Tecnologías

del agua

Estudio de Prospectiva

Consumo Energético en el sector del agua

Fundación OPTI

GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

INDICE

Resumen Ejecutivo **5**

Introducción **7**

Metodología **9**

ESTUDIO PREVIO **13**

Desalación de aguas 13

Introducción *13*

La desalación en España *14*

Consumo energético de la desalación *15*

Estimación del consumo energético global en desalación en España *18*

Potencial de ahorro en desalación *19*

La depuración de aguas residuales 20

Introducción *20*

Aguas residuales urbanas *20*

a. La depuración de aguas residuales urbanas en España 20

b. El consumo energético de la depuración urbana 26

c. Consumo energético global en depuración urbana en España 31

d. Potencial de ahorro en depuración urbana 37

e. Conclusiones 38

Depuración industrial *39*

f. Consumo energético de la depuración de aguas residuales industriales 39

g. Conclusiones 42

Resultados generales del cuestionario **43**

Los temas del cuestionario. 43

Análisis Estadístico. 44

Distribución de la participación. *44*

Clasificación de las respuestas *46*

Análisis de medidas de ahorro energético (Corto plazo) **51**

Resultados de la encuesta 51

Medidas de ahorro energético en desalación (corto plazo) 53

Medidas de ahorro energético en la depuración (corto plazo) 54

Análisis de tendencias **60**

General 60

Tendencias en desalación 62

Tendencias tecnológicas en depuración 66

Nuevas tecnologías de tratamiento *66*

Tendencias en nuevos conceptos de gestión de aguas usadas *70*

Tendencias relacionadas con aguas residuales como recurso *73*

Conclusiones **74**

Generales 74

Desalación 74

Depuración urbana 75

Definiciones y abreviaturas **77**

Bibliografía **78**

ANEXO I: PANEL DE EXPERTOS **79**

ANEXO II: CUESTIONARIO **80**

D - Ahorro energético en desalinización. (Corto plazo) 81

A – ahorro energético en depuración (corto plazo) 81

S - Tendencias en desalación 83

T - Tendencias tecnológicas en depuración 84

G - Nuevos conceptos de gestión de aguas usadas 85

R - Aguas residuales como recurso 86

ANEXO III: APÉNDICES DEL ESTUDIO PREVIO 88

Apéndice A: Tecnologías de desalación 89

Apéndice B: Tecnologías de depuración urbana 93

Apéndice C: Tecnologías de depuración industrial 103

Resumen Ejecutivo

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), ha realizado a través de la Fundación OPTI (Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial) un estudio de prospectiva que analiza la interdependencia entre agua y 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.

Con el fin de obtener una primera referencia para este estudio, se ha realizado una estimación del consumo energético actual en el sector del agua en España. Por la falta de datos estadísticos o inventarios lo suficientemente detallados o por la heterogeneidad de los datos, la estimación se limitó a la desalación y a la depuración urbana.

El resultado de la estimación es que la **desalación**, que produce1,5 - 2 hm^3/año de agua dulce, es responsable de aproximadamente el **1% del consumo energético nacional**. Mientras que las instalaciones modernas de osmosis inversa consumen algo más de **3,5 kWh/m^3**, las más antiguas pueden tener consumos de unos 5 kWh/m^3 o superiores. Estudios recientes sugieren que la optimización de la tecnología actual puede llevar a valores de consumo energético en torno a los 2,5 kWh/m^3 de agua de mar desalada.

Siendo el coste energético el mayor factor de coste de explotación, las instalaciones nuevas se diseñan bajo parámetros de optimización energética. Por ello tienen consumos energéticos cada vez menores. El ahorro a corto plazo, por tanto, se puede obtener en la modernización de las instalaciones existentes, incorporando intercambiadores de presión, ausentes en instalaciones antiguas.

La **depuración de los 3.000 hm^3/año de aguas residuales urbanas**, por su parte, conlleva otro **1% del consumo energético nacional**. Existe una gran diferencia entre la concepción tecnológica de las depuradoras pequeñas y las grandes. Las depuradoras pequeñas y de medio tamaño suelen carecer de sistemas de control de la 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 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). Se estima que la optimización energética de las depuradoras existentes puede significar una **reducción en el consumo del 17,5%.** El mayor impacto se podrá lograr en las pequeñas plantas mediante la implantación de sistemas de control del bombeo y la aireación y en modificaciones conceptuales en el pretratamiento.

Si se considera el consumo, no estimado, del transporte, la potabilización y la reutilización del agua, puede concluirse que el sector del agua es un gran consumidor de energía. Algunos estudios apuntan que el ciclo doméstico e industrial del agua responde al 2 – 3% del consumo energético total y que si consideramos la gestión hidrológica y la demanda agraria, podría llegar al 4 -5%.

Aunque el estudio tiene una orientación tecnológica, se ha puesto de manifiesto que las principales oportunidades de ahorro energético en el sector del agua no se encuentran en la parte tecnológica, sino en la parte administrativa y de organización. Es necesario crear las condiciones adecuadas para estimular la inversión en medidas de ahorro energético. Las medidas principales consisten en alargar los plazos de las concesiones de explotación de desaladoras y depuradoras, lo que permite que el concesionario pueda amortizar las inversiones que acometa y en modificar los pliegos de los contratos de concesión en tales términos que la optimización energética se convierta en un incentivo económico para el concesionario.

Las **tendencias tecnológicas en el campo de la desalación** se centran en las tecnologías y en soluciones para reducir el fouling de las membranas. El fouling es el principal factor que afecta al rendimiento energético, la vida útil de las membranas y en el ratio de producción del agua de una instalación, por lo que su reducción se traduce en importantes ahorros y beneficios. Las oportunidades en este campo se centran en el desarrollo de pretratamientos adecuados del agua tratada y en recubrimientos de las membranas. En el mismo sentido, aunque el desarrollo de membranas basadas en nanotecnología se considera fuera de alcance, la investigación científica en el campo de soluciones nanotecnológicas para reducir la problemática del fouling merece ser estimulada.

Otro campo de interés es la investigación de las combinaciones de tecnología solar y desalación. Como regla general coinciden geográficamente dos factores, que son la elevada irradiación solar en las zonas que acusan una escasez de agua. Por ello, una línea de desarrollo interesante es la del tratamiento de la salmuera mediante tecnología solar. Estas soluciones son especialmente relevantes para aplicaciones no-marinas, donde la gestión de la salmuera constituye un obstáculo real para su implantación.

En la **depuración urbana las tendencias tecnológicas** apuntan a un incremento de la demanda energética, fruto de las mayores exigencias en la calidad del agua tratada. Las tendencias tecnológicas deben de buscarse, por tanto, en reducir este incremento mediante una mayor eficiencia energética o mediante un mejor aprovechamiento energético de los fangos generados en el proceso.

En este sentido las oportunidades se encuentran en el campo de la investigación de procesos de tratamiento para detectar flujos, condiciones de proceso o reacciones bioquímicas o microbiológicas que puedan mejorar el proceso.

Destacan dos líneas de investigación de interés, por su relevancia en el ahorro energético, pero también por su papel en las políticas de promoción de las energías renovables y la lucha contra el cambio climático, que son la eliminación o recuperación de nutrientes mediante tecnologías energéticamente eficientes y el aprovechamiento energético de los

fangos mediante mejoras en la biodigestión o nuevas tecnologías de valorización energética de fangos.

Introducción

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), realiza a través de la Fundación OPTI (Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial) un estudio de prospectiva que analiza la interdependencia entre agua y 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.

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.

Estos conceptos se reúnen en el término "eficiencia energética" que es una de los temas prioritarios en la política europea, como se expresa en la declaración de Berlín:

Queremos llevar juntos la iniciativa en política energética y protección del clima, aportando nuestra contribución para contrarrestar la amenaza mundial del cambio climático.

Hasta hace poco en los "mundos" del agua y de la energía se consideraba el otro aspecto como secundario e irrelevante. Los estudios sobre sostenibilidad han contribuido a la visualización de las interrelaciones y de su relevancia, entre otros a través del cálculo de la huella energética del agua y la huella hídrica de la energía (water/energy footprints).

El cálculo de la huella hídrica revela que el uso del agua para la generación de energía implica elevados consumos del agua, por lo que es un dato importante a la vista del creciente interés por las energías renovables.

Fuente primaria de energía		Huella hídrica global (m^3/GJ)
No renovable	Uranio	0,09
	Gas natural	0,11
	Carbón	0,16
	Petróleo	1,06
Renovable	Viento	0,00
	Sol	0,27
	Agua	22
	Biomasa	70 (rango: 10-250)

(Fuente: www.waterfootprint.org)

Los datos básicos para el cálculo de la huella energética del sector del agua no se encuentran recopilados por los organismos competentes, lo que indica tanto la complejidad, como el poco interés que ha recibido hasta hace poco el consumo energético en el sector del agua. El *Global Water Research Coalition* (alianza internacional entre 12 de las organizaciones con mayor actividad en investigación en agua) ha iniciado en 2008 un programa con el objetivo de lograr un ciclo de agua urbana con una huella energética y de carbono neutral para el año 2030. En una primera estimación con los pocos datos disponibles, se estima la huella energética en potabilización (tratamiento y suministro) del orden de 0,4 – 1 kWh/m^3 y la huella de la gestión de las aguas residuales (recogida y tratamiento) en 0,5 – 0,7 kWh/m^3.

Con el fin de obtener una primera referencia para este estudio, se ha considerado conveniente realizar una estimación del consumo energético actual en el sector del agua en España. Por la falta de datos estadísticos o inventarios lo suficientemente detallados o por la heterogeneidad de los datos, la estimación se limitó a la desalación y a la depuración urbana. El resultado de la estimación es que la desalación, que produce 2 hm^3/año de agua dulce, es responsable de aproximadamente el 1% del consumo energético nacional. La depuración de los 3.000 hm^3/año de aguas residuales urbanas, por su parte, conlleva otro 1% del consumo energético nacional. Si se considera el consumo, no estimado, del transporte, la potabilización y la reutilización del agua, puede concluirse que el sector del agua es un gran consumidor de energía. Algunos estudios apuntan que el ciclo doméstico e industrial del agua responde al 2 – 3% del consumo energético total y que el total, incluyendo gestión hidrológica y la demanda agraria, podría llegar al 4 -5%.

Para la desalación y la depuración urbana se han identificado y contrastado con un panel de expertos (Anexo I) las medidas para reducir su huella energética a corto plazo, así como las tendencias tecnológicas más eficientes energéticamente, con vistas al medio y largo plazo.

Este documento es el informe final del estudio en el que se recogen las tendencias presentadas, analizadas y valoradas tanto por un panel de especialistas como a través de una encuesta a un grupo de expertos.

Metodología

La metodología de trabajo que se ha seguido es la siguiente.

a) **Estudio previo.** Como punto de partida para este estudio se ha considerado conveniente realizar una estimación del consumo energético actual en el sector del agua. Dado que no se disponen de datos estadísticos, ni de inventarios que permiten extraer o elaborar tal información, se ha realizado un estudio que permita proporcionar un marco de referencia de la situación actual de la desalación y de la depuración urbana en cuanto a su consumo energético. El estudio se adjunta como **Anexo III.**

b) **Síntesis documental.** Como información de partida para la preparación del ámbito del estudio, se han analizado las publicaciones más recientes y estudios realizados en los países más avanzados en este ámbito, identificando las tecnologías actuales en uso, así como las áreas científico-tecnológicas consideradas clave para el futuro desarrollo de la disciplina. Los resultados se han presentado en forma de opciones y tendencias para su análisis por el panel de expertos.

c) **Panel de expertos.** Primera reunión. Se ha seleccionado un panel de expertos compuesto por profesionales de reconocido prestigio en ámbito del agua, procedentes de centros de investigación, universidades y empresas. La lista de integrantes del panel de expertos se presenta en el **Anexo I.**

   En la primera reunión del panel de expertos se ha analizado la posible evolución de las tecnologías, conocimientos y aplicaciones más innovadoras y trascendentes propuestas en el documento de síntesis, así como todos aquellos posibles acontecimientos que pudieran influir de forma significativa en la evolución del sector.

   Cada experto ha propuesto una serie de especialistas adicionales en diferentes materias que han sido invitados para responder el cuestionario. Ello permite contrastar diversas opiniones y contribuye a que los resultados obtenidos tengan una mayor validez a escala territorial y recojan las opiniones de diferentes ámbitos de la sociedad.

d) **Cuestionario.** Los resultados de la reunión del panel de expertos han sido trasladados a un cuestionario, formulando los desarrollos tecnológicos, conocimientos y aplicaciones como hipótesis. Mediante el cuestionario, se trata de valorar el grado de importancia de los temas de estudio seleccionados en función de una serie de parámetros relevantes, seleccionados por el panel de expertos. El cuestionario que recoge las opciones y tendencias seleccionadas se presenta en el **Anexo II.**

e) **Encuesta.** En la encuesta se han planteado una serie de variables que permiten recoger la opinión de los participantes sobre las hipótesis respecto al desarrollo tecnológico en el campo de la eficiencia energética en el sector del agua.

Las variables manejadas en la encuesta han sido las siguientes:

Grado de importancia para España:

- *Alto* si es muy importante
- *Medio* si es importante
- *Bajo* si apenas tiene importancia

Capacidad científico- tecnológica en España:

Con ello se pretende conocer la opinión sobre el potencial de desarrollo científico y tecnológico existente en España en relación con otros países de nuestro entorno. Se diferencia entre:

- *Baja si no existe potencial*
- *Media si existe algo de potencial*
- *Alta si el potencial es importante*

Medidas para el desarrollo:

Esta variable hace referencia a las medidas que pueden impulsar la implantación o el desarrollo de los temas propuestos. Se han elegido cinco:

- *Avances en legislación,* en el caso de que la legislación o determinada normativa pueda suponer un freno al desarrollo del tema de trabajo.
- *Incentivos de la Administración,* en el caso de que se considere importante el impulso por parte de la Administración.
- *Formación de científicos/tecnólogos,* si se considera necesario tomar medidas relacionadas con la formación de los (futuros) profesionales.
- *Estimular I+D en Industria:* si el impulso tecnológico debe venir de la mano del desarrollo industrial.
- *Concienciación ciudadana:* en caso que sea la sociedad la que impulse o demande el desarrollo de determinada tecnología.

Facilidad de incorporación

La implantación práctica de una medida es más probable si no compromete inversiones existentes o altera de forme importante en operaciones existentes. Esta variable expresa este concepto, distinguiendo entre:

- *Alta.* No requiere importantes cambios para incorporar/adoptarla en instalaciones existentes
- *Medio*
- *Baja.* Requiere sustituir instalaciones existentes o modificaciones importantes en procesos

Potencial de ahorro energético

Esta variable expresa la contribución que la medida puede aportar al ahorro energético del sector. Se diferencia entre:

- *Alto si existe un alto potencial de ahorro energético*
- *Medio si el potencial de ahorro energético es significativo*
- *Bajo* si el potencial de ahorro energético no es significativo

f) **Análisis estadístico de la encuesta.** En esta etapa se han realizado los cálculos de resultados, el análisis de medias y modas, explicación de las desviaciones y extracción de conclusiones generales sobre los cuestionarios recibidos.
Asimismo y en base a los resultados, se han seleccionado una serie de hipótesis para su posterior discusión en la segunda reunión del panel de expertos.

g) **Segunda reunión del panel de expertos.** En esta reunión se analizaron y validaron los resultados de la encuesta y realizó una selección de grandes tendencias y tecnologías críticas.

h) **Conclusiones y redacción del informe final.** Mediante el análisis de los resultados del cuestionario y de las conclusiones del panel de expertos, en las conclusiones se pretende valorar el grado de importancia de las tecnologías y aplicaciones seleccionadas, estimar su fecha de materialización y determinar las capacidades españolas respecto a las europeas.

En la figura 1 se muestra de forma gráfica el procedimiento seguido en éste estudio de prospectiva.

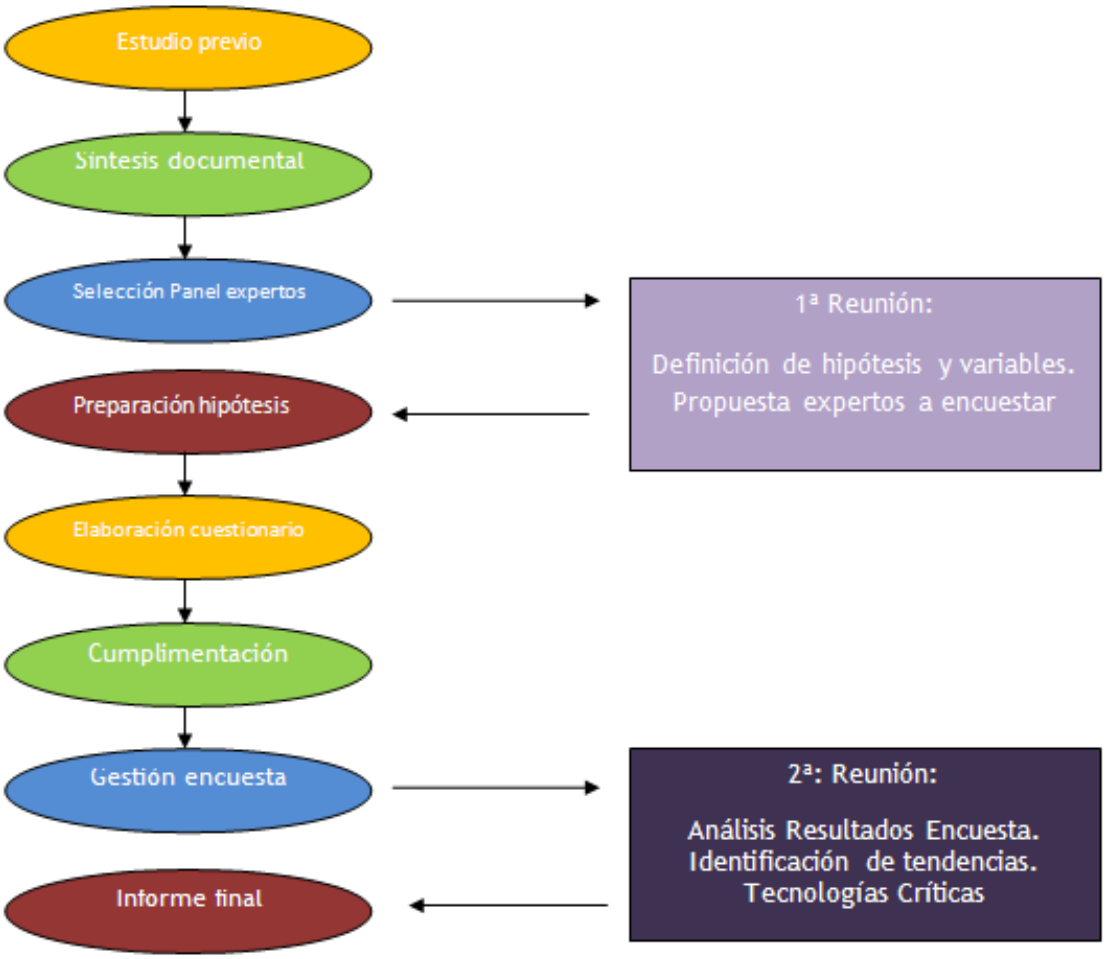


Figura 1: Esquema del procedimiento metodológico seguido en este estudio de prospectiva.

ESTUDIO PREVIO

Desalación de aguas

Introducción

Mientras que los principales usos del agua requieren del agua dulce, el 97% del agua disponible en el planeta es salada. Es por ello lógico, que la escasez del recurso y la competencia por el agua han impulsado el desarrollo de tecnologías de desalación del agua.

Se han desarrollado más de veinte procesos de desalación, que pueden dividirse en tres grupos (Ver Apéndice A):

Procesos de destilación	Destilación térmica
	Compresión de vapor
	Destilación solar
Procesos de congelación	Refrigeración-evaporación
Procesos de membrana	Osmosis inversa
	Electrodiálisis

Los primeros procesos en desarrollarse fueron los de destilación. Los de congelación no han pasado nunca a explotación comercial por su elevado coste, y en la actualidad dominan el mercado los procesos de membrana. El mayor factor de coste en la desalación es el energético, por lo que se ha dedicado un gran esfuerzo en la mejora de la eficiencia energética. El mayor progreso se ha obtenido en la tecnología de desalación por membranas, donde se ha logrado reducir a la mitad el consumo energético mediante mejoras en las membranas (mayor flujo, menor presión) y recuperación de energía cinética en el circuito de salmuera. Todavía se esperan mejoras en el diseño de membranas, que pueden reducir el consumo energético en otro 10 - 15%.

La tecnología de membranas consume notablemente menos energía que las tecnologías basadas en la destilación por lo que dominan el mercado actual.

La desalación en España

La utilización de la desalación de agua para agua potable se remonta a 1964, con la desaladora de Lanzarote. Se trataba de una planta dual, que generaba simultáneamente agua desalada y energía eléctrica, con una capacidad de desalación de 2.000 m^3/día y una potencia eléctrica de 2.000 kW.

Debido al elevado coste de la desalación, especialmente energético, su uso se limitaba a zonas de manifiesta escasez de agua, como en las islas Canarias.

Pocos años después entraron en servicio las plantas de Ceuta (1969) y Las Palmas de Gran Canaria (1970), que con sus 10.000 m^3 diarios significaría la entrada de la desalación a gran escala en el país. Ambas utilizaban tecnología de destilación multietapa (MSF), al igual que la planta pionera de Lanzarote.

La primera crisis del petróleo tuvo un impacto considerable sobre el precio del agua desalada, obligando a mejorar las tecnologías de evaporación a fin de obtener mayores rendimientos del proceso. La tradicional MSF dio paso a las tecnologías multiefecto (MED) y de compresión de vapor (VC), que hasta entonces carecían de sentido en un contexto de energía barata.

Las tecnologías térmicas alcanzaron sus límites de eficiencia energética y por tanto económica a lo largo de la década de los 1980, pero a finales de 1970 ya habían comenzado a aparecer las primeras membranas capaces de resistir las presiones necesarias para desalar agua de mar. La primera planta de osmosis inversa para agua de mar se instaló nuevamente en Lanzarote, en 1984. Comenzó con una capacidad de 500 m^3/día y poco después, en 1986, se construyó la planta de Lanzarote II, con una capacidad de 7.500 m^3/día.

El continuo desarrollo de las membranas, que entre los años 1980 y 2000 redujeron su precio a la mitad mientras duplicaban su capacidad de producción, así como el progresivo dominio de las técnicas de osmosis, contribuyeron a un constante descenso en sus costes. Aunque el mayor efecto lo produjo la incorporación de recuperadores de energía, que se inició a comienzos de los 1990, permitiendo reducir casi a la mitad el consumo energético.

En 1995, con la sequía en su punto álgido, el gobierno diseñó un programa de desalación, el mayor con tecnología de ósmosis inversa. Éste contemplaba la construcción de grandes plantas en Alicante, Murcia, Almería y Palma de Mallorca. Además, se proyectó la construcción de varias plantas en Málaga y los dos archipiélagos por iniciativa privada y municipal.

En 1996, el cambio de gobierno y el final de la sequía, frenaron el desarrollo del programa. Únicamente se inauguró la planta de Palma de Mallorca en la década de los 1990, aunque las restantes continuaron su proceso constructivo, y entre 1996 y 2003 se proyectó la construcción de varias plantas más (Blanes, Jávea, Ciudadela, Alcudia, Calviá, Andratx, San

Antonio de Ibiza, Santa Eulalia, Formentera, Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife y Hierro) así como la de Carboneras, que fue en su momento la más grande de Europa.

En la tabla 1 se relacionan las plantas de desalación marina con una capacidad superior a los 20.000 m^3/día que existen o se están implantando en el litoral mediterráneo peninsular. Las plantas indicadas en situación de "En estudio" son aquellas que están programadas y cuya construcción aún no ha sido adjudicada.

Tabla 1: Plantas de desalación marina con capacidad superior a 20.000 m^3/día

Localización	Provincia	Capacidad (m^3/día)	Situación	Tecnología
Marbella	Málaga	56.000	Operativa	Osmosis inversa
Mijas	Málaga	50.000	En proyecto	Osmosis inversa
Campo de Dalías	Almería	98.000	En construcción	Osmosis inversa
Almería	Almería	52.000	Operativa	Osmosis inversa
Níjar-Rambla Morales	Almería	20.600	Operativa	Osmosis inversa
Carboneras	Almería	42.000	Operativa	Osmosis inversa
Bajo Almanzora	Almería	20.000	En construcción	Osmosis inversa
Aguilas	Murcia	60.000-70.000	En construcción	Osmosis inversa
Valedelentisco-Mazarrón	Murcia	27.000	Operativa	Osmosis inversa
Escombreras-Cartagena	Murcia	63.000	Operativa	Osmosis inversa
San Pedro del Pinatar I	Murcia	65.000	Operativa	Osmosis inversa
San Pedro del Pinatar II	Murcia	65.000	En construcción	Osmosis inversa
Torrevieja	Alicante	240.000	En construcción	Osmosis inversa
Alicante I	Alicante	65.000	Operativa	Osmosis inversa
Alicante II	Alicante	65.000	En construcción	Osmosis inversa
Mutxamel	Alicante	50.000	En construcción	Osmosis inversa
Jávea	Alicante	30.000	Operativa	Osmosis inversa
Denia	Alicante	16.000	En construcción	Osmosis inversa
Sagunto	Valencia	23.000	En construcción	Osmosis inversa
Moncófa	Castellón	25.000	En construcción	Osmosis inversa
Oropesa	Castellón	65.000	En construcción	Osmosis inversa
Garraf	Barcelona	*	En estudio	*
El Prat de Llobregat	Barcelona	200.000	Operativa	Osmosis inversa
Tordera	Gerona	28.800	Operativa	Osmosis inversa
Tordera II	Gerona	*	En estudio	*

Fuente: PANEL CIENTÍFICO-TÉCNICO DE SEGUIMIENTO DE LA POLÍTICA DE AGUAS Convenio Universidad de Sevilla-Ministerio de Medio Ambiente. Desalación, energía y medio ambiente" Antonio Estevan gea21, S.L. Actualización por fuentes de elaboración propia

Consumo energético de la desalación

En procesos de osmosis inversa, para que el agua pase por la membrana se precisa una alta presión (cerca de 70 kg/m^2) que se logra con equipos de impulsión y con el consiguiente consumo de energía.

Con el paso de los años, el consumo de energía, en los procesos de desalinización, se ha ido reduciendo drásticamente. Hacia 1980, se estimaba en unos 10 kWh/m^3 el consumo

necesario para desalinizar agua de mar, lo que, en todo caso, suponía la mitad del consumo que, hasta esa fecha, precisaban otras tecnologías, como la evaporación súbita multiefecto. De estos 10 kWh/m^3, mediante la introducción de sistemas de recuperación de energía, se pasó, hacia el año 2000, a un consumo de unos 5 kWh/m^3 y, hoy en día, se puede hablar de consumos de algo más de **3,5 kWh/m^3** [1]

El proceso de reducción de los costes de la desalación en España y sus perspectivas han sido valorados por el CEDEX [2] en 2004, según se expone en la tabla 2:

Tabla 2: Costes de desalación

	Unidades	1995	2002	2004	2010
1. Bases de cálculo					
Coste de inversión	€/m^3-día	890	610	600	590
Amortización	Años	15	15	15	15
Interés	%	10	4	4	4
Consumo energía	kWh/m^3	5,3	4,1	3,6	2,9
Precio energía	€/kWh	0,077	0,048	0,048	0,048
2. Costes parciales					
Energía	€/m^3	0,408	0,196	0,172	0,139
Personal	€/m^3	0,036	0,036	0,030	0,025
Productos químicos	€/m^3	0,030	0,028	0,028	0,030
Mantenimiento	€/m^3	0,024	0,024	0,024	0,024
Membranas	€/m^3	0,018	0,018	0,016	0,014
TOTAL EXPLOTACIÓN	€/m^3	0,516	0,302	0,270	0,232
TOTAL AMORTIZACIÓN	€/m^3	0,337	0,170	0,168	0,165
COSTE TOTAL	**€/m^3**	**0,853**	**0,472**	**0,438**	**0,397**

Fuente: Torres (2004)

Esta evaluación, sobre la que se apoyó el Programa AGUA [3] y que se ha convertido en un dato clásico en el sector, está basada en grandes plantas, (de capacidad de producción superior a los 60.000 m^3/día) con un funcionamiento a plena ocupación, y en el contexto de precios de la energía estables. Se observa que el consumo energético disminuye de 5,3 kWh/m^3 en 1995 a 2,9 kWh/m^3 como valor estimado para 2010.

Estudios recientes sugieren que cabe reducir, aún más, este consumo energético, pudiéndose, al menos desde el punto de vista teórico, llegarse a valores de consumo energético en torno a los 2,5 kWh/m^3 de agua de mar desalada.

---

[1] Valor comprobado en la planta desalinizadora de Carboneras

[2] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)

[3] Programa Agua: Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua. Gestionado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

La tabla 3 contiene los consumos energéticos reales de cuatro plantas españolas en fase de explotación.

Tabla 3: Plantas en explotación

	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
PARÁMETROS DE OPERACIÓN				
Presión de trabajo (Atm)	70,0	67,6	70,0	70,0
Índice de Conversión	45%	45%	45%	45%
Rendimiento global calculado	64,3%	65,1%	63,6%	65,5%
CONSUMOS (kWh/m^3)				
Consumo físico ideal	1,97	1,90	1,97	1,97
Consumo industrial óptimo	2,74	2,65	2,74	2,74
Consumo industrial calculado	3,06	2,92	3,10	3,01
Consumo real registrado	3,45	3,26	3,53	3,27
Rendimiento global registrado	57,1%	58,3%	55,8%	60,2%
% Incr. Cons. Registrado/Calculado	13%	11%	14%	9%

Por otra parte, los consumos de captación y pretratamiento sobre el agua producida oscilan entre 0,48 y 0,77 kWh/m^3.

Estimación del consumo energético global en desalación en España

La estimación del consumo energético global en la desalación de agua en España se realiza a partir de una serie de hipótesis:

- Las diferentes tecnologías de desalación tienen diferentes consumos energéticos. Sin embargo, en España predomina la osmosis inversa entre las instalaciones existentes y aún más en las futuras. El consumo energético de las plantas de osmosis inversa puede tomarse como referencia ya que el peso del consumo energético de otras tecnologías en el total es mínimo.

- Los datos más recientes sobre la producción de agua desalada no son coincidentes. Proceden de las ponencias de España en el Foro Mundial del Agua en Istanbul (2009), en la que habla de **1,5 hm^3/día**, y del FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología) que habla de la existencia de 1.000 desaladoras que producen **2 hm^3/día**).

- El consumo energético de las plantas desaladoras está en 5 - 10 kWh/m^3 para plantas antiguas, 4 -5 kWh/m^3 para plantas modernas y 3 kWh/m^3 para las plantas de última generación. Se estima el consumo medio de la siguiente manera:

- En 2006 la producción era de 0,8 hm^3/día, con un parque de desaladoras que consumían entre 4 y 10 kWh/m^3. Dado que la desalación se hizo competitiva con la reducción del consumo energético, se puede asumir que el consumo medio de estas desaladoras estará del orden de **5 kWh/m^3**.

- Entre 2006 y la actualidad se ha incrementado la producción en 0,7 hm^3/día hasta los 1,5-2 hm^3/día. Se asume una media de **3,5 kWh/m^3** para estas plantas.

El consumo medio, tomando la producción mínima de 1,5 hm^3/día, por ponderación es de **4,3 kWh/m^3.**

- El consumo energético de la captación y pre- y postratamientos se estima en 0,6 kWh/m^3, que es el valor medio del rango que se emplea para este concepto.

El consumo medio total se estima, por tanto en 4,3 + 0,6 = 4,9 kWh/m^3

El consumo energético total corresponde por tanto con $1{,}5.10^6$ x 4,9 = $7{,}35.10^6$ kWh/día, lo que equivale a una potencia de **306 MW,** o bien con **408 MW** en el caso de la producción de 2 hm^3/día.

Potencial de ahorro en desalación

Considerando que el consumo energético mínimo teórico es de 2,5 kWh/m^3 y que las instalaciones más modernas llegan a unos valores de 3,5 kWh/m^3 es razonable asumir que este es un consumo al que se pueda llegar con la implantación de medidas de ahorro energético. De tal modo, el consumo medio objetivo sería 3,5 + 0,6 = 4,1 kWh/m^3, lo que respecto a la estimación actual sitúa media de 4,9 kWh/m^3 significaría un ahorro del 16%.

Los datos globales se resumen en la tabla 4:

Tabla 4: datos globales

	Consumo unitario (kWh/m^3)	TOTAL ESPAÑA		Potencial de ahorro (%)
		Potencia (MW)	Consumo actual GWh/año	
Consumo actual	4,9	306 - 408	2.681 - 3.574	
Potencial ahorro	0,8	49 - 65	429 - 569	**16%**

La depuración de aguas residuales

Introducción

La depuración de aguas residuales se realiza mediante una combinación de tecnologías físicas, químicas y biológicas de tratamiento que se aplican según las características de las aguas residuales a tratar y bajo criterios de funcionalidad, coste y efectividad.

Es necesario diferenciar entre aguas residuales urbanas y aguas residuales industriales ya que el planteamiento de la depuración es radicalmente diferente aún cuando se emplean en gran parte las mismas tecnologías.

Las aguas residuales urbanas se pueden caracterizar en función de parámetros generalmente aceptados. Ello se refleja en el parámetro "habitante-equivalente" que define una determinada cantidad de agua y una carga contaminante normalizada. De este modo, en la depuración urbana se han llegado a definir conceptos de depuración estandarizados en el que se combinan varias técnicas físicas, químicas y biológicas, siempre concebidas desde una perspectiva finalista: la depuración de las aguas residuales hasta los niveles exigidas por la normativa.

El término "aguas residuales industriales" expresa únicamente el origen de las aguas. La cantidad y composición son características únicas, si no a nivel de empresa, en todo caso a nivel de sector o actividad industrial. En el caso de las industrias, la solución del vertido de aguas residuales debería analizarse de forma integral, buscando oportunidades para tratamientos parciales, reutilización en proceso o el aprovechamiento energético. De este modo, por principio no puede tipificarse o estandarizarse la depuración industrial.

Por todo ello, el análisis del consumo energético en la depuración de aguas residuales y la realización de una prospectiva de tecnologías que permitan reducir este consumo requiere necesariamente una diferenciación entre el ámbito urbano y el industrial.

En los siguientes párrafos se presenta el resumen de un estudio previo en el que se ha realizado una estimación de la situación actual en cuanto al consumo energético en la depuración de las aguas residuales.

Aguas residuales urbanas

a. La depuración de aguas residuales urbanas en España

El censo de depuradoras del MARM no recoge datos que pueden servir de base para la estimación del consumo energético de las depuradoras. Por ello se ha establecido un "mix teórico" de tecnologías, a partir de estándares de diseño habituales y comprobación con datos procedentes de entidades de depuración. (Ver Apéndice B para una descripción de las tecnologías más empleadas).

Con objeto de recopilar datos de la situación actual de las depuradoras en España, se ha llevado a cabo una consulta de la información disponible por parte de las entidades gestoras o propietarias de las mismas. Cabe destacar la falta de información existente al respecto, y en los casos en los que sí se ha podido acceder a la misma, la poca claridad en los datos y la dificultad de acceder a datos básicos que permitan caracterizar las depuradoras como son sus habitantes equivalentes o el tipo de tratamiento que llevan a cabo.

En el caso de Aragón, se ha podido localizar datos de cada una de las depuradoras existentes, por provincias, en la página Web del Gobierno de Aragón, Instituto del Agua, en la que disponen de un Mapa de depuradoras, y una a una se puede obtener, por ejemplo, la información expuesta en la tabla 5.

Tabla 5: Datos depuradora Alcolea de Cinca

Depuradora ALCOLEA DE CINCA

Municipios servidos: Alcolea de Cinca
Tipo de tratamiento: ....
Estado actual: Funcionamiento
Coste construcción: (€) 1.397.978,62
Financiación construcción: ....
Entrada servicio: 30 de junio de 2008

Capacidad tratamiento:(m^3/d) 500
Capacidad carga (habitantes equival.): 1.667
Titular explotación: ....

Datos último año funcionamiento:

- Caudal medio tratado: (m^3/d) 553
- Hab equivalentes servidos: 754 (Media: 555)
- Consumo eléctrico: (kwh/año) 31.381
- Producción fangos:(TM/año) 30,64

En los casos de la Comunidad de Madrid y Galicia, la información se ha solicitado vía fax y correo electrónico. Únicamente se ha obtenido información por parte de la Xunta de Galicia, en forma de hoja de cálculo en la que figuran datos muy básicos sobre cada una de sus depuradoras. El Canal de Isabel II no ha dado respuesta a la información solicitada.

En el caso de la Región de Murcia, la información está disponible la página Web de La Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (ESAMUR). Se ha contrastado con los técnicos que realizan el control de la explotación de depuradoras en Murcia, que no se dispone de información sistemática de mayor detalle.

Para el resto de las Comunidad Autónomas, la información no se encuentra disponible y no se ha localizado un departamento en el que se pueda realizar la consulta.

Con la información disponible, se ha confeccionado una tabla resumen (Tabla 6) de la información recopilada, de un total de 617 depuradoras, en la que se analizan, en función de los distintos tamaños de las EDAR, sus tratamientos, de manera que se pueda hacer una relación entre el tipo de tratamiento y el tamaño de la depuradora. Esta tabla se presenta a continuación:

Tabla 6: Tratamiento vs tamaño de la depuradora

Tratamientos	TOTAL	Habitantes equivalentes												
		<101	500	1.000	2.000	3.000	5.000	10.000	20.000	30.000	50.000	100.000	500.000	>500.000
EDAR Fisico Química	12			1	3	4	3		1					
Fosa	19	10	6	3										
Tratamiento Primario	17	1	1	2	3	2	2	1	3	2				
Filtro biológico	32	8	18	5	1									
Dep. compacta	12	4	7	1										
Dep. compacta+ aireación	180	3	152	20	4	1								
Biodiscos y digestión anaerobia en frío	4		1	1		2								
Lagunaje	12					1	1		2	2	1	3	2	
Fangos Activos - Aireación Prolongada	101		6	13	13	3	9	16	14	4	11	8	3	1
EDAR Biológica	224		6	29	56	16	31	26	22	18	9	3	7	1
Fangos activados y digestión anaerobia	2											2		
Biorreactor de Membranas	2				1							1		
Tratamiento terciario	95			2	7	6	20	14	14	13	11	3	5	
Desinfección UV	21		2	3	2	4	3	2	1	1	1	1	1	
Digestion anaeróbia	1											1		
TOTAL DEPURADORAS	617	26	197	75	81	29	46	43	42	26	21	17	12	2

El siguiente paso ha sido la determinación de un patrón que relaciona la tipología de las depuradoras con el tamaño (en habitantes equivalentes), tabla 7.

Tabla 7: Tratamientos vs habitantes equivalentes

Tratamientos	Habitantes equivalentes												
	<101	500	1.000	2.000	3.000	5.000	10.000	20.000	30.000	50.000	100.000	500.000	>500.000
EDAR Fisico Química			1,3%	3,7%	13,8%	6,5%		2,4%					
Fosa	38,5%	3,0%	4,0%										
Tratamiento Primario	3,8%	0,5%	2,7%	3,7%	6,9%	4,3%	2,3%	7,1%	7,7%				
Filtro biológico	30,8%	9,1%	6,7%	1,2%									
Dep. compacta	15,4%	3,6%	1,3%										
Dep. compacta+ aireación	11,5%	77,2%	26,7%	4,9%	3,4%								
Biodiscos y digestión anaerobia en frío		0,5%	1,3%		6,9%								
Lagunaje					3,4%	2,2%		4,8%	7,7%	4,8%	17,6%	16,7%	
Fangos Activos - Aireación Prolongada		3,0%	17,3%	16,0%	10,3%	19,6%	37,2%	33,3%	15,4%	52,4%	47,1%	25,0%	50,0%
EDAR Biológica		3,0%	38,7%	69,1%	55,2%	67,4%	60,5%	52,4%	69,2%	42,9%	17,6%	58,3%	50,0%
FQ, Fangos activados y digestión anaerobia											11,8%		
Fangos Activos - Biorreactor de Membranas				1,2%							5,9%		

Este patrón se ha utilizado para contrastar el cuadro preparado por técnicos especialistas en depuración, basados en su conocimiento del parque de depuradoras en España.

En el cuadro final que se utiliza para la estimación de los consumos energéticos, se han distinguido las diferentes etapas de un proceso de depuración urbana:

Línea de agua

1. Pretratamiento, que consiste en el desbaste, desarenado y desengrasado.
2. Tratamiento primario que consiste en la sedimentación de sólidos.
3. Tratamiento secundario, en el que se distinguen diferentes tecnologías de tratamiento, desde fosas sépticas hasta reactores de fangos activados de alta carga.
4. Decantación que sirve para la separación del agua tratada de los fangos biológicos, de los que se retorna gran parte al reactor. Los fangos en exceso se destinan al tratamiento de fangos.

Línea de fangos

- Espesado, en el que se concentran los fangos, previo a su deshidratación.
- Deshidratación para reducir volumen y obtener un producto semi-solido.
- Digestión anaerobia de los fangos, con el fin de estabilizar los fangos y recuperar energía.

La clasificación de los tipos de tratamiento según los rangos de habitantes equivalente se expone de la siguiente tabla 8.

Tabla 8: Clasificación de los tratamientos según el rango de habitantes equivalentes (h.e.)

Tamaño de municipio	Total	<101	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	>500.000
Línea de agua														
Desbaste		20%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Desarenado				100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tratamiento primario														100%
Fosa séptica		40%												
Fosa séptica + filtro biológico		40%												
Compacto aeración extendida		20%	80%	85%										
Biodiscos			20%	15%										
Aireación extendida- Superficial					50%	50%	40%	30%	20%	20%	10%	10%		
Aireación extendida- Burbujas					50%	50%	60%	70%	80%	80%	90%	80%		
Fangos activos													90%	50%
Fangos activos + desnitrificación												10%	10%	50%
Agitación y retorno de fangos FA				85%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	90%	50%
Agitación y retorno de fangos desnitrificación												10%	10%	50%
Decantación					100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tratamiento terciario					1%	1%	2%	2%	2%	2%	5%	10%	10%	20%
Línea de fangos														
Espesador gravitacional			30%	100%	100%	100%	100%	100%	100%					
Espesador mecánico										100%	100%	100%	100%	100%
Eliminación directa (húmedo)		100%	100%	50%	50%	50%								
Deshidratación sacos filtrantes				50%	50%	50%								
Centrifugado							100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Digestión anaerobia y cogeneración													50%	50%

La tabla 8 supone una esquematización del "parque" de depuradoras urbanas, en el que pueden encontrarse una gran variedad de tecnologías y combinaciones de varias tecnologías integradas. Sin embargo, la gran mayoría responden a variantes sobre unas tecnologías básicas, que pueden tipificarse para estimar su perfil de consumo energético.

De forma resumida, las depuradoras se proyectan según los siguientes criterios:

- Para poblaciones de menos de 100 habitantes equivalentes se suelen utilizar fosas sépticas o plantas compactas que constan de una fosa séptica y un filtro biológico. Estas plantas se instalan con la intención de operarlas por gravedad, por lo que su consumo energético es nulo.

- En el siguiente escalón, las plantas para 100 – 1.000 habitantes se suele recurrir a depuradoras biológicas compactas, prefabricadas. El consumo energético responde al bombeo, desbaste y aireación.

- A partir de los 1.000 habitantes-equivalentes, se construyen depuradoras en obra. Aunque la concepción y el diseño de estas instalaciones puede ser muy diferentes, en su esencia se trata de instalaciones que contienen 3 tipos de equipos que consumen energía eléctrica:

    - Bombas para el transporte de agua y fangos.

    - Motores, para el accionamiento de equipos mecánicos (eliminación de gruesos, sedimentos, flotantes).

    - Soplantes o aireadores superficiales que aportan oxígeno para el tratamiento biológico.

  La exigencia de la eliminación de nutrientes en instalaciones mayores de 100.000 h.e. implica asimismo un salto en el consumo energético, al incorporarse nuevas unidades de proceso y aumentar los flujos de recirculación.

  La línea de tratamiento de fangos es un consumidor de energía en plantas de 1.000 a 100.000 h.e, principalmente por los equipos de deshidratación. En plantas de mayor tamaño, se introduce la digestión de fangos. En estas instalaciones se aprovecha el biogás producido para generar electricidad, además del calor necesario para el calentamiento de los digestores.

b. El consumo energético de la depuración urbana

El consumo energético de las depuradoras depende de la tecnología empleada. Ello, a su vez es determinado por el tamaño de la población servida y por los límites de vertido aplicables. La existencia de valores y ratios estándares permite realizar una estimación que proporcionará un dato razonablemente fundamentado.

Para realizar esta estimación se ha partido de 4 fuentes de datos:

1. **Censo de población**

   El censo de población del INE proporciona datos sobre la distribución del tamaño de los núcleos de población.

2. **Valores estándares** de carga contaminante, generación de aguas residuales y límites de vertido. Se trata de datos bibliográficos, generalmente aceptados para dimensionamiento de depuradoras.

3. **Censo de autorizaciones de vertido.**

   En cumplimiento del RD 606/2003, de 23 de mayo, los Organismos de Cuenca deben llevar un Censo de los vertidos autorizados. Asimismo el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MARM), a través de la Dirección General del Agua, debe mantener el Censo nacional de vertidos, en el que figurarán los datos del censo de los Organismos de Cuenca, los correspondientes a las administraciones hidráulicas autonómicas y los vertidos efectuados desde tierra al mar, según los datos facilitados por las Comunidades Autonómicas. Anualmente el MARM presenta un informe sobre autorizaciones de vertido. El último informe disponible presenta la situación a 31 de diciembre de 2006 y proporciona datos sobre el número de vertidos autorizados y los volúmenes de aguas residuales urbanos vertidos.

Censo de población

En la gran mayoría de los casos las depuradoras urbanas son depuradoras municipales. Salvo en grandes ciudades o en municipios con una orografía compleja, se dispondrá de una sola depuradora por municipio. Por ello, como punto de partida para el estudio se han utilizado los siguientes datos del censo del INE al 1 de enero de 2008, último dato disponible.

- Población por tamaño de municipios
- Número de municipios por tamaño de municipios

Estos datos permiten calcular la población media por tamaño de municipio.

La carga contaminante de una depuradora se expresa en habitantes equivalentes. 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. Se ha asumido un valor entre un 5%, para municipios pequeños, y un 20% para municipios grandes. De esta manera se obtiene la población media, tabla 9, expresada en habitantes equivalentes por cada tamaño de municipio.

Tabla 9: Habitantes equivalentes por cada tamaño de municipio

Tratamientos	TOTAL	Habitantes equivalentes					
		<101	500	1.000	2.000	3.000	5.000
Nº de municipos	8.112	1.036	2.750	1.075	936	517	508
Nº de habitantes	46.157.822	62.234	684.322	764.788	1.326.303	3.217.354	
Población media INE		60	249	711	1.417	3.139	
% no doméstico		5%	5%	5%	10%	10%	10%
Población media (habitantes equivalentes)		63	261	747	1.559	2.750	4.400
Población total por clase	54.357.571	65.346	718.538	803.027	1.458.933	1.421.750	2.235.200

Tratamientos	Habitantes equivalentes						
	10.000	20.000	30.000	50.000	100.000	500.000	>500.000
Nº de municipos	549	357	141	98	84	55	6
Nº de habitantes	3.815.486	5.040.092	6.997.338		5.848.264	10.832.927	7.568.714
Población media INE	6.950	14.118	29.278		69.622	196.962	1.261.452
% no doméstico	10%	15%	15%	15%	20%	20%	20%
Población media (habitantes equivalentes)	7.645	16.236	28.750	46.000	83.547	236.355	1.513.743
Población total por clase	4.197.035	5.796.106	4.053.750	4.508.000	7.017.917	12.999.512	9.082.457

- Nº de municipios y Nº de habitantes por categoría de tamaño de municipio. Fuente: INE
- Población media INE= Nº de habitantes / Nº de municipios, expresa el tamaño medio de las poblaciones en cada categoría.
- % no doméstico = valor estimado/asumido que expresa el porcentaje de la carga orgánica producida por vertidos no domésticas con respecto a la carga orgánica doméstica (producida por la población).
- Población media (habitantes equivalentes) = la población media INE (habitantes equivalentes domésticas) incrementada por el porcentaje no doméstico.
- Población total por clase = Nº de habitantes incrementado por el porcentaje no doméstico = Habitantes equivalentes totales

El INE recoge además estadísticas sobre recogida y tratamiento de aguas residuales.

La información para el año 2006 indica, tabla 10, que casi el 90% de las aguas residuales urbanas se depura, mientras que solo un 9% se recicla.

Tabla 10: Recogida y tratamiento de aguas residuales

	m^3/año
Aguas residuales recogidas (incl. pluviales)	5.608.507.875
Aguas residuales tratadas	5.015.551.140
Agua reutilizada total	496.929.250
% depurado	89,4%
% reciclada	8,9%

Valores estándares

A continuación se presentan los valores estándares que se emplearán para la estimación del consumo energético del sector de la depuración urbana.

Caudales y cargas para los afluentes

El cálculo de los caudales y las cargas de las depuradoras, tabla 11, se realiza a partir de las dotaciones teóricas de la Norma ATV-A131.

Tabla 11: Caudales y cargas

Dotación por habitante equivalente 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_{tot}	9 mg/l

Calidad de efluente

Para la calidad del efluente se ha tomado la legislación europea de aguas residuales (91/271/CEE).

Siguiendo esta legislación se han tomado las calidades de efluente dependiendo de los habitantes equivalentes (h.e), que se exponen en la tabla 12.

Tabla 12: Calidades en función de los habitantes equivalentes

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
Ntotal		-	15 mg/l	10 mg/l
Ptotal		-	2 mg/l	1 mg/l

* Aunque esta opción no entraría dentro de las calidades de la legislación 91/271/CEE, corresponde con los rendimientos normales después de un tratamiento de sedimentación como una fosa séptica, habituales para pequeños núcleos o población dispersa.

Otros

Aspectos generales que se han tenido en cuenta para todas las depuradoras durante el estudio, las cuales son:

- Todos los colectores vienen a una profundidad de 2 m. al entrar a la parcela.
- El bombeo de agua bruta bombeará a una altura de 3 - 7 m.
    - Mínimo 3 m.= 2 m. de profundidad + 1 m. para que el proceso desarrolle por gravedad, incl. pérdida de carga.
    - Max 7 m. = 2 m. de profundidad + 3 m. para que el proceso desarrolle por gravedad + 2 m. de pérdida de carga.
- Las fosas sépticas estarán enterradas para evitar la necesidad de un bombeo previo.

Censo de autorizaciones de vertido

El censo de autorizaciones de vertido de aguas residuales urbanas o asimilables y de aguas residuales industriales más reciente presenta los datos a 31 de diciembre de 2006.

En la tabla 13 se presentan los datos sobre número de vertidos y su volumen.

Tabla 13: Volumen y número de vertidos

Vertidos urbanos	Nº de municipios	Nº de autorizaciones	Volumen (Millones de m^3/año)
< 250 h.e.	2.411	10.477	40,49
250 – 1.999 h.e	3.386	3.827	188,27
2.000 – 9.999 h.e.	1.574	1.136	381,39
10.000 – 49.999 h.e.	596	349	494,20
> 50.000 h.e.	145	112	1.982,97
h.e. desconocido		936	34,47
TOTAL URBANOS	**8.112**	**16.837**	**3.121,78**

De esta información, junto con los datos estadísticos del INE (capítulo 3.1) se pueden extraer la siguiente información:

- Suponiendo que el volumen de vertidos autorizados corresponde con el 89,4% de la población (datos de depuración del INE), **la generación de aguas residuales por habitante equivale a** 3.121.780.000/(46.157.822*365) = 0,185 m^3/persona y día = **185 litros por persona y día**. Este dato es muy parecido al valor de 200 l/p.p.d tomado como valor estándar. Cabe observar que el volumen de vertido autorizado es una de las bases para el cobro de las tasas de vertido, por lo que se puede asumir que sea un dato razonablemente ajustado.

- El número total de autorizaciones de vertido, 16.837, duplica el número de municipios (8.211). Las 8.000 autorizaciones adicionales corresponden a los vertidos de pequeños núcleos de menos de 250 h.e. (2.411 municipios y 10.477 autorizaciones en esta categoría de tamaño de municipio). Las depuradoras que se utilizan para estos tamaños son de tipo compactos, desde fosas sépticas que no consumen energía, hasta depuradoras compactas y biodiscos que tienen un consumo energético proporcionalmente elevado.

c. Consumo energético global en depuración urbana en España

La figura 1 presenta un esquema que resume las unidades de tratamiento que se han diferenciado en las estimaciones del consumo energético.

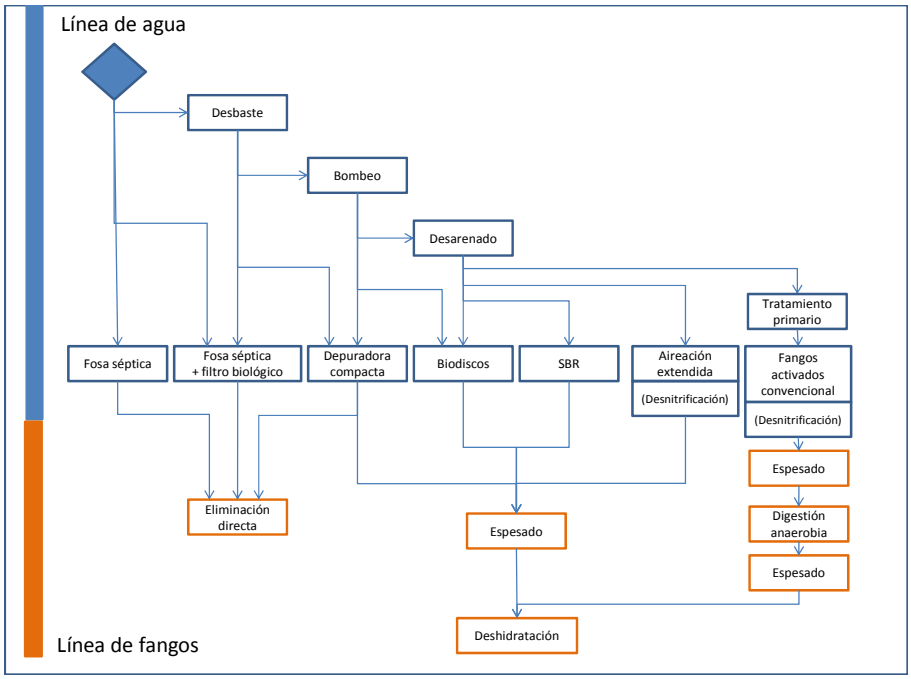


Figura 1: Unidades de tratamiento

Este esquema es la llave para la interpretación de las tablas 14,15 y 16.

La tabla 14 presenta el uso porcentual de una determinada unidad en cada rango de municipios.

Por su parte, la tabla 15 muestra la potencia de cada unidad de tratamiento, por habitante equivalente

Por lo que respecta a la tabla 16 combina los datos de las tablas 15 y 16 con la población total, para expresar la potencia total en kW para la depuración de las aguas residuales en cada rango de municipios.

Tabla 14: Porcentaje de uso de los principales elementos de una planta depuradora, diferenciados por tamaño del municipio.

Tamaño de municipio	Total	<101	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	>500.000
Línea de agua														
Desbaste		20%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Desarenado				100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tratamiento primario														100%
Fosa séptica		40%												
Fosa séptica + filtro biológico		40%												
Compacto aeración extendida		20%	80%	85%										
Biodiscos			20%	15%										
Aireación extendida- Superficial					50%	50%	40%	30%	20%	20%	10%	10%		
Aireación extendida- Burbujas					50%	50%	60%	70%	80%	80%	90%	80%		
Fangos activos													90%	50%
Fangos activos + desnitrificación												10%	10%	50%
Agitación y retorno de fangos FA				85%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	90%	50%
Agitación y retorno de fangos desnitrificación												10%	10%	50%
Decantación					100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Tratamiento terciario					1%	1%	2%	2%	2%	2%	5%	10%	10%	20%
Línea de fangos														
Espesador gravitacional			30%	100%	100%	100%	100%	100%	100%					
Espesador mecánico										100%	100%	100%	100%	100%
Eliminación directa (húmedo)		100%	100%	50%	50%	50%								
Deshidratación sacos filtrantes				50%	50%	50%								
Centrifugado							100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Digestión anaerobia y cogeneración													50%	50%

Tabla 15: Potencias unitarias, expresadas en W/h.e., de los principales elementos de una planta depuradora, diferenciadas por tamaño del municipio.

Tamaño de municipio	Total	<101	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	>500.000
Línea de agua														
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	2,10	1,00	0,70	0,50	0,40	0,20	0,20	0,15	0,12	0,12	0,11
Motores y bombas desarenado				2,50	1,20	0,80	0,50	0,40	0,25	0,25	0,25	0,16	0,07	0,07
Motores y bombas primario													0,01	0,01
Fosa séptica														
Fosa séptica + filtro biológico														
Compacto aeración extendida		30,00	20,00	6,70										
Aireación biodiscos			3,30	1,80										
aireación extendida mecánica					9,50	6,70	6,50	6,20	5,00	4,70	4,70	4,70		
Aireación extendida con soplantes					9,50	6,70	6,50	6,20	5,00	2,88	2,88	2,88		
Fangos activos													1,80	1,80
Aireación FA con desnitrificación												3,45	2,16	2,16
Agitación y retorno de fangos FA				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												0,48	0,36	
Decantación y bombeo fangos					0,40	0,32	0,25	0,25	0,14	0,12	0,08	0,05	0,01	0,01
Tratamiento terciario					0,52	0,42	0,33	0,33	0,18	0,16	0,10	0,07	0,01	0,01
Línea de fangos														
Espesador gravitacional			0,20	0,10	0,05	0,03	0,02	0,15	0,10					
Espesador mecánico										0,20	0,15	0,10	0,09	0,02
Eliminación directa (húmedo)		0	0	0	0	0								
Deshidratación sacos filtrantes				0,40	0,32	0,22								
Centrifugado							0,60	0,60	0,75	0,50	0,40	0,25	0,15	0,15
Digestión anaerobia y cogeneración													-0,60	-0,60

Tabla 16: Potencias totales, expresadas en kW, de los principales elementos de una planta depuradora, diferenciadas por tamaño del municipio.

Tamaño de municipio	Total	<101	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	>500.000
habitantes equivalentes por grupo	54.357.571	65.346	718.538	803.027	1.458.933	1.421.750	2.235.200	4.197.035	5.796.106	4.053.750	4.508.000	7.017.917	12.999.512	9.082.457
Línea de agua														
Bombeo (kW)	10.240	4	70	78	189	184	290	681	1.053	859	955	1.487	2.583	1.805
Motores y bombas desbaste (kW)	14.589	24	1.581	1.686	1.459	995	1.118	1.679	1.159	811	676	842	1.560	999
Motores y bombas desarenado (kW)	13.950			2.008	1.751	1.137	1.118	1.679	1.449	1.013	1.127	1.123	910	636
Motores y bombas primario (kW)	64													64
Fosa séptica														
Fosa séptica + filtro biológico														
Compacto aeración extendida	16.462	392	11.497	4.573										
Aireación biodiscos (kW)	691		474	217										
Aireación mecánica (kW)	40.337				6.930	4.763	5.812	7.806	5.796	3.812	2.119	3.299		
Aireación soplantes (kW)	98.981				6.930	4.763	8.717	18.215	23.184	9.334	11.678	16.159		
Aireación Fangos Activos	29.284												21.096	8.188
Aireación desnitrificación (kW)	15.063											2.424	2.813	9.826
Agitación y retorno de fangos FA	43.446			3.891	2.334	1.848	4.470	7.555	8.694	3.648	3.606	2.526	3.510	1.362
Agitación y retorno de fangos desnitrificación	805											337	468	
Decantación y bombeo fangos (kW)	4.877				584	455	559	1.049	811	486	361	351	130	91
Tratamiento terciario	199				8	6	15	27	21	13	23	46	17	24
Línea de fangos														
Espesador gravitacional	1.493		43	80	73	43	45	630	580					
Espesador mecánico	3.540									811	676	702	1.170	182
Eliminación directa (húmedo)														
Deshidratación sacos filtrantes	550			161	233	156								
deshidratación centrífugas (kW)	17.103						1.341	2.518	4.347	2.027	1.803	1.754	1.950	1.362
Digestión anaerobia y cogeneración (kW)	-6.625												-3.900	-2.725
Potencia total (kW)	305.048	420	13.665	12.694	20.491	14.351	23.484	41.839	47.095	22.814	23.025	31.051	32.306	21.814
Potencia por habitante (W/h.e.)	5,6	6,4	19,0	15,8	14,0	10,1	10,5	10,0	8,1	5,6	5,1	4,4	2,5	2,4

El resultado final del ejercicio es que la potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas 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/m^3.

La figura 2 presenta la potencia por unidad de tratamiento, expresado en watios por habitante equivalente.

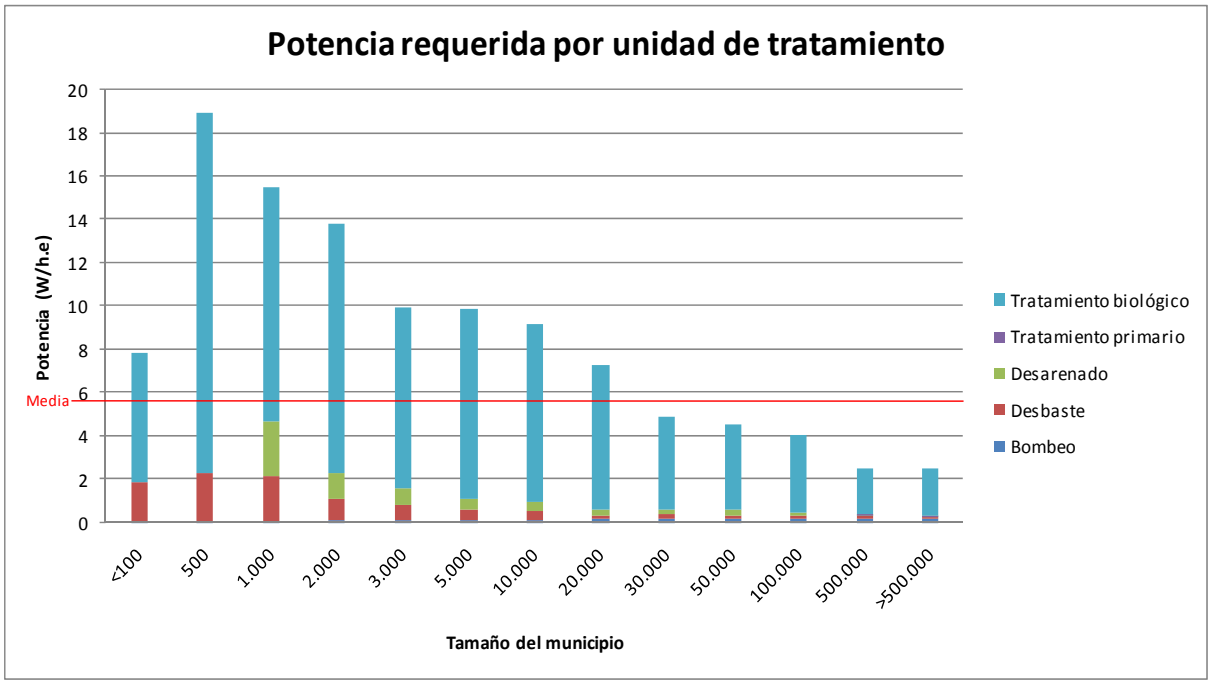


Figura 2: Potencia requerida por unidad de tratamiento

La figura 2 ilustra las siguientes particularidades:

- Las depuradoras para poblaciones de menos de 100 h.e. normalmente se operan por gravedad y una parte relevante carece de depuración biológica aerobia. Por ello, el consumo por habitante en este rango es bajo.

- En depuradoras pequeñas el peso del desbaste y desarenado en el consumo energético de la depuradora es relativamente grande. 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 malfuncionamientos debido a atascos (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.

El análisis de los diseños ha revelado además otro factor de interés:

- 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. De hecho, el ejercicio realizado en el marco de este estudio ha significado una cierta revelación, sobre la magnitud de las ineficiencias energéticas y, en consecuencia, de las oportunidades de mejora.

En la figura 3 se presenta la distribución de la potencia total requerida en España para la depuración urbana (305 MW) por los tramos del tamaño de municipio. Además se presenta el número de municipios (depuradoras) en cada tramo.

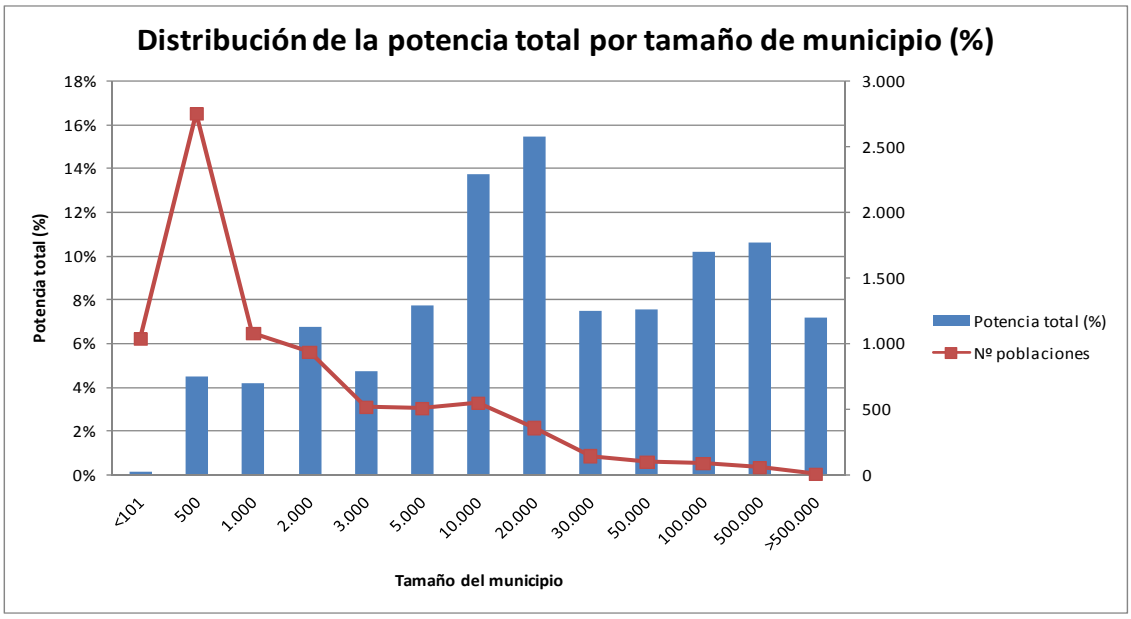


Figura 3: Distribución de la potencia total por tamaño de municipio.

Se observa que el 28% del consumo total se produce 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 sobredimensionada por razones de robustez y simplificación del proceso.

El 44% del consumo se produce en depuradoras de 5.000 – 50.000 habitantes, con el 14% del número de municipios. Estas depuradoras generalmente carecen de sistemas de control de la aireación, lo que se traduce en elevados consumos.

El 28% restante del consumo se produce en depuradoras grandes (< 50.000 h.e.), con consumos unitarios más ajustados.

d. Potencial de ahorro en depuración urbana

Con el fin de realizar una primera estimación del potencial de ahorro, se han redefinido los consumos energéticos, asumiendo una mejor gestión de la aireación (mediante temporizadores y el empleo de sistemas de agitación específicos) y mediante modificaciones conceptuales en el pretratamiento (buscando alternativas para sistemas que incluyen motores potentes por razones de robustez).

Los resultados se resumen en la figura 4, donde se marca en rojo la diferencia entre el consumo actual (valor superior de la barra roja) y el consumo tras implantar las mencionadas medidas de ahorro (valor inferior de la barra roja). La figura indica que el mayor potencial de ahorro (máxima amplitud de la barra roja) se encontrará en las pequeñas plantas. El ahorro global es de un 17, 5%.

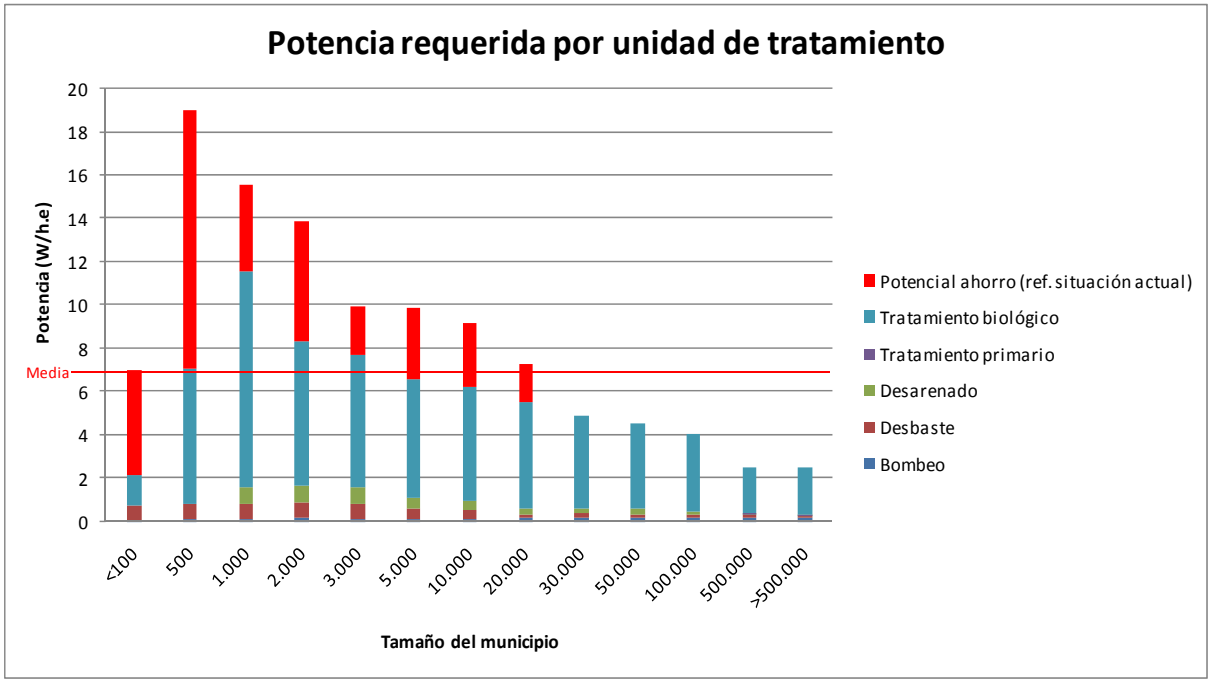


Figura 4: Potencia requerida por unidad de tratamiento

En la tabla 17 se resume el potencial de ahorro:

Tabla 17: Potencial de ahorro

	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%**

e. Conclusiones

- El censo de depuradoras del MARM no recoge datos que permiten una evaluación cuantitativa del consumo energético.
- La potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas en España es de 305 MW, lo que equivale a 5,6 W/h.e o a un consumo de 49 kWh/(h.e.año)
- Se estima el potencial de ahorro global en un 17,5%. El mayor impacto se podrá lograr en las pequeñas plantas mediante la implantación de temporizadores y modificaciones conceptuales en el pretratamiento.
- Los diseños de una depuradora se basan en criterios de proceso y funcionamiento mecánico (robustez). Apenas se toma en consideración el consumo energético con la excepción de las grandes depuradoras, donde el control de la aireación, además de su función para el control del proceso, está pensado para racionalizar el consumo energético.
- Depuradoras pequeñas (< 5.000 h.e.) emplean equipos de pretratamiento dimensionados con criterios de robustez. La potencia de bombas y motores está justificada por la necesidad de evitar atascos y obstrucciones.
- Depuradoras pequeñas y de tamaño medio carecen de sistemas de control de la aireación. Además, la aireación se sobredimensiona para cumplir la doble función de aireación y mezcla.
- Depuradoras grandes tienen un consumo más ajustado ya que cuentan con sistemas de control de la 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 mecánicas e hidráulicas acordes con la capacidad de la planta.

f. Consumo energético de la depuración de aguas residuales industriales

Muchos procesos industriales consumen agua y generan aguas residuales. Debido a la cada vez mayor presión competitiva y normativa, la industria ha reconocido la necesidad de reducir el consumo de agua y reutilizar y reciclar el agua de proceso. Las medidas integradas en el proceso, por tanto cobran mucha importancia. En el contexto de este estudio se entiende que las medidas integradas en el proceso forman parte del proceso productivo, figura 5, por lo que no serán considerados.

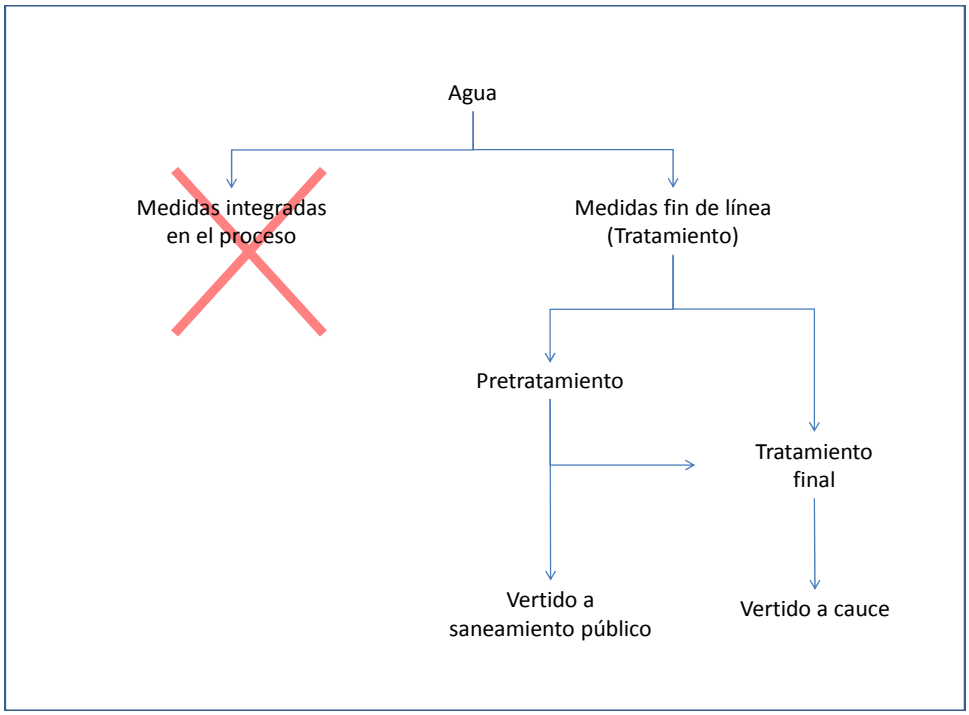


Figura 5: Agua en el proceso productivo

La mayor relevancia de las medidas integradas supone dos importantes cambios en la gestión de las aguas residuales:

- Se reduce la cantidad de aguas destinados a tratamiento y vertido.
- Se incrementa la carga contaminante de las aguas residuales (efecto purga)

Las medidas de tratamiento pueden subdividirse en dos grupos:

- Los sistemas de pretratamiento, que son aquellos que se instalan cerca de la fuente y se destinan al tratamiento de flujos específicos.
- Los sistemas de tratamiento, destinados al tratamiento del flujo total de aguas residuales generados en una industria. En industrias con una problemática de vertido

compleja, pueden instalarse sistemas de pretratamiento, cuyo efluente se dirige a una depuradora central.

Aunque no puede hablarse de características generales de aguas residuales industriales, su principal diferencia con aguas residuales urbanas es que puede contener sustancias insolubles, aceites y grasas, sustancias tóxicas o que pueden tener elevadas concentraciones de sales, elevadas temperaturas o pH extremos que impiden su tratamiento directo en una depuradora biológica.

En la figura 6 se resume la concepción de un sistema de depuración de aguas industriales.

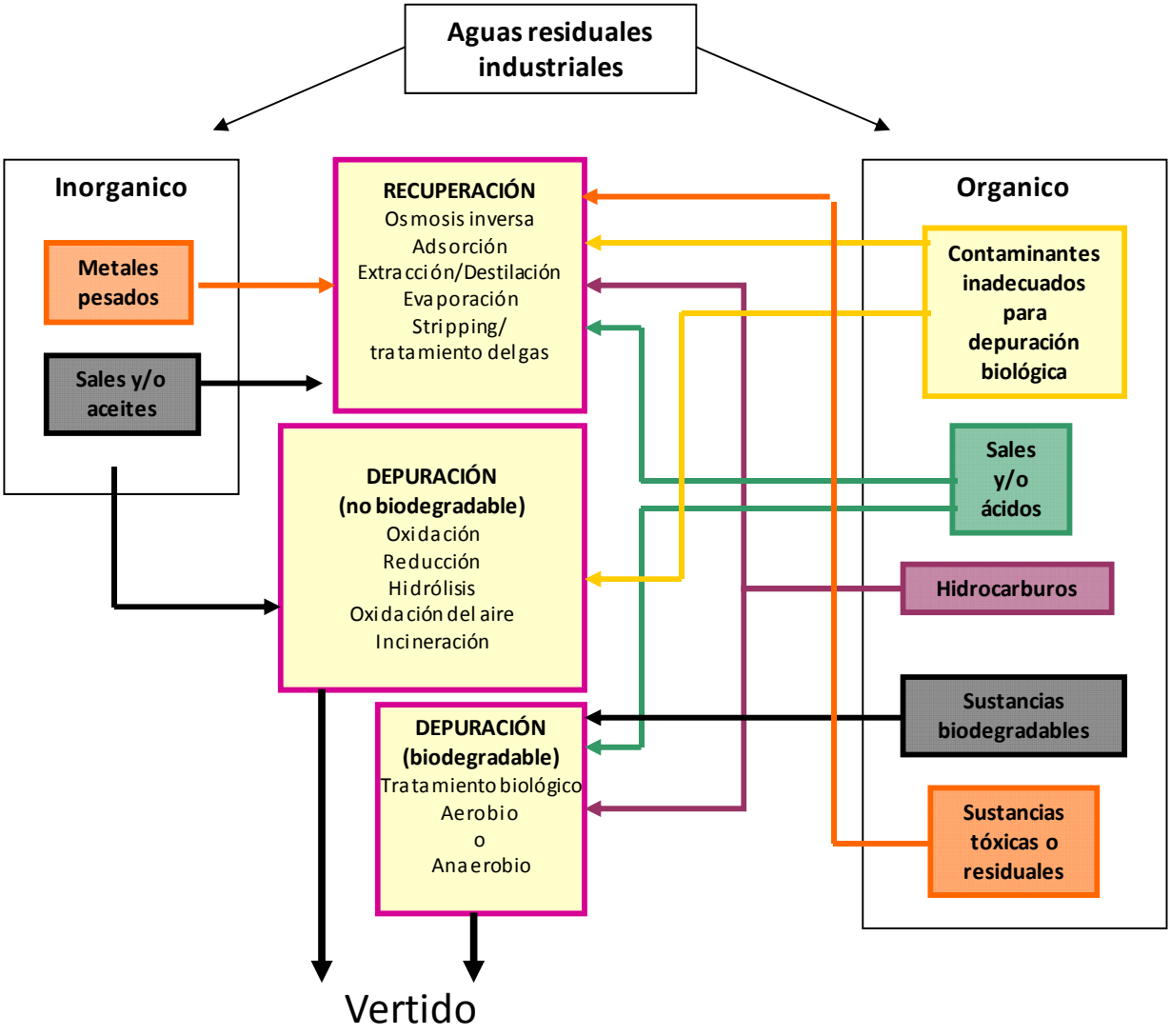


Figura 6: Sistema de depuración

Los procesos de tratamiento para residuos industriales se pueden subdividir en:

- Procesos físicos
- Procesos químicos
- Procesos biológicos

En el Apéndice C se presentarán los principales sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales, centrándose en aquellos de especial relevancia por su consumo energético.

Censo de autorizaciones de vertido

En cumplimiento del RD 606/2003, de 23 de mayo, los Organismos de Cuenca deben llevar un Censo de los vertidos autorizados. Asimismo el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MARM), a través de la Dirección General del Agua, debe mantener el Censo nacional de vertidos, en el que figurarán los datos del censo de los Organismos de Cuenca, los correspondientes a las administraciones hidráulicas autonómicas y los vertidos efectuados desde tierra al mar, según los datos facilitados por las Comunidades Autónomas. Anualmente el MARM presenta un informe sobre autorizaciones de vertido. El último informe disponible presenta la situación a 31 de diciembre de 2006 y proporciona datos sobre el número de vertidos autorizados y los volúmenes de aguas residuales industriales vertidos.

En la tabla 18 se presentan los datos sobre número de vertidos y su volumen.

Tabla 18: Número de vertidos y volumen

Tipo de aguas industriales		**Nº autorizaciones**	**Volumen (millones de m3/año)**
Clase 1	Servicios, energía y agua, alimentación, conservera, confección, madera, manufacturas diversas	3.339	343,45
Clase 2	Materiales de construcción, bebidas y tabaco, aceite, carnes y lácteos, textil, papel	1.512	126,6
Clase 3	Zootecnia	351	155,55
Clases 1,2,3 con peligrosos	Metal, minería, química, curtidos, tratamientos de superficie	299	118,97
TOTAL		**5.501**	**744,57**

El censo no ofrece ninguna información sobre las cargas contaminantes o tipología de los sistemas de tratamiento.

g. Conclusiones

El único dato cuantitativo disponible sobre la depuración industrial es el del volumen de vertido autorizado de 744 millones de m^3 para un total de 5.501 puntos de vertido.

La gran variabilidad de procesos industriales, tipologías de aguas residuales, y tecnologías de tratamiento y sus combinaciones no permiten esquematizar la depuración industrial y extraer un orden de magnitud del consumo energético.

En cualquier caso, de la somera evaluación realizada se puede concluir que:

- La mayoría de los procesos de tratamiento físico y químico no son importantes consumidores de energía. El consumo se limita al bombeo, ventilación y mezcla.
- Aquellos procesos que tienen un consumo energético elevado suelen tener aplicaciones muy precisas y a pequeña escala.
- Los procesos biológicos de tratamiento son los más comunes y se rigen por los mismos criterios que la depuración urbana.
- La depuración anaerobia, que es un productor neto de energía, es una opción convencional para aguas residuales de elevada carga orgánica biodegradable.

Resultados generales del cuestionario

Los temas del cuestionario.

Las tecnologías tratadas en el cuestionario fueron propuestas y consensuadas por el Panel de Expertos, el cual intentó recoger en las mismas las tendencias más importantes que acontecerán en el ámbito del Agua y Energía en los próximos años. Las 41 hipótesis recogidas, abarcan un amplio espectro de tecnologías y sectores de aplicación de la desalación y depuración, y fueron estructuradas en 6 grandes bloques temáticos que permitieron dotar al cuestionario de un orden que facilitara la respuesta a las personas encuestadas.

Los **bloques temáticos** en los que se agruparon:

- D - Ahorro energético en desalinización. (corto plazo)

  La mejora de la eficiencia energética en procesos de desalación enfocadas al corto plazo, necesariamente se sustentan sobre tecnologías actuales de desalación y medidas ya desarrolladas y probadas.

- A - Ahorro energético en depuración (corto plazo)

  El estudio previo ha puesto de relieve que puede lograrse un importante ahorro energético en la optimización de las plantas depuradoras existentes. Aquellas medidas de optimización que no requieren grandes modificaciones en el proceso se presentan en esta sección, dedicada a posibles medidas a corto plazo.

- S - Tendencias en desalación

  Las tendencias en la desalación a medio y largo plazo se orientan hacia nuevos materiales (membranas) para las tecnologías actuales o hacia nuevas tecnologías para la obtención de agua dulce.

- T - Tendencias tecnológicas en depuración

  En la sección de tendencias tecnológicas se incluyen tecnologías que bien se encuentran en estado de investigación, o bien tienen poca presencia en el mercado. En cualquier caso, únicamente se han incluido tendencias, enfocadas hacia la eficiencia energética o con potencial para el ahorro o aprovechamiento energético.

- G - Nuevos conceptos de gestión de aguas usadas

  El modelo actual de gestión de los residuos líquidos está basado en el agua como sistema para su transporte. Este modelo encuentra su máximo desarrollo en las grandes redes combinadas de saneamiento que transportan aguas residuales y pluviales hacia un punto final de vertido, en su caso tras una depuración.

Las redes combinadas dificultan y encarecen los procesos de depuración debido a la dilución y los elevados caudales. Los nuevos conceptos de gestión son aquellos que buscan una alternativa al agua como medio de transporte de residuos líquidos, los que cuestionan la centralización del tratamiento de aguas residuales y los que separan y gestionan los diferentes tipos de aguas usadas.

- R - Aguas residuales como recurso

  Hasta hace poco se opinaba que "lo único valioso en las aguas residuales es el agua". Es por ello que los procesos de depuración "fin de línea" actuales, están diseñados bajo la óptica de lograr la máxima calidad del agua, eliminando los contaminantes. El matiz del "fin de línea" es necesario para excluir la depuración industrial, donde se implantan activamente soluciones integradas para reutilizar agua y recuperar materiales en proceso.

  Algunos nuevos desarrollos en la depuración "fin de línea" se orientan hacia la recuperación de productos como nutrientes, producción de materias primas para procesos industriales o aprovechamiento del valor energético de los contaminantes contenidos en las aguas residuales y obviamente, la reutilización del agua.

Análisis Estadístico.

Distribución de la participación.

El cuestionario con los temas que el Panel de Expertos consideró como más relevantes se hizo llegar a un total de 101 expertos en Agua y Energía de diferentes ámbitos (centros de investigación, universidad, industria e ingeniería, administración, asociaciones y profesionales autónomos), ver figura 7.

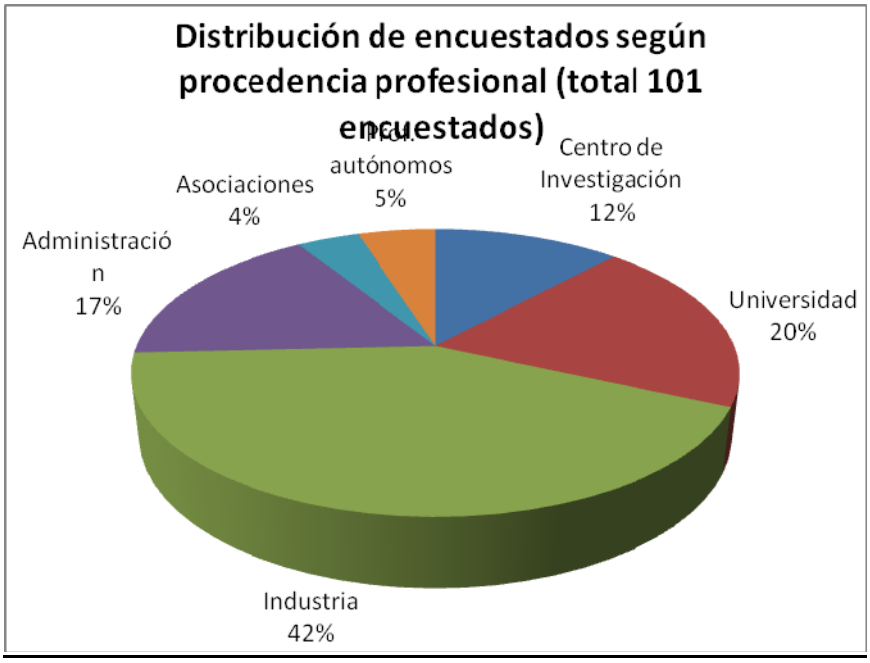


Figura 7: Distribución de los encuestados según procedencia profesional

El número de cuestionarios respondidos ha sido 25, por lo que la tasa de respuesta del cuestionario es del 25%

La procedencia profesional de los encuestados que respondieron se recoge en la figura 8:

Figura 8: Respuestas según procedencia profesional de los encuestados

La distribución del perfil profesional es muy similar entre encuestados y respuestas y mantiene el equilibrio entre entidades públicas (administración, centros de investigación y universidades) y entidades privadas (industrias, empresas gestoras y asociaciones profesionales).

En la figura 9 se puede apreciar la distribución de la población que respondió el cuestionario.

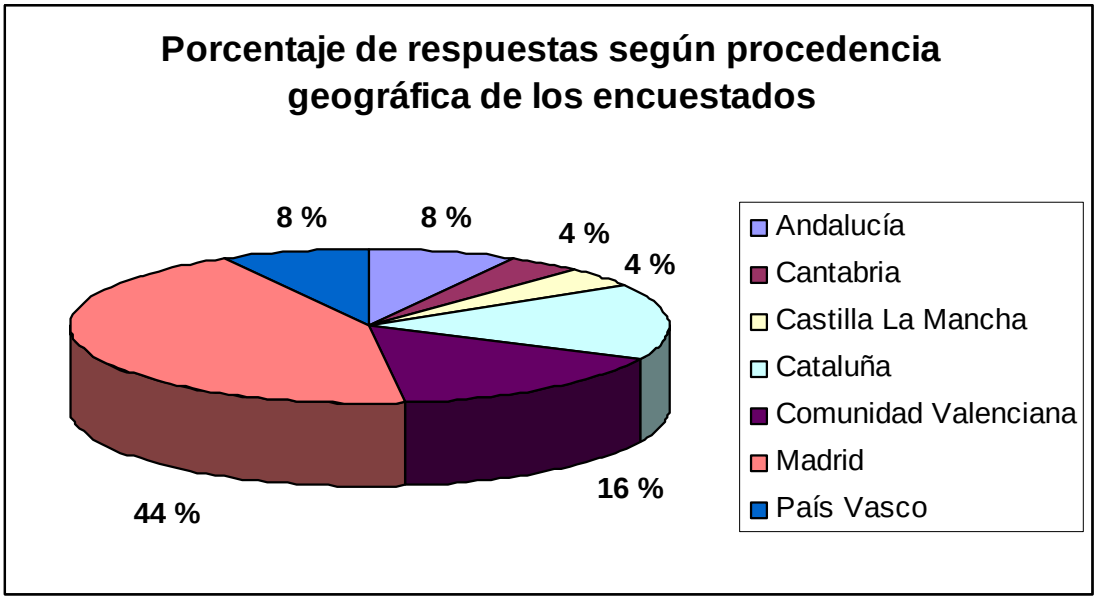


Figura 9: Respuestas según procedencia geográfica de los encuestados

Clasificación de las respuestas

Clasificación en función de su Grado de Importancia

De la agregación de todas las respuestas recibidas al cuestionario, se muestra a continuación, figura 10, el grado de importancia medio de todos los temas de la encuesta. Como se puede apreciar, apenas un 20 % de las tecnologías analizadas pueden considerarse como de baja importancia para el desarrollo futuro.

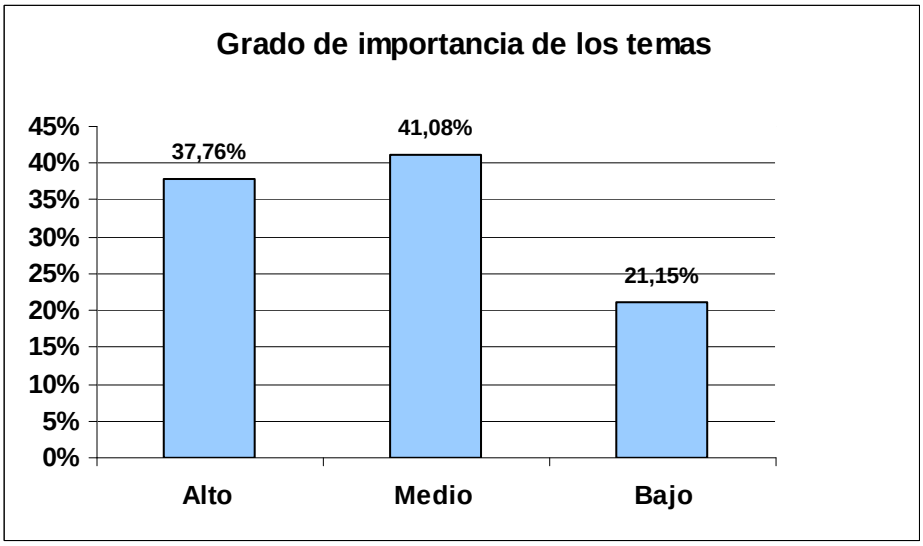


Figura 10: Grado de importancia de los temas

A partir de las respuestas obtenidas a la pregunta “grado de importancia”, para cada uno de los temas propuestos se calcula el **IGI**, índice que, otorgando un mayor peso a las respuestas

que consideran grados de importancia elevados, permite ordenar de mayor a menor rango de importancia todas las tendencias.

I.G.I. = (3·A + 2·B + 1·C) / N

Siendo:

I.G.I. = Índice del Grado de Importancia.
A = Nº de respuestas que consideran que el grado de importancia del Tema es Alto.
B = Nº de respuestas que consideran que el grado de importancia del Tema es Medio.
C = Nº de respuestas que consideran que el grado de importancia del Tema es Bajo.
N = Nº total de respuestas de la variable "grado de importancia"

El **Índice de Grado de Importancia** traduce la mayor o menor coincidencia de los expertos a la hora de valorar la importancia concedida a cada tema. Según la fórmula expresada, el índice puede oscilar entre un máximo de 3 puntos (importancia alta) y un mínimo de 1 punto (importancia baja). En términos generales, el IGI permite una clasificación numérica de los temas, tal y como se aprecia en la siguiente figura. Los temas con mayor puntuación representan las principales inquietudes de futuro de los expertos.

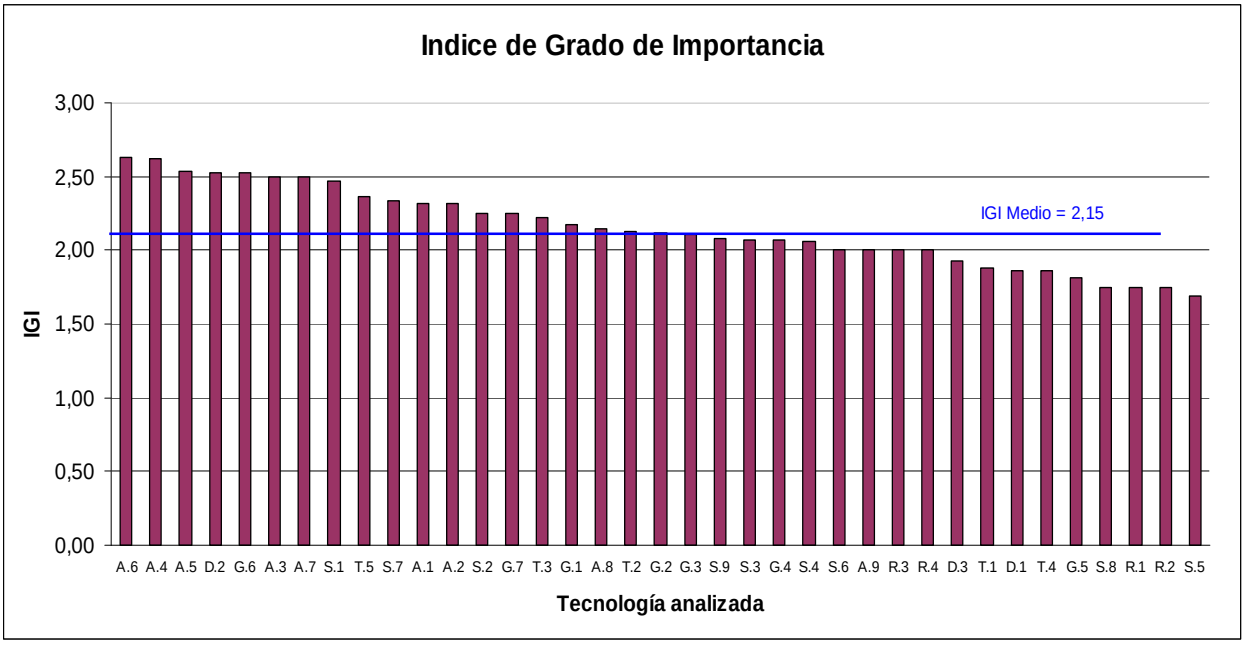


Figura 11: Índice de grado de importancia

Clasificación en función de la Capacidad Científico-Tecnológica nacional.

Se estima la posición de España en relación a la capacidad científico-tecnológica en las tecnologías críticas analizadas.

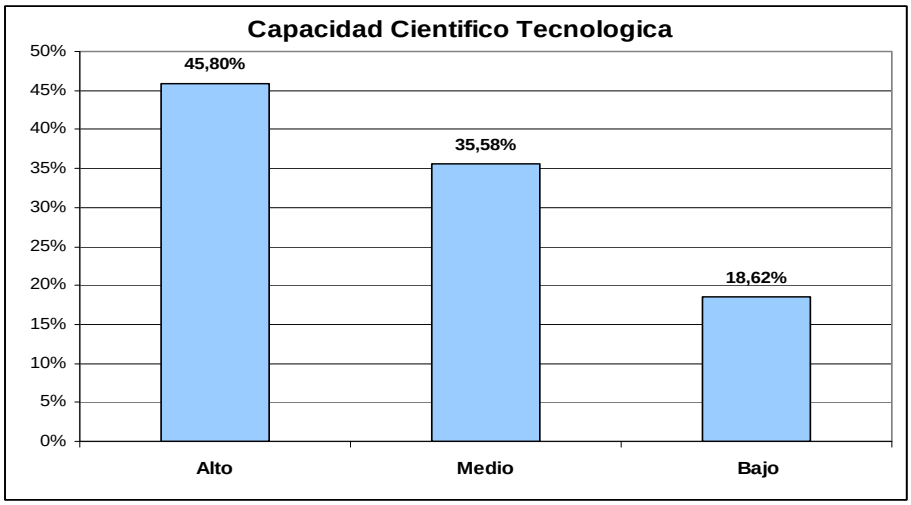


Figura 12: Capacidad científico-tecnológica

Estos resultados, figura 12, muestran que la posición científico-tecnológica en cuanto a las tecnologías analizadas, es en términos generales bastante alta. A partir de las respuestas obtenidas a la pregunta "capacidad científico tecnológica", para cada uno de los temas propuestos se calcula el **Índice de Grado de Posición**, calculado de forma análoga al IGI que, otorgando un mayor peso a las respuestas que valoran mejor la posición tecnológica de España, permite ordenar las tendencias según esta variable, según se expone en la figura 13.

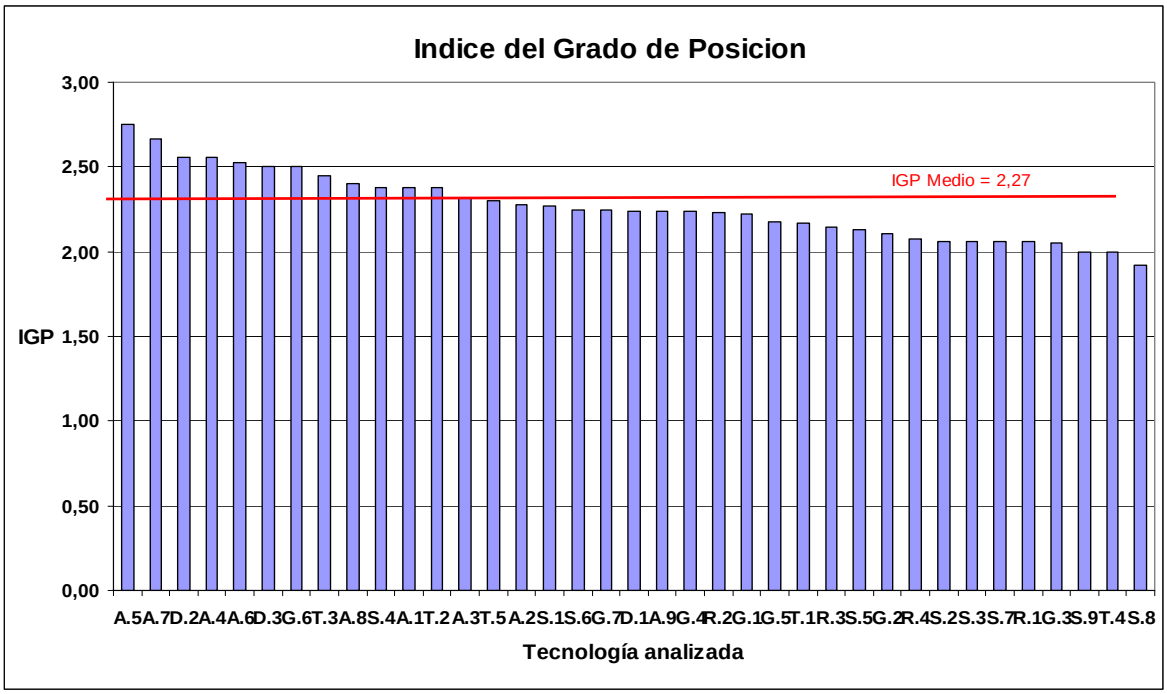


Figura 13: Índice del Grado de Posición

Clasificación en función de la Facilidad para su incorporación.

La facilidad para la incorporación de la tecnología analizada, fue asimismo evaluada por parte de los expertos. Este punto es de alto interés, puesto que indica la posibilidad real de que la capacidad técnica nacional se pueda plasmar en equipos comerciales que puedan ser

empleados por la industria. Se observa, figura 14, que, a modo general, dos tercios de las tecnologías analizadas son relativamente fáciles de incorporar.

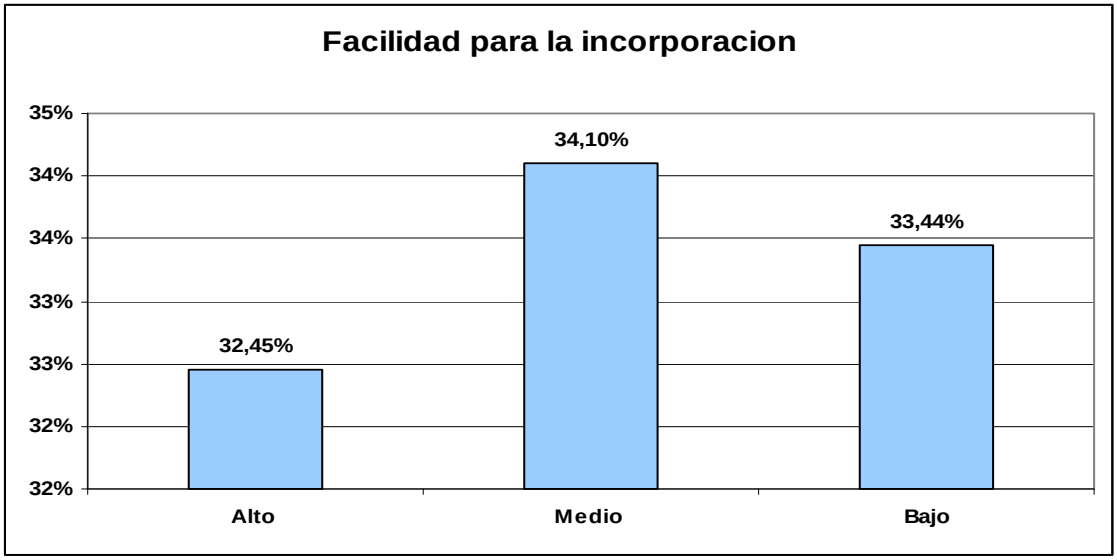


Figura 14: Facilidad para la incorporación

Clasificación en función del Potencial de Ahorro.

Igualmente se les planteó a los expertos la evaluación del potencial real de ahorro energético de las tecnologías analizadas. El objeto fundamental del estudio es analizar la relación entre las tecnologías de tratamiento del agua y sus implicaciones de consumo energético, por lo que esta variable es también considerada de alto interés para el estudio.

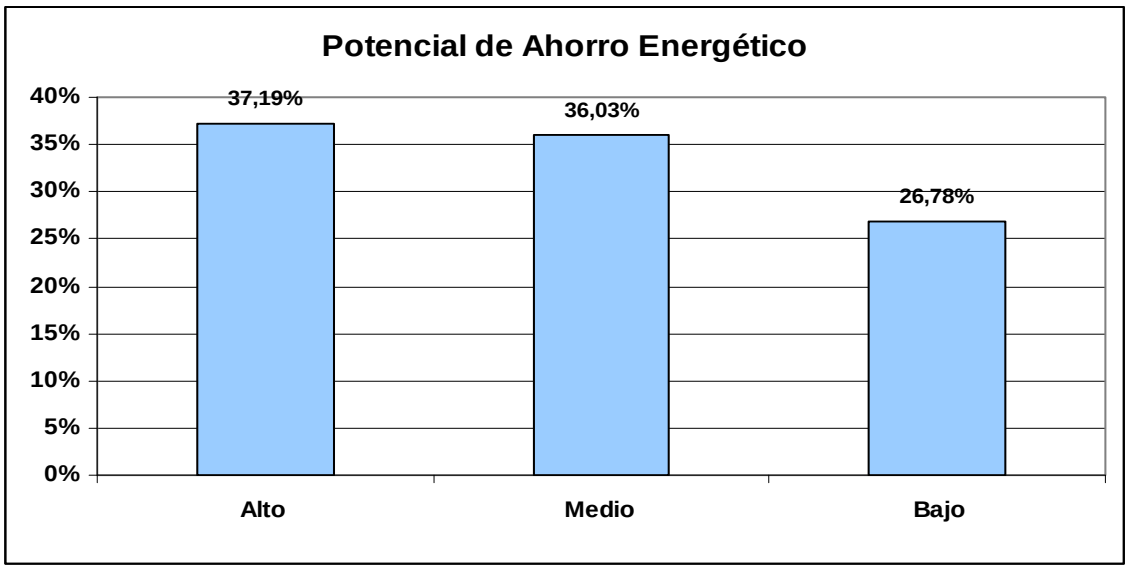


Figura 15: Potencial de Ahorro Energético

Como se puede apreciar en la figura 15, existe un buen porcentaje de tecnologías con un alto potencial de ahorro energético, y más de un 35 % con un potencial medio. En total, casi

tres cuartas partes de las tecnologías estudiadas presentan un potencial de ahorro energético suficiente como para ser tenido en cuenta.

Esta consideración ha sido la clave en el análisis del Panel de Expertos, donde se ha profundizado en mayor término en las tecnologías identificadas como críticas para el objetivo del estudio y donde se han evaluado las necesarias medidas para el desarrollo.

Medidas para el Desarrollo

El último apartado valorado en el cuestionario consistió en la identificación y selección de las principales medidas que se consideraban estratégicas para un adecuado desarrollo de la tecnología analizada.

Los valores a estudiar eran: Avances en la legislación, Incentivos en la Administración pública, Estímulo a la investigación, Formación de técnicos-científicos, Estímulo I+D en industria y Concienciación de usuarios. Los resultados generales obtenidos son los expuestos en la figura 16.

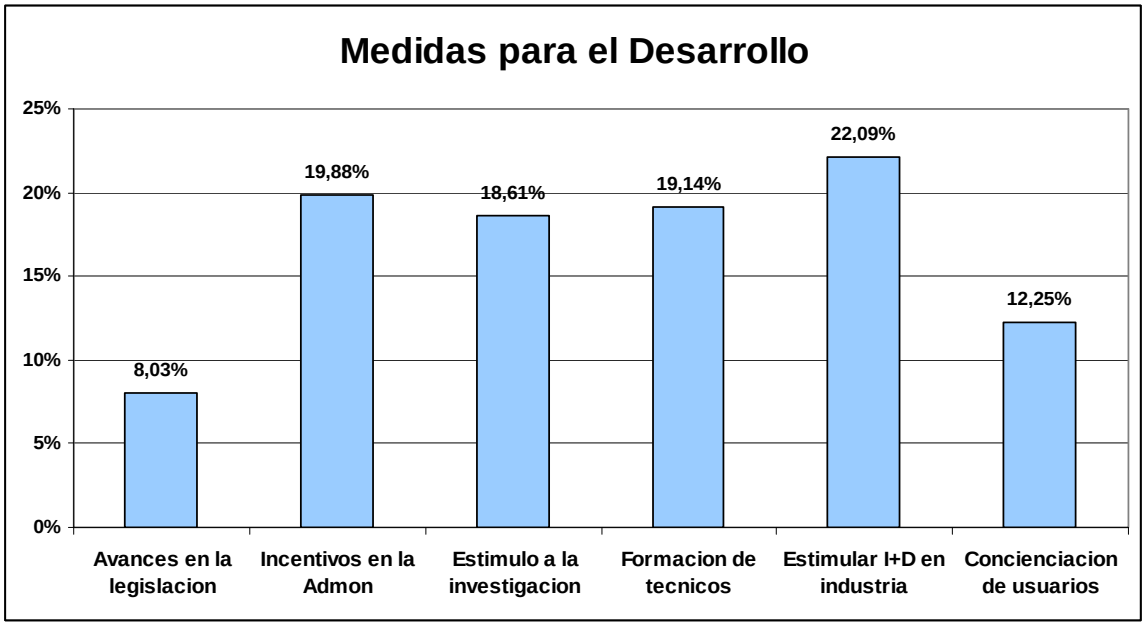


Figura 16: Medidas para el desarrollo

Según se aprecia, existe bastante igualdad en la identificación de cuatro de las principales medidas para el desarrollo de las tecnologías, y concretamente están relacionadas con la capacitación tecnológica (estimulo a la investigación, especialmente la aplicada) y humana (formación) y por supuesto, con la necesidad de incentivos por parte de la administración. La concienciación de usuarios y los avances en la legislación son medidas con una importancia bastante menor para los expertos que respondieron al cuestionario.

Análisis de medidas de ahorro energético (Corto plazo)

Resultados de la encuesta

Las medidas de ahorro energético se sustentan sobre tecnologías actuales, y se centran en mejorar la eficiencia energética de los procesos y en ofrecer soluciones basadas en la combinación de diferentes tecnologías existentes.

En la figura 17 se presentan las tecnologías y medidas de ahorro energético, según su Índice de Grado de Importancia frente al Índice de Grado de Posición. Las dos líneas perpendiculares dentro de la figura representan el valor medio de cada variable y establecen un plano dividido en cuatro cuadrantes. La figura permite destacar en su cuadrante superior-derecha aquellas tecnologías identificadas por los expertos como de mayor relevancia con un mayor consenso y que además muestran una capacidad científico tecnológica nacional destacable.

A modo global se puede apreciar que todas las tecnologías analizadas presentan altos Índices de Grado de Importancia, y aun mayores Índices de Grado de Posición, (por encima de 2,3 (sobre un máximo de 3), lo que indica la destacable capacidad científico-tecnológica española.

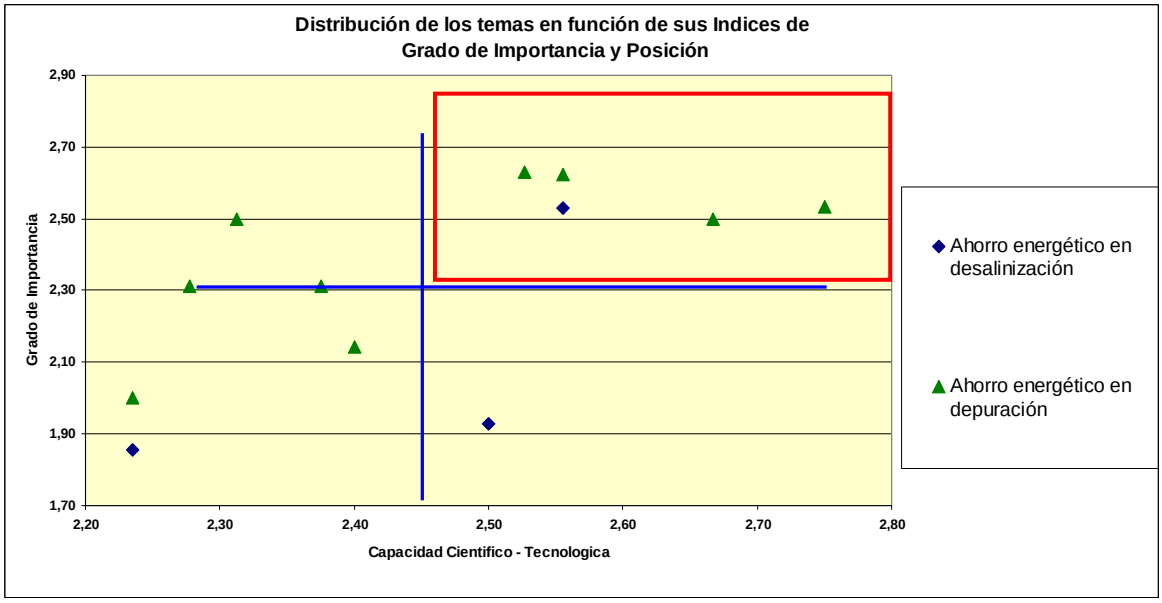


Figura 17: Distribución de los temas en función de sus Índices de Grado de Importancia y de Posición

Del mismo modo en la figura 18 se representa un Índice de Potencial de Ahorro Energético, frente a la capacidad científico-tecnológica nacional. Así, de manera complementaria se puede ver cuáles de las tecnologías en las que se dispone de posición técnica suficiente, presentan asimismo un posible potencial para conseguir disminuir el consumo energético en sus procesos:

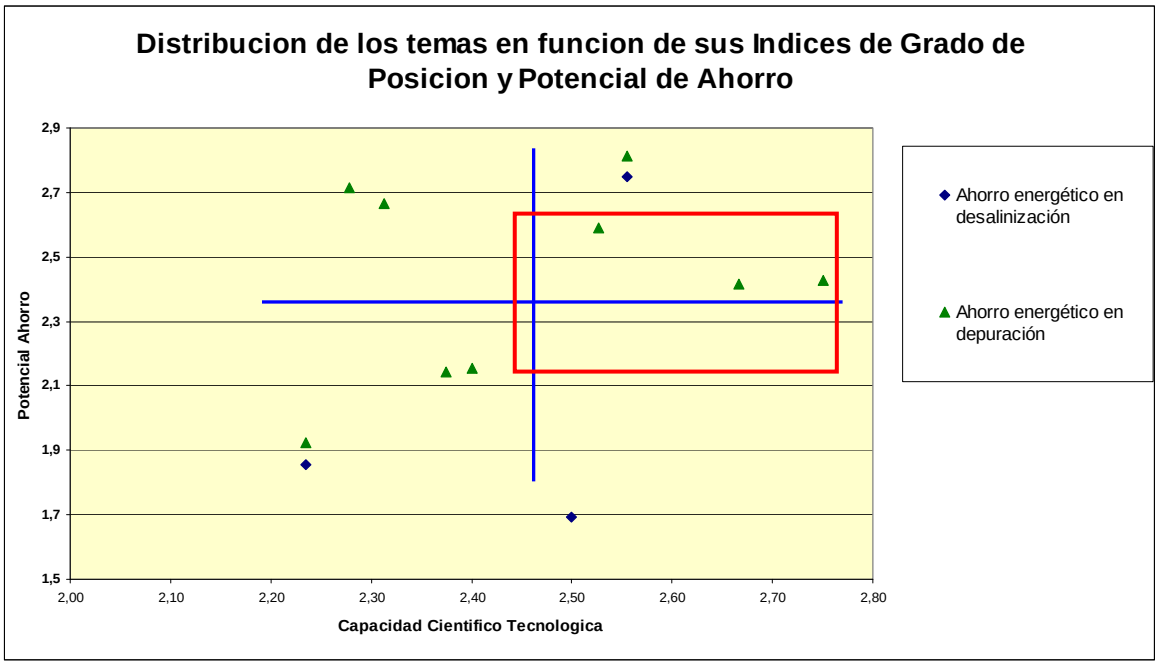


Figura 18: Distribución de los temas en función de sus Índices de Grado de Posición y Potencial de Ahorro

Como es lógico, en el corto plazo y evaluando el ahorro energético, coinciden las valoraciones de importancia y potencial de ahorro energético. Sin embargo, también coinciden las valoraciones de capacidad científico-tecnológica, lo que indica que las tecnologías seleccionadas pueden ser implantadas por empresas españolas.

A corto plazo las tecnologías con mayor importancia, potencial de ahorro y alta posición nacional son (Ver Anexo II para una descripción de las tecnologías):

- D2: Implantación de intercambiadores de presión en plantas de OI
- A4: Implantación del control de procesos por sensores
- A5: Empleo de la lógica difusa en el control de procesos
- A6: Optimización de los bombeos
- A7: Aprovechar el 100% del biogás de la digestión para generación eléctrica.

Estos temas constituyen fortalezas que es preciso reforzar o mantener. Por ello, dichas tecnologías son las seleccionadas para profundizar en su análisis, si bien el resto de tecnologías a corto plazo analizadas no suponen necesariamente poco interés o capacidad, ya que los valores medios que definen los cuadrantes son muy elevados.

Medidas de ahorro energético en desalación (corto plazo)

La mejora de la eficiencia energética en procesos de desalación enfocadas al corto plazo, necesariamente se sustentan sobre tecnologías actuales de desalación y medidas ya desarrolladas y probadas.

En el caso de la medida D.2., figura 19, se trata de una tecnología que se está incorporando en las plantas nuevas por sus obvias ventajas energéticas y económicas. Como medida de ahorro energético su importancia se limita por tanto, a aquellas plantas existentes que aún no incorporan la tecnología.

D.2	**Implantación de intercambiadores de presión en plantas de Osmosis Inversa (OI)**	
En sistemas de Osmosis Inversa, la presión de la salmuera solo es ligeramente inferior a la presión de entrada. En muchas plantas se recupera la energía mediante una turbina, pero los nuevos desarrollos van hacia intercambiadores de presión para transmitir la presión de salida a la alimentación.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,53	2,56	**2,75**

Figura 19: Implantación de intercambiadores de presión en plantas de Ósmosis Inversa

Aunque las plantas nuevas incorporan la tecnología por contribuir de forma significativa en la reducción del consumo energético, no logra introducirse en plantas existentes. Tratándose de una tecnología demostrada, la incorporación de los intercambiadores de presión en plantas existentes no depende de cuestiones técnicas, por lo que las causas deben de buscarse en temas administrativos y financieros.

Las plantas operadas por entidades públicas encuentran dificultados de tipo administrativo. Para obtener fondos para acometer las inversiones necesarias, los gestores se encuentran con procesos administrativos y con mecanismos de toma de decisiones que no son compatibles con decisiones fundamentadas en principios financieros de inversión, amortización y recuperación de la inversión (VAN y TIR).

En el caso de plantas operadas en concesión el problema es de índole financiero, motivado por el esquema de amortización que se maneja en una explotación en concesión. Es habitual encontrar que exigen plazos de amortización de nueva inversión de menos de 3-4 años. Ello no se logra cuando las instalaciones existentes no están amortizadas, ya que la nueva inversión se vería gravada por el valor remanente de los equipos amovidos.

Otro factor que juega en contra es que muchas plantas desaladoras se operan como instalaciones de apoyo. No funcionan a plena capacidad, por lo que la amortización de las instalaciones es lenta.

Por todo lo anterior se considera que se requerirá un instrumento de apoyo para primar el impacto de la medida en el ahorro energético. En la encuesta se interpreta esta medida en la elevada valoración del concepto "Incentivos de la administración". La incorporación de intercambiadores de presión en instalaciones existentes se puede fomentar mediante subvenciones o créditos blandos.

Otras medidas identificadas, como el precalentamiento de la alimentación de una planta de ósmosis o la introducción de sistemas combinados de varias tecnologías no se consideran especialmente relevantes para su aplicación en instalaciones existentes.

Medidas de ahorro energético en la depuración (corto plazo)

El estudio previo ha puesto de relieve que puede lograrse un importante ahorro energético en la optimización de las plantas depuradoras existentes, aunque es patente la falta de datos sobre la depuración de aguas residuales en España. Si ello es cierto para la depuración urbana donde al menos se cuenta con un inventario de depuradoras, más aún es así para la depuración industrial. No hay dato oficial alguno sobre la depuración de aguas residuales industriales. Aunque por esta precisa razón no se haya incluido la depuración industrial en el estudio, hay que remarcar que las oportunidades de ahorro energético/optimización en EDAR industriales son muy importantes. Debido a la gran variedad de tipologías de aguas residuales industriales, procesos de tratamiento y opciones de integración en el proceso industrial (tratamientos parciales, reutilización, aprovechamiento energético), las opciones de ahorro energético en la depuración industrial se deben de estudiar caso por caso.

Se considera importante que la administración pública incluya en los pliegos de los contratos de concesión, el control del proceso y la eficiencia energética de las plantas. En la actualidad estos aspectos no se controlan, limitándose al cumplimiento de los límites de vertido. Ello permite que las plantas sean operadas de forma energéticamente ineficiente, a

pesar de cumplir administrativamente su cometido. En este sentido, se considera interesante una nueva tendencia observada en el campo de la energía y que podría trasladarse al campo del agua, en el que Empresas Servicios Energéticos (ESE) suministran sus productos a un precio determinado. De esta manera se crea un incentivo económico para optimizar la gestión de la explotación.

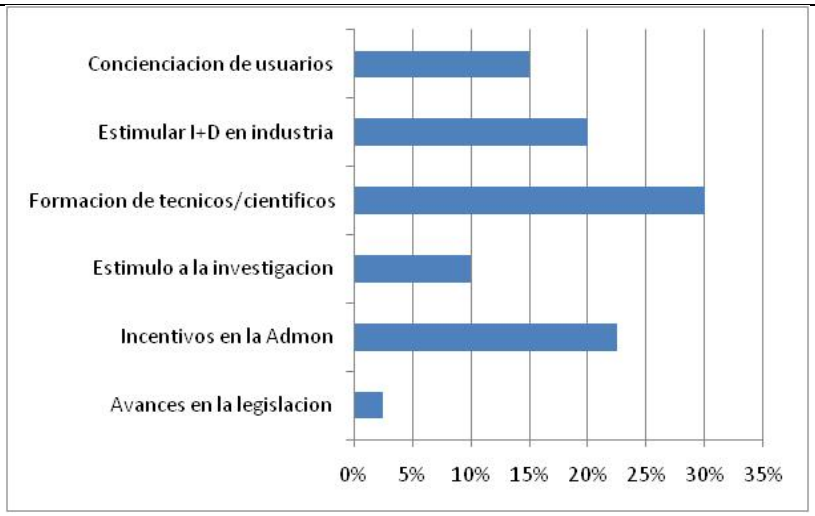
Todo ello pone de manifiesto la separación del enfoque y el interés de las administraciones competentes en materia de gestión del agua, y las administraciones competentes en materia de energía. Por ello se recomienda abrir un canal de comunicación entre la Dirección General del Agua del MARM y el IDAE para hablar sobre el ahorro energético en temas de agua.

Las medidas de optimización que no requieren grandes modificaciones en el proceso ni grandes inversiones se presentan en esta sección, dedicada a posibles medidas a corto plazo.

A.4	**Implantación del control de procesos por sensores**
A.5	**Empleo de la lógica difusa en el control de procesos**
A.6	**Optimización de los bombeos**

IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,62	2,56	**2,75**
2,53	2,75	**2,43**
2,63	2,53	**2,58**

A.4 Instalación de un sistema de control de la aireación por sensores que controlan parámetros de proceso (oxígeno, redox, amonio, nitrato). Requiere sistemas de aireación de potencia variable o intermitente. Según la configuración, pueden obtenerse reducciones en el consumo energético de 25 - 55%.



A.5 La carga de una depuradora responde en gran medida a procesos cíclicos (día-noche) o patrones conocidos (lluvia-seco). Mientras controles convencionales por PLC responden a puntos fijos de arranque y parada, el control del proceso mediante lógica difusa permite anticiparse a nuevas condiciones de operación. El ahorro energético se estima en un 20%.	A.6 Muchos bombeos no operan en su punto óptimo de rendimiento. Mediante 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.

Figura 20: Medidas A.4, A.5, A.6

El conjunto de medidas mejor valorado, figura 20, se refiere a medidas de instrumentación y control destinados a la mejora del control de proceso. Estas medidas son complementarias y estrechamente interrelacionadas, por lo que se consideran como una sola medida.

La instalación de sensores (A.4) implica el empleo de la lógica difusa para la interpretación de los datos recogidos (A.5) y la optimización de bombeos (A.6) y de la aireación, por lo que en realidad se trata de una sola medida. Dado que las tecnologías requeridas están plenamente desarrolladas y se aplican de forma generalizada en depuradoras grandes, su implantación en depuradoras medianas y pequeñas depende fundamentalmente de parámetros económicos y financieros.

A parte de ello, se observa una tendencia positiva en la gestión de las depuradoras, que empiezan a ser operadas según los criterios y principios de un proceso industrial. Este proceso encuentra como obstáculo la falta de operadores e ingenieros de proceso adecuadamente formados, por lo que esta labor tiene que ser asumida por las empresas explotadoras. Existe por tanto una oportunidad para centros de formación de dedicarse a la formación de operadores de plantas y de ingenieros de proceso especializados en proyectar, explotar y mantener las plantas depuradoras modernas.

Esta deficiencia en la explotación profesional de las depuradoras se manifiesta en la falta de mantenimiento, especialmente de sensores y equipos de control. Sus consecuencias se atribuyen erróneamente a la falta de calidad, estabilidad o precisión de estos equipos.

Otro factor que impide una adecuada explotación de las EDAR es atribuible a la condición legal de limitar los contratos de explotación a 2-4 años. Este plazo es demasiado corto para que un explotador pueda rentabilizar iniciativas propias destinadas a la mejora de gestión. Por otra parte, la administración pública, propietaria de las instalaciones carece del criterio técnico y/o de fondos para acometer iniciativas que se amorticen a mayor plazo. Sería

necesario por tanto, cambiar la legislación para permitir concesiones a largo plazo, cambiando además los parámetros de retribución para crear incentivos económicos para el explotador destinados a la optimización energética de la explotación.

Dos actuaciones que inicialmente se planteaban como una tendencia de futuro, han sido consideradas por los expertos como medidas de corto plazo. Su implantación no requiere investigación o desarrollo, sino que requiere un estímulo político o económico para ponerlas en marcha.

Una de ellas, figura 21, consiste en el desarrollo de métodos de diseño de depuradoras basados en la optimización del recurso energético y el control del proceso (G.6). Como tal, complementa las actuaciones A.4, 5 y 6 mencionados anteriormente.

La segunda actuación es complementaria a la primera y consiste en la aplicación de criterios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en el diseño y gestión de depuradoras (G.1).

Una medida destacada por los expertos, aunque no se deduce de los resultados de la encuesta, es la introducción de la obligación de realizar un estudio energético y de ACV en los proyectos de diseño de EDAR. Los pliegos de licitación de la administración deberían recoger este hito.

G.6	**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 áreas turísticas, requiere asumir muchos compromisos (condiciones de proceso, tamaño de instalaciones, eficiencia energética). Se requieren métodos de diseño para su optimización.		
IGI	IGP	Potencial de Ahorro
2,53	2,50	**2,50**

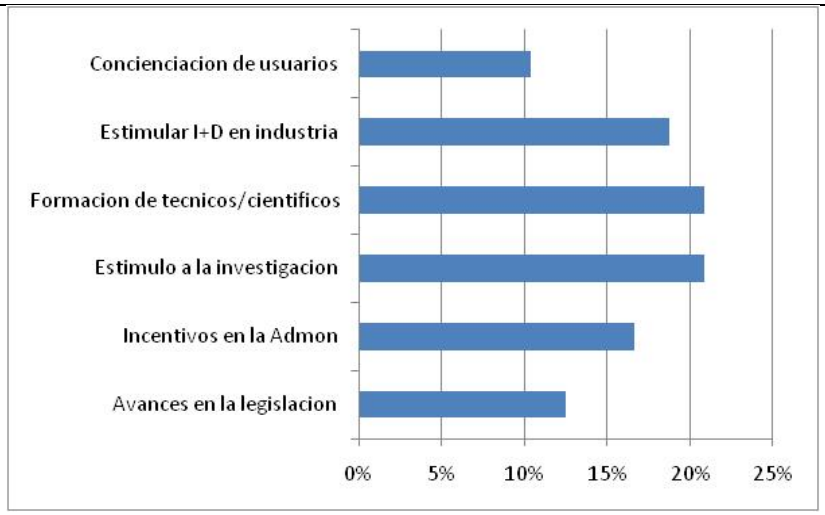


Figura 21: Medida G.6

La utilización del Análisis del Ciclo de Vida en procesos de toma de decisiones (G.1), figura 22, permite identificar y mitigar aspectos de gestión relevantes para los consumos de recursos, incluyendo el energético. Esta tendencia se ha valorado como importante, especialmente para la línea de fangos que no ha recibido la misma atención en materia de optimización que la línea de agua. Además, el transporte de los fangos deshidratados puede repercutir de manera relevante en el consumo energético global de la gestión y este hecho se pondría de manifiesto en un ACV. Aún así, se considera que el potencial de ahorro energético es bajo.

Es llamativa la importancia que los encuestados han dado a la formación de técnicos y científicos como medida de estímulo, dando a entender que se trata de una medida de fácil implantación.

G.1	**Introducción de ACV en la toma de decisiones**	
El Análisis del Ciclo de Vida contempla el consumo de recursos y energía a lo largo de la vida de un producto, proceso o actividad. Introducir sistemáticamente la evaluación energética en procesos de toma de decisiones o de diseño contribuiría a mejorar la eficiencia energética.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,18	2,22	1,87

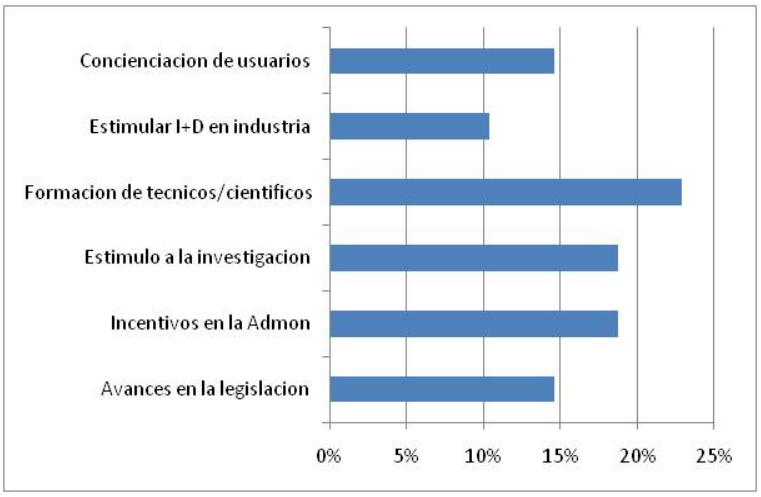


Figura 22: Medida G.1

En materia de gestión de fangos existe consenso en valorar de gran importancia la biodigestión de los fangos, por su relevancia para las políticas de promoción de las energías renovables y la lucha contra el cambio climático. En este sentido cabe interpretarse la alta valoración de la medida A.7, figura 23.

A.7	Aprovechar el 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. Posibles medidas consisten en (combinaciones de) instalación de un mayor número de motores de gas, instalación de un gasómetro, fluctuación de la temperatura de la digestión entre 32 y 36 ºC para actuar como búfer de calor.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,5	2,67	**2,5**

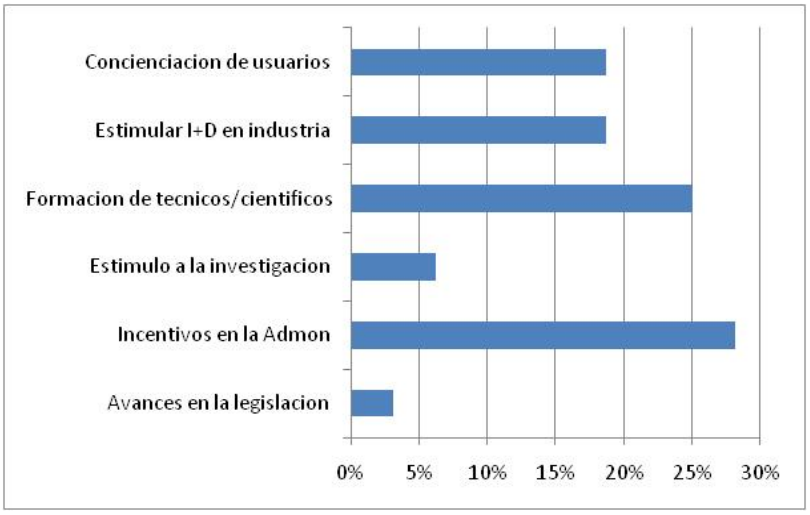


Figura 23: Medida A.7

Los expertos apuntan que la vía para estimular la biodigestión sería a través de la prima para producción eléctrica en régimen especial, aunque advierten de la necesidad de garantizar que las plantas se alimenten exclusivamente con biogás, evitando situaciones en las que el combustible principal sea el gas natural. Nuevamente, se trata de tecnología existente que requiere ser impulsado mediante incentivos de la administración y donde se requiere la formación de técnicos especializados, capaces de operar y optimizar las instalaciones.

Para EDAR de gran tamaño se apunta además a las oportunidades que puedan surgir de un replanteamiento tecnológico de la línea de fangos (medida A.8) que en la actualidad se concibe desde un punto de vista de reducción del volumen de vertido. Ello implica examinar el proceso desde una óptica de aprovechamiento energético, aplicando además criterios de ACV para incluir los costes energéticos de la deshidratación, secado y transporte de lodos.

Análisis de tendencias

General

El análisis de tendencias tecnológicas de futuro en los campos de la desalación y la depuración urbana se realiza a partir de la identificación de las medidas consideradas por los expertos como de mayor importancia, potencial de ahorro energético y capacidad científico-tecnológica.

En este caso, al tratarse de tendencias a más largo plazo, los valores medios de los índices no son tan elevados, lo que indica que, de manera general, en estas tecnologías existe una mayor diversidad de opiniones en cuanto a su interés futuro, y existe una menor posición a nivel nacional.

En la figura 24 se presenta el Índice de Grado de Importancia frente al Índice de Grado de Posición. Trazando dos líneas perpendiculares al valor medio de cada variable, se establece un plano dividido en cuatro cuadrantes. El cuadrante superior derecha representa las medidas y tecnologías identificadas por los expertos como de mayor relevancia con un mayor consenso y que muestran una capacidad científico tecnológica nacional destacable.

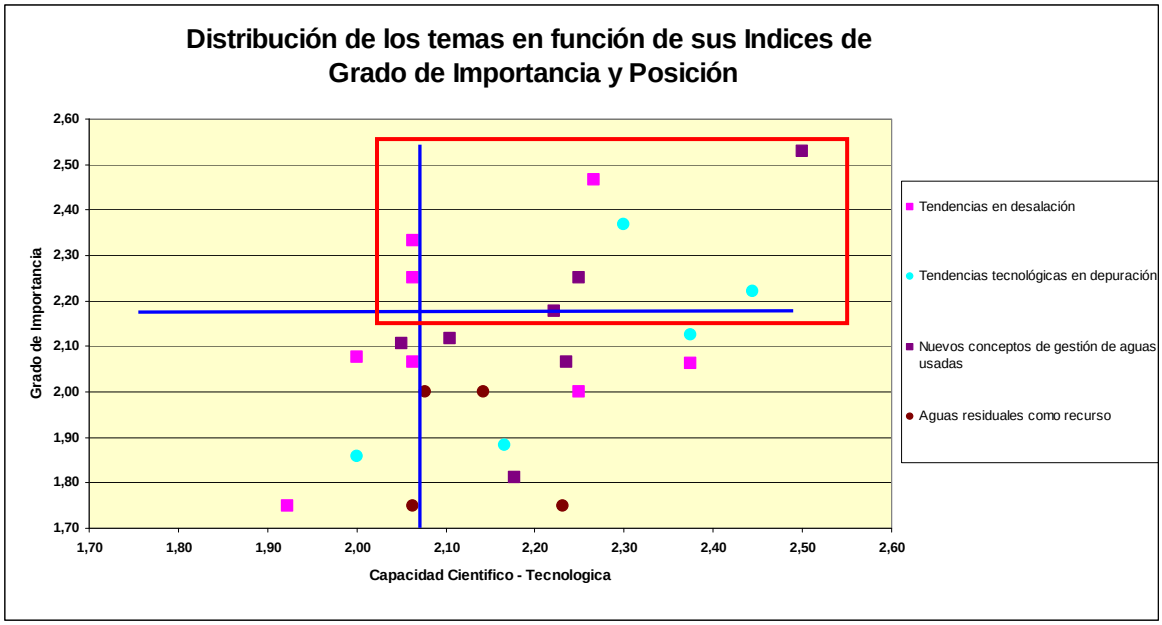


Figura 24: Distribución de los temas en función de sus Índices de Grado de Importancia y Posición

Del mismo modo, se representa un índice de Potencial de Ahorro Energético, frente a la capacidad científico-tecnológica nacional, figura 25. Así, de manera complementaria se puede ver cuáles de las tendencias tecnológicas en las que se dispone de posición técnica suficiente, presentan asimismo un posible potencial para conseguir disminuir el consumo energético en sus procesos:

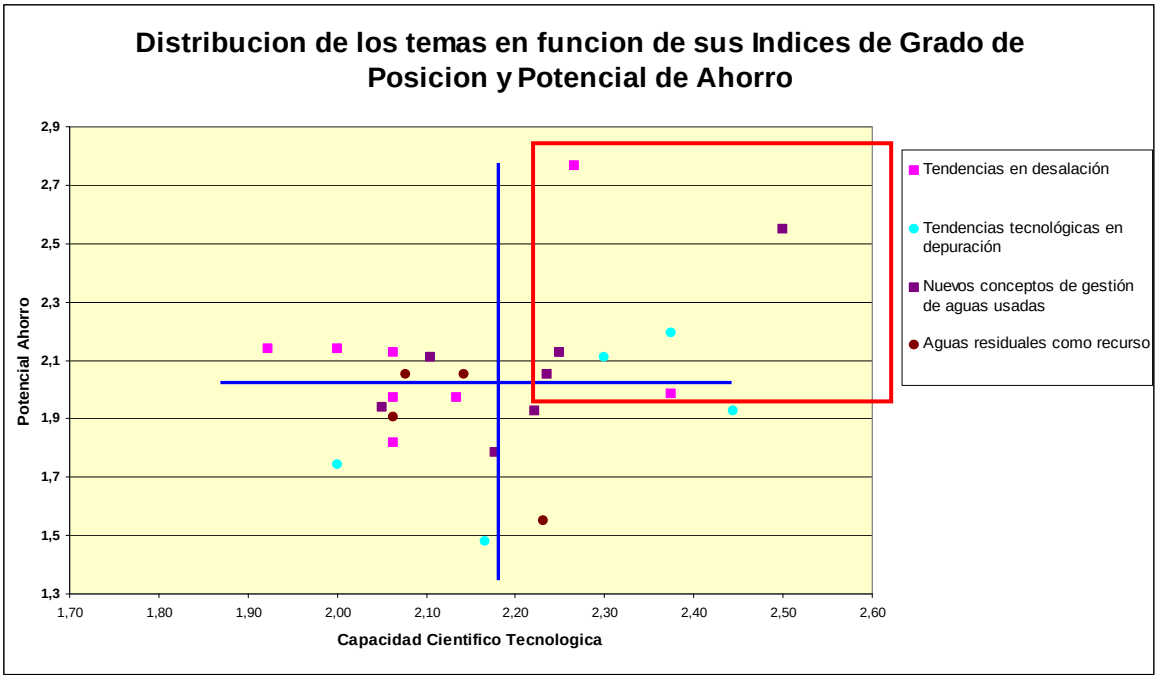


Figura 25: Distribución de los temas en función de sus Índices de Grado de Posición y Potencial de Ahorro

Las tendencias y tecnologías identificadas en los cuadrantes superiores-derechos de las figuras 24 y 25 se presentan en el cuadro 1 (Ver Anexo II para una descripción de las tecnologías):

Importancia	Ahorro	Tecnología	Descripción
●	●	S.1	Desarrollo de membranas de osmosis inversa más eficientes
●		S.2	Desarrollo de membranas de osmosis inversa más resistentes al fouling y/o a los desinfectantes
●		S.7	Aplicación de la nanotecnología para el desarrollo de membranas de

			osmosis inversa
	•	T.2	Aplicación y desarrollo de tecnologías para mejorar la biodisponibilidad de los fangos
•		T.3	Desarrollar tecnologías que permiten reducir el consumo energético de la eliminación de nutrientes
•	•	T.5	Mejorar la fiabilidad de sensores para el control de procesos
	•	G.4	Desarrollo de conceptos de gestión de aguas basado en el saneamiento y reutilización descentralizados
•	•	G.7	Desarrollar una calificación de eficiencia hídrica

Cuadro 1: Tendencias y tecnologías significativas

Estos temas constituyen fortalezas que es preciso reforzar o mantener. Por ello, dichas tecnologías son las seleccionadas para profundizar en su análisis. Se puede apreciar una buena concordancia entre las tecnologías identificadas por los expertos que respondieron al cuestionario como de alta importancia y aquellas con mayor potencial de ahorro energético, lo que avala la coherencia de las respuestas.

Tendencias en desalación

El análisis de tendencias se orienta hacia el desarrollo de nuevos materiales (membranas) para las tecnologías actuales o nuevas tecnologías para la obtención de agua dulce.

Los expertos han identificado tres medidas y tecnologías orientadas a la mejora de las membranas, aunque opinan que el desarrollo de membranas más eficientes (S.1), figura 26, ofrece pocas oportunidades para la industria española. Por un lado, el rendimiento de las membranas modernas se está acercando a su óptimo teórico. Por otro, se trata de una actividad industrial de elevada complejidad, dominada mundialmente por unos pocos fabricantes. Se tiene asumido que eventuales mejoras en las membranas serán fruto del I+D de estos fabricantes, dejando poco margen para desarrollos externos.

Existe, sin embargo un campo interesante en desarrollos relacionados con la reducción del fouling de las membranas.

S.1	Desarrollo de membranas de osmosis inversa más eficientes	
El consumo energético es el mayor factor de coste de una planta desaladora. Membranas más eficientes permiten producir más agua con menos energía, aunque con ello puede llegar a comprometerse la calidad del agua producida.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,46	2,27	**2,71**

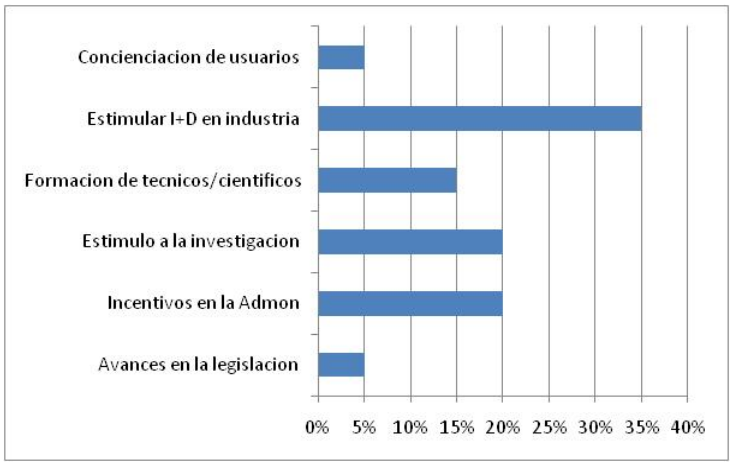


Figura 26: Medida S.1

Mediante pretratamientos adecuados y recubrimientos de las membranas se puede reducir el fouling (S.2), figura 27. El fouling de las membranas se traduce en ciclos cortos de producción – limpieza, los que afecta al rendimiento neto de la membrana. Alargar el tiempo entre ciclos de limpieza significa incrementar de la producción de agua. Además, los productos de limpieza y desinfección de las membranas afectan a la vida útil de las mismas, lo que se traduce en mayores costes de explotación. Las medidas que reducen el fouling y que mejoran la vida útil de las membranas existentes podrán aportar importantes incrementos en el rendimiento energético y en el ratio de producción del agua, por lo que se consideran un campo interesante para actuaciones de I+D.

S.2	Desarrollo de membranas de osmosis inversa más resistentes al fouling y/o a los desinfectantes	
El ensuciamiento de las membranas afecta al ciclo de operación/limpieza de las membranas y compromete su vida útil. De forma indirecta afecta al consumo energético. Se trata de desarrollar membranas con materiales más resistentes a los productos desinfectantes o menos sensibles al fouling.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,25	2,06	1,92

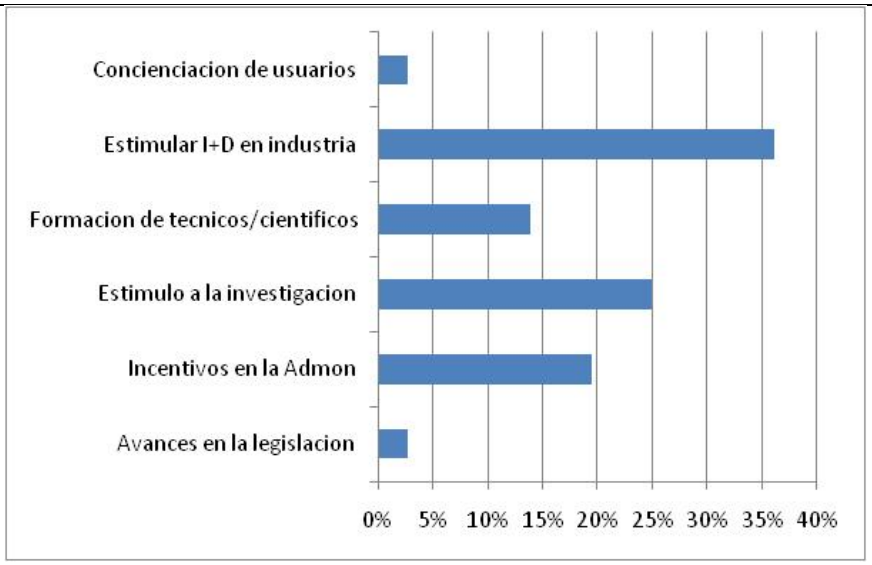


Figura 27: Medida S.2

En este mismo sentido se debe de interpretar la actuación S.7, sobre aplicaciones nanotecnológicas en el campo de las membranas. Aunque el desarrollo de membranas basadas en nanotecnología se considera fuera de alcance, la investigación científica en el campo de soluciones nanotecnológicas para reducir la problemática del fouling merece ser estimulado.

S.7	Aplicación de la nanotecnología para el desarrollo de membranas de osmosis inversa	
La nanotecnología puede emplearse para crear membranas con poros a nanoescala, potencialmente mucho más específicas que otras tecnologías de filtración. La tecnología es prometedora para desalinización, como alternativa a membranas de OI convencionales. Se estima que para desalinización consume menos energía, debido al mayor flujo y menor presión requerida. También se espera que sufran menos el efecto del fouling.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,33	2,06	2,07

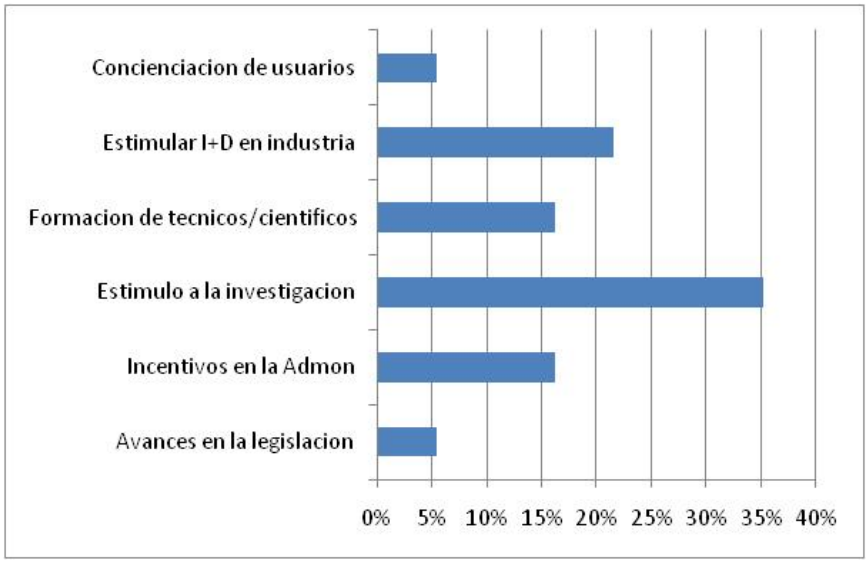


Figura 28: Medida S.7

Los expertos no han considerado que los desarrollos tecnológicos orientados a la combinación de diferentes tecnologías sean de especial importancia, o al menos no tendrán un impacto relevante en el ahorro energético. Tecnologías que entran en esta consideración son aquellas que combinan la energía eólica y la desalación, la producción marina para transportar únicamente el agua dulce, o incluso nuevos conceptos como la destilación por membranas, el "forward osmosis" o las células microbianas de desalación. Estos últimos todavía se encuentran en fases muy preliminares de investigación científica y carecen de un horizonte claro de industrialización.

Entre todas las opciones estudiadas llama la atención la tendencia tecnológica S.3, que aborda la problemática del tratamiento de la salmuera en aplicaciones no-marinas. Solucionar este tema es fundamental para ampliar el campo de aplicación de la tecnología de desalación, pero inevitablemente implica un importante consumo energético. Por ello se considera que la solución debe buscarse en la tecnología solar. El sol no solo es una fuente renovable de energía, sino que generalmente coinciden las zonas de elevada irradiación solar con zonas de escasez de agua. La combinación tecnología solar y desalación por tanto es una combinación lógica y necesaria. En este sentido conviene orientar las investigaciones en el campo del "Forward Osmosis" (S.9) y células microbianas de desalación (S.8) hacia la utilización de energía solar como fuerza motriz.

Tendencias tecnológicas en depuración

La depuración urbana e industrial utiliza en gran medida las mismas tecnologías de depuración, aunque los procesos y el entorno operativo pueden diferir. Por ello, el análisis de tendencias se centra en las tecnologías, sin diferenciar entre su aplicación urbana o industrial. Asimismo, la depuración incluye los procesos que preparan el agua para su reutilización.

El análisis de tendencias se orienta hacia líneas de investigación o de nuevas tecnologías con poca presencia en el mercado. Las tendencias, siempre enfocadas hacia la reducción del consumo energético, se han agrupado en tres capítulos:

- Nuevas tecnologías de tratamiento
- Nuevos conceptos de gestión
- Aguas residuales como recurso (energético)

Nuevas tecnologías de tratamiento

Los expertos consideran importante el desarrollo de tecnologías que permiten reducir el consumo energético en los procesos de eliminación de nutrientes (T.3), figura 29. Sin embargo, apuntan que las nuevas tecnologías de tratamiento están incrementando de forma considerable el consumo energético de la depuración. Ello se debe a la introducción de tecnologías de membranas (T.1) y configuraciones de procesos diseñadas para mejorar la eliminación de nutrientes. Aún siendo importante, no se considera, por tanto, que las medidas de reducción del consumo energético tendrán un gran impacto en el consumo.

La tendencia general de actuaciones en el campo de la depuración es la de estudiar al detalle los procesos de tratamiento para detectar flujos, condiciones de proceso o reacciones bioquímicas o microbiológicas que puedan mejorar el proceso. Es interesante destacar en este contexto el interés en la identificación de flujos concentrados de aguas, por ejemplo el flujo de retorno de la deshidratación, que puede tratarse separadamente con gran eficiencia. El ahorro se obtiene mediante el estudio integrado del proceso de tratamiento y su consumo energético asociado. Asimismo, los expertos indican la conveniencia de considerar no solo la eliminación de nutrientes, sino también su recuperación y aprovechamiento.

Las necesidades para avanzar en este campo incluyen todo el trayecto de I+D, desde la investigación básica, el I+D de las ingenierías y empresas concesionarias y la formación de técnicos especialistas en explotación de plantas.

T.3	Desarrollar tecnologías que permiten reducir el consumo energético de la eliminación de nutrientes	
La oxidación del nitrógeno y las recirculaciones internas de los procesos de desnitrificación incrementan el consumo energético de la depuración. Los balances de nutrientes de las EDAR indican que las aguas de retorno de la línea de fangos constituyen una fuente interna significativa. Se han desarrollado varios procesos que actúan de forma eficiente sobre este flujo, reduciendo así el consumo energético global (0,5 - 5% del total). Nuevos procesos que desnitrifican a partir de nitrito son aún más eficientes (2 – 10% de reducción para el total de la depuradora).		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,22	2,44	1,87

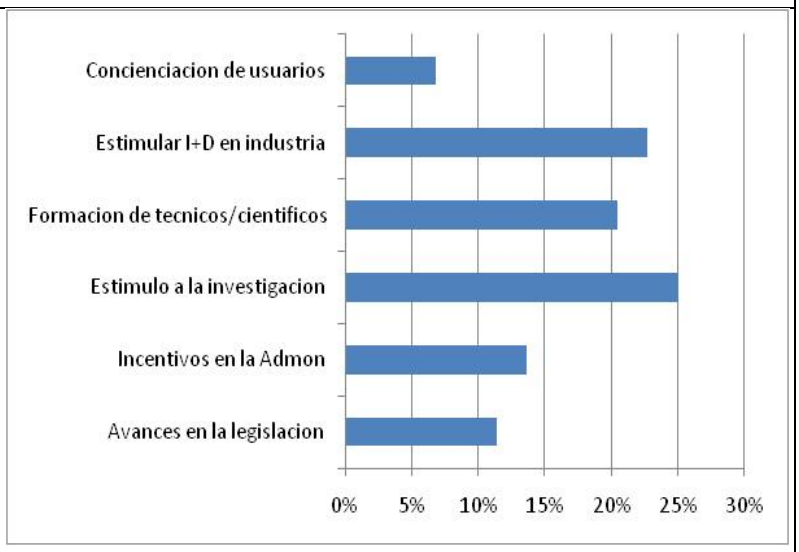


Figura 29: Medida T.3

En el caso de otra tendencia altamente valorada en la encuesta, como la mejora de la fiabilidad de los sensores para el control del proceso (T.5), figura 30, conviene recordar la interpretación dada al respecto en el capítulo 4.3 respecto a la falta de un mantenimiento adecuado de los sensores existentes. Por tanto no hace falta desarrollar mejores sensores, sino aplicar un mejor mantenimiento de los existentes.

En cuanto a los retos de futuro existe un importante campo en el desarrollo de biosensores para contaminantes emergentes, como los disruptores endocrinos, residuos de medicamentos, etc. Los esfuerzos deben dirigirse hacia la investigación de sustancias indicadores de la presencia de tales contaminantes, análogo a lo que es la *E. Coli* como especie indicadora de una contaminación fecal. El segundo paso en la investigación sería el desarrollo de biosensores para detectar las sustancias indicadoras.

También en este caso, la tendencia se considera importante, desde el punto de vista del desarrollo de la tecnología de depuración, aunque se duda de su impacto en el ahorro energético.

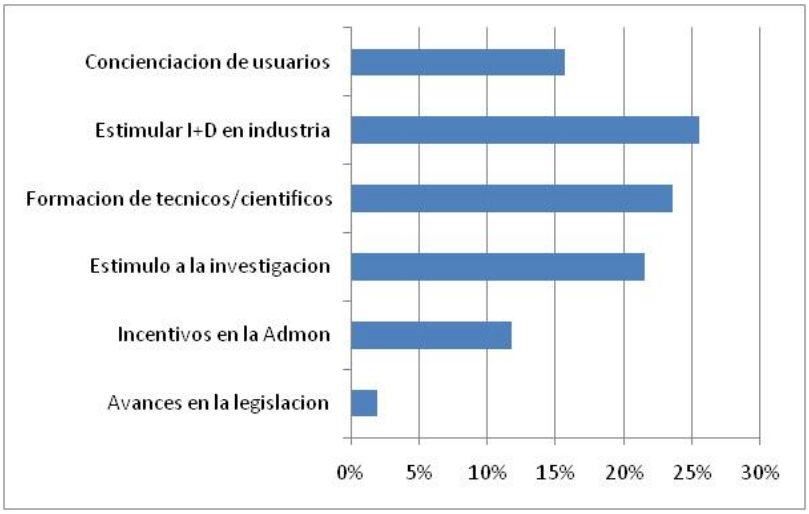
T.5	**Mejorar la fiabilidad de sensores para el control de procesos**	
La optimización del proceso de depuración y en consecuencia del consumo energético requiere de datos fiables en tiempo real, por lo que el buen funcionamiento de los sensores es de suma importancia. Aunque el mercado ofrece sensores para todos los parámetros relevantes, su fiabilidad, la dificultad de su calibración en un entorno hostil, como el de las depuradoras y especialmente la (auto) comprobación en tiempo real de su buen funcionamiento no está resuelta. Existe una necesidad, por tanto de mejorar la fiabilidad de los sensores, bien mediante su rediseño o mediante sistemas de limpieza y calibración automática.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,37	2,30	**2,06**

Figura 30: Medida T.5

La mejora de la biodisponibilidad de los fangos (T.2), figura 31, contribuirá a un mayor rendimiento energético de la biogestión, por lo que se considera que el potencial de ahorro de las actuaciones en este campo es elevado. La investigación en este campo permite un amplio espectro de enfoques, desde métodos mecánicos, sónicos, térmicos hasta

enzimáticos. Aún así, los expertos no consideran la medida entre las más importantes, y opinan que la biodisponibilidad es solo uno de muchos aspectos que deben de estudiarse para mejorar la gestión de los lodos, además de la reducción de la viscosidad, la mejora de la deshidratabilidad, la reducción del consumo de polielectrolito y las tecnologías para la higienización.

T.2	**Aplicación y desarrollo de tecnologías para mejorar la biodisponibilidad de los fangos**	
La biodigestión se alimenta con los fangos primarios y secundarios de la depuración aerobia. La desintegración de la biomasa puede mejorar la disponibilidad biológica del sustrato y de esta manera incrementar la producción de biogá de la digestión. La desintegración se puede realizar con procesos mecánicos, sónicos y/o térmicos. Estos procesos pueden incrementar la biodisponibilidad en un 30% y reducen el tiempo de digestión a la mitad.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,12	2,37	**2,14**

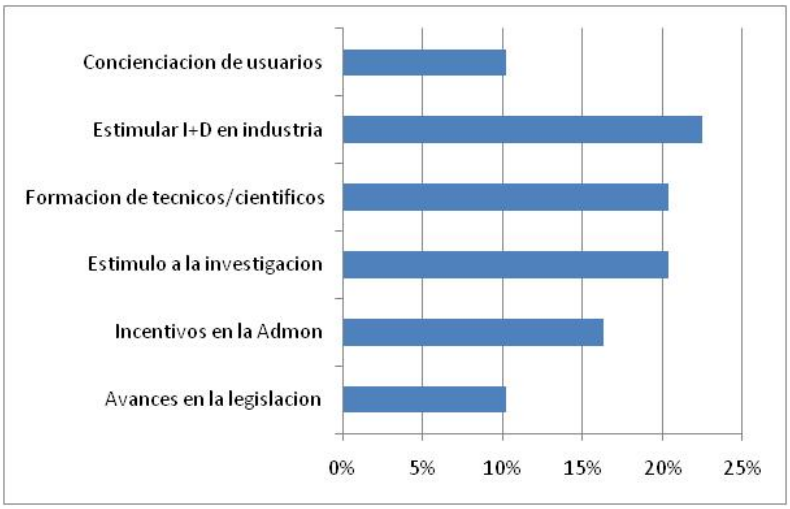


Figura 31: Medida T.2

Tendencias en nuevos conceptos de gestión de aguas usadas

En esta sección se analizan las tendencias que ofrecen una alternativa a los principios básicos de la gestión de aguas usadas como son el empleo del agua como medio de transporte de la contaminación y la centralización de las instalaciones de tratamiento.

Estos nuevos conceptos buscan soluciones desde el origen de la contaminación (en la fuente) y valoran una gestión, por separada, de las fracciones que ofrecen posibilidades de recuperación de productos y de reutilización de aguas que, una vez combinadas no serían viables. Una aplicación de este principio, comúnmente utilizado es la infiltración in situ de aguas pluviales, en lugar de su recogida y transporte en redes centralizadas. La figura 32 ilustra lo anterior.

Tipos de agua residual, en origen

	Aguas amarillas	Aguas marrones	Aguas grises	Aguas pluviales
Origen	Orines	Heces y agua	Ducha, lavabo, lavadora,……	Lluvia
	1,5 l/d	0,5 - 40 l/d	100 – 150 l/d	-
Tratamiento	Precipitación, secado	Biodigestión, desinfección	Tratamiento biológico, desinfección	Filtración
Aprovechamiento	Fertilizante	Riego, energía, compost	Agua para baldeo, limpieza, riego	Riego, infiltración

Figura 32: Tipos de agua residual en origen

El desarrollo de conceptos de gestión de aguas basado en el saneamiento y reutilización descentralizados (G.4), figura 33, ha sido considerado de gran importancia y con un elevado potencial de ahorro energético. Inicialmente se podrían enfocar las soluciones hacia pequeñas EDAR para el tratamiento local de aguas grises de urbanizaciones para su reutilización en jardinería. Sin embargo, su implantación implica un cambio importante en la filosofía de gestión, por lo que la concienciación de los usuarios es considerado una medida clave. Asimismo, la viabilidad económica es dudosa con los precios actuales del agua. Por ello se considera que los incentivos de la administración serán requeridos para estimular la introducción y demostración de medidas de este tipo.

G.4	Desarrollo de conceptos de gestión de aguas basados en el saneamiento y reutilización descentralizados	
Mediante descentralización y separación en la fuente las aguas grises (ducha, lavamanos, agua de lavado), aguas negras (inodoros) y aguas pluviales. Se pretende ahorrar recursos (energía y recursos primarios) 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.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,07	2,24	**2,00**

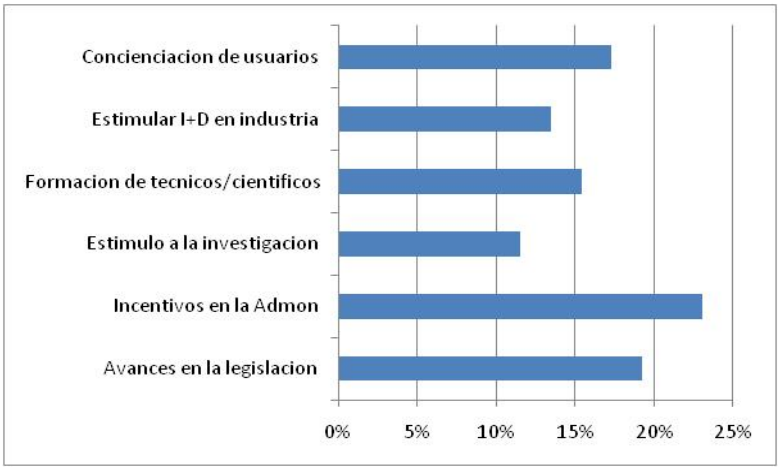


Figura 33: Medida G.4

La calificación de eficiencia hídrica (G.7), figura 34, en parte ya está incorporado en la calificación energética de equipos domésticos, ya que el calentamiento del agua es el principal factor de consumo energético y está directamente relacionado con el volumen de agua consumida. El siguiente paso sería la introducción de la reutilización del agua en lavadoras y lavavajillas, que consistiría en utilizar el agua del último lavado para el primer enjuague del siguiente ciclo. Podría ser necesario incentivar u obligar a los fabricantes a implantar la recuperación de agua en sus equipos, porque innegablemente incrementará su precio de venta.

Impactos derivados de reducción del consumo de agua que conlleva la calificación de eficiencia hídrica son el bombeo de menores cantidades de agua, pero especialmente la mejor dilución de la contaminación donde contribuye a mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento.

En este sentido es importante destacar la importancia que se otorga a la concienciación de usuarios en la relación entre el ahorro del agua y el ahorro energético, por consumir menos energía en el calentamiento del agua y/o en su potabilización, transporte y depuración.

Se recomienda avanzar en la calificación hídrica a través de instituciones como el CEDEX y preparar un protocolo de certificación. En cualquier caso, la calificación debe de incluir conceptos de ACV para contemplar los impactos indirectos (bombeo, depuración) en el impacto energético de la calificación.

G.7	**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. Como tal es un complemento a la calificación energética.		
IGI	IGP	POTENCIAL DE AHORRO
2,25	2,25	**2,08**

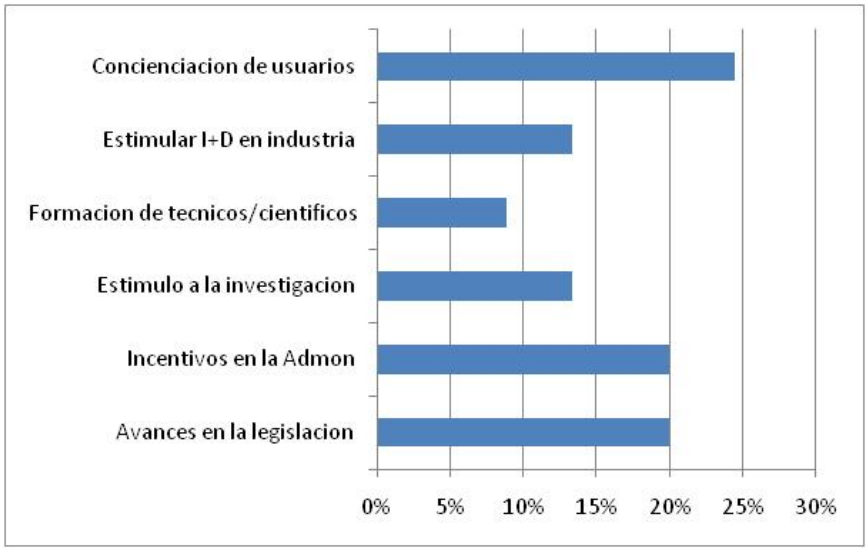


Figura 34: Medida G.7

Otras tendencias tecnológicas que implican un cambio conceptual en el modelo de depuración no han sido valoradas como especialmente importantes por los expertos. Se trata de las tecnologías de tratamientos blandos (G.2) que cambian la concepción de un tratamiento de carácter industrial a un tratamiento basado en principios ecosistémicos.

Algo similar es el caso de los sistemas descentralizados de tratamiento (G.3), que implican el abandono de los clásicos sistemas de saneamiento por sistemas diferenciados y los tratamientos por sistemas pequeños y específicos. Relacionado con ello está la tendencia de sustituir el agua como medio de transporte de aguas negras por sistemas neumáticos de transporte (G.5).

Estos sistemas, si bien son considerados interesantes como tópico de investigación, no se conciben como alternativa real en un horizonte temporal previsible.

Tendencias relacionadas con aguas residuales como recurso

Algunos nuevos desarrollos en la depuración “fin de línea” se orientan hacia la recuperación de productos como nutrientes, producción de materias primas para procesos industriales o aprovechamiento del valor energético de los contaminantes contenidos en las aguas residuales y obviamente, la reutilización del agua. Centrándose en la faceta energética, se han identificado tendencias orientadas al aprovechamiento energético de la materia orgánica presente en las aguas residuales. En el caso de las aguas residuales urbanas, el reto consiste en aprovechar una fuente de energía que no supera el orden de 0,1% en masa, siendo el resto agua.

Ninguna de las tendencias identificadas ha sido valorada como importante y con alta posición de España en la materia, aunque generalmente se han considerado interesantes desde el punto de vista académico. Este es el caso de la depuración con microalgas (R.1) que se desarrolla con el objetivo de producir una biomasa bacteriana y de microalgas que sea aprovechable energéticamente. España tiene una cierta posición en la investigación en este campo.

Otras tecnologías como las células de combustible microbianas (R.3 y R.4) se encuentran todavía en una fase demasiado prematura para ser consideradas como una tendencia sólida.

Finalmente, en el campo de las tecnologías para la valorización energética de los fangos (R.2) España tiene una elevada capacidad técnico-científica, aunque los expertos opinan que el potencial de ahorro energético y por tanto la importancia, no es muy elevada

Conclusiones

Generales

El estudio previo ha puesto de relieve que el potencial de ahorro energético en la desalación y en la depuración urbana es relevante. En desalación, el coste energético es el mayor factor de coste, por lo que la eficiencia energética es un parámetro de diseño fundamental. El ahorro energético en este campo, por ello, se limita a la modernización de plantas antiguas de osmosis inversa, que carecen de las soluciones para la recuperación energética que incorporan todas las plantas modernas.

El ahorro energético en la depuración urbana se centra en la optimización energética de depuradoras pequeñas. Estas están diseñadas y son operadas bajo criterios de robustez, lo que se traduce en un gasto energético elevado.

Sin embargo, la principal conclusión del estudio podría ser que 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 reuniones de los paneles de expertos han puesto de manifiesto que las condiciones de los contratos de concesión no incentivan e incluso impiden iniciativas en materia de control del proceso y 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.

Una de las causas de la poca atención que ha recibido la optimización energética en el sector del agua es la falta de comunicación entre las administraciones competentes en materia de gestión del agua y aquellas con competencia en energía. Por ello se recomienda abrir un canal de comunicación entre la Dirección General del Agua del MARM y el IDAE para hablar sobre el ahorro energético en temas de agua.

Otras medidas que se identificaron para mejorar la relación agua – energía están relacionadas con la capacitación tecnológica (estimulo a la investigación, especialmente la aplicada) y humana (formación) y por supuesto, con la necesidad de incentivos por parte de la administración.

Desalación

Las actuaciones consideradas de mayor interés son las de corto plazo. Estas significan generalmente una optimización energética de las instalaciones existentes.

En desalación, la principal medida consiste en la incorporación de intercambiadores de presión. Aunque las plantas nuevas ya incorporan esta tecnología por contribuir de forma significativa en la reducción del consumo energético, no logra introducirse en plantas existentes, principalmente por razones administrativas y financieras. La principal razón administrativa es el corto plazo de las concesiones que impide la amortización de la inversión. Las razones financieras son la lenta amortización de las plantas, el coste de la amortización de equipos que se eliminan con la reinversión.

Las tendencias a más largo plazo en el campo de la desalación se concentran en las tecnologías y soluciones para reducir el fouling de las membranas. El fouling es el principal factor que afecta al rendimiento energético, a la vida útil de las membranas y en el ratio de producción del agua de una instalación, por lo que su reducción se traduce en importantes ahorros y beneficios. Dado que el diseño y fabricación de membranas está concentrado en unas pocas empresas que dominan el mercado mundial, las oportunidades en materia de I+D se centran en el desarrollo de pretratamientos adecuados del agua tratada y en recubrimientos de las membranas. En el mismo sentido, aunque el desarrollo de membranas basadas en nanotecnología se considera fuera de alcance, la investigación científica en el campo de soluciones nanotecnológicas para reducir la problemática del fouling merece ser estimulada.

Otro campo de interés es la investigación de las combinaciones de tecnología solar y desalación. Como regla general coinciden geográficamente dos factores, que son la elevada irradiación solar en las zonas que acusan una escasez de agua. Por ello, una línea de desarrollo interesante es la del tratamiento de la salmuera mediante tecnología solar. Estas soluciones son especialmente relevantes para aplicaciones no-marinas, donde la gestión de la salmuera constituye un obstáculo real para su implantación.

Depuración urbana

Las medidas de corto plazo en depuración urbana se orientan hacia la optimización energética de las instalaciones existentes, principalmente mediante la implantación de sistemas de medición, instrumentación y control. Estos sistemas emplean la lógica difusa para la interpretación de los datos recogidos para la optimización de bombeos y de la aireación. Dado que las tecnologías requeridas están plenamente desarrolladas y se aplican de forma generalizada en depuradoras grandes, su implantación en depuradoras medianas y pequeñas depende fundamentalmente de parámetros económicos y financieros. En todos los casos se trata de inversiones que se amortizan en un breve plazo. Los factores que ralentizan su implantación generalizada se pueden resumir en:

- Falta de operadores y técnicos debidamente formados en operación y mantenimiento, por lo que se señala que existen oportunidades en el campo de la formación.

- Condicionado inadecuado de los contratos de concesión de las plantas de desalación y depuración. Los concesionarios no encuentran incentivos para optimizar la instalación gestionada, bien porque el corto plazo impide la amortización total de una mejora, o porque no paga la factura energética. En otros casos las inversiones deben ser financiados por la entidad pública que no encuentra medios para realizarlas.

Se han identificado dos actuaciones importantes para la optimización energética que no requieren investigación o desarrollo, sino que requieren un estímulo político o económico para ponerlas en marcha. Una de ellas consiste en el desarrollo de métodos de diseño de depuradoras basados en la optimización del recurso energético y el control del proceso y la otra, complementaria a la primera, consiste en la aplicación de criterios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en el diseño y gestión de depuradoras.

Las tendencias a largo plazo en la depuración urbana apuntan a un incremento de la demanda energética, fruto de las mayores exigencias en la calidad del agua tratada. Las tendencias tecnológicas deben de buscarse por tanto, en reducir este incremento mediante una mayor eficiencia energética o mediante un mejor aprovechamiento energético de los fangos generados en el proceso.

En este sentido, la tendencia general de actuaciones en el campo de la depuración es la de estudiar al detalle los procesos de tratamiento para detectar flujos, condiciones de proceso o reacciones bioquímicas o microbiológicas que puedan mejorar el proceso. Es interesante destacar en este contexto el interés en la identificación de flujos concentrados de aguas, por ejemplo el flujo de retorno de la deshidratación, que puede tratarse separadamente con gran eficiencia. El ahorro se obtiene mediante el estudio integrado del proceso de tratamiento y su consumo energético asociado. Asimismo, los expertos indican la conveniencia de considerar no solo la eliminación de nutrientes, sino también su recuperación y aprovechamiento.

Destacan dos líneas de investigación de interés, que son la eliminación o recuperación de nutrientes mediante tecnologías energéticamente eficientes y el aprovechamiento energético de los fangos mediante mejoras en la biodigestión o nuevas tecnologías de valorización energética de fangos. La gestión de fangos es además relevante por su papel en las políticas de promoción de las energías renovables y la lucha contra el cambio climático.

El concepto de “aguas residuales como recurso energético” no se considera ni importante ni relevante para el ahorro energético en un horizonte razonable, en parte porque las tecnologías en este ámbito se encuentran en una fase demasiado temprana para valorar su potencial y en otra porque su implantación exige un cambio radical en la concepción de la gestión de las aguas residuales.

Definiciones y abreviaturas

Aguas residuales urbanas: Las aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial que se generan en el ámbito urbano.

DBO Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5^{20}). Se define como la cantidad de oxigeno que precisan los microorganismos para la eliminación de la materia orgánica biodegradable presente en una muestra a través de procesos bioquímicos, a una temperatura de 20 ºC tras 5 días de incubación.

DQO Demanda Química de Oxígeno (DQO). Se define como la cantidad de oxígeno que es necesaria para la oxidación de la materia orgánica y algún compuesto inorgánico (sulfuros, nitritos, etc.) por medio de reactivos químicos.

IGI Índice del Grado de Importancia
IGP Índice del Grado de Posición
Índices que ayudan en la interpretación de los resultados de la encuesta, otorgando un mayor peso a las respuestas que consideran, respectivamente, las tendencias que para España son de elevada importancia y aquellas en las que el país tiene una elevada posición competitiva.

SST Sólidos en Suspensión Totales: Son aquellos que quedan retenidos al filtrar un determinado volumen de muestra por un filtro de 0,45 µm con peso conocido (tarado). Se expresa en miligramos de sólidos por litro (mg/l)

EDAR Estación Depuradora de Aguas Residuales

h.e. Habitante equivalente: la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxigeno en 5 días (DBO_5) de 60 g de oxígeno por día.

W/h.e Potencia energética por habitante equivalente

Bibliografía

1. Proyecto Aqua-CSP. Energía Solar Térmica de Concentración para la Desalinización de Agua Marina http://www.dlr.de/tt/aqua-csp
2. Logan, Bruce E., Energy sustainability of the water sector. 2009 Clarke Prize Lecture
3. www.desar.nl
4. K. Kujawa-Roeleveld, et. al, Co-digestion of concentrated black water and kitchen refuse in an accumulation system within the DESAR (decentralized sanitation and reuse) concept. Water Science & Technology, Vol 48 No. 4 pp. 121–128.
5. Water and Energy. Draft Report of the GWRC Research Strategy Workshop. Global Water Research Coalition (2008)

ANEXO I: PANEL DE EXPERTOS

NOMBRE	INSTITUCION	Panel	
		1	2
Enrique Cabrera Marcet	Instituto Tecnológico del Agua (UPV)	X	
Eloy García Calvo	IMDEA Agua	X	X
Francisco Laguna	ETSICCP - UPM	X	
Ángel Cajigas	Asociación Tecnológica para el Tratamiento del Agua (ATTA-Agua)	X	
Francisco Cubillo	Canal Isabel II	X	
Ramón Prats Vime	ADASA SISTEMAS, S.A.U	X	X
Ignacio del Río Marrero	CEDEX	X	X
Juan José Salas	Centro de Nuevas Tecnologías del Agua	X	
Fermín López Unzu	Acuamed	X	
Anna Osann	Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla-La Mancha	X	
Raúl Sánchez	ETSICCP - UPM	X	
Fernando Cortabitarte	Acciona Agua	X	
Manuel Fariñas	Acciona Agua	X	X
Juan Peña	Mondragón Soluciones	X	
Sergio Jimenez	Fundación OPTI	X	X
Louw Wildschut	Tecnoma - Fundación OPTI	X	X
Fermín Jimenez	MARM	X	
José Luis Isidoro	IDAE	X	X
Jesus Pedro García	IDAE	X	X
Fernando Fdz. Polanco	Universidad de Valladolid		X
Valentín Garcia Albaich	Isolux Corsan		X

ANEXO II: CUESTIONARIO

D - Ahorro energético en desalinización. (Corto plazo)

	Titulo	Descripción
D.1	**Precalentamiento de la alimentación de una planta de osmosis inversa con calor residual de procesos térmicos o energía solar**	A mayor temperatura de la alimentación incrementa la eficiencia de la osmosis inversa. Para calentar el agua puede emplearse el calor de bajo valor (residual) de centrales eléctricas o procesos industriales o bien, emplear energía solar.
D.2	**Implantación de intercambiadores de presión en plantas de OI**	En sistemas de Osmosis Inversa, la presión de la salmuera solo es ligeramente inferior a la presión de entrada. En muchas plantas se recupera la energía mediante una turbina, pero los nuevos desarrollos van hacia intercambiadores de presión para transmitir la presión de salida a la alimentación.
D.3	**Implantación de sistemas combinadas de osmosis inversa y electrodiálisis para aguas salobres**	La combinación de la osmosis inversa y la electrodiálisis en un mismo sistema permite incrementar el flujo de agua sobre la membrana, reduciendo de esta manera el consumo energético global. La ganancia es mayor en aguas salobres.

A – Ahorro energético en depuración (corto plazo)

A.1	**Separación de la función de aireación y agitación en reactores de fangos activados**	Es práctica común diseñar el sistema de aireación de reactores de fangos activados 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 consiste en introducir sistemas separados para mezcla y oxigenación.
A.2	**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
A.3	**Implantar equipos de aireación más eficientes**	El cambio de los aireadores superficiales por otros de alto rendimiento puede significar un ahorro energético importante. (25 – 90%). Compresores de alto rendimiento pueden tener un 10 - 15% más de rendimiento. Mezcladores de tipo hiperboloide ofrecen un rendimiento de 20 - 55% superior que los convencionales.

A.4	**Implantación del control de procesos por sensores**	Instalación de un sistema de control de la aireación por sensores que controlan parámetros de proceso (oxígeno, redox, amonio, nitrato). Requiere sistemas de aireación de potencia variable o intermitente. Según la configuración, pueden obtenerse reducciones en el consumo energético de 25 - 55%.
A.5	**Empleo de la lógica difusa en el control de procesos**	La carga de una depuradora responde en gran medida a procesos cíclicos (día-noche) o patrones conocidos (lluvia-seco). Mientras controles convencionales por PLC responden a puntos fijos de arranque y parada, el control del proceso mediante lógica difusa permite anticiparse a nuevas condiciones de operación. El ahorro energético se estima en un 20%.
A.6	**Optimización de los bombeos**	Muchos bombeos no operan en su punto óptimo de rendimiento. Mediante 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 de caudales permite ajustar el consumo eléctrico.
A.7	**Aprovechar el 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. Posibles medidas consisten en (combinaciones de) instalación de un mayor número de motores de gas, instalación de un gasómetro, fluctuación de la temperatura de la digestión entre 32 y 36 ºC para actuar como búfer de calor.
A.8	**Re-evaluación de la deshidratación, incluyendo el parámetro de consumo energético**	Esta opción promueve la selección de tecnologías de deshidratación, no solamente bajo criterios de inversión y rendimiento de deshidratación, sino también en consumo energético del proceso y los costes del transporte del producto deshidratado.
A.9	**Implantación de sistemas de control por sensores para regular el nivel de ventilación en naves cerradas.**	La mayoría de las depuradoras cuentan con sistemas de tratamiento del aire para el control de olores. Estos sistemas mueven grandes volúmenes de aire. Los sistemas se suelen operar por ventilación fija y sobredimensionada para garantizar la calidad del aire tratada. Se puede ahorrar energía fluctuando el caudal según la concentración de ácido sulfhídrico y/o amonio en el aire extraído.

S - Tendencias en desalación

S.1	**Desarrollo de membranas de osmosis inversa más eficientes**	El consumo energético es el mayor factor de coste de una planta desaladora. Membranas más eficientes permiten producir más agua con menos energía, aunque con ello puede llegar a comprometerse la calidad del agua producida.
S.2	**Desarrollo de membranas de osmosis inversa más resistentes al fouling y/o a los desinfectantes**	El fouling de las membranas afecta al ciclo de operación/limpieza de las membranas y compromete su vida útil. De forma indirecta afecta al consumo energético. Se trata de desarrollar membranas con materiales más resistentes a los productos desinfectantes o menos sensibles al fouling.
S.3	**Desarrollo de tecnologías de tratamiento de salmuera en aplicaciones no-marinas**	La concentración de las salmueras requiere grandes cantidades de energía. A medida que se extiende e uso de la OI a aplicaciones en el interior del país para el tratamiento de aguas salobres, será un factor que compromete la eficiencia energética de la tecnología. El esfuerzo debe centrarse en tecnologías que realizan esta concentración con el mínimo gasto energético.
S.4	**Desarrollo de plantas de osmosis inversa marinas, accionadas por energía eólica**	Implantación de plantas de osmosis inversa en instalaciones eólicas marinas, donde la fuerza motriz es el viento. Ello requiere el desarrollo de bombas accionadas directamente por el molino, la optimización del proceso de osmosis para operación en el ámbito marino y la solución de la continuidad de la operación en ausencia de viento.
S.5	**Desarrollo de plantas de desalación basado en tecnología de calor/fío, accionadas por energía eólica**	La tecnología consiste en utilizar la fuerza eólica para accionar el compresor de un circuito de calor/frío para desalación mediante un proceso de evaporación flash o destilación por membranas. Requiere el desarrollo de compresores accionados directamente por el molino y la adaptación de los procesos de desalación a condiciones de carga variable.
S.6	**Desarrollo de tecnología de destilación por membranas para aplicación en desalación**	En la destilación por membranas se emplean membranas hidrófobas que rechazan el agua pero dejan pasar el vapor de agua. El agua se produce por condensación. Para desalación se puede emplear calor de bajo valor (solar, agua de enfriamiento de centrales o procesos industriales) para calentar la alimentación. El consumo energético del procesos es significativamente menor que el de la osmosis inversa.
S.7	**Aplicación de la nanotecnología para el desarrollo de membranas de osmosis inversa**	La nanotecnología puede emplearse para crear membranas con poros a nanoescala, potencialmente mucho más específicas que otras tecnologías de filtración. La tecnología es prometedora para desalinización, como alternativa a membranas de OI convencionales. Se estima que para desalinización consume menos energía, debido al mayor flujo y menor presión requerida. También se espera que sufren menos el efecto del fouling

S.8	**Desarrollo de la tecnología de células microbianas de desalación**	Las células microbianas de desalación son la versión biológica de las células de electrodiálisis. El proceso no requiere electricidad para desalinizar, porque emplea materia orgánica (p.e. aguas residuales) en cuya degradación los microorganismos que crecen sobre el ánodo se liberan los electrones y protones requeridos para la electrodiálisis. El proceso ha sido descubierto solo recientemente, de modo que no se dispone aún de datos para valorar su potencial de aplicación.
S.9	**Desarrollo de la tecnología de osmosis (Forward Osmosis) para desalación**	La osmosis es un proceso físico sobre el que se fundamenta la tecnología de membranas. En su aplicación actual (a la inversa) se consumen grandes cantidades de energía. Se está investigando la osmosis "al derecho" (Forward Osmosis, FO), siendo la clave la selección de la sustancia osmótica que permite ser separada fácil u completamente del agua.

T - Tendencias tecnológicas en depuración

T.1	**Aplicación de la tecnología MBR (Bioreactor de membranas) en la depuración urbana**	En la depuración convencional, la separación entre fangos y agua tratada es uno de los puntos débiles. La tecnología de bioreactores de membrana cambia esta condición. Permite mayores concentraciones de fangos y con ello reactores más pequeños y logra una separación absoluta entre sólidos y agua. En el estado actual de desarrollo, los MBR consumen más energía que sistemas convencionales, por lo que el reto consiste en incrementar la eficiencia energética del sistema, mejorando membranas, reduciendo fouling, o incorporando tecnologías adicionales como la dielectroforesis.
T.2	**Aplicación y desarrollo de tecnologías para mejorar la biodisponibilidad de los fangos**	La biodigestión se alimenta con los fangos primarios y secundarios de la depuración aerobia. La desintegración de la biomasa puede mejorar la disponibilidad biológica del sustrato y de esta manera incrementar la producción de biogás de la digestión. La desintegración se puede realizar con procesos mecánicos, sónicos y/o térmicos. Estos procesos pueden incrementar la biodisponibilidad en un 30% y reducen el tiempo de digestión a la mitad.
T.3	**Desarrollar tecnologías que permiten reducir el consumo energético de la eliminación de nutrientes**	La oxidación del nitrógeno y las recirculaciones internas de los procesos de desnitrificación incrementan el consumo energético de la depuración. Los balances de nutrientes de las EDAR indican que las aguas de retorno de la línea de fangos constituyen una fuente interna significativa. Se han desarrollado varios procesos que actúan de forma eficiente sobre este flujo, reduciendo así el consumo energético global (0,5 - 5% del total). Nuevos procesos que desnitrifican a partir de nitrito son aún más eficientes (2 – 10% de reducción para el total de la depuradora).

T.4	**Implantación de sistemas de Ciclo Rankino Orgánico para optimizar el aprovechamiento energético de biogas**	La demanda de calor de los digestores suele ser inferior al calor disponible en la cogeneración de la totalidad del biogás. El rendimiento energético global puede incrementarse, mediante un sistema de Ciclo Rankine Orgánico (ORC) que aprovecha el calor de los gases de combustión. Plantas existentes de ORC operan en rangos de 160 – 1500 kWe, aunque se está preparando la entrada en el mercado de unidades de 3 – 15 kWe. El rendimiento eléctrico de un ORC está en el orden de 10 – 20%.
T.5	**Mejorar la fiabilidad de sensores para el control de procesos**	La optimización del proceso de depuración y en consecuencia del consumo energético requiere de datos fiables en tiempo real, por lo que el buen funcionamiento de los sensores es de suma importancia. Aunque el mercado ofrece sensores para todos los parámetros relevantes, su fiabilidad, la dificultad de su calibración en un entorno hostil, como el de las depuradoras y especialmente la (auto) comprobación en tiempo real de su buen funcionamiento no está resuelta. Existe una necesidad, por tanto de mejorar la fiabilidad de los sensores, bien mediante su rediseño o mediante sistemas de limpieza y calibración automática.

G - Nuevos conceptos de gestión de aguas usadas

G.1	**Introducción de ACV en la toma de decisiones**	El Análisis del Ciclo de Vida contempla el consumo de recursos y energía a lo largo de la vida de un producto, proceso o actividad. Introducir sistemáticamente la evaluación energética en procesos de toma de decisiones o de diseño contribuiría a mejorar la eficiencia energética.
G.2	**Implantación y desarrollo de tecnologías ecosistémicas de depuración**	Sistemas naturales, como humedales artificiales, lagunas o ecosistemas artificiales como los “living machines” o “Organica” combinan los principios de las depuradoras convencionales con las de ecosistemas más complejos. Estos sistemas no dependen de una oxigenación artificial, por lo que tienen un consumo energético bajo.
G.3	**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, como urbanizaciones o barrios. Ello facilita la implicación de los actores y permite promover soluciones de bajo consumo energético.

G.4	**Desarrollo de conceptos de gestión de aguas basado en el saneamiento y reutilización descentralizados**	Mediante descentralización y separación en la fuente las aguas grises (ducha, lavamanos, agua de lavado), aguas negras (inodoros) y aguas pluviales. se pretende ahorrar recursos (energía y recursos primarios) 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.
G.5	**Desarrollo de sistemas de evacuación de aguas negras por vacío**	La tecnología de recogida neumática de aguas marrones, en combinación con inodoros domésticos con evacuación por vacío proporciona un residuo liquido de elevada carga orgánica, idónea para depuración anaerobia. El concepto minimiza el consumo de agua y facilita el aprovechamiento energético.
G.6	**Desarrollo de metodos de diseños de depuradoras basados en la optimización del recuros energético y el control de procesos**	El diseño de depuradoras para situaciones de gran variacion de caudal y carga, como las que se producen áreas turísticas, requiere asumir muchos compromisos (condiciones de proceso, tamaño de instalaciones, eficiencia energética). Se requieren métodos de diseño para su optimización.
G.7	**Desarrollar una calificación de eficiencia hídrica**	La reducción del consumo de agua en equipos domésticos implica reducción del consumo energetico, tanto directamente, como en transporte y depuración, por tener aguas residuales más concentradas. Como tal es un complemento a la calificación energética.

R - Aguas residuales como recurso

R.1	**Desarrollo de la tecnología de depuración con microalgas como materia prima para biocombustibles**	La depuración simbiótica lleva al máximo la interacción entre bacterias y microalgas con el objetivo de producir biomasa aprovechable. Muchas especies de microalgas tienen un contenido de aceites mayor del 30% y en algunos llegan al 75%. Las algas, por ello, son objeto de investigación como potencial fuente de biodiesel. La simbiosis beneficia asimismo al proceso de depuración, porque eliminan nutrientes del flujo de agua. Debido a la elevada demanda de superficie y la necesidad de filtración del efluente para recuperar las algas, el sistema parece indicado para aguas de elevada carga (ganaderas y agroindustriales) o flujos parciales de depuradoras (aguas retorno de la línea de fangos).

R.2	**Desarrollo de tecnologías para la valorización energética de los fangos en húmedo.**	Los procesos biológicos de aprovechamiento energético de los fangos tienen un rendimiento limitado, debido a la predominancia de componentes poco biodegradables (ligninas, celulosa). Se están desarrollando procesos térmicos como la gasificación en agua supercrítica. El proceso requiere un material con mínimo 80% de humedad y opera en condiciones de temperatura de 500 – 700 ºC y presiones de 200 – 400 bar para producir hidrógeno. Existen otras tecnologías que bajo condiciones de temperatura y presión distintas producen aceite o combustibles sólidos.
R.3	**Desarrollo de células de combustible microbianas (Microbial Fuel Cells, MFC) para convertir materia orgánica en electricidad**	Las células de combustible microbianas (MFC) producen una corriente eléctrica mediante procesos bioelectroquímicos. Una MFC es una célula con dos electrodos, separada por una membrana. En el compartimento del ánodo se encuentra la masa bacteriana que se encarga de la oxidación biológica de la materia orgánica, liberando electrones y protones. Los electrones fluyen del ánodo al cátodo, donde reaccionan con los protones que han pasado la membrana y con oxígeno, produciendo agua. Las células pueden captar oxigeno de forma pasiva, de modo que no se requiere aireación. Otra ventaja es que las bacterias solo pueden aprovechar parte de la energía para el crecimiento, por lo que la generación de fangos es menor. En la actualidad la capacidad de los MFC está en unos 3 W/m^2 y se espera poder llegar a los 7 W/m^2.
R.4	**Desarrollo de células microbianas de electrólisis (Microbial electrolysis cell, MEC) para convertir materia orgánica en hidrógeno y metano**	Una célula microbiana de electrólisis es una modificación del MFC que funciona en ausencia de oxígeno y produce hidrógeno. El MEC sigue el principio de la electrólisis, en el se emplea energía eléctrica para producir hidrógeno y oxígeno a partir de agua. En el MEC, el potencial generado por la oxidación bacteriana de la materia no es suficiente, por lo que requiere incrementarlo con una fuente externa. En estos momentos se obtiene un rendimiento energético (materia orgánica más electricidad introducida) del orden del 80%. Un desarrollo reciente es la producción de metano, en lugar de hidrógeno. Para ello se aplica un biofilm metanogénico sobre el cátodo. Las bacterias metanogénicas pueden convertir directamente el acetato (alimentación) e hidrógeno (generado en la célula) en metano.

ANEXO III: APÉNDICES DEL ESTUDIO PREVIO

Apéndice A: Tecnologías de desalación

TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA DESALACIÓN

Los procesos técnicos de desalación de aguas marinas o salobres continentales pueden dividirse en:

a) Procesos de **destilación**: se divide a su vez en:

Destilación térmica: la energía necesaria para la desalación es obtenida de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo, etc.)

Por compresión de vapor: figura 1, utiliza un compresor adiabático que consigue dos sectores de diferente presión, de tal manera que se genera un flujo de vapor desde el sector de mayor presión y temperatura de condensación hacia el inferior, lugar donde se produce la condensación

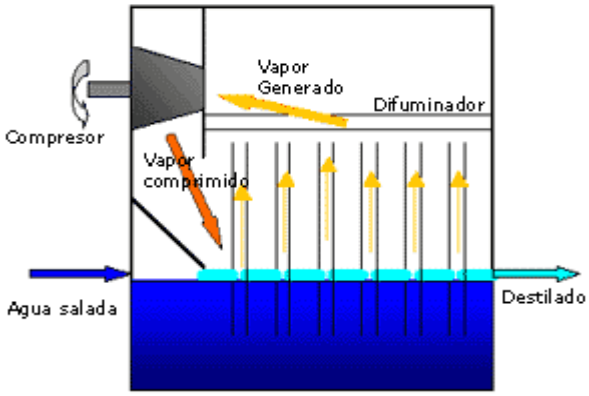


Figura 1: Diagrama de la compresión de vapor (CV) con evaporador de tubos verticales (VTE).

Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

Destilación solar: figura 2, adecuada para pequeñas comunidades en regiones áridas o semiáridas. Tiene dos variantes según utilice la energía del sol directamente o por captura del sol mediante células solares.

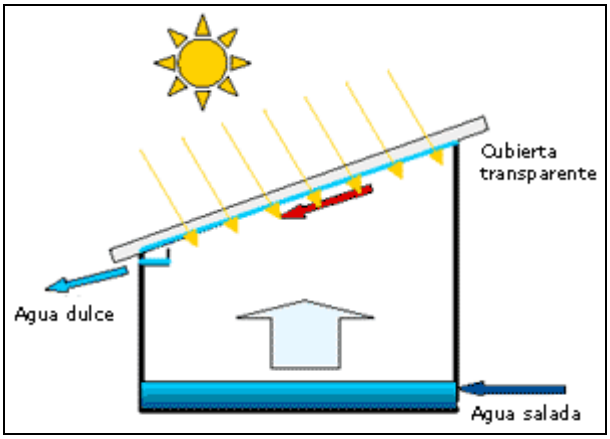


Figura 2: Esquema de un colector solar para destilación

Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

b) **Procesos de Congelación:** el agua salina se ve sometida a diversos procesos de refrigeración para posteriormente evaporarse a baja presión en un cristalizador al vacío. Así se obtienen cristales de hielo mezclados con cristales se salmuera que pueden ser separados mediante procesos mecánicos

c) **Procesos de membrana**: de gran difusión en la actualidad. Hay dos tipos básicos:

Ósmosis inversa: figura 3, mediante la aplicación de presión mecánica se logra contrarrestar la presión osmótica natural, de forma que el agua fluye desde la zona con mayor concentración de sales a la de menor concentración hasta obtener agua pura.

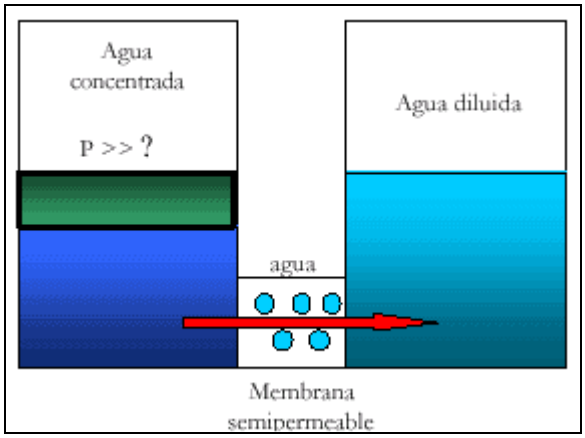


Figura 3: Proceso de ósmosis inversa
Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

Electrodiálisis: figura 4, separación iónica a través de una serie de membranas situadas sucesivamente y con una separación de milímetros entre sí. La aplicación de campos eléctricos genera la migración de iones que pasan por estas membranas que actúan como tamices.

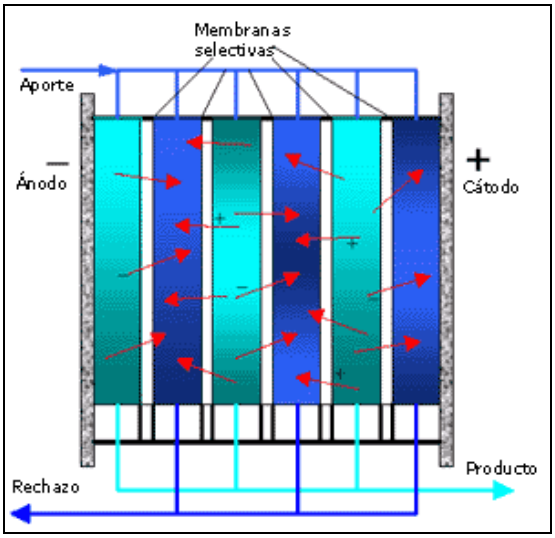


Figura 4: Proceso de electrodiálisis
Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

La técnica más extendida en la actualidad y que más proyección de futuro tiene en España es la osmosis inversa que como ya se ha comentado anteriormente consiste en bombear agua a alta presión a través de membranas semipermeables que separan agua y sal.

Esto se debe a los siguientes motivos

- Supone el menor consumo eléctrico posible
- El coste energético depende de la salinidad del agua bruta
- Su modalidad permite gran flexibilidad para ampliaciones
- Los costes de inversión son menores que en otras tecnologías

Una planta desaladora con esta tecnología dispone de los siguientes elementos:

- **Captación del agua.**

- **Pretratamiento:** La ósmosis inversa exige que los niveles de sólidos en suspensión y materia viva (materias, algas, etc.) sean lo más pequeños posibles para evitar un rápido ensuciamiento de la membrana.

  El sistema de pre-tratamiento incluye procesos de filtración y micro-filtración y se complementa con la adición de compuestos químicos (coagulantes, antioxidantes, acidificador e inhibidores de incrustaciones). Incluye también una desinfección mediante cloración, UV o aplicación de ozono.

- **Bombeo de alta presión.**

- **Osmosis inversa.**

- **Post-tratamiento o acondicionamiento** del agua: básicamente consiste en la neutralización del PH y desinfección (UV, ozonización, etc.).

Apéndice B: Tecnologías de depuración urbana

TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

En esta sección se presenta una descripción de las depuradoras típicas y de los consumos eléctricos para cada tamaño.

Los consumos eléctricos se expresan de forma indirecta, utilizando las potencias de los equipos por habitante equivalente (W/h.e).

Se ha calculado este valor a partir de la potencia de los equipos instalados y del número de horas de funcionamiento en una situación de operación normal. De esta manera, para equipos en funcionamiento continuo (24 h) el valor de W/h.e. se calcula mediante división de la potencia del equipo y la capacidad de tratamiento. En equipos que funcionan durante algunas horas al día, se corrige por la fracción del tiempo de funcionamiento.

El bombeo de entrada se suele controlar mediante sensores de nivel, de modo que el consumo energético del bombeo es una función directa del caudal bombeado. Por ello, el consumo se calcula a partir de las fórmulas estándares para bombas y se expresa en potencia por h.e. (W/h.e.)

El consumo energético de la aireación de depuradoras pequeñas corresponde al consumo de los equipos de aireación instalados. La potencia se define en proyecto según la capacidad de tratamiento y se supone que operan las 24 h.

Para depuradoras de mayor tamaño se ha calculado el consumo a partir de un modelo de cálculo del proceso biológico. De esta manera el consumo toma en consideración la carga contaminante y los parámetros típicos de proceso (carga másica, nitrificación, desnitrificación).

Los tipos de tratamiento que se han tenido en cuenta son los siguientes:

Fosa séptica

Un foso séptico, figura 5, normalmente se construye como tanque enterrado. Dado que la pérdida de carga hidráulica es mínima, se suele operar por gravedad, por lo que el sistema no tiene consumo energético/eléctrico alguno.

El proceso de tratamiento consiste en una sedimentación de los sólidos y a degradación anaerobia parcial de los lodos.

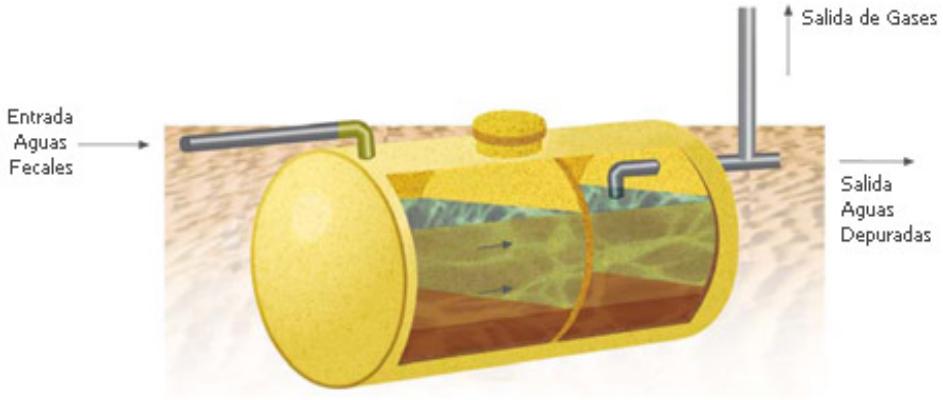


Figura 5: Foso séptico
(Fuente: Remosa)

Consumo energético cero. Se opera por gravedad y la instalación no tiene elementos mecánicos.

Foso séptico y filtro biológico

El rendimiento de un foso séptico se puede mejorar mediante una segunda etapa de tratamiento en el que se percola el agua a través un medio filtrante en presencia de aire, figura 6. Las pérdidas de carga de este sistema son mayores (2 – 3 m.) por lo que no en todos los casos se puede operar por gravedad. En todo caso se requeriría solamente un bombeo.

Este filtro biológico permite una mayor reducción de la carga orgánica e incluso puede llegar a una nitrificación parcial.

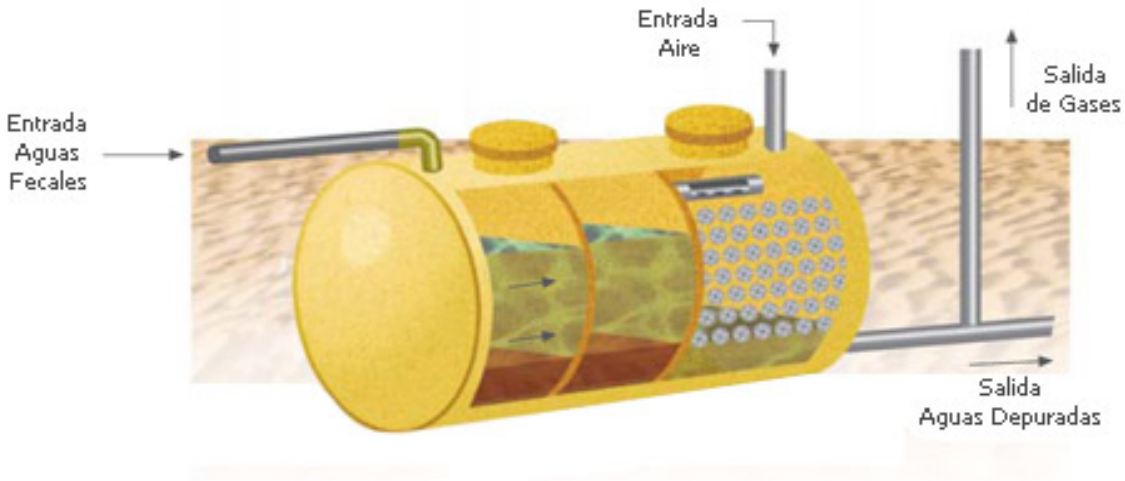


Figura 6: Foso séptico y filtro biológico

(Fuente: Remosa)

Consumo energético cero. Se opera por gravedad y la instalación no tiene elementos mecánicos.

<u>Depuradora compacta de fangos activos</u>

Una depuradora de este tipo, figura 7, realiza un proceso convencional de fangos activos, dentro de un tanque enterrado. La aireación se realiza mediante soplantes y aireación de burbujas. Para el retorno de fangos se emplea aire procedente del soplante, utilizando un sistema "air-lift".

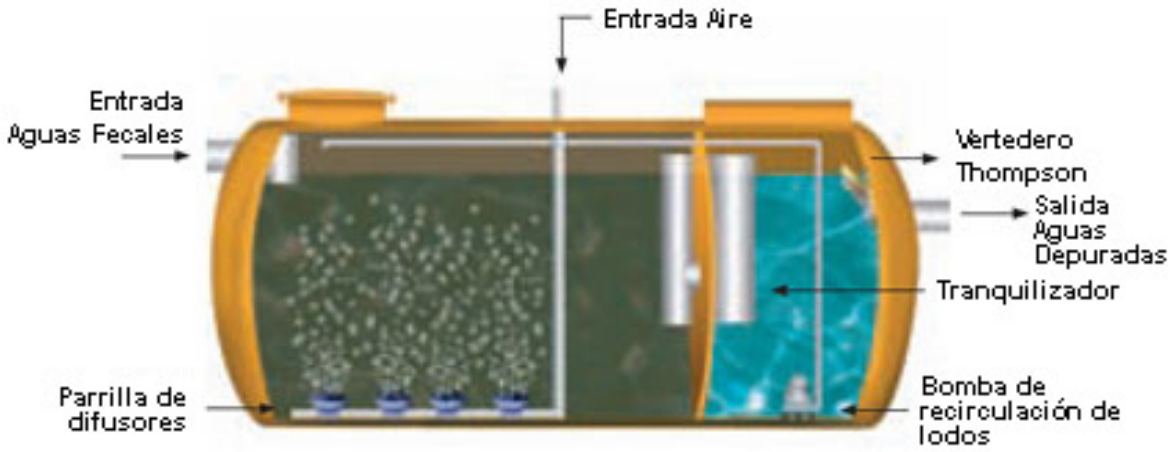


Figura 7: Depuradora compacta de fangos activos

(Fuente: Remosa)

Esta depuradora estará compuesta con los siguientes tratamientos:

- Estación de bombeo.
- Desbaste: Un rototamiz
- Tratamiento biológico: una planta compacta de fangos activas de aireación extendida. La planta compacta consiste en:
  - Agitador en la zona anóxica
  - Sistema de aireación un eyector
  - Bomba de recirculación de fangos

Se expresa el consumo en términos de la potencia de los equipos por habitante equivalente, corrigiendo por equipos que no funcionan a tiempo completo, tabla 1.

Tabla 1: Potencias para depuradora de fangos activos

Potencia (W/h.e.)	Habitantes equivalentes		
		101	501
		-	-
	<101	500	1.000
Línea de agua			
Bombeo	0,06	0,10	0,10
Motores y bombas desbaste	1,80	2,20	2,10
Motores y bombas desarenado			2,50
Compacto aeración extendida	30,00	20,00	6,70
Agitación y retorno de fangos FA			5,70
Línea de fangos			
Espesador gravitacional		0,20	0,10
Deshidratación sacos filtrantes			0,40
TOTAL	**31,86**	**22,50**	**17,60**

Las instalaciones pequeñas son ineficientes energéticamente porque requieren potencias mínimas para que operen con garantías los equipos mecánicos (riesgo de atascos) y para proporcionar suficiente potencia de mezcla (aireación).

Depuradora compacta de Biodiscos

Una depuradora de biodiscos es conceptualmente una depuradora biológica aerobia de lecho fijo, figura 8. La masa bacteriana está adherida a la superficie de los biodiscos. El funcionamiento de este sistema está basado en la rotación de los biodiscos que se encuentran parcialmente sumergidos en el agua bruta. Esta rotación permite la transferencia de oxígeno aire/ biomasa. Una ventaja importante que presentan estos equipos es que no es necesario controlar el oxígeno disuelto en el tanque.

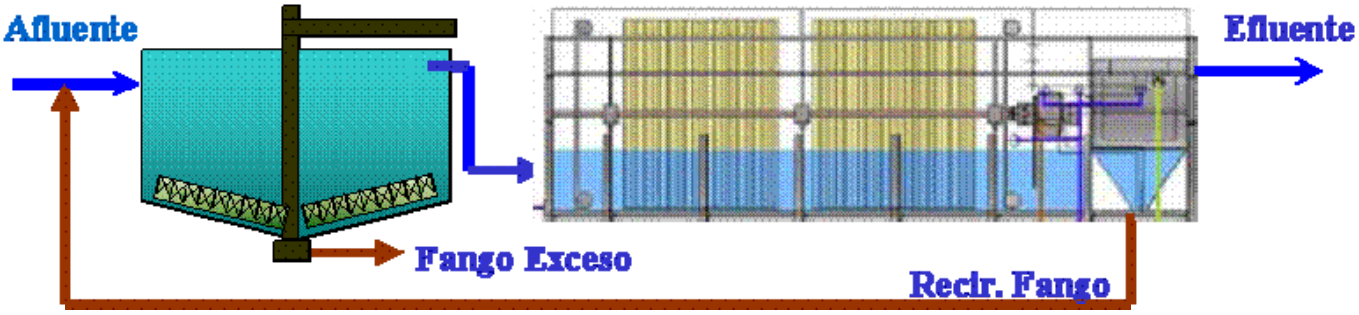


Figura 8: depuradora compacta de biodiscos

Esta depuradora estará compuesta con los siguientes tratamientos:

- Estación de bombeo.
- Desbaste: Un rototamiz.
- Tratamiento biológico: una planta compacta de biodiscos. La planta compacta consiste en:
  - Un sedimentador
  - Biodisco, el cual está dividido en:
    - Unidad de biodisco, accionado por un motor eléctrico.
    - 1 decantador lamelar con una bomba para la recirculación de fangos.

Se expresa el consumo en término de la potencia de los equipos por habitante equivalente, corrigiendo por equipos que no funcionan a tiempo completo.

Tabla 2: Potencias para depuradora de biodiscos

Potencia (W/h.e.)	Habitantes equivalentes	
	101	501
	-	-
	500	1.000
Línea de agua		
Bombeo	0,10	0,10
Motores y bombas desbaste	2,20	2,10
Motores y bombas desarenado		2,50
Aireación biodiscos	3,30	1,80
Línea de fangos		
Espesador gravitacional	0,20	0,10
Deshidratación sacos filtrantes		0,40
TOTAL	**5,80**	**7,00**

Las plantas de biodiscos consumen menos energía que otras plantas compactas porque no consumen energía para aireación, que es un proceso energéticamente ineficiente. La aireación es pasiva y solo se requiere energía para girar los biodiscos.

Fangos Activos – Aireación Extendida

Son sistemas de lodos activados que trabajan con cargas másicas muy bajas, 0,05-0,15 (kg DBO/día)/kg biomasa, obteniéndose rendimientos de en torno al 95 %, figura 9. El tiempo de residencia del agua en el reactor es de, al menos, 24 horas. Los microorganismos trabajan prácticamente en fase de respiración endógena, por lo que la generación de fangos es baja y además éstos se encuentran muy mineralizados. Por ello, la gestión de los fangos es más sencilla y permite su aplicación directa sobre el suelo o su deshidratación directa, sin riesgos de malos olores.

Debido a que el reactor admite más sólidos en suspensión no es necesario instalar decantadores primarios, simplificando la instalación y disminuyendo los costes de primera instalación.

El consumo de oxígeno de estos reactores es relativamente alto, de 2 a 3 kg O2/kg DBO eliminada, debido a que, además de la eliminación de la DBO y la generación de nuevos microorganismos, nitrifica.

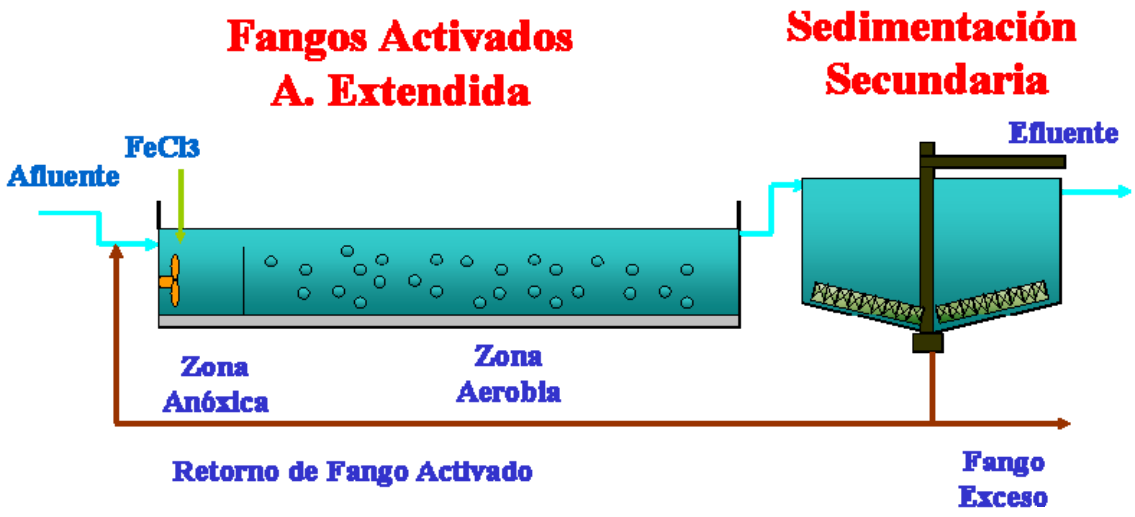


Figura 9: Depuradora de fangos activos con aireación extendida

Esta depuradora estará compuesta con los siguientes tratamientos:

- Estación de bombeo.
- Desbaste
- Desarenador-desengrasador.
- Tratamiento biológico: tipo fangos activados de aireación extendida, la cual comprende:
  - Sistema de aireación, según el tipo de depuradora de aireación superficial (mecánica) o de burbujas (soplantes y difusores).

- Agitación para mantener la masa bacteriana en suspensión.
- Bomba de recirculación de fangos.
- Bomba para fangos en exceso.

- Tratamiento de fangos:
  - Espesador, con sistema mecánico para favorecer el proceso.
  - Bombas de fango y agua.
  - Equipo de deshidratación, según el tamaño de la planta mediante sacos filtrantes (pequeño) o centrífugas.

Se expresa el consumo en término de la potencia de los equipos por habitante equivalente, corrigiendo, en su caso, por equipos que no funcionan a tiempo completo, tabla 3.

Tabla 3: Potencias para depuradoras de fangos activos con aireación extendida

Potencia (W/h.e)	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
Línea de agua								
Bombeo	0,13	0,13	0,13	0,16	0,18	0,21	0,21	0,21
Motores y bombas desbaste	1,00	0,70	0,50	0,40	0,20	0,20	0,15	0,12
Motores y bombas desarenado	1,20	0,80	0,50	0,40	0,25	0,25	0,25	0,16
aireación extendida mecánica	9,50	6,70	6,50	6,20	5,00	4,70	4,70	4,70
Aireación extendida con soplantes	9,50	6,70	6,50	6,20	5,00	2,88	2,88	2,88
Aireación FA con desnitrificación								3,45
Agitación y retorno de fangos FA	1,60	1,30	2,00	1,80	1,50	0,90	0,80	0,40
Agitación y retorno de fangos desnitrificación								0,48
Decantación y bombeo fangos	0,40	0,32	0,25	0,25	0,14	0,12	0,08	0,05
Línea de fangos								
Espesador gravitacional	0,05	0,03	0,02	0,15	0,10			
Espesador mecánico						0,20	0,15	0,10
Deshidratación sacos filtrantes	0,32	0,22						
Centrifugado			0,60	0,60	0,75	0,50	0,40	0,25
TOTAL aireación superficial	**14,20**	**10,20**	**10,50**	**9,96**	**8,12**	**7,08**	**6,74**	**5,99**
TOTAL aireación por burbujas	**14,20**	**10,20**	**10,50**	**9,96**	**8,12**	**5,26**	**4,92**	**4,17**
TOTAL FA con desnitrificación								**9,48**

En el rango de 1.000 – 10.000 h.e. se emplea la aireación superficial y por burbujas. Los consumos son ligeramente distintos, ya que la aireación por burbujas es más eficiente.

En plantas que incluyen desnitrificación, el consumo incrementa (un 20%) por la mayor recirculación.

Fangos Activos Convencionales

Los sistemas de fangos activos convencionales, figura 10, son similares a los de aireación extendida, con la importante diferencia de estar operadas a mayor carga orgánica. La consecuencia es que el consumo energético en la aireación es menor ya que parte de la carga orgánica de las aguas residuales se incorpora a la masa bacteriana, sin ser estabilizado. Por esta razón los lodos requieren un tratamiento posterior, que generalmente es de digestión anaerobia. En este proceso se genera biogás, que se aprovecha en

cogeneración para producir energía eléctrica y el calor necesario para el calentamiento de los reactores.

Aunque desde un punto de vista energético es sería la opción a elegir en todos los casos, económicamente solo es viable a partir de una capacidad de 100.000 h.e. debido a los elevados costes de inversión en la planta de biodigestión.

Figura 10: Depuradora de fangos activos convencionales

Esta depuradora estará compuesta con los siguientes tratamientos:

- Estación de bombeo.
- Desbaste.
- Desarenador-desengrasador.
- Tratamiento primario: decantador primario + fangos primarios (para > 100.000 h.e.).
- Tratamiento biológico: tipo fangos activados de aireación extendida, la cual comprende:
  - Sistema de aireación de burbujas (soplantes y difusores).
  - Bombas de recirculación interna (mayor en caso de procesos con desnitrificación) y de agitación.
  - Bomba de recirculación de fangos.
  - Bomba para fangos en exceso.
- Tratamiento de fangos:
  - Espesador, con sistema mecánico para favorecer el proceso.

- Bombas de fango y agua.
- Equipo de deshidratación, según el tamaño de la planta mediante sacos filtrantes (pequeño) o centrífugas.
- (En plantas con digestión) Digestores, bombas, motores de gas y generadores.

Se expresa el consumo en término de la potencia de los equipos por habitante equivalente, corrigiendo, en su caso, por equipos que no funcionan a tiempo completo, tabla 4.

Tabla 4: Potencias para depuradora de fangos activos convencionales

Potencia (W/h.e)	100.001 - 500.000	>500.000
Línea de agua		
Bombeo	0,20	0,20
Motores y bombas desbaste	0,12	0,11
Motores y bombas desarenado	0,07	0,07
Motores y bombas primario	0,01	0,01
Fangos activos	1,80	1,80
Aireación FA con desnitrificación	2,16	2,16
Agitación y retorno de fangos FA	0,30	0,30
Agitación y retorno de fangos desnitrificación	0,36	
Decantación y bombeo fangos	0,01	0,01
Línea de fangos		
Espesador mecánico	0,09	0,02
Centrifugado	0,15	0,15
Digestión anaerobia y cogeneración	-0,60	-0,60
TOTAL	2,15	2,07
TOTAL con desnitrificación	2,57	2,13

En un 10% de instalaciones se incorporan procesos de desnitrificación que tienen una demanda adicional de energía en aireación, recirculación y agitación de los tanques.

La digestión de fangos aporta una cantidad de energía eléctrica que equivale al 25% del consumo total.

MBR

Un bioreactor de membranas es un proceso compacto que combina un proceso de fangos activados con la filtración por membranas. Básicamente se sustituye la decantación secundaria por la filtración por membranas que se emplea para separar la masa bacteriana (fangos activos) del efluente. En los sistemas integrados, las membranas se sumergen en el reactor biológico. En sistemas externos, la filtración se encuentra separada del reactor biológico y se retornan los fangos al reactor.

El sistema se emplea cada vez más para la depuración industrial porque permite elevadas cargas (baja ocupación de terreno) y ofrece altos rendimientos. El coste energético del proceso es significativamente mayor que el de procesos convencionales y se estiman en 0,8 - 1,2 kWh/m3 o 0,18 kWh/h.e, lo que equivale a 7,4 W/h.e.

Apéndice C: Tecnologías de depuración industrial

TECNOLOGÍAS DE DEPURACIÓN INDUSTRIAL

1. PROCESOS FÍSICOS

En la tabla 5 se resumen los principales procesos físicos de tratamiento. La mayoría de ellos son procesos convencionales, utilizadas también en depuradoras urbanas.

Tabla 5. Procesos físicos de tratamiento

Proceso	Tipo	Principal factor de consumo energético	Calificación energética
Rejillas	convencional		Baja
Tamices	Convencional		Baja
Sedimentador	Convencional		Baja
Desarenador	Convencional		Baja
Desengrasado	Convencional		Baja
Flotación	Específico	Bombas de alta presión	Media
Filtración por arena	Convencional	Bombas	Baja
Micro/ultra filtración	Específico	Bombas de alta presión	Media
Pervaporación	Específico	Bombas de vacío	Alta
Evaporación	Específico	Calor	Alta
Electrodiálisis	Específico	Campo eléctrico	Media
Stripping (Vapor/aire)	Específico	Ventiladores y bombas	Baja
Intercambio iónico	Específico	Bombas	Baja
Carbono activo	Específico	Bombas	Baja

A continuación se comentan las características de los procesos específicos, centrándose en los aspectos relevantes para el consumo energético.

Flotación

En una unidad de flotación se introduce una mezcla de agua y aire ambas a alta presión en el tanque de flotación. En la mayoría de los casos se dosifican coagulantes y/o floculantes. La liberación del aire en forma de burbujas, adheridas a las partículas contaminantes, causa su flotación. La capa flotante es eliminada y procesada como fango.

El proceso más conocido es el DAF (Dissolved Air Flotation)

La flotación es una alternativa para la eliminación de grasas y puede combinarse con coagulación/floculación para separar las partículas por flotación en lugar de sedimentación.

No se han obtenido datos sobre el consumo energético, pero es relativamente alto debido a la necesidad de bombas de alta presión y compresores.

Filtración

A partir del clásico filtro de arena, los procesos de filtración más modernos emplean membranas, figura 11, que se clasifican según el tamaño del poro en microfiltración (0,1 – 20 µm), ultrafiltración (0,001 – 0,1 µm) y osmosis inverso (< 0,001 µm).

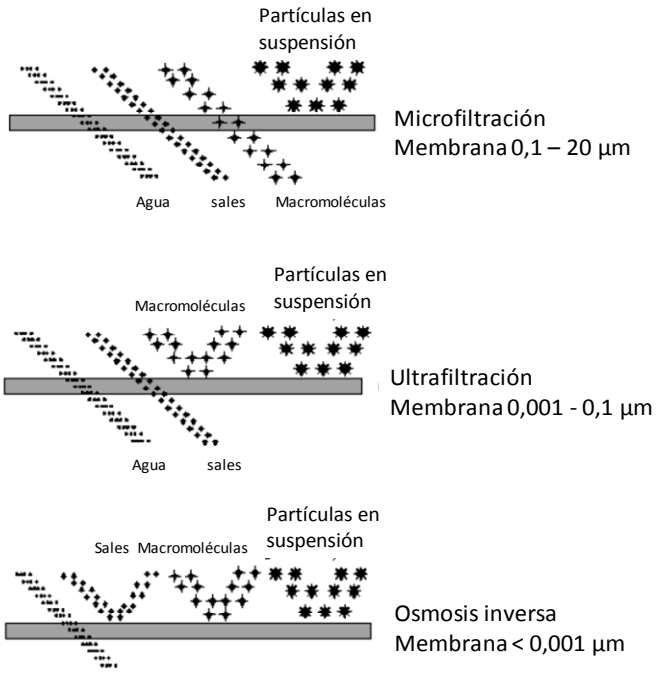


Figura 11: Procesos de filtración

El consumo energético es inversamente proporcional al diámetro de poro. En el caso de la Osmosis inversa guarda una relación directa con la salinidad del agua, desde 0,75 kWh/m^3 para agua dulce (contaminada) a 1,5 kWh/m^3 para agua salobre hasta 3,5 – 5 kWh/m^3 para agua salada.

Evaporación / pervaporación

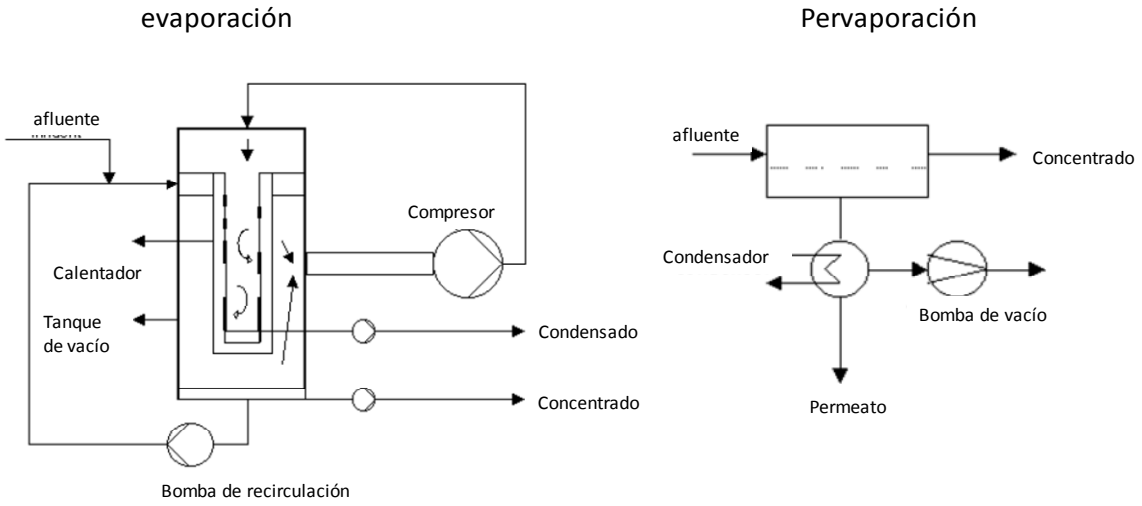


Figura 12: procesos de evaporación y pervaporación

La evaporación, figura 12, tiene el doble objetivo de concentrar la contaminación y de producir agua pura. Los procesos de evaporación por recompresión del vapor pretenden mejorar el rendimiento energético.

La pervaporación, figura 12, es un proceso de membranas, análogo a la destilación. Es similar a la osmosis inversa, salvo que el producto pasa de la fase líquida a la gaseosa. El proceso requiere el calentamiento del agua a 70 – 100 ºC, y requiere tanto bombas a presión como compresores de vacío. Como tal es un proceso con un elevado consumo energético.

La evaporación consume elevadas cantidades de energía, pero puede ser interesante para la concentración de pequeños flujos de sustancias problemáticas (metales pesados, salmueras).

La pervaporación es una técnica adecuada para la eliminación de sustancias volátiles y puede competir con el stripping y la adsorción a carbón activo. El consumo energético, sin embargo es mayor.

Electrodiálisis

El principio de la electrodiálisis consiste en aplicar una potencial eléctrica sobre una combinación de membranas selectivas. Los iones difunden a través de las membranas hacia el cátodo o ánodo.

Se trata de un proceso costoso y con un elevado gasto energético, por lo que se emplea a pequeña escala para producir agua potable o recuperación de metales.

Stripping, intercambio iónico y adsorción a carbón activo.

Los procesos tienen en común que emplean una columna de tratamiento para eliminar contaminantes específicos de un flujo de agua. El interés del proceso está en el principio físico y no es especialmente relevante el consumo energético, que se limita al consumo de bombas y/o ventiladores.

La torre de lavado (stripper) consiste en una columna rellena de un material de gran superficie específica en el que se introduce el agua en la parte superior y se insufla aire en la parte inferior.

Es una técnica sencilla y robusta para la eliminación de sustancias volátiles con un consumo energético bajo.

Un intercambiador de iones consiste en una columna rellena de una resina específica. El agua a tratar fluya a través de la columna, intercambiando los iones contaminantes (por ejemplo metales pesados) por otras inocuos.

Este proceso tiene su mayor utilidad de forma integrada en el proceso, aunque es utilizado comúnmente como tratamiento final para eliminación de iones. El consumo energético es bajo, ya que no requiere elevadas presiones.

La adsorción a carbón activo es eficaz para la eliminación de un amplio rango de sustancias orgánicas. Se suele emplear para concentraciones bajas de sustancias presentes en aguas de proceso o agua potable.

El consumo energético del proceso es bajo, pero en caso de incluir la regeneración del carbón puede considerarse elevado.

2. PROCESOS QUÍMICOS

A continuación, tabla 6, se comentan las características de los procesos específicos, centrándose en los aspectos relevantes para el consumo energético.

Tabla 6: Procesos y consumos

Proceso	Tipo	Principal factor de consumo energético	Calificación energética
Neutralización	21	Bombas	Baja
Coagulación/floculación	15	Bombas/mezcladoras	Baja
Precipitación	17	Bombas/mezcladoras	Baja
Desemulsionado	18	Bombas	Baja
Detoxificación	20	Bombas	Baja
Electrocoagulación	16	Campo eléctrico, bombas	Alta
Electrolisis (por membranas)	19	Campo eléctrico, bombas de alta presión	Alta
Oxidación química	22	Bombas, generador de ozono, luz UV	Media

Neutralización, coagulación/floculación, precipitación, desemulsionado, destoxificación

Estos procesos tienen su interés en el principio químico de tratamiento. Tienen en común que se agrega una sustancia química al flujo de agua y en muchos casos se combina con otros procesos (flotación, sedimentación, stripping) para eliminar la contaminación.

Tienen consumos energéticos bajos, principalmente por bombas de dosificación y bombas de circulación y agitadores.

Electrocoagulación

El objetivo de la electrocoagulación es la coagulación entre coloides que facilita su separación del flujo del agua. El coagulante se libera electrolíticamente, generalmente desde un ánodo férrico o de aluminio. La liberación de gas en la superficie de los electrodos además causa un ligero efecto de flotación.

El proceso se caracteriza por su elevado consumo energético, por lo que se emplea poco.

Electrólisis

La electrólisis es una técnica electroquímica para la recuperación de metales. Se emplean electrodos inertes sobre los que precipita el metal que pretende recuperarse. El proceso se puede mejorar mediante la separación de los compartimentos anódicos y catódicos mediante una membrana, llamándose entonces electrodiálisis por membranas.

Aunque el consumo energético es elevado, el proceso es interesante para la recuperación de metales (cobro, zinc, níquel, plata, oro).

Oxidación química

En la oxidación química se emplean sustancias oxidantes (oxígeno, cloro, ozono, peróxido) para facilitar la biodegradación posterior de sustancias orgánicas tóxicas o complejas. La oxidación con peróxidos puede reforzarse en presencia de luz UV por la generación de radicales.

En el caso de emplear ozono y/o luz ultravioleta, el consumo energético del proceso es relevante.

3. PROCESOS BIOLÓGICOS

Los procesos biológicos suelen ser la mejor base para la depuración industrial en la mayoría de los casos. Los procesos de biodegradación son capaces de eliminar una amplia gama de sustancias contaminantes, desde sólidos en suspensión (inorgánicos y orgánicos), nutrientes y todo tipo de sustancias orgánicas. Los procesos biológicos incluso tienen la capacidad de adaptarse a sustancias orgánicas complejas y tóxicas. En el caso de la presencia de contaminantes incompatibles con la depuración biológica, puede complementarse el proceso con un pretratamiento específico para neutralizarlo.

Las depuradoras industriales suele carecer de sistemas de regulación que permitan optimizar el proceso y adecuarse a las fluctuaciones en caudal y composición de las aguas. Debido a ello, muchas depuradoras están en origen sobredimensionadas, si bien a lo largo del tiempo pueden llegar a sobrecargarse.

A diferencia de las depuradoras urbanas, para la depuración industrial de aguas de elevada carga orgánica es particularmente interesante utilizar procesos anaerobios. Estos, además de ser más compactos y producir menos fangos, logran altos rendimientos en eliminación de la carga orgánica y producen biogás que puede aprovecharse energéticamente.

A continuación, tabla 7, se comentan las características de los procesos específicos que no hayan sido evaluados con la depuración de aguas residuales urbanas, centrándose en los aspectos relevantes para el consumo energético.

Tabla 7: Procesos específicos

Proceso	Tipo	Principal factor de consumo energético	Calificación energética
Biofiltro	Convencional	Bombas	Baja
Biodisco	Convencional	Bombas, motor del disco	Baja
SBR	Específico	Bombas, soplante	Media
Fangos activados	Convencional	Bombas, soplante	Media
MBR	Específico	Bombas, soplante	Media
Depuración anaerobia	Específico	Bombas/motor de gas	Positiva

Sequencing Batch Reactor (SBR)

Un SBR, figura 13, es un proceso de fangos activados que se opera por lotes. Generalmente se operan dos tanques en paralelo. Al inicio del proceso, el tanque contiene un volumen determinado de fangos activos.

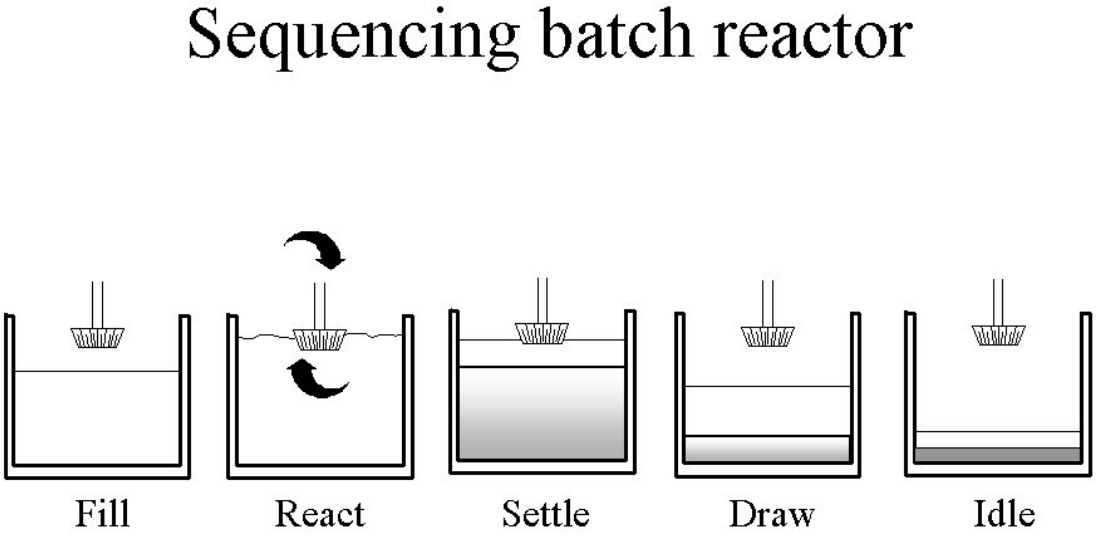


Figura 13: SBR

El ciclo de proceso consiste en:

- Llenado del tanque con aguas residuales.
- Aireación.
- Sedimentación (parada de la aireación).
- Decantación del agua depurada.

Periódicamente se purgan los fangos en exceso.
Este proceso se emplea habitualmente en industrias pequeñas y medianas para aguas residuales de carácter orgánico.

El consumo energético del proceso es comparable con el de otros procesos de fangos activados.

Depuración anaerobia

La depuración anaerobia, figura 14, se emplea generalmente para el tratamiento de aguas residuales con una elevada concentración de sustancias orgánicas biodegradables (cerveceras, papeleras, azucareras, etc.). El proceso se desarrolla de forma óptima a temperaturas de 30 – 35ºC, por lo que puede ser necesario calentar el afluente.

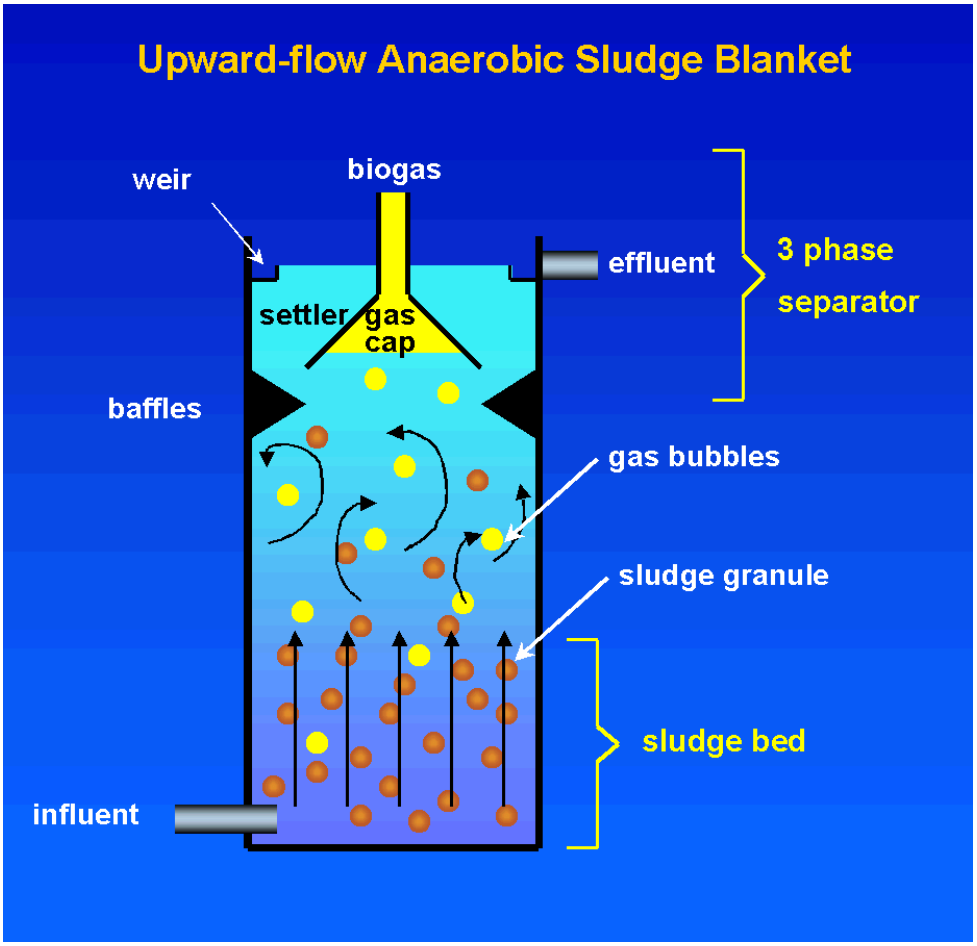


Figura 14: esquema de depuración aerobia

El proceso más utilizado es el UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). En este proceso, se introduce el agua en el fondo del reactor donde entra en contacto con el manto de lodos. En el separador de 3 fases, localizado en la parte superior del reactor se recoge el biogás, se separa el afluente y se retorna el lodo al reactor.

El consumo energético del proceso se limita al bombeo y, eventualmente, al calentamiento del agua, mientras produce unos 0,4 m^3 biogás/kg DQO eliminado con un 60% de metano (7,5 MJ/kg DQO eliminado).