



CONSUMO DE ENERGÍA PARA LA DEPURACIÓN DE AGUA EN ESPAÑA

ENERGY CONSUMPTION FOR WATER PURIFICATION IN SPAIN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D^a IRIS IRENE CERDÁ JAÉN

Dirigido por:

Cat. D. ELOY GARCÍA CALVO (UAH)

Alcalá de Henares, a 23 de mayo de 2019

AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo Fin de Máster ha sido realizado bajo la supervisión de D. Eloy García Calvo, a quien deseo expresar mi más profundo agradecimiento por su dedicación y ayuda.

A mis compañeras y amigas: Gissela, Indira, Maura, Simone y María; gracias por vuestro compañerismo y por haberos cruzado en mi camino.

A mi madre Leonor y a mi hermano Gabriel por vuestro apoyo incondicional.

A mi tía María Jesús por tu paciencia.

A mi abuela Emiliana, gracias por tanto.

ÍNDICE

1. RESUMEN	9
2. INTRODUCCIÓN	9
3. OBJETIVOS	11
4. METODOLOGÍA.....	11
4.1. Investigación bibliográfica	11
4.2. Estudio técnico comparativo.....	12
5. LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN ESPAÑA EN NÚMEROS	12
5.1. Volumen de agua residual tratada en España.....	12
5.2. Coste unitario del saneamiento del agua residual en España.....	14
5.3. Consumo energético global en la depuración urbana en España	17
5.4. Consumo energético de la depuración urbana en función del tamaño del municipio y de las tecnologías empleadas.....	19
6. MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LA DEPURACIÓN URBANA... 27	
6.1. Gestión y administración pública.....	27
6.2. Tecnológicas	29
6.3. Soluciones para pequeños núcleos de población y/o depuradoras de pequeño tamaño.....	31
6.4. Conclusiones de las medidas de ahorro propuestas.....	32
7. EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS EN PEQUEÑAS POBLACIONES.....	33
8. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS Y TAMAÑO DE MUNICIPIO	36
8.1. Diferente tamaño de población, misma tecnología empleada	36
8.1.1. Datos de partida del influente	37
8.1.2. Dotación.....	37
8.1.3. Caudales.....	38
8.1.4. Composición del agua residual.....	38

8.1.5. Habitantes equivalentes	39
8.1.6. Caracterización del influente.....	40
8.2. Diseño del sistema de biodiscos:	42
8.3. Cálculo de la potencia del motor	45
9. CONCLUSIONES.....	48
10. BIBLIOGRAFÍA.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tarifas medias correspondientes a los años 2010 y 2015. A partir de datos de AEAS y AGA, 2010.....	16
Tabla 2. Evaluación tendencial del consumo de energía. Adaptado de IDAE, 2010.	19
Tabla 3. Predicciones de ahorros y objetivos de consumos de energía en abastecimiento y depuración de agua. Adaptado de PNAEE, 2017.....	19
Tabla 4. Potencia unitaria (W/h.e.) de los principales elementos de una planta depuradora, en la Línea de agua diferenciada por tamaño de municipio. Tomado de IDAE, 2010.....	21
Tabla 5. Potencia unitaria (W/h.e.) de los principales elementos de una planta depuradora, en la Línea de fango diferenciada por tamaño de municipio. Tomado de IDAE, 2010.	22
Tabla 6. Potencias por habitante (W/h.e.) de una planta depuradora en función de su tamaño. Tomado de IDAE, 2010.	23
Tabla 7. Consumos urbanos (l/hab·día) según los usos y tamaño de la población. Tomado de Martín et al., 2006.	38
Tabla 8. Valores típicos de los principales contaminantes del agua residual urbana. A partir de datos de Metcalf y Eddy, 2000.....	39
Tabla 9. Datos de diseño: dotación, caudal y h.e.....	39
Tabla 10. Rendimientos de eliminación en cada etapa. A partir de datos de Huertas y Marcos, 2012.	41
Tabla 11. Concentraciones de DBO ₅ y SS en cada proceso de la EDAR.....	41

Tabla 12. Datos de partida de la población de 500 habitantes para el diseño de los biodiscos. (1) Dato tomado de Huertas y Marcos (2012). (2) Dato tomado de Catalán Lafuente (1997). (3) Datos tomados de Isla de Juana (2005).....	42
Tabla 13. Resultados del diseño de los biodiscos para una población de 500 habitantes.....	44
Tabla 14. Datos de partida de la población de 2.000 habitantes para el diseño de los biodiscos. (1) Datos tomados de Isla de Juana (2005).....	45
Tabla 15. Resultados del diseño de los biodiscos para una población de 2.000 habitantes.....	45
Tabla 16. Parámetros de partida de cálculo del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 500 habitantes. (1) Datos tomados de Isla de Juana (2005).	46
Tabla 17. Potencia del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 500 habitantes.....	46
Tabla 18. Parámetros de partida de cálculo del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 2.000 habitantes. (1) Datos tomados de Isla de Juana (2005).	47
Tabla 19. Potencia del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 2.000 habitantes.....	47
Tabla 20. Consumo energético obtenido.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Volumen de aguas residuales tratadas en España. Unidades de volumen en m ³ /día. Tomado de www.ine.es	13
Figura 2. Volumen de aguas residuales tratadas en España. Unidades m ³ /habitante/día. Tomado de www.ine.es	14
Figura 3. Importe facturado por alcantarillado y depuración en España. Unidades en miles de euros. Tomado de www.ine.es	15
Figura 4. Coste de suministro, alcantarillado y depuración en España. Unidades en €/m ³ . Tomado de www.ine.es	16
Figura 5. Porcentaje de población conectada a depuradora y tipo de depuración. Tomado de (www.eea.europa.eu)	18

Figura 6. Consumo de la depuración de agua residual en España. Tomado de IDAE, 2010.	18
Figura 7. Potencia requerida por unidad de tratamiento para distintos tamaños de EDAR expresado en W/h.e.; Tomado de Fundación Canal, 2017.	24
Figura 8. Distribución de la potencia total requerida por tamaño de municipio (%) y número de depuradoras en cada tramo. Tomado de IDAE, 2010.	26
Figura 9. Esquema secuencial de tratamientos. Tomado de Huertas y Marcos, 2012.	40

ABREVIATURAS

ACV: Análisis del Ciclo de Vida.

AEAS: Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento.

AGA: Asociación Española de Empresas Gestoras de los Servicios de Agua Urbana.

DPH: Dominio Público Hidráulico.

DSEAR: Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización.

EDAR: Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.

EEA: European Environment Agency.

h.e.: Habitante Equivalente.

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

INE: Instituto Nacional de Estadística.

PAAEE: Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020.

PLC: Control Lógico Programable.

PNAEE: Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020.

PNCA: Plan Nacional de Calidad de las Aguas 2007-2015.

SBR: Reactor Biológico Secuencial.

TNC: Tecnologías no Convencionales.

1. RESUMEN

En el presente proyecto de revisión bibliográfica, se analizan los aspectos fundamentales relativos al consumo energético que representa el sector de saneamiento del agua residual urbana en España. Para ello, se comienza con un análisis del consumo total del agua abastecida (suministro) y posteriormente tratada (saneamiento) en nuestro país, evaluando su coste y las tendencias en cuanto a consumos y ahorros que se estiman en el futuro.

Se prosigue con el análisis del consumo energético nacional que supone la depuración de la totalidad de las aguas residuales urbanas en España, y su consiguiente comparativa en cuanto a tamaño de población. Se abordarán también, las medidas que favorecerían un importante ahorro energético en el sector.

A continuación, el estudio se centrará, por las particularidades que se exponen en el presente proyecto, en la depuración en los pequeños núcleos de población.

Por último, se llevará a cabo un análisis comparativo entre dos núcleos urbanos de diferente tamaño de población mediante el dimensionado de un sistema de tratamiento biológico de biodiscos, además del desempeño energético que este proceso conlleva.

2. INTRODUCCIÓN

Debido al aumento de la población mundial, con su consiguiente incremento de la demanda de energía y del volumen de agua para satisfacer tanto su uso doméstico, industrial y agrario, la optimización y el ahorro energético en las estaciones depuradoras de aguas residuales es de vital importancia. Se estima que la demanda de abastecimiento de agua para uso humano se encuentra entre los 160 y los 180 litros por persona y día, y que el aumento de exigencia sobre la calidad y depuración de las aguas residuales ha provocado un incremento de la actividad en el sector de la depuración del agua residual urbana (PNAEE, 2017).

La relación entre el agua y la energía es tan importante como compleja. Esta complejidad no solo se expresa porque la producción de energía requiere agua y

la gestión del agua requiere energía, sino también por la relación entre la energía y el agua con el clima y con el cambio climático (IDAE, 2010).

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), realizó en el 2010 un estudio en el que analizó el vínculo entre el agua y la energía en nuestro país, y el papel que la ciencia y la tecnología pueden tener para reducir la energía consumida en el ciclo del agua (IDAE, 2010).

Así mismo, en el *Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020* (PNAEE), que contiene medidas dirigidas a mejorar la eficiencia energética, y los ahorros de energía conseguidos o previstos en la *Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética*, identificaron mediante una auditoría energética integral de las instalaciones de abastecimiento y depuración de aguas las medidas y actuaciones de ahorro y mejora de la eficiencia energética en esas infraestructuras.

En ambos estudios se obtuvo como resultado de la estimación, que la totalidad de la depuración del agua residual en España (4.450 hm³/año) implicaba el 1% del consumo energético nacional, en forma de energía eléctrica, siendo el coste energético el mayor factor de coste de explotación (IDAE, 2010; PNAEE, 2017).

Se valoró las diferencias en cuanto al consumo energético en depuradoras pequeñas, en grandes y en instalaciones de construcción más reciente; Se observó que las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) están experimentando una mejora de su eficiencia por innovación tecnológica y por la agrupación de caudales hacia instalaciones mancomunadas, además que en el caso de las depuradoras pequeñas, sus consumos son elevados al carecer de sistemas de control de la aireación y al estar sus equipos electromecánicos sobredimensionados para satisfacer un diseño robusto de instalación. El consumo en estas depuradoras más pequeñas se estima en 50 kWh/habitantes-año, siendo en las depuradoras de mayor tamaño de unos 20-30 kWh/habitantes-año al ser instalaciones más optimizadas en cuanto al diseño y al dimensionado. Se estima que la optimización energética de las depuradoras existentes puede significar una reducción en el consumo del 17,5% (IDAE, 2010).

3. OBJETIVOS

El presente trabajo pretende abordar y conocer el sector de la depuración de las aguas residuales urbanas en España, mediante el estudio de sus características fundamentales.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Análisis de los consumos, económico, energético y el volumen total que representa el sector del saneamiento en España.
- Profundizar en el consumo energético que supone la depuración de aguas residuales urbanas en España, conociendo sus deficiencias y posibles opciones de mejora y ahorro.
- La realización de un estudio tecnológico comparativo para comprobar si se cumplen las premisas que se exponen y desarrollan en el presente trabajo.

4. METODOLOGÍA

4.1. Investigación bibliográfica

Se ha realizado una búsqueda sistemática de información mediante el aprovechamiento, en mayor medida, de los recursos electrónicos disponibles.

1ª Fase: con el objeto de contextualizar de forma global el sector del agua en España, he recurrido a la base de datos que ofrecen los siguientes portales de información científica y accesible a todo público que así lo desee:

- Instituto Nacional de Estadística (INE): iniciando la búsqueda en el apartado *Agricultura y medio ambiente* → *Agua*. En el buscador que ofrece el portal INEbase se buscó mediante el término “agua” que dio acceso a la “Estadística sobre suministro y saneamiento del agua”.
- European Environment Agency (EEA): En el portal de la Agencia Europea del Medio Ambiente se accedió a la información desde el apartado “Datos y mapas”, a continuación en el buscador se introdujo la palabra “Spain” para encontrar información y recursos gráficos de nuestro país.

2ª Fase: partiendo de la información extraída del documento inicial aportado como guía por parte del tutor del presente proyecto (IDAE, 2010) se analizó dicha información y se extrajeron interesantes conclusiones que darían inicio a los siguientes apartados: identificación de la problemática que presenta la depuración en pequeños núcleos de población y particularmente el tratamiento secundario.

4.2. Estudio técnico comparativo

Tras el planteamiento de la necesidad de realizar un estudio técnico comparativo relativo a la depuración en pequeños núcleos de población, se emplearon como documentos guía: “Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población: mejora de la calidad de los efluentes” y “Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones”. El análisis de dichos documentos, de su sistema y orden de diseño y de los valores característicos que ahí se reflejan para cada parámetro, sirvieron como base para el inicio del cálculo y dimensionado del sistema de biodiscos mediante la metodología y cálculos que se reflejan en el Manual de “Proyectos de plantas de tratamiento de aguas: aguas de proceso, residuales y de refrigeración”.

5. LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN ESPAÑA EN NÚMEROS

5.1. Volumen de agua residual tratada en España

La demanda en el subsector del agua de recogida y tratamiento de aguas residuales ha experimentado en últimos años un notable incremento, fruto del crecimiento urbano y por el aumento en cuanto a las exigencias en calidad del efluente vertido, tal como se comentó previamente, la demanda de abastecimiento de agua para el uso humano se estima entre los 160 y 180 litros por persona y día (PNAEE, 2017). Para justificar y censar este incremento, el INE recoge y elabora registros y cómputos acerca de la recogida y abastecimiento diario de aguas residuales en España, estos datos son de libre acceso y consulta. Puede apreciarse en la Figura 1 el notable aumento del volumen de agua residual registrada a nivel nacional, se explica por la aplicación del *Real Decreto 606/2003 de 23 de mayo* (BOE, 2003) por el que se deben autorizar y computar los vertidos realizados al dominio público hidráulico. En los años posteriores al 2004 y ya adentrados en la crisis económica, pueden apreciarse descensos acusados en los años 2007 y 2008 y la posterior recuperación y estabilización de la curva; a partir del año 2014 también se aprecia un leve descenso provocado por la mayor concienciación en el uso responsable del agua de la ciudadanía, mejora en los sistemas de riego y mayor eficiencia de los electrodomésticos (PWC, 2018).

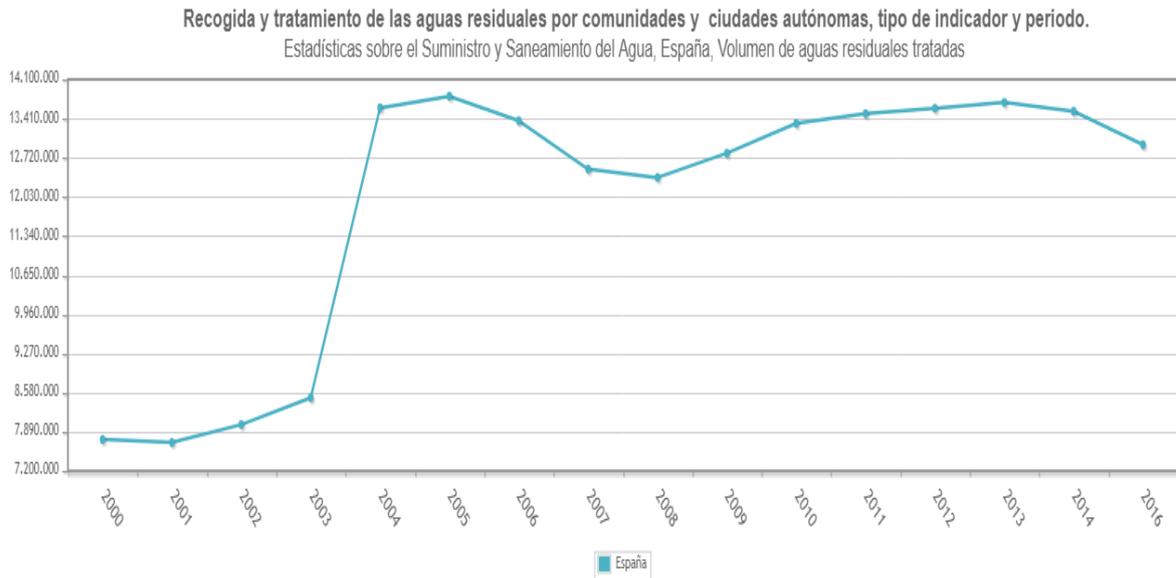


Figura 1. Volumen de aguas residuales tratadas en España. Unidades de volumen en m³/día. Tomado de www.ine.es

Los datos más actualizados encontrados respecto al volumen autorizado de vertido a Dominio Público Hidráulico (DPH) referente a tipología de vertido *urbano* se corresponden con los de 2017 (www.mitego.gob.es), siendo la población en España a 1 de julio de 2017 de 46.532.869 habitantes (www.ine.es), el vertido por persona correspondería al siguiente:

$$\frac{3.081.089.164 \text{ m}^3}{46.532.869 \text{ personas} \cdot 365 \text{ días}} = 0,181 \frac{\text{m}^3}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 181 \text{ litros/persona} \cdot \text{día}$$

En la Figura 2 que se muestra a continuación, puede observarse cómo en el periodo temporal 1996-2003 el volumen de aguas residuales tratadas cuantificadas en m³/habitante/día es un valor muy similar a la dotación diaria de 160-180 litros por habitante y día, la diferencia entre ambos valores puede explicarse por registros mal cuantificados o por las pérdidas en la red de saneamiento. Las pérdidas en las redes de abastecimiento son un indicador de su ineficiencia. Pueden dividirse en pérdidas reales (roturas, fugas, averías) y en pérdidas aparentes como pueden ser el agua no registrada, errores de medida, fraudes, etc. En el año 2006, estas pérdidas ascendieron al 16,7% del volumen de agua introducido en las redes de abastecimiento (INE, 2008).

Cabe señalar que, a partir del año 2006, no se publica el dato del 'volumen total de agua vertida' ya que el cuestionario de la encuesta se ha modificado para incluir el destino final de las aguas residuales depuradas y se ha procedido a incorporar en estos apartados las aguas residuales no procedentes de la red de distribución (pluviales, extracción propia, u otras procedencias), mientras que hasta la estadística del año 2003 inclusive, se recogía exclusivamente la información sobre las aguas residuales procedentes de la misma. (www.ine.es).

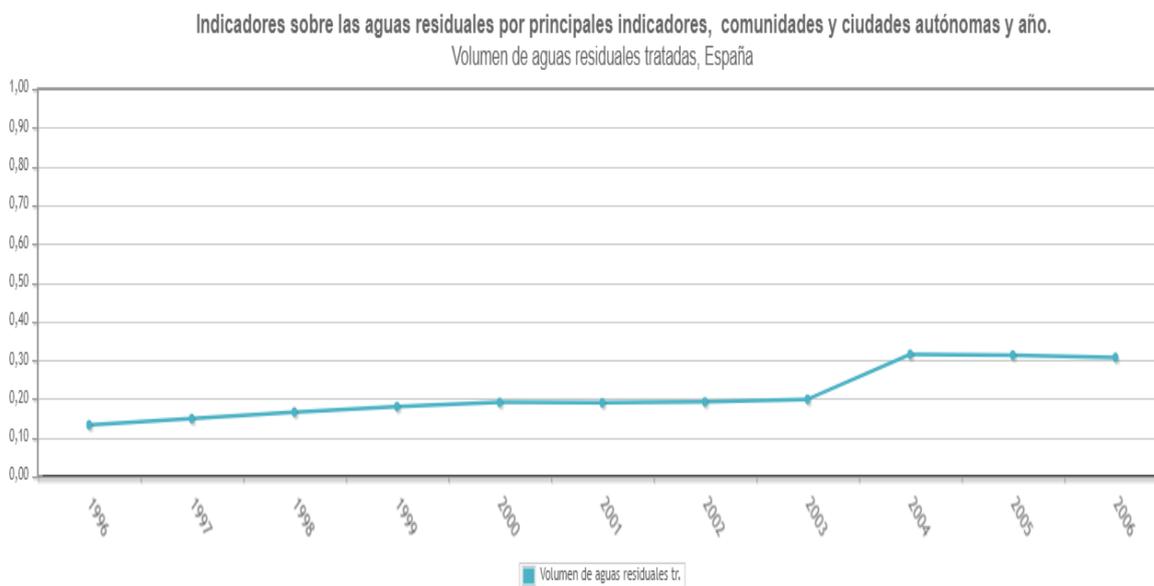


Figura 2. Volumen de aguas residuales tratadas en España. Unidades m³/habitante/día. Tomado de www.ine.es

5.2. Coste unitario del saneamiento del agua residual en España

Los servicios de alcantarillado y depuración se denominan comúnmente saneamiento. Consisten en la retirada de las aguas residuales de los hogares, oficinas, industrias y cualquier instalación donde se produzcan y su transporte mediante el sistema de alcantarillado hasta llegar a los colectores interceptores. Estos canalizan la entrega a las EDARs, donde se trata el agua residual para reintroducirla, ya depurada, en los cauces naturales en cumpliendo de las exigencias de vertido que marque la legislación (AEAS, 2017).

Toda esa infraestructura de saneamiento supone un elevado coste para las administraciones públicas y para los ciudadanos, para ello, el INE recopila información y elabora estadísticas acerca del importe facturado por alcantarillado

y depuración del agua, como aparece reflejado en la Figura 3. A partir del año de referencia 2004 se producen algunas variaciones en los datos de los apartados de recogida y tratamiento de aguas residuales debido a un cambio metodológico, con objeto de adaptarse a las necesidades de los usuarios de estas estadísticas y a las recomendaciones internacionales. El INE procedió a incorporar en estos apartados las aguas residuales no procedentes de la red de distribución (pluviales, extracción propia, u otras procedencias), mientras que hasta la estadística del año 2003 inclusive, se recogía exclusivamente la información sobre las aguas residuales procedentes de la misma. Hasta el año 2006 inclusive, el 'importe total de los gastos de inversión' no incluía los relativos a la recogida de aguas residuales (alcantarillado), por ello se observa el elevado incremento del importe del 2006 al 2007 (www.ine.es).

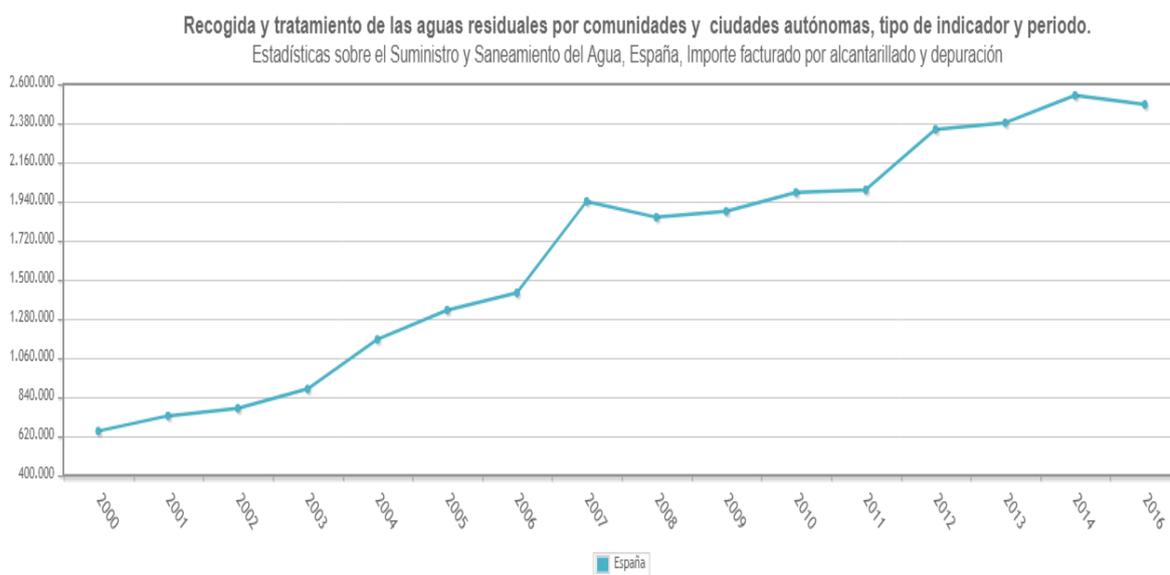


Figura 3. Importe facturado por alcantarillado y depuración en España. Unidades en miles de euros. Tomado de www.ine.es

El coste unitario del agua se define como el cociente entre los importes abonados por el suministro de agua más los importes abonados en concepto de alcantarillado, depuración y cánones de saneamiento o vertido, y el volumen de agua registrada y distribuida a los usuarios (INE, 2018). En la Figura 4 puede observarse que del coste unitario total, el correspondiente al alcantarillado y depuración es menor.

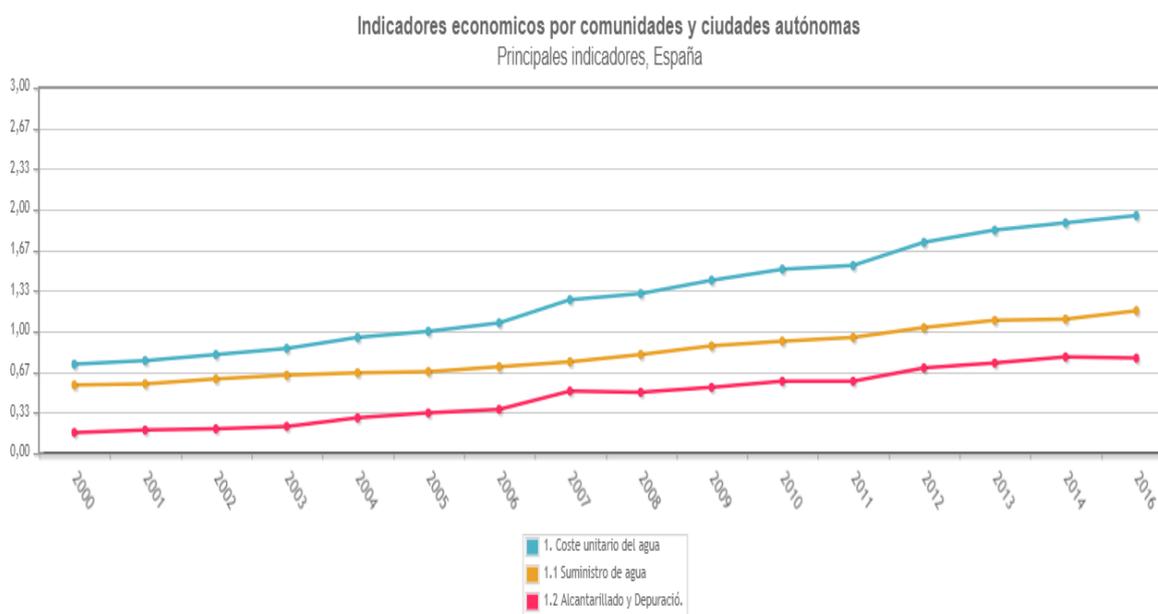


Figura 4. Coste de suministro, alcantarillado y depuración en España. Unidades en €/m³. Tomado de www.ine.es

Los datos más recientes encontrados corresponden al 2015 y pertenecen a una encuesta y posterior estudio tarifario realizado por la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) y la Asociación Española de Empresas Gestoras de los Servicios de Agua Urbana (AGA). Los datos que obtienen permiten estimar el precio pagado por los usuarios del servicio del ciclo integral del agua (abastecimiento y saneamiento) y el segmentado por tipo de uso (doméstico y no doméstico). Las tarifas medias se exponen en la Tabla 1, en ella se muestran los correspondientes al abastecimiento y saneamiento (vertido y depuración), representando el 42% del precio de la tarifa abonada por el usuario, el coste del saneamiento doméstico (AEAS, 2017).

Tabla 1. Tarifas medias correspondientes a los años 2010 y 2015. A partir de datos de AEAS y AGA, 2010.

Año	Abastecimiento (€/m ³)	Saneamiento (€/m ³)
2010	0,93	0,63
2015	1,02	0,75

El aumento tarifario nos evidencia la importancia de alcanzar los objetivos medioambientales y la sostenibilidad económica (Morcillo, 2017).

5.3. Consumo energético global en la depuración urbana en España

El agua es un recurso vital que utilizamos cada día. Para que los consumidores finales dispongan de un servicio de abastecimiento y saneamiento de agua garantizado es necesario consumir energía. La cantidad de energía necesaria para llevar a cabo las operaciones necesarias para distribuirla al consumidor final depende mucho de las condiciones locales, de la calidad del agua (Hardy Y Garrido, 2010) y de su correcto manejo para su vertido en las condiciones adecuadas mediante la aplicación de los tratamientos necesarios.

En el subsector del abastecimiento y depuración de agua se ha experimentado un incremento del consumo de energía no sólo por el crecimiento poblacional sino también por el derivado de las exigencias sobre calidad y depuración de las aguas residuales contenidas en la *Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas* y el consiguiente *Plan Nacional de Saneamiento y Depuración*, que se ha traducido en la entrada en servicio de numerosas EDARs a lo largo de la geografía española. En concreto, en 2010 estaban en servicio en España 2.950 EDAR para el tratamiento de las aguas de origen urbano, 600 más que las existentes en 2004, lo que permite estimar que al menos el 95% de la población española está conectada a algún sistema de depuración (PNAEE, 2017). Dichos datos difieren a los encontrados más actuales, aportados por la encuesta realizada por AEAS y AGA 2016 en la que el número de EDARs en España en el año 2016 es de 2041 unidades (Morcillo, 2017).

En la Figura 5 que se muestra a continuación, aparece desglosado por países la proporción de población conectada a sistemas de saneamiento, y al tipo de tratamiento (primario, secundario, etc) (AEAS, 2017). Se evidencia el avance tecnológico de nuestro país, por el aumento de la proporción del uso y aplicación del tratamiento terciario.

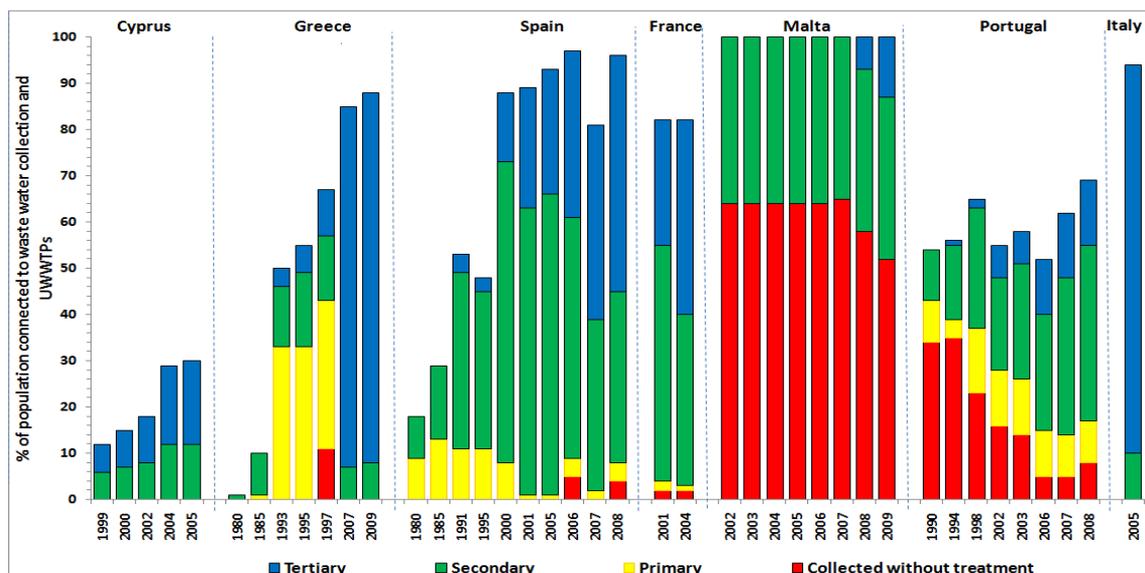


Figura 5. Porcentaje de población conectada a depuradora y tipo de depuración. Tomado de (www.eea.europa.eu)

El consumo de energía de los sistemas de abastecimiento de agua a las poblaciones y, sobre todo, de las depuradoras de aguas residuales depende de la tecnología empleada, del tamaño de la población abastecida y de los límites de vertido y depuración aplicables. Se puede estimar un consumo de electricidad en depuración para el conjunto de las instalaciones en 2010 de 2.225 GWh/año. Por otra parte, en captación, abastecimiento y distribución de agua urbana se ha estimado un consumo de electricidad en bombeo de otros 447 GWh/año, lo que totaliza para este subsector una cifra de 2.672 GWh/año (PNAEE, 2017).

El resultado final del estudio realizado por IDAE (2010) de consumos para la depuración de las aguas residuales urbanas en España además del ahorro potencial se muestra en la Figura 6.

	Consumo unitario		TOTAL ESPAÑA		Potencial de ahorro (%)
	(W/h.e)	kWh/(m ³ ·año)	Potencia (MW)	Consumo actual GWh/año	
Consumo actual	5,6	49	305	2.672	-
Potencial ahorro	0,98	8,6	53	468	17,5%

Figura 6. Consumo de la depuración de agua residual en España. Tomado de IDAE, 2010.

Se tasó un consumo medio de energía en depuración de 0,5 kWh/m³ en el año 2010. Analizando el sector para el periodo 2011-2020 se estimó un crecimiento continuo en el consumo tal como se muestra en la Tabla 2, motivado por la consolidación de los procesos y por la entrada en servicio de nuevas infraestructuras de depuración de agua (PNAEE, 2017).

Tabla 2. Evaluación tendencial del consumo de energía. Adaptado de IDAE, 2010.

Años	2010	2020
Abastecimiento y depuración de agua	230 ktep	238 ktep

Sin embargo, este tendencial de crecimiento en el consumo no se alcanzará por los ahorros que se producirán en el sector como resultado de las medidas directas promovidas desde las administraciones públicas (PAAEE, 2011) y por los cambios tecnológicos. En base a los ahorros, la previsión del consumo de energía para la presente década se refleja en la Tabla 3.

Tabla 3. Predicciones de ahorros y objetivos de consumos de energía en abastecimiento y depuración de agua. Adaptado de PNAEE, 2017.

Años	2010	2016	2020
Ahorros de energía final (ktep)	2	11	35
Objetivos de consumo de energía (ktep)	230	225	203

El *Plan Nacional de Calidad de las Aguas 2007-2015* previó la construcción de unas 1.000 nuevas EDARs, en parte para ampliación y modernización de depuradoras ya operativas, lo que hace estimar para la presente década una mejora del 15% en el consumo de energía de estas instalaciones, lo que significará reducir la demanda de energía eléctrica en 400 GWh/año (PAAEE, 2011).

5.4. Consumo energético de la depuración urbana en función del tamaño del municipio y de las tecnologías empleadas

El consumo energético de las depuradoras depende de la tecnología empleada. Ello a su vez, está determinado por los límites de vertido aplicables y por el tamaño de la población abastecida. Existe una gran diferencia entre la concepción

tecnológica de las depuradoras pequeñas y grandes. Las depuradoras pequeñas y de medio tamaño suelen carecer de sistemas de control de aireación. Además el diseño, basado en la robustez mecánica, implica un cierto sobredimensionamiento de equipos electromecánicos. Por ello, el consumo unitario en tales depuradores es relativamente elevado. En grandes depuradoras, se optimiza el diseño, el dimensionamiento y el control para lograr consumos energéticos más ajustados. En tales plantas, se pueden obtener valores de 20 -30 kWh/ (h.e. ·año), mientras que se estima que la media para el parque de depuradoras en España está en torno a los 50 kWh/ (h.e. ·año), siendo la depuración de la totalidad de las aguas residuales de España el 1% del consumo energético nacional (IDAE, 2010).

En la encuesta realizada por IDAE (2010) recopilaron información de 617 depuradoras de forma que consiguieron elaborar un estudio representativo del parque de EDARs urbanas en España y en el que analizaron las relaciones entre tipo de tratamiento y tamaño de la depuradora y que resultan de gran interés para la caracterización de las instalaciones en el conjunto nacional.

Las unidades de tratamiento estudiadas, diferenciando entre la línea de agua y de fangos, han sido:

- Línea de agua: desbaste, bombeo, desarenado, fosa séptica, fosa séptica + filtro biológico, depuradora compacta, biodiscos, reactor biológico secuencial (SBR), aireación prolongada (desnitrificación), tratamiento primario, fangos activados convencionales (desnitrificación).
- Línea de fangos: eliminación directa, espesado, deshidratación, digestión anaerobia (IDAE, 2010).
- Las potencias unitarias, expresadas en W/h.e., de los principales elementos de una planta depuradora, diferenciadas por tamaño de municipio se muestran en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Potencia unitaria (W/h.e.) de los principales elementos de una planta depuradora, en la Línea de agua diferenciada por tamaño de municipio. Tomado de IDAE, 2010.

Tamaño del municipio	<100	101 500	501 1.000	1.001 2.000	2.001 3.000	3.001 5.000	5.001 10.000	10.001 20.000	20.001 30.000	30.001 50.000	50.001 100.000	100.001 500.000	< 500.001
Bombeo	0,06	0,10	0,10	0,13	0,13	0,13	0,16	0,18	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
Motores y bombas desbaste	1,80	2,20	2,1	1,00	0,70	0,70	0,40	0,20	0,20	0,15	0,12	0,12	0,11
Motores y bombas desarenado	s.d.	s.d.	2,50	1,20	0,80	0,80	0,40	0,25	0,25	0,25	0,16	0,07	0,07
Motores y bombas primario	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	0,01	0,01
Compacto aeración extendida	30,0	20,0	6,70	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Aireación biodiscos	s.d.	3,30	1,80	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Aireación extendida mecánica	s.d.	s.d.	s.d.	9,50	6,70	6,50	6,20	5,00	4,70	4,70	4,70	s.d.	s.d.
Aireación extendida con soplantes	s.d.	s.d.	s.d.	9,50	6,70	6,50	6,20	5,00	2,88	2,88	2,88	s.d.	s.d.
Fangos activos	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	1,80	1,80
Aireación FA con desnitrificación	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	3,45	2,16	2,16
Agitación y retorno de fangos FA	s.d.	s.d.	5,70	1,60	1,30	2,00	1,80	1,50	0,90	0,80	0,40	0,30	0,30
Agitación y retorno de fangos desnitrificación	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	0,48	0,36	s.d.
Decantación y bombeo fangos	s.d.	s.d.	s.d.	0,40	0,32	0,25	0,25	0,14	0,12	0,08	0,05	0,01	0,01
Tratamiento terciario	s.d.	s.d.	s.d.	0,52	0,42	0,33	0,33	0,18	0,16	0,10	0,07	0,01	0,01

Tabla 5. Potencia unitaria (W/h.e.) de los principales elementos de una planta depuradora, en la Línea de fango diferenciada por tamaño de municipio. Tomado de IDAE, 2010.

Tamaño del municipio	<100	101 500	501 1.000	1.001 2.000	2.001 3.000	3.001 5.000	5.001 10.000	10.001 20.000	20.001 30.000	30.001 50.000	50.001 100.000	100.001 500.000	< 500.001
Espesador gravitacional	s.d.	0,20	0,10	0,05	0,03	0,02	0,15	0,10	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Espesador mecánico	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	0,20	0,15	0,10	0,09	0,02
Eliminación directa (húmedo)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Deshidratación sacos filtrantes	s.d.	s.d.	0,40	0,32	0,22	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Centrifugado	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	0,60	0,60	0,75	0,50	0,40	0,25	0,15	0,15
Digestión anaerobia y cogeneración	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	-0,60	-0,60

Se pone en evidencia, con la información aportada en las Tablas 4 y 5, que los tratamientos se adaptan y se implantan dependiendo del tamaño de la población abastecida, por ejemplo: los biodiscos se instalan para pequeñas depuradoras, en cambio, los fangos activos para instalaciones de mayor capacidad; además se aprecia que en las grandes depuradoras se optimiza el diseño y los consumos energéticos son más reducidos conforme aumenta el tamaño de la instalación.

A continuación, en la Tabla 6, se muestran las potencias totales obtenidas en función del tamaño del municipio; los resultados obtenidos en el estudio elaborado por IDAE (2010), aportan conclusiones muy claras en cuanto al sobredimensionamiento y robustez excesivos en instalaciones para municipios de pequeño tamaño. Siendo la media nacional de la potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas de 5,6 W/h.e. que equivale a un consumo energético de 49 kWh/ (h.e. ·año) o de 0,67 kWh/m³.

Tabla 6. Potencias por habitante (W/h.e.) de una planta depuradora en función de su tamaño. Tomado de IDAE, 2010.

Tamaño del municipio (h.e.)	Potencia (W/h.e.)
<100	6,4
101-500	19,0
501-1.000	15,8
1001-2.000	14,0
2.001-3.000	10,1
3.001-5.000	10,5
5.001-10.000	10,0
10.001-20.000	8,1
20.001-30.000	5,6
30.001-50.000	5,1
50.001-100.000	4,4
100.000-500.000	2,5
>500.000	2,4
Media	5,6

El cómputo global de la potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales en España es de 305 MW (IDAE, 2010).

El desbaste, desarenado y en mayor medida el tratamiento secundario del agua residual representan para las depuradoras de pequeños municipios los mayores desempeños energéticos de todo el proceso; a partir de las instalaciones de 30.000 h.e. se comienzan a reducir y ajustar en mayor medida los consumos.

Destaco el elevado gasto energético que supone el desbaste en instalaciones de pequeño tamaño, siendo unos tratamientos simples y de poca tecnicidad.

Evidentemente, el tratamiento secundario, con su elevada relevancia en el ciclo completo de la depuración del agua es el mayor consumidor de energía, por ello, sería conveniente su optimización y adecuada adaptación e implantación. En depuradoras de municipios de gran tamaño los costes del tratamiento secundario representan prácticamente la totalidad del consumo energético, aun así, el diseño más cuidado y técnico permiten obtener unos desempeños energéticos muy ajustados. En la Figura 7 se muestra la valoración en cuanto a los consumos dependiendo del tamaño de la población.

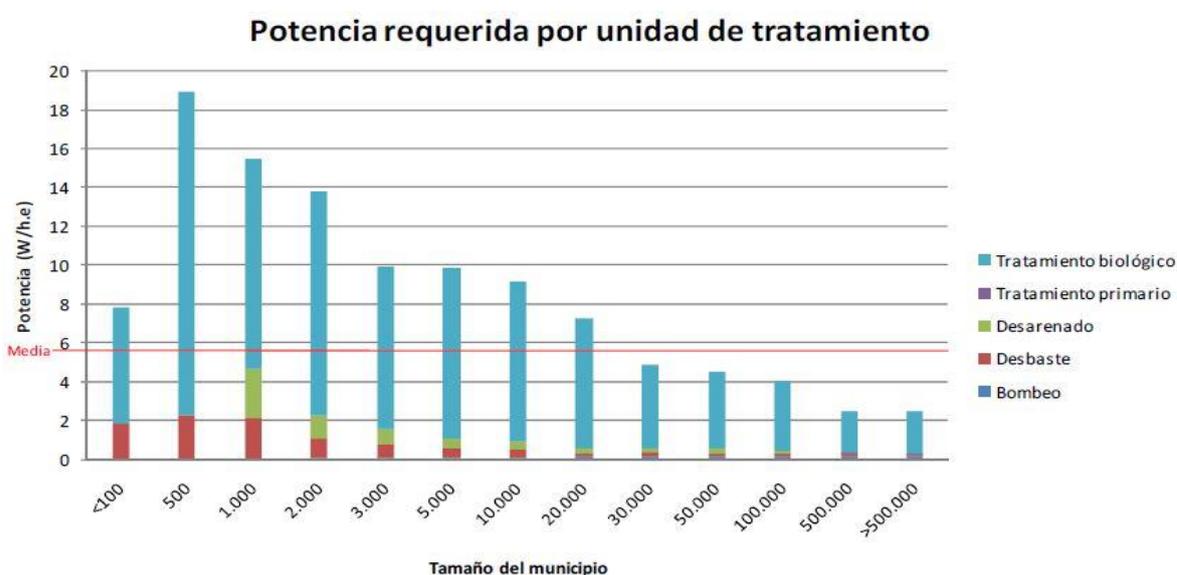


Figura 7. Potencia requerida por unidad de tratamiento para distintos tamaños de EDAR expresado en W/h.e.; Tomado de Fundación Canal, 2017.

A la vista de estos resultados, el estudio IDAE (2010) realiza unas interesantes consideraciones:

- Las depuradoras para poblaciones de menos de 100 h.e. normalmente se operan por gravedad y gran parte carece de depuración biológica aerobia, por ello, el consumo por habitante en este rango es relativamente bajo.
- En depuradoras pequeñas el peso del desbaste y desarenado en el consumo energético de la depuradora es significativamente elevado. La explicación es que el correcto funcionamiento de estos equipos requiere de una potencia mínima de los motores y bombas, con el fin de evitar el mal funcionamiento debido a atascos y obstrucciones (robustez). El diseño, por tanto, no guarda una relación directa con el tamaño de la instalación, sino que se parte de una potencia mínima.
- En depuradoras pequeñas, la aireación se suele sobredimensionar. Ello se debe por una parte a los requisitos de robustez, similares a los del pretratamiento; por otra, se emplea el sistema de aireación para la doble función de aireación y mezcla, a pesar de ser energéticamente ineficiente, además de que las depuradoras pequeñas y de tamaño medio suelen carecer de sistemas de control de aireación.
- El diseño de una depuradora se basa exclusivamente en parámetros de proceso y de ingeniería mecánica (robustez). No se realiza una evaluación coste/beneficio energético.
- Las depuradoras grandes tienen un consumo más ajustado ya que cuentan con sistemas de control de aireación. Además, se ha superado el umbral mínimo de potencia para conferir el carácter de robustez al equipamiento mecánico, por lo que su dimensionamiento está determinado por parámetros mecánicos e hidráulicos acordes con la capacidad de la planta.
- Una parte importante del consumo energético de las EDAR se produce en el proceso biológico de eliminación de materia orgánica, el cual tiene lugar por vía aerobia mediante el aporte de oxígeno a los reactores. Este aporte se puede realizar con distintas tecnologías, las cuales tienen distintas eficiencias y rendimientos, por lo que según la tecnología adoptada en una determinada EDAR el consumo final para una misma eliminación de materia orgánica puede ser mayor o menor (Fundación Canal, 2017).

El estudio y los reveladores resultados obtenidos, ponen en evidencia las ineficiencias energéticas y la necesidad de mejora, modernización y optimización de los tratamientos implantados en las depuradoras de aguas residuales urbanas. La siguiente Figura 8 representa el reparto de los 305 MW de potencia global consumida por la depuración de las aguas residuales de España dependiendo del tamaño del municipio. Las observaciones extraídas por el estudio realizado por IDAE (2010) de la Figura 8 son:

- Se observa que el 28% de la potencia total está instalada en municipios de menos de 5.000 habitantes que conforman el 84% del número total de municipios. En esta franja además, se encuentran las depuradoras con equipamiento sobredimensionado por razones de robustez y simplificación del proceso.
- El 44% de la potencia está instalada en depuradoras de 5.000–50.000 habitantes, con el 14% del número de municipios. Estas depuradoras generalmente carecen de sistemas de control de aireación, lo que se traduce en elevados consumos.
- El 28% restante de la potencia instalada se encuentra en depuradoras grandes (<50.000 h.e.), con consumos unitarios más ajustados (IDAE, 2010).

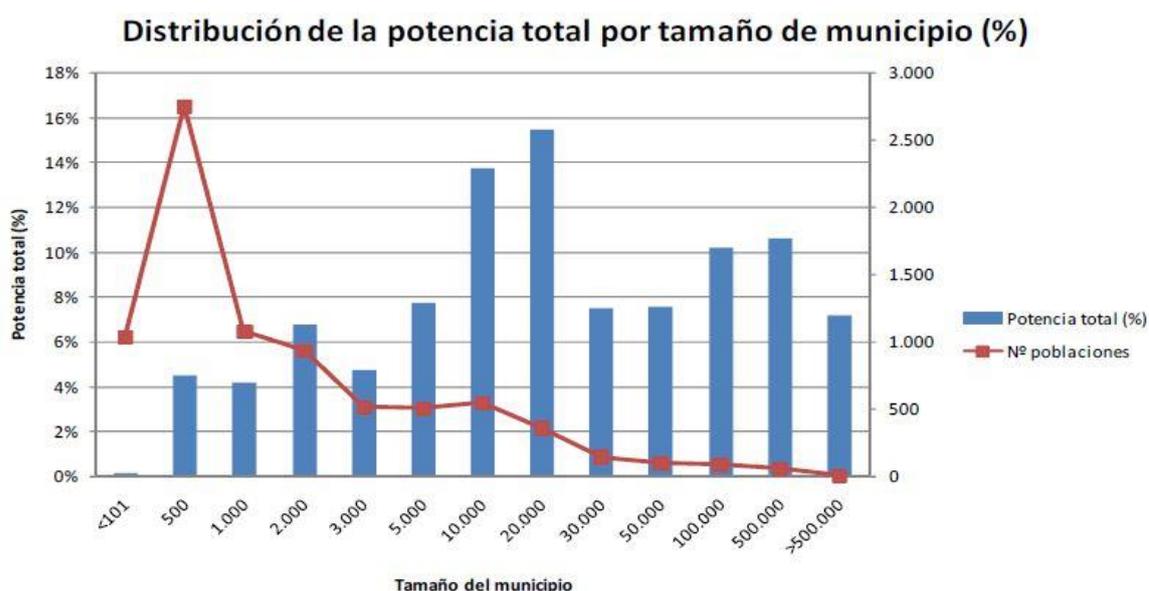


Figura 8. Distribución de la potencia total requerida por tamaño de municipio (%) y número de depuradoras en cada tramo. Tomado de IDAE, 2010.

6. MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LA DEPURACIÓN URBANA

Siendo la demanda de agua creciente a lo largo de los años, la gestión en el suministro de este recurso y de sus tratamientos de potabilización y depuración plantean a las administraciones públicas una espiral creciente de costes, siendo el reto lograr una gestión que contribuya a un desarrollo sostenible (www.idae.es).

A nivel nacional, el *Plan de Saneamiento y Depuración de 1995* como el *Plan de Calidad de Aguas: Saneamiento y Depuración del 2010*, supusieron un importante esfuerzo en la inversión de infraestructuras para cumplir la *Directiva 91/271/CEE* y en el caso del segundo plan mencionado, para alcanzar los objetivos ambientales fijados en la *Directiva Marco del Agua* (www.iagua.es).

El actual *Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización 2018* (DSEAR), cuyos objetivos son entre otros: garantizar una gestión sostenible basada en el ciclo integral del agua, prestar especial atención al aprovechamiento de las aguas residuales para avanzar en economía circular, eficiencia energética, favorecer la reutilización y en materia de generación de energía por ejemplo, el aprovechamiento de los lodos de la depuradora (www.miteco.gob.es).

Para perseguir los objetivos específicos del *Plan DSEAR* como para progresar en el cumplimiento de la *Directiva Marco del Agua*, es necesaria la implantación de medidas de ahorro y eficiencia energética.

El estudio llevado a cabo por IDAE (2010) puso en relieve las deficiencias en materia de eficiencia y competitividad sufridas por el sector de la depuración de aguas residuales urbanas, además especifican medidas concretas con las que puede obtenerse un ahorro energético considerable con la optimización de las depuradoras existentes; junto con el estudio de Fundación Canal (2017) se han recopilado las medidas propuestas por sendos estudios para el ahorro energético:

6.1. Gestión y administración pública

- Mejora administrativa y organizativa: crear las condiciones adecuadas para estimular la inversión en medidas de ahorro energético, como por ejemplo, mediante la creación de incentivos económicos; que la administración pública incluya en los pliegos de concesión el control del proceso y la

eficiencia energética de las plantas. En la actualidad estos aspectos no se controlan, por lo que facilitaría que se cambie la concepción de operación de las depuradoras, no limitándose simplemente al cumplimiento de los límites de vertido.

- Alargar los plazos de las concesiones de explotación para permitir que el concesionario pueda amortizar las inversiones que acometa y modificar los contratos de concesión para que aplicar las medidas de optimización energética se convierta en un incentivo económico para el concesionario. En la actualidad los contratos de explotación son de 2-4 años, este plazo es demasiado corto para que un explotador pueda rentabilizar iniciativas propias destinadas a la mejora de la gestión.
- Desarrollo de conceptos de gestión de aguas basados en el saneamiento y reutilización descentralizados: mediante la descentralización y separación en la fuente de las aguas grises (ducha, lavamanos, agua de lavado), aguas negras (inodoros) y aguas pluviales, se pretende ahorrar energía y reutilizar el agua. Estos conceptos crean el marco para el desarrollo de nuevas tecnologías enfocadas a la recuperación de nutrientes, la generación de energía, la reutilización del agua y el aprovechamiento de la materia orgánica.
- Introducción de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en la toma de decisiones: permite identificar y mitigar aspectos de gestión relevantes para los consumos energéticos. Introducir sistemáticamente la evaluación energética en procesos de toma de decisiones o de diseño contribuiría a mejorar la eficiencia energética.
- Desarrollar una calificación de eficiencia hídrica: la reducción del consumo de agua en equipos domésticos implica reducción del consumo energético, tanto directamente, como en transporte y depuración, por tener aguas residuales más concentradas.
- Gestión tarifaria de la deshidratación del fango: se recomienda analizar la gestión del proceso de deshidratación para realizar en la medida de lo posible el proceso aprovechando el periodo más económico que abarca todos los días desde las 24h hasta las 8h. En este análisis se debe considerar el ahorro que supone realizar el proceso de deshidratación

durante los periodos de tarificación más económicos y las implicaciones que tiene el desplazamiento horario del proceso en el funcionamiento global de la EDAR (disponibilidad y coste de personal, almacenamiento y evacuación del fango...).

6.2. Tecnológicas

- En el campo de la investigación: detectar flujos, condiciones de proceso o reacciones bioquímicas o microbiológicas que puedan mejorar los procesos.
- Desarrollo de métodos de diseños de depuradoras basados en la optimización del recurso energético y el control de procesos: el diseño de depuradoras para situaciones de gran variación de caudal y carga, como las que se producen en áreas turísticas, requiere asumir muchos compromisos (condiciones de proceso, tamaño de instalaciones, eficiencia energética) y métodos de diseño para su optimización.
- Aprovechamiento del 100% del biogás de la digestión para generación eléctrica: en muchas depuradoras solamente se aprovecha parte del biogás generado en la digestión. Posibles medidas para aprovechar la totalidad del biogás requieren flexibilizar el sistema de aprovechamiento energético. Algunas posibles medidas consisten en: instalación de un mayor número de motores de gas, instalación de un gasómetro, fluctuación de la temperatura de la digestión entre 32°C y 36 °C para actuar como búfer de calor.
- Instalación de un sistema de cogeneración en las EDARs con digestión anaerobia: con esta medida el porcentaje de ahorro estimado se encuentra entre un 30% y 60% del consumo total de la EDAR.
- Sistemas de control/temporizadores de agitación: Dado el importante porcentaje de consumo energético que representa el sistema de agitación se podría analizar la implementación de un sistema de control para temporizarla. Este sistema de control pondría en marcha y apagaría los agitadores de forma periódica y debería tener en cuenta la velocidad de sedimentación del fango para evitar que durante el periodo de paro de los agitadores sedimentara en exceso dicho fango. El porcentaje de ahorro en

el consumo energético esperable con esta medida es de entre un 10 y un 20%, siendo proporcional al porcentaje del tiempo que se puedan mantener parados los agitadores sin afectar al buen funcionamiento del proceso.

- Instalación de variadores de frecuencia: para reducir el consumo energético se podría ajustar los caudales de recirculación interna al caudal de tratamiento. Para ello sería necesaria la instalación de un sistema de control que modificara los caudales de recirculación interna en función del caudal de entrada a la planta o ajustar dichos caudales en función de las necesidades de desnitrificación existentes. Para la instalación del sistema de control para modificar los caudales de recirculación interna de acuerdo al caudal de entrada, sería necesaria la instalación de caudalímetros en las recirculaciones, la instalación de variadores de frecuencia en las bombas que no dispongan de ellos y la programación del sistema de control. Con la instalación de este sistema sería esperable una reducción del orden del 25% en el consumo energético de las bombas de recirculación interna. De todas formas, conviene señalar que el porcentaje de reducción del consumo energético respecto del total de la EDAR que se podría conseguir con este sistema de control sería bastante bajo, teniendo en cuenta que el consumo energético de las bombas de recirculación interna representa únicamente el 3% del consumo energético total de la EDAR.
- Implantación de sistemas de control por sensores para regular el nivel de ventilación en naves cerradas mediante el ajuste del caudal de extracción del sistema de desodorización: la mayoría de las depuradoras cuentan con sistemas de tratamiento del aire para el control de olores. Estos sistemas que mueven grandes volúmenes de aire, suelen operar por ventilación fija y sobredimensionada para garantizar la calidad del aire tratada. Para reducir el consumo energético, se deberían colocar medidores de ácido sulfhídrico y en función de las mediciones obtenidas modificar el caudal de aire tratado. Además, dada la mayor densidad del sulfhídrico respecto del aire, se puede reducir el caudal de aire extraído, y con ello el consumo energético, realizando la extracción del aire de los edificios de pretratamiento, deshidratación y espesamiento por la parte inferior. Implantando estas medidas se podría conseguir una reducción del consumo energético de entre un 30 y un 40%.

- Cambiar la tipología de aireación para mejorar la eficiencia energética: el cambio de aireación superficial a aireación por burbujas, puede significar un ahorro energético, hasta el 100%, por dos vías: mayor rendimiento del sistema de aireación y mayores posibilidades de control del proceso. Puede requerir la instalación de mezcladores.
- Implantar equipos de aireación más eficientes: el cambio de los aireadores superficiales por otros de alto rendimiento puede significar un ahorro energético importante, entre 25 – 90%. Compresores de alto rendimiento pueden tener un 10 - 15% más de rendimiento. Mezcladores de tipo hiperboloide ofrecen un rendimiento del 20 - 55% superior que los convencionales.
- Separación de la función de aireación y agitación en reactores de fangos activados: el diseño del sistema de aireación de reactores de fangos activados tradicionalmente se implantaba para la doble función de oxigenar y mantener los fangos activados en suspensión. La consecuencia es que la regulación de la aireación está condicionada a las necesidades de mezcla. Dado que los sistemas de aireación no son muy eficientes para la mezcla, en régimen de aireación extendida se incurre en un gasto excesivo de energía. La medida de ahorro consistiría en introducir sistemas separados para mezcla y oxigenación.

6.3. Soluciones para pequeños núcleos de población y/o depuradoras de pequeño tamaño.

- Implantar medidas de optimización en instalaciones medianas y pequeñas, cuyo uso está ampliamente extendido en depuradoras de mayor tamaño y que no requieren de grandes modificaciones en el proceso ni de grandes costes de inversión, y con los cuales, se aprecian mejoras a corto plazo:
 - Instalación del control de procesos por sensores: implantar sistemas de control de aireación por sensores que controlen parámetros de proceso (oxígeno, redox, amonio, nitrato). Requiere de sistemas de aireación de potencia variable o intermitente. Según la configuración, pueden obtenerse importantes reducciones en el consumo energético del 25 al 55%.

- Empleo de la lógica difusa en el control de procesos: la carga de una depuradora responde a procesos cíclicos (día-noche) o patrones conocidos (lluvia-seco). Mientras que controles convencionales por control lógico programable (PLC) responden a puntos fijos de arranque y parada. El control del proceso mediante lógica difusa permite la anticipación a las nuevas condiciones de operación. El ahorro energético se estima en un 20%.
- Optimización de los bombeos: en ocasiones, los bombeos no operan en su punto óptimo de rendimiento. Mediante el uso de sistemas de control de frecuencia puede optimizarse el bombeo en función del caudal y presión (caudal de entrada) o parámetros de proceso (caudal de retorno de fangos). La optimización de rendimientos y regulación del caudal permite ajustar el consumo eléctrico. La instalación de un sistema de control avanzado para el bombeo de cabecera proporcionaría un porcentaje de ahorro estimado entre un 10 y 15% del consumo del sistema de bombeo. En el caso del bombeo de elevación del agua del decantador primario hasta el tratamiento biológico, la instalación de una bomba de menor caudal dotada de variador de frecuencia supondría un ahorro energético de entre un 10% y un 20%.
- Implantación y desarrollo de sistemas descentralizados de depuración: sistemas naturales y de pequeña escala se prestan para integrarlos en sistemas de gestión de agua a nivel local, urbanizaciones, barrios y pequeños municipios. Promueven soluciones de bajo consumo energético al no depender de una oxigenación artificial.

6.4. Conclusiones de las medidas de ahorro propuestas

- Lograr la máxima optimización energética de las instalaciones debe ser prioritario a la hora de la toma de decisiones a nivel organizativo y de gestión.
- Se requiere una mejora de la capacitación tecnológica, estímulo a la investigación, formación de los trabajadores y la necesidad de incentivos por parte de la administración (IDAE, 2010).

- Es necesario detectar las deficiencias en la explotación de la planta y desarrollar un correcto mantenimiento de la misma para adaptar los procesos y subsanar los fallos operativos.
- Es necesaria la optimización energética de las depuradoras pequeñas.
- Las oportunidades de ahorro energético en el sector del agua no se encuentran únicamente en la parte tecnológica, sino también en la parte administrativa y de organización de la gestión. Las condiciones de los contratos de concesión no incentivan e incluso impiden iniciativas en materia de control del proceso y de la eficiencia energética de las plantas. Ello permite que las plantas sean operadas de forma energéticamente ineficiente, a la vez que cumplan administrativamente su cometido. Se recomienda la introducción de concesiones a más largo plazo y la introducción de condiciones que convierten la optimización energética en un incentivo económico para el concesionario (IDAE, 2010).

7. EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS EN PEQUEÑAS POBLACIONES

Como se puede comprobar en este estudio, el tratamiento de aguas residuales de pequeñas comunidades rurales o áreas urbanas descentralizadas es motivo de gran preocupación debido a los altos costes, tanto de inversión como de mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales. De hecho, hoy en día, todavía hay muchas áreas rurales que vierten sus aguas residuales sin cumplir con la *Directiva 2000/60/CE*. Por este motivo, se requieren tecnologías de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales en estas áreas (www.madrimasd.org).

Según la *Directiva 91/271/CEE* (DOCE, 2001) se considera pequeña aglomeración urbana, aquella inferior a 2.000 h.e. excluyendo las viviendas aisladas o poblaciones muy pequeñas que no dispongan de sistemas colectores para aguas residuales. En el caso de España, que cuenta con más de 8.000 municipios, en el 72% de éstos su población es inferior a los 2.000 habitantes, elevándose al 47 % los municipios que cuentan con menos de 500 habitantes

(www.iagua.es); dichas condiciones, crean un difícil contexto para extender y establecer sistemas de depuración a todos los municipios de nuestro país.

A causa de la dispersión poblacional de España, se ha impuesto la necesidad de implantar numerosas plantas de depuración para adecuarse a la ley vigente. Por otro lado, en ocasiones, el diseño y dimensionado de los sistemas de depuración en pequeñas poblaciones se ha realizado copiando a escala más pequeña los sistemas de depuración de grandes núcleos. No se realizaban estudios previos adecuados de caudales, carga contaminante, alternativas posibles, etc. Como resultado, se han construido en algunas poblaciones instalaciones poco o nada adecuadas para la realidad del núcleo y de sus aguas residuales (www.madrimasd.org).

Uno de los principales retos del *Plan Nacional de Calidad de las Aguas* (PNCA) es extender los sistemas de depuración a todas las pequeñas poblaciones por las circunstancias particulares que condicionan el tratamiento del agua residual en el medio rural que especifican Huertas y Marcos (2012):

- La irregularidad de los vertidos en caudal y carga contaminante.
- Los efluentes depurados deben cumplir las normativas y límites de vertido vigentes.
- La limitación de recursos económicos, humanos y capacidad técnica para la explotación y el mantenimiento.
- Dificultad e incluso imposibilidad de aprovechamiento de las ventajas económicas y tecnológicas que ofrece la economía de escala como consecuencia de su pequeño tamaño y dispersión geográfica.
- La posibilidad de que los vertidos sobre el medio receptor generen un impacto significativo, especialmente en zonas de alto valor ecológico, lo que hace aconsejable buscar métodos alternativos a los sistemas de depuración convencionales.

Para las poblaciones de menos de 2.000 h.e. la normativa exige un “tratamiento adecuado” de las aguas residuales, entendiéndose como tal aquel tratamiento

que permita que las aguas receptoras cumplan después del vertido los objetivos de calidad previstos. El concepto de “tratamiento adecuado” establecido para pequeñas poblaciones, es mucho más amplio y flexible que los límites fijos de emisión establecidos reglamentariamente para grandes vertidos. Por tanto, el sistema de depuración escogido podrá ser más o menos intenso en función de la naturaleza del vertido y del medio receptor. Para los pequeños municipios, el reto reside en implantar tecnologías de depuración que se adapten a las peculiaridades y condicionantes de cada núcleo, que permitan obtener un efluente con la calidad deseada acorde con los objetivos ambientales del medio receptor (Huertas y Marcos, 2012).

A la hora de seleccionar e implantar las instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales generadas en los pequeños núcleos de población, debe tenerse en cuenta las características tecnológicas que cumplan las siguientes especificaciones según Martín et al., (2006):

- Consumo energético mínimo, procurando evitar el uso de dispositivos electromecánicos, como por ejemplo, en el caso de la aireación, optar por sistemas de oxigenación natural.
- Que requieran de un mantenimiento y explotación simples, así como, unos costes asociados ajustados.
- Simplificar la gestión de los lodos generados en los procesos de depuración.
- Que presenten un bajo impacto ambiental sonoro y una buena integración paisajística en el medio ambiente.
- Garantizar un funcionamiento eficaz y flexibilidad y estabilidad frente a las grandes oscilaciones de caudal y carga en el influente a tratar, circunstancias comunes en los pequeños municipios.

Las tecnologías de depuración de aguas residuales urbanas que reúnen estas características se conocen bajo el nombre genérico de “Tecnologías no Convencionales” (TNC). Este tipo de tecnologías requieren actuaciones de bajo impacto ambiental, logrando la reducción de la carga contaminante con costes de operación inferiores a los de los tratamientos convencionales y con unas

necesidades de mantenimiento sin grandes dificultades técnicas, lo que permite su explotación por personal no especializado. Los procesos que intervienen en las TNC incluyen muchos de los que se aplican en los tratamientos convencionales (sedimentación, filtración, adsorción, precipitación química, intercambio iónico, degradación biológica, etc.), junto con procesos propios de los tratamientos naturales (fotosíntesis, fotooxidación, asimilación por parte de las plantas, etc.); pero a diferencia de las Tecnologías Convencionales, en las que los procesos transcurren de forma secuencial en tanques y reactores, y a velocidades aceleradas (gracias al aporte de energía, como por ejemplo para aireación y/o agitación/mezcla), en las TNC se opera sin aporte de energía, a velocidad natural, desarrollándose los procesos en un único reactor-sistema y el ahorro en energía se compensa con una mayor necesidad de superficie (Martín et al., 2006).

8. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS Y TAMAÑO DE MUNICIPIO

Como puede observarse en la Tabla 4 del presente documento, la etapa en el proceso de depuración del agua con mayor consumo de energía, tanto en pequeñas como en grandes instalaciones, es el tratamiento secundario. El tipo de procedimiento implantado, las etapas necesarias, las características y composición del agua residual a tratar y la necesidad o no de aireación son factores determinantes en el desempeño energético que supone el tratamiento biológico en una depuradora urbana.

Entre las múltiples problemáticas que presenta el tratamiento de aguas residuales en pequeños núcleos, quiero destacar la dificultad de obtención de beneficios en la reducción de costes por economía de escala frente a grandes instalaciones; por ello he realizado un estudio comparativo con diferente tamaño de población abastecido y con la misma tecnología aplicada, para verificar o no si se cumple esta premisa:

8.1. Diferente tamaño de población, misma tecnología empleada

La DOCE (1991) establece que para poblaciones superiores a 2.000 h.e., las aguas residuales urbanas que entren en los sistemas colectores sean objeto, antes de verterse, de un tratamiento secundario o de un proceso equivalente.

Dicho tratamiento debe incluir por lo general de un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso en el que se respeten los requisitos de la Directiva. En cambio, y como se comentó en el apartado anterior, para las poblaciones de menos de 2.000 h.e. la normativa exige un “tratamiento adecuado” de las aguas residuales. El tratamiento biológico que en la recopilación de datos del estudio llevado a cabo por IDAE (2010), está presente en poblaciones menores a 2.000 h.e. es el de *biodiscos*, por ello ha sido el seleccionado para el análisis comparativo entre diferentes tamaños de población.

Los *biodiscos* consisten en un tratamiento de oxidación de materia orgánica mediante bacterias fijas en un soporte (Isla de Juana, 2005). Constan de un reactor semicilíndrico, en cuyo interior se han dispuesto, mediante un eje horizontal, una serie de discos que giran lentamente dentro del depósito, el cual contiene el agua residual a depurar. Los discos constituyen el soporte inerte sobre cuya superficie se forma un film biológico, en su movimiento, se encuentran alternativamente y sucesivamente en contacto con el agua residual (inmersión) y con el oxígeno del aire (emersión). Sumergida aproximadamente el 40% del área de los discos, giran lentamente de 1 a 2 revoluciones por minuto (Catalán Lafuente, 1997). La principal ventaja de los *biodiscos* es su reducido consumo energético, debido a no necesitar aporte de oxígeno.

8.1.1. Datos de partida del influente

Se compara la misma tecnología de tratamiento secundario biológico (*biodiscos*) en 2 tamaños diferentes de población: 500 y 2.000 habitantes ya que según Huertas y Marcos (2012) es un tratamiento que resulta adecuado para núcleos con ese rango de población.

8.1.2. Dotación

El primer paso para dimensionar la instalación consiste en conocer el volumen de las aguas que se deben tratar. La cantidad de aguas residuales que produce una comunidad está en proporción con el consumo de agua abastecido y con el grado de desarrollo económico y social de la misma (Martín et al., 2006).

Las dotaciones consideradas para nuestro caso de estudio se han extraído de la Tabla 7.

Tabla 7. Consumos urbanos (l/hab·día) según los usos y tamaño de la población. Tomado de Martín et al., 2006.

Población (habitantes)	Domésticos municipales	Industrial	Servicios	Fugas de redes y varios	TOTAL
<1.000	60	5	10	25	100
1.000-6.000	70	30	25	25	150
6.000-12000	90	50	35	25	200
12.000-50.000	110	70	45	25	250
50.000-250.000	125	100	50	25	300
>250.000	165	150	60	25	400

8.1.3. Caudales

La estimación del caudal diario del agua residual urbana que llega a una estación depuradora, se realiza a partir de la dotación y población servida, de la forma (Martín et al., 2006):

$$Q = \frac{D \cdot P}{1000}$$

Donde:

Q = caudal diario (m³/día)

D = dotación (l/hab·día)

P = población (hab)

8.1.4. Composición del agua residual

Para la caracterización del agua residual se emplean un conjunto de parámetros, los cuales han sido seleccionados en una concentración de: *contaminación fuerte*, para realizar el diseño considerando valores concentrados y posibles picos de contaminación, han sido tomados a partir de los valores aportados por la siguiente Tabla 8:

Tabla 8. Valores típicos de los principales contaminantes del agua residual urbana. A partir de datos de Metcalf y Eddy, 2000.

Parámetro	Contaminación fuerte	Contaminación media	Contaminación ligera
Sólidos en Suspensión (mg/l)	350	220	100
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	400	220	110
DQO (mg O ₂ /l)	1000	500	250
Nitrógeno (mg N/l)	85	40	20
Fósforo (mg P/l)	15	8	4
Grasas (mg/l)	150	100	50
Coliformes Fecales (ufc/100 ml)	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁵ -10 ⁷

8.1.5. Habitantes equivalentes

Se emplean para la medición de la contaminación biodegradable presente en las aguas residuales. El cálculo de los habitantes equivalentes es un factor sumamente importante en el ámbito de la depuración de las aguas residuales, e influye de forma significativa sobre: los caudales, la calidad de las aguas residuales generadas y la tecnología a aplicar para la depuración de las aguas residuales. Su metodología de cálculo según Martín et al., (2006) es la siguiente, y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9:

$$h. e. = \frac{Q \left(\frac{m^3}{día} \right) \cdot DBO_5 \left(\frac{mg}{l} \right)}{60 \text{ g } DBO_5 / día}$$

Tabla 9. Datos de diseño: dotación, caudal y h.e.

Población (habitantes)	Dotación (l/hab·día)	Q (m ³ /día)	h.e.
500	100	50	333
2.000	150	300	2.000



Figura 9. Esquema secuencial de tratamientos.
Tomado de Huertas y Marcos, 2012.

8.1.6. Caracterización del influente

La composición del agua residual a la entrada del tratamiento secundario se obtendrá a partir de la realización de balances de materia, conociendo la calidad del influente (Tabla 8), los tratamientos que se llevan a cabo previos a los biodiscos, y sus rendimientos en cuanto a la eliminación de la contaminación. La secuencia de procesos que experimenta el agua residual es la que se muestra en la Figura 9:

1. **Pretratamiento:** en esta etapa de depuración se persigue la eliminación de los sólidos flotantes más voluminosos y la eliminación de grasas y arenas que dificultarían los tratamientos posteriores, constaría de una etapa de desbaste y otra de desarenado-desengrasado.

2. **Tratamiento primario:** El *tanque imhoff* consta de un depósito dividido en dos cámaras en las que se produce sedimentación y digestión anaerobia de los sólidos decantados. El rendimiento de eliminación de contaminantes alcanzado es comparable a un decantador primario para los sólidos en suspensión y la DBO, lo que indica una pobre eliminación de materia orgánica.

El inconveniente es que tiene un coste mayor que la fosa séptica aunque también se obtiene algo más de calidad en el efluente (Isla de Juana, 2005). Normalmente este sistema de depuración se utiliza como tratamiento primario de las aguas residuales como etapa previa a otros sistemas de depuración, por lo tanto, no constituiría un sistema de tratamiento de aguas residuales en sí mismo (Huertas y Marcos, 2012); le seguiría el decantador primario, previo a los biodiscos.

Los rendimientos de eliminación en cada etapa de tratamiento se muestran en la siguiente Tabla 10, cabe mencionar que para el posterior balance de materia se ha considerado el máximo rendimiento de eliminación en cada etapa.

Tabla 10. Rendimientos de eliminación en cada etapa. A partir de datos de Huertas y Marcos, 2012.

Tratamiento	Parámetro	Rendimiento (% de eliminación)
Pretratamiento	Sólidos en suspensión	5-15
	DBO ₅	5-10
Tanque Imhoff	Sólidos en suspensión	60-70
	DBO ₅	30-40
Decantador primario	Sólidos en suspensión	40-60
	DBO ₅	25-35
Biodiscos	Sólidos en suspensión	80-90
	DBO ₅	80-90

Aplicando dichos rendimientos de eliminación a la composición inicial del influente a la entrada de la EDAR, se obtendrían los balances de materia mostrados en la Tabla 11:

Tabla 11. Concentraciones de DBO₅ y SS en cada proceso de la EDAR.

Proceso	DBO₅ (mg/l)	SS (mg/l)
Influente	400	350
Efluente del pretratamiento	360	297,5
Efluente del Tanque Imhoff	216	89,25
Efluente del Decantador primario	140,4	35,7
Efluente de los biodiscos	14,04	3,57

8.2. Diseño del sistema de biodiscos:

Para el diseño del tratamiento de los biodiscos, se han empleado las concentraciones correspondientes al efluente del decantador primario, y para el dimensionado del tratamiento se ha empleado la metodología que aparece en el manual de Isla de Juana (2005). Los parámetros de partida considerados se muestran a continuación en la Tabla 12:

Tabla 12. Datos de partida de la población de 500 habitantes para el diseño de los biodiscos. (1) Dato tomado de Huertas y Marcos (2012). (2) Dato tomado de Catalán Lafuente (1997). (3) Datos tomados de Isla de Juana (2005).

Datos de partida	
Caudal de diseño (m ³ /h)	2,08
Número de líneas	1
Concentración de DBO a la entrada de biodiscos (mg/l)	140,4
Concentración de DBO a la salida de biodiscos (mg/l)	14,04
Factor de corrección por temperatura	1 ⁽³⁾
f	18,32 ⁽³⁾
Factor de seguridad	1,1 ⁽³⁾
Diámetro de biodiscos (m)	2 ⁽¹⁾
Superficie específica bruta de los biodiscos (m ² /m ³)	90 ⁽³⁾
Sumergencia de los biodiscos (%)	40 ⁽²⁾
Concentración de SS a la entrada de los biodiscos (mg/l)	35,7
Velocidad ascensional decantador secundario (m ³ /m ² h)	0,8 ⁽³⁾
Factor producción de fangos	0,23 ⁽³⁾

Para el cálculo de f, se sigue la siguiente correlación según Isla de Juana (2005) para el diseño de biodiscos:

$$f = -11,6 + (5,962 \cdot \ln[DBO_5] \text{ en influente})$$

Para el cálculo del *Factor de producción de fangos*, se ha estimado mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Factor de producción de fangos} = -0,0725 + 0,0215 \cdot [DBO_5] \text{ en influente}$$

El formulario empleado para el diseño de los biodiscos es el siguiente:

Rendimiento esperado de eliminación de DBO₅ (%)

$$= \left(\frac{([DBO_5]_{entrada} - [DBO_5]_{salida})}{[DBO_5]_{entrada}} \right) \cdot 100$$

$$\text{Kilos de DBO}_5 \text{ alimentado} \left(\frac{kg}{día} \right) = Q \left(\frac{m^3}{h} \right) \cdot 24 \left(\frac{h}{día} \right) \cdot \frac{[DBO_5]_{entrada}}{1000 \left(\frac{l}{m^3} \right)}$$

Superficie de biodiscos (m²)

= *Factor de corrección por temperatura* · *Factor de seguridad*

$$\cdot \left(\frac{Q \left(\frac{m^3}{h} \right) \cdot 24 \cdot \left(DBO_5 \text{ a la entrada} \left(\frac{mg}{l} \right) - DBO_5 \text{ a la salida} \left(\frac{mg}{l} \right) \right)}{\frac{F \cdot \text{Concentración de DBO}_5 \text{ a la salida de biodiscos} \left(\frac{mg}{l} \right)}{15,1 + \text{Concentración de DBO}_5 \text{ a la salida de biodiscos} \left(\frac{mg}{l} \right)}} \right)$$

$$\text{Volumen biodiscos total (m}^3\text{)} = \frac{S \text{ biodiscos (m}^2\text{)}}{S \text{ específica bruta} \left(\frac{m^2}{m^3} \right)}$$

$$\text{Carga superficial} \left(\text{gr de } \frac{DBO_5}{dxm^2} \right) = \frac{\text{Kilos de DBO}_5 \text{ alimentado} \left(\frac{kg}{día} \right) \cdot 1000}{\text{Superficie de biodiscos total (m}^2\text{)}}$$

$$V \text{ útil mínimo de balsa (m}^3\text{)} = V \text{ biodiscos total (m}^3\text{)} \cdot \frac{\text{Sumergencia (\%)}}{100} \cdot 1,5$$

$$\text{Longitud de los biodiscos (m)} = \frac{\frac{S \text{ biodiscos (m}^2\text{)}}{S \text{ específica bruta} \left(\frac{m^2}{m^3} \right)}}{\frac{\pi}{4} \cdot (\text{Diámetro de los biodiscos (m)})^2}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Concentración de SS en salida de biodiscos } \left(\frac{mg}{l}\right) \\
& = \text{Concentración de SS a la entrada de los biodiscos } \left(\frac{mg}{l}\right) \\
& + \text{Factor de producción de fangos} \\
& \cdot \left(\text{Concentración de DBO a la entrada de biodiscos } \left(\frac{mg}{l}\right) \right) \\
& - \text{Concentración de DBO a la salida de biodiscos } \left(\frac{mg}{l}\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Producción de fangos biológicos } \left(\frac{kg}{\text{día}}\right) \\
& = \left(\frac{\text{Concentración de SS en salida de biodiscos } \left(\frac{mg}{l}\right) \cdot 24 \cdot Q}{1000} \right) \\
& \cdot \left(\frac{\text{Velocidad ascensional decantador secundario (m3/m2h)} \cdot 0,039}{1,9 - \text{Velocidad ascensional decantador secundario (m3/m2h)}} \right)
\end{aligned}$$

Se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Tabla 13:

Tabla 13. Resultados del diseño de los biodiscos para una población de 500 habitantes

Resultado del cálculo

Rendimiento esperado de eliminación de DBO ₅ (%)	90
Kilos de DBO ₅ alimentados por día	7,02
Superficie de biodiscos total (m ²)	787,4
Volumen de biodiscos total (m ³)	393,7
Carga superficial (g DBO ₅ /dxm2)	8,92
Volumen útil mínimo recomendado de balsa (m ³)	236,22
Longitud de biodiscos (m)	0,886
Concentración de SS en salida de biodiscos (mg/l) (antes de decantación)	64,68
Producción de fangos biológicos DBO ₅ decantación (kg/día)	3,14

Se ha aplicado la misma metodología para el cálculo del diseño en el caso de la población de 2.000 habitantes; los datos de partida y los resultados obtenidos se muestran en las siguientes Tabla 14 y Tabla 15 respectivamente.

Tabla 14. Datos de partida de la población de 2.000 habitantes para el diseño de los biodiscos. (1) Datos tomados de Isla de Juana (2005).

Datos de partida	
Caudal de diseño (m ³ /h)	12,5
Número de líneas	1
Concentración de DBO a la entrada de biodiscos (mg/l)	140,4
Concentración de DBO a la salida de biodiscos (mg/l)	14,04
Factor de corrección por temperatura	1 ⁽¹⁾
f	18,32 ⁽¹⁾
Factor de seguridad	1,1 ⁽¹⁾
Diámetro de biodiscos (m)	3 ⁽¹⁾
Superficie específica bruta de los biodiscos (m ² /m ³)	90 ⁽¹⁾
Sumergencia de los biodiscos (%)	40 ⁽¹⁾
Concentración de SS a la entrada de los biodiscos (mg/l)	35,7
Velocidad ascensional decantador secundario (m ³ /m ² h)	0,8
Factor producción de fangos	0,23

Tabla 15. Resultados del diseño de los biodiscos para una población de 2.000 habitantes

Resultado del cálculo	
Rendimiento esperado de eliminación de DBO ₅ (%)	90
Kilos de DBO ₅ alimentados por día	42,12
Superficie de biodiscos total (m ²)	4724,35
Volumen de biodiscos total (m ³)	1574,78
Carga superficial (g DBO ₅ /dxm2)	8,92
Volumen útil mínimo recomendado de balsa (m ³)	944,87
Longitud de biodiscos (m)	2,37
Concentración de SS en salida de biodiscos (mg/l) (antes de decantación)	64,68
Producción de fangos biológicos DBO ₅ decantación (kg/día)	18,85

8.3. Cálculo de la potencia del motor

A continuación se comenta el procedimiento para el cálculo de las variables del motor necesario en cada caso. Los parámetros de partida considerados en el caso de la población de 500 habitantes y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 16 y Tabla 17 respectivamente.

Tabla 16. Parámetros de partida de cálculo del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 500 habitantes. (1) Datos tomados de Isla de Juana (2005).

Datos de partida

Superficie de biodiscos en el mismo eje (m ²)	787,4
rpm del biodisco	1,8 ⁽¹⁾
Viscosidad del agua en la balsa de biodiscos (cp)	1,1 ⁽¹⁾
Concentración DBO entrada (mg/l)	140,4
Relación DBO suspendida/SS en suspensión	0,6 ⁽¹⁾

El formulario empleado para el cálculo del motor rotatorio de los biodiscos es el siguiente:

Potencia absorbida (kW)

$$= 1,7 \cdot \left(\frac{S \text{ biodiscos (m}^2\text{)}}{9.295} \right) \cdot \frac{\mu \text{ balsa (cp)}}{1.002} \cdot \left(\frac{Rpm \text{ biodisco}}{1,5} \right)^{1,55}$$

$$Potencia \text{ m\u00ednima del motor (kW)} = Potencia \text{ absorbida (Kw)} \cdot 1,2$$

$$V \text{ perif\u00e9rica (m/min)} = 2 \cdot \pi \cdot Rpm \text{ biodisco} \cdot \frac{Di\u00e1metro \text{ de biodiscos (m)}}{2}$$

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 17. Potencia del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 500 habitantes.

Resultado del c\u00e1lculo

Potencia absorbida estimada (kW)	0,21
Potencia m\u00ednima del motor (kW)	0,25
Velocidad perif\u00e9rica de los biodiscos (m/min)	11,31

Se realiz\u00f3 de igual forma para el caso del motor del sistema de tratamiento biol\u00f3gico en una instalaci\u00f3n para una poblaci\u00f3n de 2.000 habitantes, los datos de partida y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 18 y en la Tabla 19 respectivamente.

Tabla 18. Parámetros de partida de cálculo del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 2.000 habitantes. (1) Datos tomados de Isla de Juana (2005).

Datos de partida	
Superficie de biodiscos en el mismo eje (m ²)	4724,35
rpm del biodisco	1,8 ⁽¹⁾
Viscosidad del agua en la balsa de biodiscos (cp)	1,1 ⁽¹⁾
Concentración DBO entrada (mg/l)	140,4
Relación DBO suspendida/SS en suspensión	0,6 ⁽¹⁾

Tabla 19. Potencia del motor rotatorio para los biodiscos en una población de 2.000 habitantes.

Resultado del cálculo	
Potencia absorbida estimada (kW)	1,26
Potencia mínima del motor (kW)	1,51
Velocidad periférica de los biodiscos (m/min)	16,96

Con los resultados obtenidos tras el cálculo se procede a su comparación en cuanto al consumo energético por habitante en cada caso de aplicación, como se refleja en la siguiente Tabla 20. Para el cálculo del consumo energético se ha considerado que los sistemas de biodiscos operan ininterrumpidamente las 24 horas al día los 365 días del año.

Como puede observarse, el resultado obtenido es el mismo en ambos casos de población (5,51 kWh/h.e.) Considerando las diferencias notables en cuanto a dotación abastecida en cada uno de los casos, se puede concluir que se aplica el principio de economía de escala en el presente estudio comparativo.

Tabla 20. Consumo energético obtenido.

Población (habitantes)	Dotación (l/hab-día)	h.e.	Potencia (kW)	Consumo energético anual Total (kWh/año)	Consumo energético por h.e. (kWh/h.e.)
500	100	333	0,21	1837,2	5,51
2.000	150	2.000	1,26	11023,1	5,51

9. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han analizado los factores característicos relativos al consumo energético que supone la depuración de las aguas residuales urbanas de España tomando como referencia los consumos reflejados en el “Estudio de Prospectiva: consumo energético en el sector del agua” realizado por IDAE (2010).

Las tendencias futuras en cuanto al consumo energético del sector del saneamiento en España son optimistas; la creciente concienciación ciudadana en cuanto al malgasto del agua, las mejoras tecnológicas, facilidades y agilización administrativa en el sector público y la identificación de procesos no ejecutados correctamente, provocarán en un futuro un importante ahorro energético en el sector.

Tras el análisis realizado se detectó la problemática que provoca la descentralización de la depuración en pequeños núcleos urbanos, presentando elevados costes de explotación y mantenimiento producidos por la robustez de sus instalaciones y por el incorrecto diseño y mantenimiento del sistema de depuración. La adecuada aplicación y diseño de tecnologías no convencionales de depuración resultaría beneficiosa en el ámbito económico y paisajístico de los municipios.

Se identificó además, como principal consumidor de energía, el tratamiento biológico, por ello se eligió como punto de partida para el análisis técnico comparativo. Se obtuvieron resultados interesantes en cuanto al consumo energético anual por h.e. pese al suponer el mismo desempeño energético una población de 2.000 habitantes con una dotación de 150 l/hab·día que una población de 500 habitantes con una dotación de 100 l/hab·día

La diferencia en cuanto a dotación abastecida en ambos casos de diferente población evidencia una de las mayores problemáticas que presentan los pequeños municipios, la imposibilidad de aprovechamiento de la economía de escala en el sector del saneamiento de las aguas residuales en España.

10. BIBLIOGRAFÍA

- AEAS (2017). Día Mundial del Agua 2017: informe sobre aguas residuales en España. Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento. España.
- AEAS y AGA (2011). Tarifas 2010: precio de los servicios de abastecimiento y saneamiento en España. Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento y la Asociación Española de Empresas Gestoras de los Servicios de Agua a Poblaciones. España.
- Aquamundam (2018). Catálogo de Buenas Prácticas. "AQUAMUNDAM. Soluciones para la gestión integrada sostenible del agua en el espacio POCTEP". En: <http://www.aquamundam.eu/wp-content/uploads/2018/09/CATALOGO-BUENAS-PRACTICAS-AQUAMUNDAM.pdf> Accedido en abril de 2019.
- BOE (2003). Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VIII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Boletín Oficial del Estado núm., 135 de 6 de julio de 2003.
- Catalán, Lafuente, J.G. (1997). Depuradoras: "bases científicas". Madrid. Bellisco.
- DOCE (1991). 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*.
- DOUE (2012). Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética. *Diario Oficial de la Unión Europea*.
- Fundación Canal, 2017. Huella energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid. Fundación Canal, Canal de Isabel II. Madrid.
- Hardy, L., Garrido, A. (2010). Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España. Papeles de agua virtual nº6. Fundación Botín. Santander.
- Huertas, R., Marcos, C. (2012) Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Valladolid. Confederación Hidrográfica del Duero.

- IAGUA. Decálogo de la depuración de las aguas residuales en las pequeñas poblaciones, Juan José Salas. En: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/decalogo-depuracion-aguas-residuales-pequenas-poblaciones> Accedido en abril de 2019.
- IAGUA. Elementos para un Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización. Iagua, en: <https://www.iagua.es/blogs/agustina-lopez/elementos-plan-nacional-depuracion-saneamiento-eficiencia-ahorro-y> Accedido en marzo de 2019.
- IDAE (2010). Estudio de Prospectiva. Consumo energético en el sector del agua. Fundación OPTI. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE). Madrid.
- IDAE. Abastecimiento y depuración de agua. En: <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/servicios/abastecimiento-y-depuracion-de-agua> Accedido en marzo de 2019.
- INE (2008). Estadísticas e indicadores del agua. Cifras INE: boletín informativo del Instituto Nacional de Estadística, enero 2008. www.ine.es *Estadísticas e indicadores del agua*. En: <https://www.ine.es/revistas/cifraine/0108.pdf> Accedido en febrero de 2019.
- INE (2017). INE base: serie detallada desde 2002. En: <http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=9663> Accedido en febrero de 2019.
- INE (2018). Estadística sobre el Suministro y Saneamiento del Agua - Año 2016. Notas de prensa, 27 de noviembre de 2018. En: http://www.ine.es/prensa/essa_2016.pdf Accedido en febrero de 2019.
- Isla de Juana, Ricardo (2005). Proyectos de plantas de tratamiento de aguas: aguas de proceso, residuales y de refrigeración. Madrid. Bellisco.
- Madrid+d (2016). Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en áreas rurales descentralizadas. En: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2016/07/05/132747> Accedido en marzo de 2019.
- Martín García, I., Betancort Rodríguez, J.R., Salas Rodríguez, J.J., Peñate Suárez, B., Pidre Bocado, J.J., Sardón Martín, N. (2006). Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de

- población: mejora de la calidad de los efluentes. Instituto Tecnológico de Canarias.
- Metcalf & Eddy (2000). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. Madrid. McGraw-Hill.
- Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (2017). Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2011) e IDAE. Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020.
- Ministerio de Medio Ambiente (2007). El Plan Nacional de Calidad de las Aguas: saneamiento y depuración 2007-2015. En: https://www.miteco.gob.es/images/es/PlanNacionalCalidadAguas_tcm30-279844.pdf Accedido en marzo de 2019.
- Ministerio para la Transición Ecológica (2018). Reunión del Consejo Nacional del Agua, Madrid (2018). En: https://www.miteco.gob.es/es/prensa/181016consejonacionaldelagua_tcm30-482753.pdf Accedido en marzo de 2019.
- Ministerio para la Transición Ecológica (diciembre de 2018). Informe de autorizaciones de vertido a 31 de Diciembre de 2017: Dominio Público Hidráulico. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. En: https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/informeautorizacionesdevertidoaldph-2017_tcm30-485855.pdf Accedido en marzo de 2019.
- Morcillo Bernaldo de Quirós, Fernando (2017). Estado actual de las aguas residuales en España: desde la visión de los operadores de servicios urbanos de agua. En: pasado, presente y futuro de las aguas residuales, 22 de marzo de 2017. Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento y Canal de Isabel II, 2017.
- PWC (2018). La gestión del agua en España: análisis y retos del ciclo urbano del agua. PWC, España.