células de Combustibles es otra tecnología que puede tener aplicación para generación de energía eléctrica a partir del biogás de digestión de las EDAR, aunque actualmente está poco desarrollada y únicamente se dispone de pruebas piloto debido a su alto coste económico de implantación, aunque ofrece un alto rendimiento eléctrico que varía entre el 40% y el 70%. Esta tecnología utiliza como combustible el hidrógeno o metanol obtenido mediante un proceso catalítico derivado del gas metano del biogás.

El marco normativo de la producción y comercialización de energía en régimen especial en España está regulada a través del RD Ley 1/2012, la Ley 15/2012, el RD Ley 2/2013, el RD Ley 9/2013 y la Ley 24/2013 mientras que la venta de la energía eléctrica generada está fijada por el RD 413/2014 y la Orden IET/1045/2014 por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos, como es el caso que nos ocupa de la energía eléctrica generada a partir del biogás para su venta.

La generación para autoconsumo dentro de las mismas instalaciones de depuración se regula mediante el RD 900/2015 y se aplica a toda instalación de generación que no se encuentre totalmente aislada de la red eléctrica. (Aguiló, 2018)

El marco legal existente se traduce en aumento de impuestos sobre la venta de energía, aparición de impuestos sobre el combustible utilizado para la generación de energía eléctrica y la aplicación de unos peajes de acceso a la potencia contratada y energía consumida además de cargos sobre el sistema de la potencia instalada de generación y por la energía autoconsumida. Lo que dificultaba enormemente la viabilidad de muchos proyectos de generación de energía eléctrica con biogás en EDAR que deben vender la energía que producen a precio de mercado que en muchos casos puede suponer una rentabilidad que no cubra costes de operación y mantenimiento (Repullo, 2018), como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Coste de producción de kWh eléctrico en distintos escenarios de cogeneración con biogás combustible. (Adaptada de Aguiló, 2018)

Cogeneración con biogás	Régimen de venta RD413/2014 con Ro	Régimen de venta RD413/2014 sin Ro	Régimen de autoconsumo tipo 2 RD900/2015
kWh Generados con biogás	1.000 kWh	1.000 kWh	1.000 kWh
Precio venta (Pool)	43,80 €/MWh	42,00 €/MWh	-
Retribución por operación (Ro)	25,00 €/MWh	0,00 €/MWh	-
Autoconsumos auxiliares	35 kWh	35 kWh	35 kWh
Ingresos	66,39 €	40,53 €	-
Peajes RD1544/2011	0,48 €	0,48 €	-
Peajes costes del sistema y capacidad RD900/2015 ETU1976/2016	-	-	8,13 €
Impuesto sobre la venta Ley 15/2012 (7%)	4,65€	2,84 €	-
Impuesto HC sobre biogás Ley 15/2012 Ley 38/1992 (0,65€/GJ con CAE)	7,43 €	7,43€	7,43 €
Impuesto especial eléctrico para energía generada y autoconsumida Ley 28/2014	-	-	3,45 €
Mantenimiento motor (0,02 €/kWh)	20,00 €	20,00 €	20,00 €
Margen de operación	33,80 €/MWh	9,8 €/MWh	-
Coste de producción kWh eléctrico	0,033 €/kWh	0,030 €/kWh	0,039 €/kWh

En el año 2018 el gobierno anunció la intención de suspender la aplicación del impuesto del 7% a la generación de electricidad mediante la anulación de la tasa de hidrocarburos, tasa que se le aplicaba al biogás generado en la propia EDAR (Repullo, 2018). Este cambio no propicia las nuevas inversiones en estas instalaciones por lo que se tiene que buscar nuevas alternativas a la generación eléctrico para el biogás aprovechando la propuesta del objetivo del uso del 27% de energía proveniente de fuentes renovables para el año 2030 dentro del Plan Europeo de Eficiencia Energética. (Aguiló, 2018)

4.3 Incineración del lodo de la EDAR.

La incineración del lodo deshidratado en las EDAR es una tecnología muy desarrollada que ofrece una alternativa a considerar si los fangos producidos fueran de una calidad comprometida y no cumplieren las prescripciones establecidas por la normativa relativa a la aplicación de lodos al suelo o si no fuera posible absorber toda la producción en función del mercado de compost. Por lo que si se produce un descenso de la demanda del mismo podría solventarse mediante la valorización energética de las cantidades de fangos no compostados. En estos casos se puede optar por una valorización energética del residuo mediante la gestión de estos lodos realizando incineración con recuperación energética mediante cogeneración y así ayudar al aumento el rendimiento energético global del proceso de depuración.

El RD 815/2013 de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y el desarrollo de la Ley 16/2002 de 1 de julio de prevención y control de la contaminación regula la incineración de lodo de EDAR, estableciendo las medidas a que deben ajustarse las actividades de incineración y coincineración de residuos, con la finalidad de impedir o limitar riesgos para la salud humana y los efectos negativos sobre el medio ambiente que puedan derivar de esta actividad.

La instalación de un proceso de incineración del lodo en la EDAR requiere de una inversión inicial importante, ya que se trata de una instalación compleja, como se puede observar en la Figura 10, que tiene un enfoque de proceso más industrial que los habituales en depuración que requiere de personal especializado para su operación, pero es un proceso que elimina el residuo obtenido en depuración reportando un beneficio económico gracias a la recuperación de energía calorífica del lodo y a la cogeneración de energía eléctrica. Además, otra de las características que tiene este proceso es el de obtener como único residuo la ceniza, pudiendo darle un uso posterior por otros procesos industriales e incluso por la construcción fomentando la economía circular generando la menor cantidad de residuo y añadiendo valor económico a la actividad.

El PCI del lodo deshidratado depende de la porción sólidos volátiles y del contenido en humedad que posea, como valores de referencia se pueden tomar un lodo con 30% MS su PCI varía entre 400-500 kcal/kg, mientras que un lodo con 50% MS el PCI ronda 900-1.000 kcal/kg. Para conseguir vencer la vaporización del agua que posee el lodo frente la energía liberada en la combustión de los sólidos volátiles se necesita una sequedad mínima del

lodo del 35%, considerándose por tanto lodo autotérmico, por lo que mayor sequedad tenga el lodo para incineración mejor rendimiento energético se obtendrá ya que si el PCI del lodo no es suficiente para conseguir la autotermicidad se debe añadir un combustible complementario, usando mayoritariamente el Gas Natural. (Orbe, 2017).

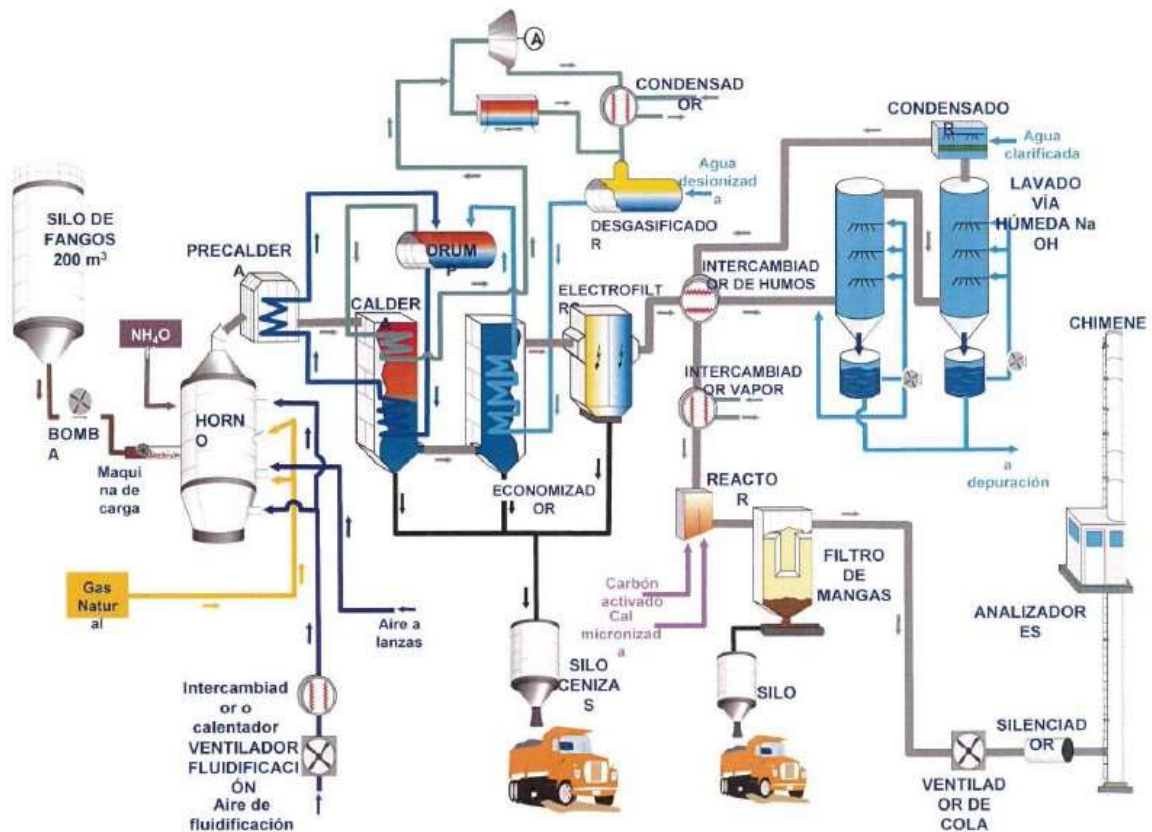


Figura 10. Esquema general del proceso de incineración de la EDAR Galindo perteneciente al Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia. (Adaptada de Orbe 2017).

El PCI del fango de EDAR se sitúa alrededor de las 3.500 kcal/kg, por lo que se puede decir que es un buen combustible, pero para que su conversión térmica sea autosostenida, como se ha indicado anteriormente, es necesario eliminar previamente una parte importante de agua mediante procesos térmicos y mecánicos por lo que supone un alto coste económico, (Elías, 2013). En la Tabla 10 se pueden ver los PCI de los distintos tipos de fango que nos podemos encontrar en una EDAR.

En el estudio de valorización de lodos realizado por el departamento de Ingeniería de Residuos de la Universitat Jaume I, (Colomer et al., 2009) se pudo ver la comparativa de las características del análisis elemental y los PCI de lodos procedentes EDAR de distintas actividades industriales. Los resultados obtenidos en la investigación hacen recomendable

la valorización energética para cinco de los lodos estudiados, aunque se recomienda realizar un secado térmico o mecánico previo a su transporte a la planta incineradora para ahorrar en el transporte. Además, como podemos observar en la Tabla 11 se presenta una comparativa de la masa necesaria de cada uno de los lodos estudiados como combustible derivado de residuos, al 10% de humedad, con la cantidad equivalente que habría que quemar de otros combustibles fósiles como la antracita y el lignito para producir 1.800 kWh de electricidad en una central térmica.

Tabla 10. Especificaciones de base seca de distintos tipos de fango de EDAR. (Adaptada de Elías, 2013)

Tipo de Fangos	% de combustible	PCI (kcal/kg)
Fango primario de EDAR	-	5.280
Fango digerido anaerobiamente	-	3.060
Primario (precipitación química)	-	3.920
Fracción grasas y espumas	88	9.280
Sólidos precipitados químicamente	57	4.150
Fracción arenosa	33	2.230
Fango sin digerir primario + secundario	50	7,0
Fango sin digerir primario + secundario	45,6	6,4

Tabla 11. Comparativa de PCI de distintos tipos de lodo de depuradora con combustibles fósiles. (Adaptada de Colomer et al, 2009)

Tipo de combustible	PCI (kcal/kg) (Los lodos analizados tienen un contenido en humedad del 10%)	Peso necesario para producir 1.800 kWh de electricidad en una central térmica con rendimiento medio del 35%
Lodo de EDAR	2.635,42	1.680,70 kg
Lodo de depuradora de industria papelera	3.115,74	1.421,60 kg
Lodo de EDAR	2.456,62	1.830,10 kg
Lodo de depuradora de industria de curtidos	3.257,47	1.359,70 kg
Lodo de depuradora de industria textil	2.334,05	1.897,70 kg
Lodo de depuradora de industria láctea	1.332,56	3.324,10 kg
Antracita	6.700,00	661,08 kg
Lignito	2.177,00	2.034,60 kg

Para la incineración del lodo deshidratado es necesario realizar la combustión del mismo por lo que se requiere un exceso de oxígeno respecto al estequiométrico aportado por la inyección de aire, que actúa como comburente, y así asegurar una completa oxidación. La temperatura de combustión está comprendida entre los 850 °C y los 1.100 °C en función

de la composición de los compuestos a tratar. Como resultado del proceso se obtendrá por un lado un volumen de gases de combustión formados por CO₂ (11%), H₂O (25%), O₂ (6%) y N₂ (57%) junto partículas (33-35 g/Nm³) y otros compuestos en menores proporciones según la composición del lodo y por otro lado residuos sólidos, compuestos fundamentalmente por escorias inertes, cenizas y residuos de sistema de depuración de los gases de combustión. (IDAE, 2011)

Existen distintos tipos de hornos para realizar la incineración de los lodos como el horno de parrillas, el horno rotativo, el horno de lechos múltiples y el horno de lecho fluidificado. Los tres primero mencionados son muy flexibles en operación frente a combustibles heterogéneos, por lo pueden tratar RSU, residuos industriales, lodos de depuradora o residuos hospitalarios. En el caso del lecho fluidizado, los residuos tienen que cumplir unas ciertas especificaciones con respecto a tamaño, forma y composición, ya que deben ser residuos con ausencia o bajo contenido en materiales inertes y metales separados, lo que lo limita para su uso en RSU directos y encuentra una buena aplicación para lodo de depuradora.

Un horno de lecho fluidizado consiste en una cámara cilíndrica y vertical, cuya parte inferior contiene el material de lecho. Éste debe ser inerte, de tamaño pequeño y esférico y capaz de fluidizar en el momento en que se le introduzca el gas para tal finalidad. Normalmente dispone de un lecho de arena donde se produce la combustión entre el lodo y el oxígeno que aporta el aire de fluidificación. En este tipo de horno el fango se introduce directamente por tubería en varios puntos de la cámara de combustión para garantizar el buen reparto en el lecho de arena. El calor y las turbulencias generadas en el lecho de arena provoca la disgregación rápida del fango en partículas finas quedando en suspensión facilitando el contacto con el oxígeno del aire de combustión y de fluidificación que se introduce en la parte inferior de la cámara de combustión por medio de un ventilador que ajusta el caudal mediante un variador de frecuencia. Antes de la aportación de aire para la fluidificación, se debe precalentar mediante el calor de los gases de combustión, el calor del vapor obtenido en la caldera o por fuentes externas del proceso. Para realizar el arranque del horno, se dispone de unos quemadores de gas que se usan hasta que se alcance la temperatura de operación.

En el interior del lecho fluidizado, tiene lugar los procesos de secado, volatilización, ignición y la combustión del lodo. Se produce un gradiente de temperaturas, de manera que, en la zona situada por encima del lecho, se dan temperaturas de entre 850 °C y 950 °C, permitiendo la retención de gases en la zona de combustión. En el interior del lecho la temperatura será menor situándose alrededor de los 650 °C. (IDAE, 2011)

La energía térmica que se desprende en la combustión del lodo se aprovecha para transmitirle calor al fluido de trabajo a presión constante en la caldera, como se puede observar en la Figura 11, en la que se representa el ciclo de Rankine típico del funcionamiento de este tipo de instalaciones. Durante el proceso 4-1 representado en la gráfica anterior, el fluido de trabajo se calienta en varias etapas hasta la temperatura de saturación pasando los gases de la combustión por una caldera de recuperación de calor a presión constante provocando el cambio de fase de estado líquido a fase vapor, obteniendo al final vapor sobrecalentado a una temperatura de 400 °C y a una presión de 40 bar. El vapor sobrecalentado a alta presión se utiliza posteriormente para la obtención de energía mecánica y eléctrica mediante la expansión isoentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador (proceso 1-2). Mediante la potencia generada en el eje de la turbina de vapor se transmite a su vez a un alternador solidario que genera energía eléctrica. Posteriormente en el condensador el fluido de trabajo transmite calor a presión constante al circuito de refrigeración, pasando en esta fase el fluido de trabajo a estado líquido saturado (proceso 2-3). Cerrando el ciclo, mediante el uso de una bomba se realiza la compresión isoentrópica del fluido de trabajo, estando ya en fase líquida, hasta el valor de presión de la caldera (proceso 3-4). El rendimiento térmico del proceso de generación de vapor de agua sobrecalentado es del orden del 80%, debido a las pérdidas caloríficas tanto en el horno como en la caldera y por la temperatura mínima de salida de los gases de combustión de la caldera de recuperación. (IDAE, 2011)

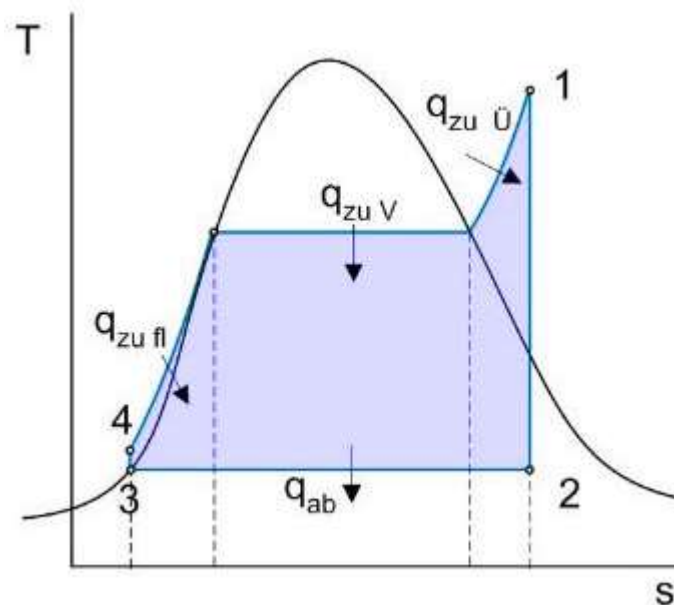


Figura 11. Ciclo de Rankine del proceso de recuperación de energía. (Adaptada de Orbe 2017).

Todos los residuos generados en el proceso de incineración de lodo se deben tratar para no dañar al medio ambiente. Uno de los residuos evidentemente derivado de la incineración son los humos generados, por lo que se debe proceder a realizar su depuración, para ello es habitual el uso de sistemas en seco como los electrofiltros, que actúan como separadores de partículas, además del lavado húmedo de gases en torres de lavado para neutralización de gases ácidos como el HCl, SO₂ y HF con NaOH pulverizado. Mediante el uso de filtros manga se puede eliminar metales pesados, Hg, VOCs, dioxinas y furanos.

Las aguas residuales procedentes de los lavados húmedos pueden tratarse en la misma EDAR, pero deberán someterse previamente a un tratamiento de efluentes del lavador antes de su entrada en los procesos habituales de la EDAR.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los residuos generados en la incineración de lodo son las cenizas de las cuales hay que gestionar su eliminación y reciclaje. Uno de los destinos habituales de la ceniza es la fabricación de cemento debido a su capacidad de fraguado, por lo que se incorpora como materia prima en la fabricación de Clinker. También se puede destinar para la fabricación de elementos prefabricados de hormigón e incluso se puede aplicar para elaborar mezclas bituminosas para firmes de carreteras (Orbe 2017).

Tabla 12. Costes de incineración del lodo en el Horno nº3 de la EDAR Galindo. (Adaptada de Orbe, 2017)

Concepto	Coste de incineración (€/t LD)	Coste de incineración (€/t MS)
Energía (Gas + Electricidad)	8,43	28,10
Reactivos	1,73	5,77
Gestión de la ceniza	1,98	6,60
Personal de Operación	7,03	23,43
Control del proceso	4,85	16,17
Mantenimiento	14,73	49,10
Conservación	0,86	2,87
Coste de incineración del lodo	39,61	132,03

En la Tabla 12 y en la Figura 12 se muestran los datos de los costes del proceso de incineración del lodo del horno nº3 en la EDAR Galindo en el periodo comprendido entre octubre de 2015 y septiembre de 2016 tras su puesta en marcha en agosto del año 2015. Se puede observar que el coste de mantenimiento pasa a ser el más grande debido a la complejidad de la instalación de incineración en el que se engloba la inspección técnica anual como el mantenimiento preventivo y correctivo. En el periodo mencionado anteriormente, los datos de consumo del horno nº3 han sido 24.657 t de lodo, 148.728 Nm³ de Gas,

6.266.992 kWh de energía eléctrica, 105,9 t de arena, 129,8 t de agua amoniacal, 581 t de hidróxido sódico, 1,5 t de carbón activo y 0,9 t de cal micronizada para obtener una producción de 1.351.304 kWh de energía eléctrica en exceso y 1.387 t de ceniza (Orbe, 2017).

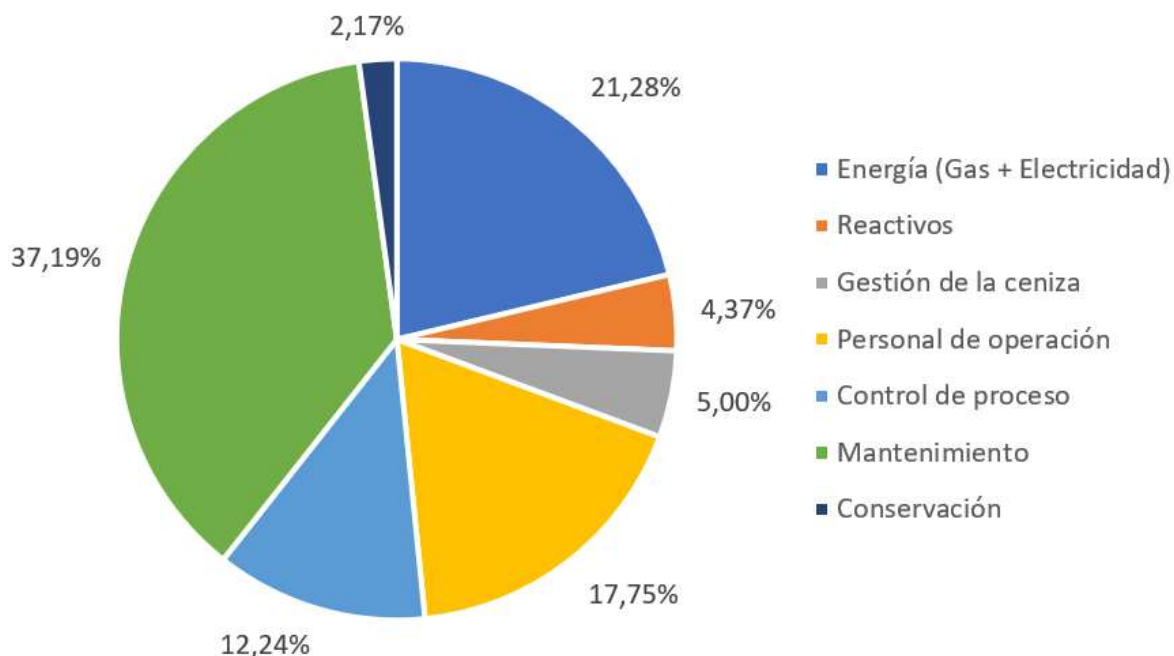


Figura 12. Costes de incineración de lodo del Horno n°3 de la EDAR Galindo. (Adaptada de Orbe 2017)

A modo de conclusión podemos indicar que mediante la valorización energética de los lodos podríamos eliminar los residuos de una forma sostenible cumpliendo con la normativa vigente y además podemos obtener un combustible con un PCI aceptable evitando la extracción de combustibles fósiles no renovables, disminuyendo por tanto la huella de carbono.

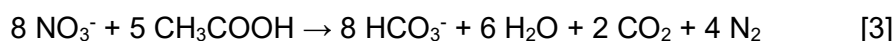
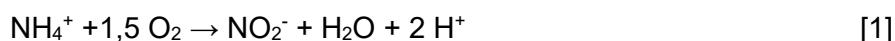
4.4 Tratamiento de los retornos de la línea de fango de la EDAR.

Como hemos comentado anteriormente la instalación de digestión anaerobia nos permite realizar la estabilización del lodo generado en el tratamiento primario y secundario de la EDAR obteniendo biogás como subproducto que podemos aprovechar para la obtención de energía eléctrica y así reducir el consumo energético de la instalación de la EDAR.

Los efluentes secundarios generados se han retornado tradicionalmente a cabecera de planta para volver a introducirlos en el proceso para su tratamiento y depuración con la

corriente principal procedente del colector, con el inconveniente que estas corrientes secundarias contienen un alto contenido en nitrógeno, pudiendo llegar a constituir hasta un 20-30% de la carga de nitrógeno influente, aumentando por tanto el contenido en nitrógeno del proceso. (Santamaría et al, 2016)

La eliminación de nutrientes para evitar la proliferación de algas o eutrofización de las aguas receptoras del efluente de las EDAR, está limitada por la Directiva Europea 91/271/CEE por lo que obliga a su eliminación en la propia EDAR. Para cumplir con la eliminación del nitrógeno presente en las aguas residuales, tradicionalmente se ha utilizado la combinación de procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación. La nitrificación consta de dos etapas representadas en las ecuaciones [1] y [2], la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitrito y la posterior oxidación de éste a nitrato realizado por bacterias autótrofas oxidantes de amonio y oxidantes de nitrito. La desnitrificación reduce el nitrato a nitrito formando nitrógeno gas en condiciones anóxicas mediante consumo de materia orgánica realizado por bacterias heterótrofas desnitrificantes según se puede comprobar en la ecuación [3]. (Vázquez et al., 2011)

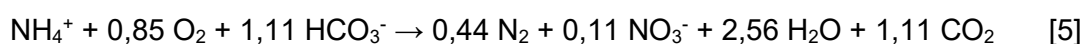
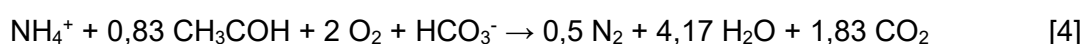


Los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación han supuesto en ocasiones un empeoramiento del rendimiento del tratamiento biológico debido a la disminución de la relación C/N, necesitando incrementar los requerimientos de aireación y los volúmenes anóxicos/aerobios además de tener que añadir una fuente de C externa en la etapa de postnitrificación, lo que conlleva un encarecimiento del proceso debido al aumento del consumo energético e incluso su inviabilidad en caso de que el espacio disponible sea reducido. (Santamaría et al., 2016)

Para dar solución a la problemática expuesta, en los últimos años se ha incrementado el uso de procesos de tratamiento de corrientes secundarias ricas en nitrógeno mediante bacterias autótrofas anaerobias anaerobic ammonium oxidation, también llamadas popularmente Anammox. (Manterola et al., 2014). El proceso Anammox fue descubierto hace aproximadamente 23 años en la Universidad Técnica de Delft (Holanda) durante la operación de una planta piloto desnitrificante, tratando aguas residuales de una planta de levaduras. Para poder aplicar el proceso Anammox a la eliminación de nitrógeno de las aguas residuales se necesitan concentraciones adecuadas de nitrito y amonio, encontrando el último

en el efluente del digestor mientras que el nitrito lo podemos obtener realizando la oxidación previa del 50% del amonio a nitrito. Este proceso se puede realizar en dos etapas, aunque lo habitual es realizarlo en una única etapa conjunta en un único reactor MBBR haciendo crecer la biomasa en forma de biopelícula sobre soportes en forma de gránulos que permiten crear una zona aerobia, en la zona en contacto con el medio aireado y una zona anóxica más interna. (Vázquez et al., 2011)

Se pueden enumerar varias ventajas del proceso de eliminación de nitrógeno autótrofa representado en la ecuación [5] mediante la combinación de nitrificación parcial y Anammox, sobre la tecnología convencional de nitrificación-desnitrificación anteriormente expuesta y representada en la ecuación [4]. Realizando la estequiometría del proceso se puede calcular y comparar varios parámetros como el consumo de oxígeno, el consumo de DQO o la emisión de CO₂ como se muestra en la Tabla 13.



Se puede observar que se produce un ahorro de casi dos tercios de oxígeno requerido, por lo que se prevé una reducción en el consumo energético equivalente para la eliminación de N, además no necesita fuente de materia orgánica externa como el metanol de la ecuación del proceso de nitrificación-desnitrificación anterior. Podemos observar que la producción de gases efecto invernadero es inferior además de que se producen menos lodos.

Tabla 13. Comparación estequiométrica del proceso de nitrificación-desnitrificación frente al proceso nitrificación parcial-Anammox. (Adaptada de Vázquez et al., 2011)

Proceso	Nitrificación-Desnitrificación	Nitrificación parcial-Anammox
Consumo de O ₂ (kg O ₂ /kg N)	4,57	1,71
Consumo de DQO (kg DQO/kg N)	2,86	0
Emisión de CO ₂ (kg CO ₂ /kg N)	5,76	3,14
Producción de lodo (kg SSV/kg N)	> 1	< 0,1

Pese a las ventajas en la aplicación de esta tecnología, se ha visto limitada su expansión debido en gran parte a la baja tasa de crecimiento de las bacterias Anammox y a su sensibilidad frente a elevadas concentraciones de oxígeno disuelto, nitritos, ácido nitroso libre y amoníaco libre. Los tiempos de puesta en marcha del proceso se han reducido gracias al

concepto BioFarm, mediante el cual se producen soportes plásticos colonizados previamente por las bacterias Anammox, reduciendo el tiempo de puesta en marcha de 18 meses a 6 meses. (Manterola et al., 2014)

La introducción de proceso con la tecnología IFAS en lugar del uso de MBBR, ha incrementado la tasa de eliminación de nitrógeno alrededor de 2,5 veces que en el proceso MBBR, mejorando la decantabilidad del fango producido con valores de IVF de 70-100 ml/g además de facilitar la eliminación de N con el arrastre de sólidos. (Santamaría et al., 2016) Todo ello conseguido con la tecnología IFAS mediante la diferenciación espacial de las poblaciones bacterianas en flóculos (bacterias heterótrofas) y biomasa en biopelícula (nitrificantes), permitiendo mayores tasas de eliminación de materia orgánica y nitrógeno. (Manterola et al., 2014) Debido a que la nitratación parcial del nitrógeno amoniacal ocurre principalmente en los floculos en suspensión, por lo que las bacterias AOB oxidan el NH_4 a NO_2 en la fase líquida del reactor, quedando la biopelícula reservada para las bacterias Anammox que consumen el NO_2 producido por las bacterias AOB junto con el exceso de NH_4 . El crecimiento de biomasa en suspensión es capaz de enriquecer la población de nitrificantes y mejorar las tasas de nitratación a niveles incluso más bajos de oxígeno disuelto que en el proceso MBBR puro, debido a la limitación en la transferencia. Todo ello permite operar el proceso a menores valores de oxígeno disuelto que en la configuración MBBR, con el consiguiente ahorro energético. (Santamaría et al., 2016)

Como conclusión al presente apartado, se puede determinar que la introducción de un proceso de tratamiento de nutrientes en las corrientes de retornos a cabecera de la línea de fangos de una EDAR puede suponer un importante ahorro en el consumo energético de la instalación debido a la disminución de las necesidades de aporte de oxígeno en el proceso además de aportar una mejoría en la calidad del efluente vertido en los cauces receptores.

5. CONCLUSIONES

El estudio energético realizado sobre la depuración de agua residual en España, nos revela el consumo de energía en dicho sector supone el que supone el 1% del consumo energético nacional que supone una potencia total requerida de 305 MW, obteniendo un consumo medio unitario de las EDAR en España de 0,53 kWh/m³.

Tras analizar la relación existente entre el consumo energético de las EDAR y los h-e que atiende, se observa que el 28 % de la potencia se consume en depuradoras de pequeño

tamaño, inferior a 5.000 h-e que dan servicio al 84% de municipios de España, mientras que otro 44% del consumo energético en depuración se realiza en instalaciones de tamaño mediano, entre 5.000 h-e y 50.000 h-e, que dan servicio a un 14 % del total de municipios de españoles. Por el contrario, el 28% de consumo eléctrico restante realiza en instalaciones que dan servicio a municipios de más de 50.000 h-e, lo que supone un 2% de los municipios de España, lo que nos permite indicar que el consumo unitario disminuye exponencialmente cuando el tamaño de las EDAR aumenta por lo que se debe tender a concentrar caudales de ARU de poblaciones menores para su tratamiento en plantas de mayor tamaño y así poder optimizar el consumo energético obtenido por m³ tratado.

De la analítica realizada a las diferentes tecnologías de depuración, podemos obtener la conclusión de que su aplicación está íntimamente relacionada con el tamaño de la EDAR y de la población a la que da servicio, además de centrar la mayor parte del consumo energético en las necesidades de oxígeno para la depuración, debido a que los sistemas de aireación son los grandes consumidores de energía eléctrica en este tipo de instalaciones. La disponibilidad de terreno nos va a marcar también el uso de unas tecnologías u otras para la depuración. La aplicación de tecnologías extensivas, como los filtros verdes, HSFV y HSFH, nos requerirán menor consumo energético debido al desarrollo de métodos naturales de depuración que requerirán mayor disponibilidad de terreno, en cambio las tecnologías intensivas, como equipos compactos SBR, MBBR o IFAS hasta procesos más complejos como FA con DA, al necesitar acelerar los procesos naturales de depuración requerirán mayor consumo energético.

Las exigencias de calidad en los VLE de los efluentes conllevan asociado un aumento del consumo energético, debido a las necesidades de eliminación de nutrientes, especialmente el N, por lo que sería conveniente que se ajustara por parte de la Administración Competente los VLE para adecuarlos al cauce receptor y así evitar el sobre coste de dimensionamiento, sobre todo en instalaciones que dan servicio a pequeñas poblaciones.

En la realización del estudio se ha observado una tendencia generalizada en la reducción del consumo energético en las EDAR, focalizándose en gran medida en la gestión y optimización del sistema de aireación del tratamiento biológico. Su importancia es debida a que representa entre el 50% y el 60% del consumo energético de una EDAR. Así mismo se destaca que el buen mantenimiento de los equipos y la renovación paulatina de los mismos por otros más eficientes en las instalaciones ayuda a minimizar el gasto de energía.

Es reseñable la reducción del coste energético en las EDAR mediante la recuperación de

la energía del ARU con el uso de tecnologías que nos ayudan a realizar el aprovechamiento del biogás generado en la digestión o mediante la incineración de lodos deshidratados para, en ambos casos, poder generar energía eléctrica y térmica que ayuda a favorecer el autoconsumo energético.

Como método conjunto de reducción de nutrientes y energía en la depuración de agua residual, se ha estudiado el proceso de tratamiento de corrientes secundarias de la línea de fango mediante el empleo de bacterias Anammox, que nos ayudan a realizar la reducción de nitrógeno en la depuración biológica añadiendo con su ayuda una importante reducción del consumo energético.

Concluyendo, cabe señalar que es necesaria la inversión en depuración por las Administraciones Competentes en España, incluyendo la construcción de nuevas instalaciones de tratamiento de aguas residuales, como la mejora y adaptación en instalaciones existentes para conseguir los objetivos de eliminación de nutrientes y de reducción de costes energéticos en los procesos, así como fomentar la I+D+i para lograr la desinfección de microcontaminantes y la posibilidad de recuperación de subproductos que ayuden a la su reutilización y disminución de la huella de carbono en el ciclo del agua.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aguiló Martos, P. (2018). *Producción y utilización del gas combustible de digestión*. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo III. CEDEX. Madrid, 2018.

Albaladejo Ruiz, A. (2013). *Parametrización del consumo energético de las depuradoras de aguas residuales de la Región de Murcia*. Alicante.

Albaladejo Ruiz, A. y Albadalejo Falcó, A. (2016). *Parametrización del consumo energético de las depuradoras de aguas residuales (levante español)*. Dyna Vol. 91 nº1, Enero-Febrero 2016, 82-87.

Albaladejo Ruiz, A., Martínez Muro, J.L. y Santos Asensi, J.M. (2015). *Parametrización del consumo energético en las depuradoras de aguas residuales urbanas de la Comunidad Valenciana*. Tecnoaqua nº15, Enero-Febrero, 55-61.

Albaladejo Ruiz, A. y Trapote Jaume, A. (2013). *Influencia de las tarifas eléctricas en los costes de operación y mantenimiento de las depuradoras de aguas residuales*. Tecnoaqua nº3, Septiembre-Octubre, 48-54.

- AQUALITRANS (2017). Guía de soluciones tecnológicas para la eficiencia de las EDAR. Proyecto AQUALITRANS. Programa de Cooperación Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020.
- Castell, D., García, M., Tormos, I., Ferrer, C., Morenilla, J.J., Bernacer, I. y Baseiro, A. (2011). *Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR. Análisis comparativo de dos tecnologías*. Tecnología del agua, nº 327, 50-56.
- Castellet Viciano, L., Hernández-Chover, V. y Hernández Sancho, F. (2016). *Modelización del coste energético del proceso de depuración considerando el envejecimiento de las instalaciones*. XLII Reunión de Estudios Regionales (AEER). International Conference on Regional Science. 16, 17 y 18 de noviembre de 2016. Facultad de CC. Económicas y Empresariales de la Universidad de Santiago de Compostela.
- Castro García, M., Martínez González, M., Moya Sánchez, N. y Serna Box, T. (2013). Sostenibilidad energética de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. II Jornadas Inicio a la Investigación de Estudiantes de la Facultad de Biología. 83-93. Universidad de Murcia. Accesible en la web: <https://www.congresos.um.es/iiefb2013/paper/view/27441/12461>
- Colomer Mendoza, F.J., Carlos Alberola, M., Herrera Prats, L., Gallardo Izquierdo, A. y Bovea, M.D. (2009). Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras. INGRES, Universitat Jaume I. Residuos nº 110, 31-37. Accesible en la web: <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/22773/32650.pdf?sequence=1>
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Accesible en la web: https://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/directiva2000_60marcoaguas_tcm30-162987.pdf
- Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE*. Diario Oficial de la Unión Europea. Accesible en la web: <https://www.boe.es/doue/2012/315/L00001-00056.pdf>
- Directiva del Consejo de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (91/271/CEE)*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Accesible en la web: <https://www.boe.es/doue/1991/135/L00040-00052.pdf>

EIONET. Accesible en la web:
http://cdr.eionet.europa.eu/es/eu/uwwt/envwscqfa/Q2017_UWWTDArt15_20180718.xls/manage_document

Estrategia Energética 2020. Accesible en la web:
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2020-energy-strategy>

Estrategia Energética 2030. Accesible en la web:
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>

Elías, X. (2013). *Secado y aprovechamiento energético de fangos de EDAR.* Tecnoaqua, nº1. Mayo-Junio, 34-44. Accesible en la web:
<https://www.tecnoaqua.es/articulos/20160601/secado-aprovechamiento-energetico-fangos-EDAR#.XNB9UuqzblU>

EUROSTAT (2019). Energy prices in 2018. Household energy prices in the EU increased compared with 2017. Newsrelease 88/2019. 21 May 2019. Accesible en la web:
<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/9802432/8-21052019-AP-EN.pdf/7f42181d-d795-4ce1-9dde-ba93fe247166>

Ferrer, J., Aguado, D., Barat, R., Serralta, J. y Lapuente, E. (2016). *Huella energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid.* Fundación Canal.

Ferrer Torregrosa, C., Olovas Masip, E., Chiva Mengod, B., Cabedo Oliver, J.M., García Ventoso, M. y Basiero Sichert, J.A. (2004). *Análisis energético de los procesos de una EDAR.* Revista Ingeniería del Agua. Accesible en la web:
<https://www.ingenieriadelaqua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/MO03rev.pdf>

García Calvo, E., Cobacho, R., Cubillo González, F., Gómez Hernández, T., Soriano Rull, A., Ruiz Moya, L., Melgosa Revillas, S. y Cler González, I. (2012). *Guía sobre hidroeficiencia energética.* Consejería de Economía y Hacienda, organización Dirección General de Industria, Energía y Minas. Comunidad de Madrid.

González González M.G., Melián Navarro A., Molina-Martínez J.M. y Ruíz Canales A. (2016). *Ahorro y eficiencia energética en estaciones depuradoras de aguas residuales.* Comunicación 83. II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola. 10-12 de febrero de 2016, Almería. España.

González González M.G., Melián Navarro A., Molina-Martínez J.M. y Ruíz Canales A. (2016). *Medidas de ahorro y eficiencia energética de carácter innovador en*

estaciones depuradoras de aguas residuales. I Jornada agua y sostenibilidad en los procesos productivos de cuencas deficitarias. 17 de marzo. Universidad de Murcia. Murcia. España.

Hardy, L y Garrido, A. (2010). *Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España*. Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales. Universidad Politécnica de Madrid.

Hardy, L; Garrido, A. & Juana, L. (2012). *Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus*. International Journal of Water Resources Development, 28(1), Special Issue: Water Policy and Management in Spain. Taylor & Francis, Leiden, the Netherlands.

Huertas, R., Marcos, C., Ibarguren, N. y Ordás, S. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Confederación Hidrográfica del Duero (CHD).

iAgua. (2014) *Eficiencia energética en las estaciones depuradoras de aguas residuales*.

iAgua nº4, 82-83. Accesible en la web:

<https://www.iagua.es/noticias/isotrol/14/11/17/eficiencia-energetica-estaciones-depuradoras-aguas-residuales>

IDAE (2010). *Estudio de prospectiva. Consumo energético en el sector del agua*. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE). Madrid.

IDAE (2011). *Plan de Energías Renovables 2011-2020*. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE). Madrid.

IDAE (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Madrid.

Jácome Burgos, J.A., del Río Cambeses, H., Torres Sánchez, D., Blanco Menéndez J. y Suarez López, J. (2012) *Análisis de criterios para la selección de sistemas de depuración de aguas residuales en el medio rural*. Cuenca fluvial y desarrollo sostenible. Río Mandeo. 381-398. Diputación de A Coruña.

Manterola, G., Otegui, L., Albizuri, J. y Zalakain, G. (2014) *Procesos avanzados de eliminación de nitrógeno: soluciones ANITA™ MOX de AnoxKaldnes*. iAgua. Accesible en la web: <https://www.iagua.es/blogs/veolia-water/procesos-avanzados-de-eliminacion-de-nitrogeno-soluciones-anita%E2%84%A2-mox-de-anoxkaldnes>

Metcalf, L., Eddy, H.P. & Tchobanoglous, G. (2003). *Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse*. Mc Graw Hill.

- Moliner i Rafa, M. (2018). *Secado térmico de lodo de depuración*. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo III. CEDEX. Madrid, 2018.
- Moragas Bouyat, L. (2018). *Aspectos económicos de implantación y explotación de una EDAR*. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo IV. CEDEX. Madrid, 2018.
- ONU (2017) *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas Residuales El Recurso Desaprovechado*. Paris. Accesible en la web: <https://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Orbe Arrabategui, H. (2018). *La incineración de lodo procedente de la depuración de aguas residuales*. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo III. CEDEX. Madrid, 2018.
- Ortega de Miguel, E., Ferrer Medina, Y., Salas Rodríguez, J.J., Aragón Cruz, C. y Real Jiménez, A. (2012). *Manual para la implantación de sistemas de depuración para pequeñas poblaciones*. Elaborado en conjunto por CEDEX y CENTA. Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015*. Accesible en la web: https://www.mapama.gob.es/es/agua/planes-y-estrategias/PlanNacionalCalidadAguas_tcm30-279844.pdf
- Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (1995-2005)*. Accesible en la web: <https://www.boe.es/boe/dias/1995/05/12/pdfs/A13808-13824.pdf>
- del Río Marrero, I. (2018). *Esquema de una EDAR. Pretratamientos*. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo I. CEDEX. Madrid, 2018.
- Real Decreto 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía*. Boletín Oficial del Estado número 38 de 13 de febrero de 2016. Accesible en la web: <https://www.boe.es/boe/dias/2016/02/13/pdfs/BOE-A-2016-1460.pdf>

- Red Eléctrica de España (2018). *Avance Informe Sistema Eléctrico Español*. Accesible en la web: <https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/informe-anual/avance-del-informe-del-sistema-electrico-espanol-2018>
- Repullo, F. (2018). *El biogás en España vislumbra nuevos escenarios*. Retema, 29/10/2018. Accesible en la web: <https://www.retema.es/noticia/el-biogas-en-espana-vislumbra-nuevos-escenarios-CKOiy>
- Santamaria, A., Albizuri, J., Nussbaum, B., Zhao, H. y Lemaire, R. (2016). *Procesos avanzados de eliminación de nitrógeno: Anita Mox con configuraciones IFAS*. Tecnoaqua, 17, Enero-Febrero, 46-54.
- Simón, P. (2018). *Sistemas de control y optimización del consumo energético en EDAR*. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo IV. CEDEX. Madrid, 2018.
- Simón P., Lardín C. y Abellán M. (2012). *Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia*. Ingeniería Civil, 168, 93-112.
- Simón P., Lardín C., Cacho C. y García M. (2015). *Transferencia de oxígeno: evaluación rápida de la eficiencia de los sistemas de aireación*. Tecnoaqua, nº15. Septiembre-October, 92-101.
- Vázquez, J.R., González, R., Rogalla, F., Mosquera, A., Campos, J.L. y Méndez, R. (2011). *Eliminación sostenible de nitrógeno de la corriente de retorno de EDAR's*. Retema, nº151. Mayo-Junio, 24-32.
- Wagner, W. (2018). *Reactores anaeróbicos para el tratamiento de aguas residuales urbanas*. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo II. CEDEX. Madrid, 2018.