

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

**LA REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES DEPURADOS EN ESPAÑA:  
RETROSPECTIVA, DESARROLLO DEL MARCO NORMATIVO, ESTUDIO DE  
LAS TECNOLOGÍAS DE REGENERACIÓN FRENTE A LOS BIORREACTORES  
DE MEMBRANA Y SUS COSTES EN FUNCIÓN DEL USO**

TESIS DOCTORAL

**Raquel Iglesias Esteban**  
Ingeniero Agrónomo por la UPM

**2016**



DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

**LA REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES DEPURADOS EN ESPAÑA:  
RETROSPECTIVA, DESARROLLO DEL MARCO NORMATIVO, ESTUDIO DE  
LAS TECNOLOGÍAS DE REGENERACIÓN FRENTE A LOS BIORREACTORES  
DE MEMBRANA Y SUS COSTES EN FUNCIÓN DEL USO**

**Raquel Iglesias Esteban**  
Ingeniero Agrónomo

**DIRECTOR: AUGUSTO ARCE MARTÍNEZ**

**2016**



Tribunal nombrado por el Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 22 de diciembre de 2015.

Presidente: D<sup>a</sup> María del Carmen Cartagena Causapé

Secretario: D. Jesús Ángel Vázquez Minguela

Vocal: D. Federico Estrada Lorenzo

Vocal: D. Ignasi Rodríguez –Roda Layret

Vocal: D<sup>a</sup> María del Mar Delgado Arroyo

Suplente: D<sup>a</sup> María del Mar Gómez Zamora

Suplente: D. Francisco Ribas Elcorobarrutia

Realizado el acto de defensa y lectura de Tesis el día 26 de enero de 2016.

EL PRESIDENTE LOS VOCALES

EL SECRETARIO



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DEFENSA**

Augusto Arce Martínez, Profesor Titular del Departamento de Química y Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Madrid, como director de la Tesis Doctoral titulada “LA REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES DEPURADOS EN ESPAÑA: RETROSPECTIVA, DESARROLLO DEL MARCO NORMATIVO, ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE REGENERACIÓN FRENTE A LOS BIORREACTORES DE MEMBRANA Y SUS COSTES EN FUNCIÓN DEL USO” realizada por Raquel Iglesias Esteban, alumna del programa de Doctorado de Tecnología Agroambiental del Departamento de Química y Tecnología de Alimentos, para aspirar al grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid.

AUTORIZA La presentación de esta memoria para que se proceda al trámite de su lectura y defensa ante el tribunal correspondiente.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en Madrid, a 16 de diciembre de 2015.

Fdo.: Dr.

D. Augusto Arce Martínez





## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la labor que he estado desarrollando en el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEH-CEDEX) durante más de diez años como personal de investigación y luego como funcionaria de carrera en temas de reutilización de aguas residuales.

Quiero dar las gracias, en primer lugar, a mi Director de tesis, Augusto Arce Martínez, Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid, también quiero agradecer a Ignasi Rodríguez –Roda Layret, Catedrático de la Universidad de Girona y Pedro Simón Andreu, Director técnico de la Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia, por haberme animado y ayudado en todo lo que han podido para sacar este proyecto adelante.

Agradecer a mis compañeros de trabajo Enrique Ortega de Miguel, José Genaro Batanero Bernabeu y Pedro Catalinas Montero por iniciarme y apoyarme en mi desarrollo profesional y formativo, en este campo tan necesario e interesante, como es el del tratamiento de las aguas y su reutilización.

No quisiera dejar pasar la oportunidad de agradecer la colaboración recibida por parte de Federico Estrada Lorenzo (Director del CEH) e Ignacio del Río Marrero (Jefe del Área de Tecnologías del Agua del CEH), y a todas aquellas personas que han colaborado en los trabajos que aquí se presentan, operadores de plantas, técnicos de entidades y agencias de gestión, y personal funcionario e I+D de otras áreas del CEH como la de informática, Confederaciones Hidrográfica, Ayuntamientos o Diputaciones. Gracias a Luis Quintas, Lucas Moragas, Adela Martínez, Jordi Robusté, Emilia Belén García y a los técnicos de las diferentes casas comerciales consultadas.

Por último, a los míos, familia y amigos, que han entendido mis ausencias, animándome a perseverar en aquello que me proponga.



---

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>ABREVIATURAS</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	v
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>RESUMEN</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 La reutilización de efluentes depurados como parte de la planificación de los recursos hídricos.....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	9
<b>3 LA REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES DEPURADOS EN ESPAÑA</b> .....	11
3.1 La reutilización en España: caudales reutilizados, principales usos y tratamientos .....	11
3.2 Los distintos escenarios de la reutilización en España .....	19
3.3 Propuestas para el avance sostenible de la reutilización.....	26
<b>4 DESARROLLO DEL MARCO NORMATIVO</b> .....	33
4.1 Marco normativo para la reutilización directa de efluentes depurados.....	33
4.2 Criterios y estándares internacionales.....	37
4.3 Legislación española en materia de reutilización.....	41
4.3.1 El Real Decreto 1620/2007 sobre reutilización de aguas depuradas.....	41
4.3.2 Guía para la aplicación del Real Decreto 1620/2007 .....	49
4.3.3 El Plan Nacional de Reutilización de Aguas.....	52
4.4 Estudio y evaluación del R.D. 1620/2007.....	53
<b>5 LÍNEAS DE TRATAMIENTO APLICABLES EN FUNCIÓN DE LAS CALIDADES ESTABLECIDAS R.D.1620/2007 Y SUS COSTES ASOCIADOS</b> .....	57
5.1 Tecnologías de regeneración más implantadas en España.....	57
5.1.1 Descripción de las tecnologías: físico-químicos, filtraciones, membranas, desalación y desinfección.....	57
5.1.2 Costes de las distintas tecnologías de regeneración estudiadas .....	81
5.2 Líneas de tratamiento aplicables en función de las calidades por usos establecidas en el R.D 1620/2007.....	87
5.2.1 Calidades establecidas en el R.D. en función de los distintos usos.....	88
5.2.2 Tipos de líneas de tratamiento válidas para cumplir con las calidades establecidas en el R.D.....	90
5.2.3 Costes de implantación y explotación de los distintos tipos de líneas de tratamiento adoptadas. ....	92

---

<b>6</b>	<b>LOS MBR COMO TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN</b> .....	97
6.1	La evolución de los biorreactores de membrana en España .....	97
6.2	Descripción de la tecnología MBR.....	101
6.3	Sistemas de filtración mediante membrana.....	107
6.4	Operación y buenas prácticas en el diseño de los MBRs .....	152
6.4.1	Operación de los sistemas MBRs .....	152
6.4.2	Buenas prácticas de diseño en función de la experiencia acumulada.....	158
6.5	Costes de implantación y explotación de los MBRs frente a otros tratamientos de regeneración.....	162
6.5.1	Costes de implantación de los MBRs .....	162
6.5.2	Costes de explotación de los MBRs .....	166
6.5.3	Costes de implantación y explotación de los MBRs frente otros tratamientos de regeneración.....	171
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	177
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	181
<b>ANEXOS</b> .....		187
	Anexo I. Fichas-cuestionario para la realización de la Base de Datos de Reutilización.....	187
	Anexo II. Ejemplos de ficha para conocimiento de las líneas de tratamiento aplicables en función de las calidades establecidas en el R.D 1620/2007 .....	197
	Anexo III. Ficha-cuestionario sistemas comerciales de filtración por membrana.....	201
	Anexo IV. Ficha para el análisis de los costes de implantación y explotación de MBRs de nueva implantación .....	205
	<b>PRODUCCIÓN CIENTÍFICA</b> .....	211

- AAPP:** Administraciones Públicas
- ACA:** Agencia Catalana del Agua
- ACOSOL:** Abastecimiento de Aguas y Saneamiento de la Costa del Sol
- AEAS:** Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento
- APPCC:** Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico
- AP:** Aireación prolongada
- BDR:** Base de Datos de Reutilización
- C.E.:** Comunidad Europea
- CCAA:** Comunidades Autónomas
- CCB:** Consorcio Costa Brava
- CCHH:** Confederaciones Hidrográficas
- CE:** Conductividad eléctrica, expresada en  $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$
- CEDEX:** Centro de Estudios y Experimentación de obras públicas
- C<sub>m</sub>:** Carga másica, expresada en  $\text{kg DBO}_5\cdot\text{kg SSVLM}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$
- CYII:** Canal de Isabel II
- Da:** Daltons
- DBO<sub>5</sub>:** Demanda Bioquímica de Oxígeno, expresada en  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$
- DEMOWARE:** Innovation Demonstration for a Competitive and Innovative European Water Reuse
- DEREA:** Centro de investigación de Demostración en Reutilización de Aguas
- DGA:** Dirección General del Agua
- DMA:** Directiva Marco del Agua
- DPH:** Dominio Público Hidráulico
- DQO:** Demanda Química de Oxígeno, expresada en  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$
- E.coli:** Echerichia Coli
- EDAR:** Estación Depuradora de Aguas Residuales
- EDR:** Electrodialisis reversible
- EM:** Estados Miembros
- EPS:** Sustancias Poliméricas Extracelulares
- ERA:** Estación Regeneradora de Aguas Depuradas
- ESAMUR:** Entidad de Saneamiento de Aguas de Murcia
- F:** Flujo expresado en  $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  o LMH
- FAC:** Fango Activo Convencional
- F-Q:** Físico Químico
- F<sub>w</sub>:** Producción de fangos en exceso, expresado en  $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$

---

**ha:** hectárea

**h-e:** Habitante equivalente

**hm:** Hectómetro cúbico (equivalente a 1000 m<sup>3</sup>)

**K:** Permeabilidad de la membrana, expresada en L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.bar<sup>-1</sup>

**K:** Permeabilidad, en L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup>

**kWh:** kilowatio hora

**LDM:** límites de desviación máxima

**LMH:** Flujo de operación expresado en L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>

**MAGRAMA:** Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente

**MBR:** Biorreactor de Membrana

**MF:** Microfiltración

**MFH:** Membrana de Fibra Hueca

**MPP:** Membrana Placa Plana

**MT:** Membrana Tubular

**NCA:** Normas de Calidad Ambiental

**ND:** Nitrificación – Desnitrificación

**N<sub>T</sub>:** Nitrógeno total, expresado en mg. L<sup>-1</sup>

**OD:** Concentración de oxígeno disuelto, expresada en mg. L<sup>-1</sup>

**OI:** Ósmosis inversa

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**PE:** Polietileno

**PES:** Politietilsulfona

**PHC:** Planes Hidrológicos de Cuenca

**PLC:** Controlador lógico programable

**PNCA:** Plan Nacional de Calidad de las Aguas

**PNSD:** Plan Nacional de Saneamiento y Depuración

**PNRAD:** Plan Nacional de Reutilización de Aguas Depuradas

**PP:** Polipropileno

**Pt:** Fósforo total, expresado en mg. L<sup>-1</sup>

**PTM:** Presión transmembrana, expresadas en bar o kg.cm<sup>-2</sup>

**PVDF:** Polivinilideno fluoruro

**PVP:** Polivinil pirrolidona

**Q<sub>R</sub>:** Caudal de recirculación, expresado en m<sup>3</sup>. d<sup>-1</sup>

**Q<sub>W</sub>:** Caudal de purga, expresado en m<sup>3</sup>. d<sup>-1</sup> o m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

**R:** Resistencia de la membrana, expresada en m<sup>-1</sup>

**RAS:** Relación de Adsorción de Sodio

---

**RD:** Real Decreto

**Re:** recirculación externa

**Ri:** recirculación interna

**r.p.m.:** revoluciones por minuto

**SAD<sub>m</sub>:** Demanda específica de aireación de las membranas referida a la superficie de membranas, expresada en  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

**SAD<sub>p</sub>:** Demanda específica de aireación de las membranas referida al volumen de permeado, expresada en  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

**SBR:** Reactor Biológico Secuencial (Sequencing Batch Reactor)

**SDI:** Índice de ensuciamiento de la membrana (Silt Density Index)

**SS:** Concentración de sólidos en suspensión, expresada en  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  o  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

**SSLM:** Concentración de sólidos en suspensión en el licor mezcla, expresados en  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

**TRA:** Tratamiento de Regeneración Avanzado

**TRC:** Tratamiento de Regeneración Convencional

**TRH:** Tiempo de Retención Hidráulico, expresado en horas

**UE:** Unión Europea

**UF:** Ultrafiltración

**UFC:** Unidades Formadoras de Colonia

**UNT:** Unidades de Nefelométricas de Turbidez

**USEPA:** Agencia medioambiental estadounidense

**UV:** ultravioleta

**VMA:** Valor Máximo Admisible

**$\alpha$ :** Coeficiente de transferencia de oxígeno

**$\Theta_c$ :** Tiempo de residencia celular o edad del fango, expresada en días.

**$\mu$ :** Viscosidad, expresada en  $\text{Pa} \cdot \text{s}$  o  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

**$\mu\text{m}$ :** micras

**u:** unidades





---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1 Demandas hídricas en España, (Libro Blanco del Agua, 2000).....	2
Tabla 1.2 Extracciones de agua superficial y subterránea, (PHC, 2009-2015).....	3
Tabla 1.3 Estado del saneamiento y la depuración según las exigencias de la Directiva 91/271/CEE, (MAGRAMA, 2009).....	5
Tabla 3.1 Caudal de agua reutilizada en función de los usos, (Iglesias R., 2009).....	14
Tabla 3.2 Número y tipología de líneas de tratamientos de regeneración implantadas.....	17
Tabla 3.3 Oferta de agua en Canarias, $\text{hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , (www.gobiernodecanarias.org, 2015).....	22
Tabla 3.4 Comparación de criterios de calidad entre diferentes normativas.....	29
Tabla 4.1 Normativas y recomendaciones sobre condiciones de la reutilización establecidas en diferentes ámbitos de la administración española (Iglesias R., 2009).....	35
Tabla 4.2 Comparativa de criterios de calidad entre recomendaciones y.....	36
Tabla 4.3 Datos históricos y estándares de calidad del agua residual regenerada (adaptado de Paranychianakis et al., 2010 y modificado Iglesias R., 2015).....	36
Tabla 4.4 Comparación de criterios de calidad de algunas normativas.....	38
Tabla 4.5 Criterios de calidad para la reutilización de las aguas según usos (RD 1620/2007).....	44
Tabla 4.6 Frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro (RD 1620/2007).....	48
Tabla 4.7 Límites de Desviación Máxima permitidos (RD 1620/2007).....	48
Tabla 5.1 Rendimiento de las distintas tecnologías de regeneración.....	59
Tabla 5.2 Características de las distintas tecnologías de filtración y porcentaje de reducción de los parámetros establecidos en el RD 1620/2007.....	64
Tabla 5.3 Dosis de hipoclorito para diferentes tipos de agua residual.....	77
Tabla 5.4 Nivel de desinfección mediante radiación UV en función de la transmitancia.....	79
Tabla 5.5 Rendimiento de las distintas etapas de tratamiento.....	80
Tabla 5.6 Costes de implantación y explotación de la decantación lamelar.....	81
Tabla 5.7 Costes de implantación y explotación de la decantación lamelar lastrada con arena.....	82
Tabla 5.8 Costes de implantación y explotación unidades de filtración.....	82
Tabla 5.9 Costes de implantación de unidades de UF.....	83
Tabla 5.10 Costes de explotación de unidades de UF.....	83
Tabla 5.11 Costes de explotación de unidades de MF.....	83
Tabla 5.12 Costes de explotación de unidades EDR.....	84
Tabla 5.13 Costes de explotación de unidades OI.....	84
Tabla 5.14 Costes de implantación de unidades radiación UV.....	85
Tabla 5.15 Costes de explotación de unidades UV en función de la dosis.....	85
Tabla 5.16 Costes de explotación de unidades de hipoclorito.....	86
Tabla 5.17 Costes de implantación de unidades de ozono.....	86

Tabla 5.18 Clasificación de las unidades de tratamiento seleccionadas .....	88
Tabla 5.19 Grupos de calidad por límites microbiológicos establecidos en el R.D. 1620/2007 .....	89
Tabla 5.20 Tipos de tratamiento de regeneración, sin desalación, cumplimiento RD 1620/2007.....	90
Tabla 5.21 Tipos de tratamiento de regeneración, con desalación, cumplimiento RD 1620/2007 .....	91
Tabla 5.22 Costes de implantación y explotación de las unidades de tratamiento adoptadas.....	92
Tabla 5.23 Costes de implantación y explotación de cada tipo de tratamiento adoptado .....	93
Tabla 5.24 Porcentajes de recuperación de las distintas unidades de tratamiento.....	93
Tabla 6.1 Calidades del efluente tratado por MBR y FAC (Iglesias R., 2014).....	97
Tabla 6.2 Características de las configuraciones de membranas más empleadas en los MBR .....	106
Tabla 6.3 Clasificación de los sistemas comerciales seleccionados por tipo de membrana .....	107
Tabla 6.4 Resumen de las características generales del modelo ZeeWeed 500D .....	109
Tabla 6.5 Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del sistema ZeeWeed 500D .....	111
Tabla 6.6 Resumen de las características generales del modelo MemPulse™ .....	114
Tabla 6.7 Resumen de los principales parámetros de diseño y operación sistema MemPulse™ .....	115
Tabla 6.8 Resumen de las características generales del PSH 41 1800 PURON® .....	118
Tabla 6.9 Resumen de las principales características del diseño y operación del PSH 41 1800.....	120
Tabla 6.10. Resumen de las características generales del modelo RW400 .....	123
Tabla 6.11 Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del modelo RW400.....	125
Tabla 6.12 Características de las series de los modelos MEMBRAY™ .....	127
Tabla 6.13 Resumen de las características generales del modelo TMR 140-200D.....	128
Tabla 6.14 Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo TMR 140-200D .....	131
Tabla 6.15 Resumen de las características generales del modelo VRM 30/640 .....	134
Tabla 6.16 Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo VRM 30/640.....	134
Tabla 6.17 Resumen de las características generales del modelo BIO-CEL .....	137
Tabla 6.18 Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del modelo BIO-CEL.....	138
Tabla 6.19 Resumen de las características generales del modelo MFM300 .....	143
Tabla 6.20 Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del modelo MFM300 ....	144
Tabla 6.21 Resumen de las características generales del modelo Airlift Staggered 30.....	147
Tabla 6.22 Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo Airlift Staggered 30 .....	148
Tabla 6.23 Resumen de las características generales del modelo MEGABLOCK 636 .....	150
Tabla 6.24 Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo MEGABLOCK 636 .....	151
Tabla 6.25 Parámetros de diseño sistemas filtración según casas comerciales.....	151
Tabla 6.26 Ventajas e inconvenientes de las distintas configuraciones de membrana .....	152
Tabla 6.27 Parámetros de funcionamiento y diseño de MBR españoles .....	154
Tabla 6.28 Consumos energéticos de MBR españoles, 2011 .....	156
Tabla 6.29 Problemas detectados en MBR españoles, consecuencias y posibles soluciones .....	157

---

Tabla 6.30 Costes de implantación MBR construidos del 2007 al 2011 .....	163
Tabla 6.31 Costes de implantación de ampliaciones de EDAR con MBR construidos 2003- 2007 ....	165
Tabla 6.32 Costes de implantación MBR duales construidos en el 2011.....	166
Tabla 6.33 Información recopilada sobre costes de explotación.....	166
Tabla 6.34 Costes de explotación de plantas MBR .....	167
Tabla 6.35 Costes energéticos de plantas MBR .....	169
Tabla 6.36 Costes de reactivos de plantas MBR .....	170
Tabla 6.37 Costes de implantación de MBR.....	171
Tabla 6.38 Costes de explotación en $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ de MBR, AP-ND con TRC y TRA .....	172
Tabla 6.39 Demanda energética de diferentes tipos de EDARs.....	173
Tabla 6.40 Costes de implantación de tratamientos de regeneración convencional.....	174
Tabla 6.41 Costes de implantación de aireaciones prolongadas .....	175
Tabla 6.42 Costes de implantación en $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$ de una AP-TRC, AP-TRA y MBR.....	175
Tabla 6.43 Costes de explotación de una aireación prolongada .....	176
Tabla 6.44 Costes de explotación en $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ de AP-TRC, AP-TRA y MBR.....	176



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 3.1 Esquema lógico de relaciones de la Base de Datos de Reutilización, (Quintas L., 2009).....	13
Figura 3.2 Caudal reutilizado por demarcaciones hidrográficas, $\text{hm}^3.\text{año}^{-1}$ , (BDR, 2009).....	15
Figura 3.3 Ubicación geográfica de actuaciones de reutilización en España, (BDR, 2009).....	15
Figura 3.4 Porcentajes de caudal reutilizado por CCAA, (BDR, 2009).....	16
Figura 4.1 Reducción de patógenos con diferentes medidas de protección, (OMS, 2006).....	37
Figura 4.2 Orden de preferencia en la solicitud y permiso requerido, (MAGRAMA, 2010).....	50
Figura 4.3 Distribución de responsabilidades en la calidad y en la inspección, (MAGRAMA, 2010).....	51
Figura 4.4 Distancias mínimas de la red de reutilización, respecto las redes de agua potable y saneamiento, (MAGRAMA, 2010).....	51
Figura 5.1 Tratamiento de regeneración mediante físico-químico, decantación lamelar, filtración sobre arena y desinfección por hipoclorito, Vitoria (Iglesias, R.).....	58
Figura 5.2 Esquema de funcionamiento de proceso físico-químico con decantación lamelar.....	61
Figura 5.3 Esquema de funcionamiento del Sistema Densadeg®.....	61
Figura 5.4 Esquema de funcionamiento del Sistema Actiflo®.....	62
Figura 5.5 Filtro convencional, monocapa y de flujo descendente (Iglesias, R.).....	65
Figura 5.6 Filtros de arena a presión (Iglesias, R.).....	65
Figura 5.7 Filtros de anillas. Dcha.) Ranuras de la anilla Izda.) Anilla y Elemento filtrante.....	66
Figura 5.8 Filtros de lecho pulsante en funcionamiento (Iglesias, R.).....	66
Figura 5.9 Esquema de funcionamiento de un filtro de puente móvil (Iglesias, R.).....	67
Figura 5.10 Filtros de doble etapa de arena Dualsand (Iglesias, R.).....	68
Figura 5.11 Esquema de un filtro de arena Dynasand®, (Iglesias, R.).....	68
Figura 5.12 Dcha) Interior de uno de los discos que componen el filtro textil. Izda) Disposición de los discos dentro de la línea de tratamiento (Batanero, G.).....	69
Figura 5.13 Ejemplos de reacondicionamiento a filtración mediante medio textil (Batanero, G.).....	69
Figura 5.14 Esquema de funcionamiento del Filtro Hydrotech®.....	70
Figura 5.15 Separación de los distintos procesos de filtración por membrana (AEAS, 2006).....	71
Figura 5.16 Esquema general de un proceso de filtración con una membrana (AEAS, 2006).....	71
Figura 5.17 Microfiltración tubular en Canarias (Iglesias, R.).....	72
Figura 5.18 Esquema de microfiltración con membrana plana.....	73
Figura 5.19 Dcha) Bastidor de membranas de fibra hueca de ultrafiltración a depresión Izda) Bastidor de membranas tubulares a presión (Iglesias, R.).....	73
Figura 5.20 Esquema de funcionamiento de la electrodiálisis reversible (Iglesias R.).....	75
Figura 5.21 Ósmosis Inversa instalado, Gran Canaria (Iglesias R.).....	75
Figura 5.22 Laberinto de cloración de un tratamiento de desinfección (Iglesias R.).....	78
Figura 5.23 Diferentes disposiciones y lámparas de radiación ultravioleta (Iglesias R.).....	79

Figura 5.24 Generador de ozono (Iglesias R.) .....	80
Figura 6.1 Evolución de los MBR en España: nº de plantas y capacidad instalada, (Iglesias R., 2015)..	98
Figura 6.2 Capacidad y nº de instalaciones de MBR por casas comerciales, (Iglesias R., 2015).....	98
Figura 6.3 Porcentajes sobre el total del volumen tratado por MBR por usos, (Iglesias R., 2015) .....	99
Figura 6.4 Configuraciones más frecuentes de biorreactores de membrana: a) externo b) sumergido integrado, c) sumergido no integrado, (Iglesias R.) .....	102
Figura 6.5 Diagrama de flujo de un proceso MBR con N-D. (Iglesias R.) .....	103
Figura 6.6 Ejemplos de configuraciones y módulos de membrana. De izquierda a derecha: Placa plana, fibra hueca (sumergidas) y tubular (externa). .....	105
Figura 6.7 Membranas de fibra hueca que componen el módulo ZeeWeed 500. ....	108
Figura 6.8 Izquierda: módulo. Derecha: bastidor del ZeeWeed 500D.....	108
Figura 6.9 Izquierda: Tanque de membranas con un bastidor extraído. Derecha: Tanque de membranas con conexiones de permeado y aire de limpieza. ....	109
Figura 6.10 Esquema del sistema Zenon .....	110
Figura 6.11 Sistema de aireación del sistema Zenon.....	112
Figura 6.12 Tubería de la parrilla de aireación del sistema Zenon .....	112
Figura 6.13 Fibras huecas GEN2 que componen el módulo MemPulse™ .....	113
Figura 6.14 Izquierda: módulo. Derecha: bastidor del B40N.....	113
Figura 6.15. Izquierda: Tanque de membranas con bastidores. Derecha: Detalle de conexiones de permeado y aire de limpieza .....	114
Figura 6.16 Esquema del sistema de membranas Siemens.....	115
Figura 6.17. Sistema de aireación MemPulse™. Izquierda: conexiones de permeado y aire. Centro: Parte inferior del módulo – acumulador de aire. Derecha: burbuja ascendiendo por las fibras .....	116
Figura 6.18 Fibras huecas PSH que componen el módulo del sistema PURON® .....	117
Figura 6.19 Módulo PSH del sistema PURON® y elemento filtrante que lo compone .....	117
Figura 6.20 Bastidores de módulos PSH de PURON®.....	117
Figura 6.21 Tanque de membranas con bastidores PSH de PURON. ....	118
Figura 6.22 Esquema general de funcionamiento del sistema PURON® .....	119
Figura 6.23 Izq: Esquemas de distribución de bastidores; Dcha: entrada del licor mezcla .....	119
Figura 6.24 Sistema de aireación central del sistema PURON® .....	120
Figura 6.25 Izquierda: Paquete de membranas SP400. Derecha: bastidor SP 400.....	122
Figura 6.26 Izquierda: módulo tipo 510. Derecha: bastidor RW 400 .....	122
Figura 6.27 Izquierda: módulo tipo 515. Derecha: bastidor RW400. ....	123
Figura 6.28 Tanque de membranas con membranas RW400 Kubota. ....	124
Figura 6.29 Sistema de membranas Kubota con eliminación de nutrientes .....	124
Figura 6.30 Esquema de instalación de membranas Kubota.....	125
Figura 6.31 Tipos de filtración membranas Kubota: succión y gravedad. ....	126
Figura 6.32 Limpieza de difusores sistema Kubota.....	127

Figura 6.33 Izquierda: módulo. Derecha: bastidor del TMR 140-200D.....	128
Figura 6.34. Bastidor TMR140-200D. Izq: Sistema integrado. Dcha: Sistema no integrado.....	129
Figura 6.35 Esquema funcionamiento del sistema Toray .....	129
Figura 6.36 Módulo y bastidor del modelo VRM del sistema Huber .....	132
Figura 6.37 Ubicación respecto al reactor biológico del sistema Huber VRM.....	132
Figura 6.38 Esquema del sistema Huber VRM .....	133
Figura 6.39 Membranas de placa plana que componen los módulos BIO-CEL® .....	135
Figura 6.40 Izquierda: Módulo de membranas C25. Derecha: Detalle de la colocación de las láminas de membrana en el módulo.....	136
Figura 6.41 Esquema de bastidores BIO-CEL®. De izquierda a derecha: Modelos BC50F-C25-UP150, BC100F-C25-UP150 y BC400F-C100-UP150.....	136
Figura 6.42 Esquema de membranas suspendidas en configuración integrada.....	136
Figura 6.43 Esquema de membranas apoyadas en configuración no integrada.....	137
Figura 6.44 Tanque de membranas con conexiones de permeado y aire de limpieza.....	137
Figura 6.45 Esquema del sistema MBR con membranas BIO-CEL®.....	138
Figura 6.46 Izq: Esquema del sistema de aireación. Dcha: Tubos difusores, BIO-CEL .....	139
Figura 6.47 Esquema del funcionamiento de la limpieza mecánica de las membranas, BIO-CEL.....	140
Figura 6.48 Módulo Hollow-Sheet® y bastidores modelos MFM300, MFM200 y MFM100.....	141
Figura 6.49 Esquema funcionamiento configuración no integrada Alfa-Laval .....	142
Figura 6.50 Esquema configuración integrada sistema Alfa-Laval.....	142
Figura 6.51 Tanque de membranas con conexiones de permeado y aire de limpieza, Alfa-Laval .....	143
Figura 6.52 Detalle de la distribución del aire entre los módulos, Alfa-Laval.....	144
Figura 6.53 Esquema de la limpieza de mantenimiento, Alfa-Laval .....	145
Figura 6.54 Módulo de membranas tubulares Airlift.....	146
Figura 6.55 Instalación MBR con bastidor AirLift straggered 30.....	146
Figura 6.56 Esquema del sistema Norit AirLift.....	147
Figura 6.57 Módulo de fibra hueca del modelo Megablock 636 .....	149
Figura 6.58 Bastidor Megablock 636.....	150
Figura 6.59 Influencia de los MLSS en el factor alfa, (www.onlinembr.info).....	153
Figura 6.60 Influencia de los MLSS en la permeabilidad de las membranas (ESAMUR, 2011).....	153
Figura 6.61 Tamiz rotativo de 1mm de paso.....	155
Figura 6.62 Puntos de control del proceso de filtración de un MBR (Ferrero et al, 2012). .....	155
Figura 6.63 Rotura de MFH en bastidores Zenon, (ACA) .....	158
Figura 6.64 Vista general de la EDAR de San Pedro del Pinatar, (ESAMUR) .....	159
Figura 6.65 Tanque de laminación de La Bisbal, (ACA) .....	160
Figura 6.66 Biorreactor con membranas planas (Iglesias R.).....	161
Figura 6.67 Costes de implantación de MBR entre 1.000-20.000 m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> .....	163

---

Figura 6.68 Costes de implantación de MBR entre 2.000-140.000 h-e .....	164
Figura 6.69 Costes de explotación en $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ en función del caudal tratado.....	168
Figura 6.70 Costes de eliminación de $\text{DBO}_5$ en función de la carga tratada en h-e.....	168
Figura 6.71 Distribución porcentual de los costes de explotación de un MBR.....	170
Figura 6.72 Costes de implantación en $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$ de MBR, AP-TRA y AP-TRC.....	172
Figura 6.73. Costes de explotación en $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ de MBR, AP-TRC y AP-TRA.....	173



La reutilización de efluentes depurados siempre ha sido una opción en lugares con déficit coyuntural o estructural de recursos hídricos, se haya o no procedido a la regulación y planificación de esta práctica. La necesidad se crea a partir de las demandas de una zona, normalmente riego agrícola, que ven un mejor desarrollo de su actividad por contar con este recurso. España es el país de la UE que más caudal reutiliza, y está dentro de los diez primeros a nivel mundial. La regulación de esta práctica por el RD 1620/2007, ayudó a incorporar la reutilización de efluentes depurados a la planificación hidrológica como parte de los programas de medidas, con objeto de mitigar presiones, como son las extracciones de agua superficial y subterránea, o mejoras medioambientales evitando un vertido.

El objeto de este trabajo es conocer la situación de la reutilización de efluentes depurados en España, los diferentes escenarios y planteamientos de esta actividad, el desarrollo del marco normativo y su aplicabilidad, junto a los tratamientos que permiten alcanzar los límites de calidad establecidos en la normativa vigente, en función de los distintos usos. Además, se aporta un análisis de costes de las distintas unidades de tratamiento y tipologías de líneas de regeneración, tanto de las utilizadas después de un tratamiento secundario como de otras opciones de depuración, como son los biorreactores de membrana (MBRs).

Para el desarrollo de estos objetivos, en primer lugar, se aborda el conocimiento de la situación de la reutilización en España a través de una base de datos diseñada para cubrir todos los aspectos de esta actividad: datos de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR), de la estación regeneradora (ERA), caudales depurados, reutilizados, volúmenes utilizados y ubicación de los distintos usos, tipos de líneas de tratamiento, calidades del agua reutilizada, etc. Las principales fuentes de información son las Confederaciones Hidrográficas (CCHH) a través de las concesiones de uso del agua depurada, las entidades de saneamiento y depuración de las distintas comunidades autónomas (CCAA), ayuntamientos, Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) y visitas a las zonas más emblemáticas. Además, se revisan planes y programas con el fin de realizar una retrospectiva de cómo se ha ido consolidando y desarrollando esta práctica en las distintas zonas de la geografía española.

Se han inventariado 322 sistemas de reutilización y 216 tratamientos de regeneración siendo el más extendido la filtración mediante filtro arena seguido de una desinfección mediante hipoclorito, aunque este tratamiento se ha ido sustituyendo por un físico-químico con decantación lamelar, filtro de arena y radiación ultravioleta, tratamiento de regeneración convencional (TRC), y otros tratamientos que pueden incluir membranas, tratamientos de regeneración avanzados (TRA), con dosificación de hipoclorito como desinfección residual, para adaptarse al actual marco normativo. El uso más extendido es el agrícola con el 70% del caudal total reutilizado, estimado en 408 hm<sup>3</sup>, aunque la capacidad de los tratamientos de regeneración esperada para 2015, tras el Plan Nacional de Reutilización de Aguas (PNRA), es tres veces superior.

Respecto al desarrollo normativo, en las zonas donde la reutilización ha sido pionera, las administraciones competentes han ido desarrollando diferentes recomendaciones de calidad y manejo de este tipo de agua. El uso agrícola, y en zonas turísticas, el riego de campos de golf, fueron los dos primeros usos que tuvieron algún tipo de recomendación incluso reglamentación. Esta situación inicial, sin una normativa a nivel estatal ni recomendaciones europeas, creó cierta incertidumbre en el avance de la reutilización tanto a nivel de concesiones como de planificación.

En la actualidad sigue sin existir una normativa internacional para la reutilización y regeneración de efluentes depurados. Las recomendaciones de referencia a nivel mundial, y en concreto para el uso agrícola, son las de la OMS (Organización Mundial de la Salud) publicadas 1989, con sus posteriores revisiones y ampliaciones (OMS, 2006). Esta norma combina tratamientos básicos de depuración y

---

unas buenas prácticas basadas en diferentes niveles de protección para evitar problemas sanitarios. Otra normativa que ha sido referencia en el desarrollo del marco normativo en países donde se realiza esta práctica, son las recomendaciones dadas por la Agencia Medioambiente Estadunidense (USEPA, 2012) o las publicadas por el Estado de California (Título 22, 2001). Estas normas establecen unos indicadores y valores máximos dónde el tratamiento de regeneración es el responsable de la calidad final en función del uso.

Durante 2015, la ISO trabajaba en un documento para el uso urbano donde se muestra tanto los posibles parámetros que habría que controlar como la manera de actuar para evitar posibles riesgos. Por otro lado, la Comisión Europea (CE) viene impulsando desde el 2014 la reutilización de aguas depuradas dentro del marco de la Estrategia Común de Implantación de la Directiva Marco del Agua, y fundamentalmente a través del grupo de trabajo de “Programas de medidas”. Para el desarrollo de esta iniciativa se está planteando sacar para 2016 una guía de recomendaciones que podría venir a completar el marco normativo de los distintos Estados Miembros (EM).

El Real Decreto 1620/2007, donde se establece el marco jurídico de la reutilización de efluentes depurados, tiende más a la filosofía implantada por la USEPA, aunque la UE parece más partidaria de una gestión del riesgo, donde se establecen unos niveles de tolerancia y unos puntos de control en función de las condiciones socioeconómicas de los distintos Estados, sin entrar a concretar indicadores, valores máximos o tratamientos. Sin embargo, en la normativa estadounidense se indican una serie de tratamientos de regeneración, mientras que, en la española, se hacen recomendaciones a este respecto en una Guía sin validez legal. Por tanto, queda sin regular los procesos para alcanzar estos estándares de calidad, pudiendo ser éstos no apropiados para esta práctica. Es el caso de la desinfección donde el uso de hipoclorito puede generar subproductos indeseables.

En la Guía de recomendaciones para la aplicación del RD, publicada por el Ministerio de Agricultura y Medioambiente (MAGRAMA) en 2010, se aclaran cuestiones frecuentes sobre la aplicación del RD, prescripciones técnicas básicas para los sistemas de reutilización, y buenas prácticas en función del uso. Aun así, el RD sigue teniendo deficiencias en su aplicación siendo necesaria una revisión de la misma, como en las frecuencias de muestreo incluso la omisión de algunos parámetros como huevos de nematodos que se ha demostrado ser inexistentes tras un tratamiento de regeneración convencional. En este sentido, existe una tendencia a nivel mundial a reutilizar las aguas con fines de abastecimiento, incluir indicadores de presencia de virus o protozoos, o incluir ciertas tecnologías como las membranas u oxidaciones avanzadas para afrontar temas como los contaminantes emergentes.

Otro de los objetivos de este trabajo es el estudio de tipologías de tratamiento en función de los usos establecidos en el RD 1620/2007 y sus costes asociados, siendo base de lo establecido a este respecto en la Guía y PNRA anteriormente indicados. Las tipologías de tratamiento propuestas se dividen en líneas con capacidad de desalar y las que no cuentan con una unidad de desalación de aguas salobres de ósmosis inversa o electrodiálisis reversible. Se realiza esta división al tener actuaciones en zonas costeras donde el agua de mar entra en los colectores, adquiriendo el agua residual un contenido en sales que es limitante en algunos usos. Para desarrollar este objetivo se han estudiado las unidades de tratamiento más implantadas en ERAs españolas en cuanto a fiabilidad para conseguir determinada calidad y coste, tanto de implantación como de explotación. El TRC, tiene un coste de implantación de 28 a 48 €.m<sup>-3</sup>.d y de explotación de 0,06 a 0,09 €. m<sup>-3</sup>, mientras que, si se precisara desalar, este coste se multiplica por diez en la implantación y por cinco en la explotación. En caso de los usos que requieren de TRA, como los domiciliarios o algunos industriales, los costes serían de 185 a 398 €.m<sup>-3</sup>.d en implantación y de 0,14 a 0,20 €.m<sup>-3</sup> en explotación.

En la selección de tecnologías de regeneración, la capacidad del tratamiento en relación al coste es un indicador fundamental. Este trabajo aporta curvas de tendencia coste-capacidad que sirven de

---

herramienta de selección frente a otros tratamientos de regeneración de reciente implantación como son los MBR, u otros como la desalación de agua de mar o los trasvases entre cuencas dentro de la planificación hidrológica.

En España, el aumento de las necesidades de agua de alta calidad en zonas con recursos escasos, aumento de zonas sensibles como puntos de captación para potables, zonas de baño o zonas de producción piscícola, y en ocasiones, el escaso terreno disponible para la implantación de nuevas plantas depuradoras (EDARs), han convertido a los MBRs, en una opción dentro del marco de la reutilización de aguas depuradas. En este trabajo, se estudia esta tecnología frente a los TRC y TRA, aportando igualmente curvas de tendencia coste-capacidad, e identificando cuando esta opción tecnológica puede ser más competitiva frente a los otros tratamientos de regeneración.

Un MBR es un tratamiento de depuración de fangos activos donde el decantador secundario es sustituido por un sistema de membranas de UF o MF. La calidad del efluente, por tanto, es la misma que el de una EDAR seguida de un TRA. Los MBRs aseguran una calidad del efluente para todos los usos establecidos en el RD, incluso dan un efluente que permite ser directamente tratado por las unidades de desalación de OI o EDR.

La implantación de esta tecnología en España ha tenido un crecimiento exponencial, pasando de 13 instalaciones de menos de  $5.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  en el 2006, a más de 55 instalaciones en operación o construcción a finales del 2014, seis de ellas con capacidades por encima de los  $15.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

Los sistemas de filtración en los MBR son los que marcan la operación y diseño de este tipo de instalaciones. El sistema más implantado en España es de membrana de fibra hueca (MFH), sobre todo para instalaciones de gran capacidad, destacando Zenon que cuenta con el 57% de la capacidad total instalada. La segunda casa comercial con mayor número de plantas es Kubota, con membranas de configuración placa plana (MPP), que cuenta con el 30 % de la capacidad total instalada. Existen otras casas comerciales implantadas en MBR españoles como son Toray, Huber, Koch o Microdym. En este documento se realiza la descripción de los sistemas de filtración de todas estas casas comerciales, aportando información de sus características, parámetros de diseño y operación más relevantes.

El estudio de 14 MBRs ha posibilitado realizar otro de los objetivos de este trabajo, la estimación de los costes de explotación e implantación de este tipo de sistemas frente a otras alternativas de tratamiento de regeneración. En este estudio han participado activamente ACA y ESAMUR, entidades públicas de saneamiento y depuración de Cataluña y Murcia respectivamente, que cuentan con una amplia experiencia en la explotación de este tipo de sistemas. Este documento expone los problemas de operación encontrados y sus posibles soluciones, tanto en la explotación como en los futuros diseños de este tipo de plantas.

El trabajo concluye que los MBRs son una opción más para la reutilización de efluentes depurados, siendo ventajosos en costes, tanto de implantación como de explotación, respecto a EDARs seguidas de TRA en capacidades por encima de los  $10.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .



The reuse of treated effluent has always been an option in places where a situational or structural water deficit exists, whether regulatory and/or planning efforts are completed or not. The need arises from the demand of a sector, commonly agricultural irrigation, which benefits of this new resource. Within the EU, Spain is ahead in the annual volume of reclaimed water, and is among the top ten countries at a global scale. The regulation of this practice through the Royal Decree 1620/2007 has helped to incorporate the water reuse to the hydrological plans as a part of the programme of measures to mitigate pressures such as surface or ground water extraction, or environmental improvements preventing discharges.

The object of this study is to gain an overview of the state of the water reuse in Spain, the different scenarios and approaches to this activity, the development of the legal framework and its enforceability, together with the treatments that achieve the quality levels according to the current law, broken down by applications. Additionally, a cost analysis of technologies and regeneration treatment lines for water reclamation is performed, whereas the regeneration treatment is located after a wastewater treatment or other options such as membrane bioreactors (MBR).

To develop the abovementioned objectives, the state of water reuse in Spain is studied by means of a database designed to encompass all aspects of the activity: data from the wastewater treatment plants (WWTP), from the water reclamation plants (WRP), the use of reclaimed water, treated water and reclaimed water annual volumes and qualities, facilities and applications, geographic references, technologies, regeneration treatment lines, etc. The main data providers are the River Basin authorities, through the concession or authorization for water reuse, (sanitary and wastewater treatment managers from the territorial governments, local governments, Hydrological Plans of the River Basins and field visits to the main water reuse systems. Additionally, a review of different plans and programmes on wastewater treatment or water reuse is done, aiming to put the development and consolidation process of this activity in the different regions of Spain in perspective.

An inventory of 322 reuse systems and 216 regeneration treatments has been gathered on the database, where the most extended regeneration treatment line was sand filtration followed by hypochlorite disinfection, even though recently it is being replaced by physical–chemical treatment with a lamella settling system, depth sand filtration, and a disinfection with ultraviolet radiation and hypochlorite as residual disinfectant, named conventional regeneration treatment (CRT), and another treatment that may include a membrane process, named advanced regeneration treatment (ART), to adapt to legal requirements. Agricultural use is the most extended, accumulating 70% of the reclaimed demand, estimated at 408 hm<sup>3</sup>, even though the expected total capacity of WRPs for 2015, after the implementation of the National Water Reuse Plan (NWRP) is three times higher.

According to the development of the water reuse legal framework, there were pioneer areas where competent authorities developed different quality and use recommendations for this new resource. Agricultural use and golf course irrigation in touristic areas were the first two uses with recommendations and even legislation. The initial lack of common legislation for water reuse at a national or European level created some doubts which affected the implementation of water reuse, both from a planning and a licensing point of view.

Currently there is still a lack of common international legislation regarding water reuse, technologies and applications. Regarding agricultural use, the model recommendations at a global scale are those set by the World Health Organization published in 1989, and subsequent reviews and extensions about risk prevention (WHO, 2006). These documents combine wastewater treatments with basic regeneration treatments reinforced by good practices based on different levels of protection to avoid

---

deleterious health effects. Another relevant legal reference for this practices has been the Environmental Protection Agency of the US (USEPA, 2012), or those published by the State of California (Title 22, 2001). These establish indicator targets and maximum thresholds where regeneration treatment lines are responsible for the final quality according to the different uses.

During 2015, the ISO has worked on a document aimed at urban use, where the possible parameters to be monitored together with risk prevention have been studied. On the other hand, the European Commission has been promoting the reuse of treated effluents within the Common Implementation Strategy of the Water Framework Directive, mainly through the work of the Programme of Measures Working Group. Within this context, the publication of a recommendation guide during 2016 is intended, as a useful tool to fill in the legal gaps of different Member States on the matter.

The Royal Decree 1620/2007, where the water reuse regulation is set, resembles the principles of the USEPA more closely, even though the EU shows a tendency to prioritize risk assessment by establishing tolerance levels and thresholds according to socioeconomic conditions of the different countries, without going into details of indicators, maximum thresholds or treatments. In contrast, in the US law, regeneration treatments are indicated, while in the Spanish legislation, the only recommendations to this respect are compiled in a non-compulsory guide. Therefore, there is no regulation on the different treatment lines used to achieve the required quality standards, giving room for inappropriate practices in this respect. This is the case of disinfection, where the use of hypochlorite may produce harmful byproducts.

In the recommendation Guide for the application of the Royal Decree (RD), published by the Ministry of Agriculture and Environment (MAGRAMA) in 2010, clarifications of typical issues that may arise from the application of the RD are given, as well as basic technical parameters to consider in reuse setups, or good practices according to final use. Even so, the RD still presents difficulties in its application and requires a review on issues such as the sampling frequency of current quality parameters or even the omission of nematode eggs indicator, which have been shown to be absent after CRT. In this regard, there is a global tendency to employ water reuse for drinking water, including indicators for the presence of viruses and protozoans, or to include certain technologies such as membranes or advanced oxidation processes to tackle problems like emerging pollutants.

Another of the objectives of this study is to provide different regeneration treatment lines to meet the quality requirements established in the RD 1620/2007 broken down by applications, and to estimate establishment and operational costs. This proposal has been based on what is established in the above mentioned Guide and NWRP. The proposed treatment typologies are divided in treatment trains with desalination, like reverse osmosis or reversible electrodialysis, and those that lack this treatment for brackish water. This separation is done due to coastal facilities, where sea water may permeate the collecting pipes, rising salt contents in the wastewater, hence limiting certain uses. To develop this objective a study of the most common treatment units set up in Spanish WRPs is conducted in terms of treatment train reliability to obtain an acceptable relationship between the required quality and the capital and operational costs. The CRT has an establishment cost of 28 to 48  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  and an operation cost of 0.06 to 0.09  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ , while, if desalination was required, these costs would increase tenfold for implementation and fivefold for operation. In the cases of uses that require ART, such as residential or certain industrial uses, the costs would be of 185 to 398  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  for implementation and of 0.14 to 0.20  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$  for operation.

When selecting regeneration treatment lines, the relation between treatment capacity and cost is a paramount indicator. This project provides cost-capacity models for regeneration treatment trains. These may serve as a tool when selecting between different options to fulfill water demands with MBR facilities, or others such as sea water desalination plants or inter-basin water transfer into a water planning framework.

---

In Spain, the requirement for high quality water in areas with low resource availability, the increasing number of sensitive zones, such as drinking water extraction, recreational bathing areas, fish protected areas and the lack of available land to set up new WWTPs, have turned MBRs into a suitable option for water reuse. In this work this technology is analyzed in contrast to CRT and ART, providing cost-capacity models, and identifying when and where this treatment option may outcompete other regeneration treatments.

An MBR is an activated sludge treatment where the secondary settling is substituted by a membrane system of UF or MF. The quality of the effluent is, therefore, comparable to that of a WWTP followed by an ART. MBRs ensure a sufficient quality level for the requirements of the different uses established in the RD, even producing an effluent that can be directly treated in OI or EDR processes. The implementation of this technology in Spain has grown exponentially, growing from 13 facilities with less than  $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  in 2006 to above 55 facilities operating by the end of 2014, 6 of them with capacities over  $15000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

The membrane filtration systems for MBR are the ones that set the pace of operation and design of this type of facilities. The most widespread system in Spain is the hollow fiber membrane configuration, especially on high flow capacities, being Zenon commercial technology, which mounts up to 57% of the total installed capacity, the main contributor. The next commercial technology according to plant number is Kubota, which uses flat sheet membrane configuration, which mounts up to 30% of the total installed capacity. Other commercial technologies exist within the Spanish MBR context, such as Toray, Huber, Koch or Microdym. In this document an analysis of all of these membrane filtration systems is done, providing information about their characteristics and relevant design and operation parameters.

The study of 14 full scale running MBRs has enabled to pursue another of the objectives of this work: the estimation of the implementation and operation costs of this type of systems in contrast to other regeneration alternatives. Active participation of ACA and ESAMUR, public wastewater treatment and reuse entities of Cataluña and Murcia respectively, has helped attaining this objective. A number of typical operative problems and their possible solutions are discussed, both for operation and plant design purposes.

The conclusion of this study is that MBRs are another option to consider for water reuse, being advantageous in terms of both implementation and operational costs, when compared with WWTPs followed by ART, when considering flow capacities above  $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .





---

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 La reutilización de efluentes depurados como parte de la planificación de los recursos hídricos

La reutilización de las aguas residuales es un componente intrínseco del ciclo natural del agua, ya que, mediante el vertido de estos efluentes a los cursos de agua y su dilución con el caudal circulante, han venido siendo reutilizadas tradicionalmente en puntos aguas abajo, para su aprovechamiento en diferentes usos como el agrícola, urbano o industrial. Es preciso distinguir entre reutilización indirecta, que es la mencionada y la más común, y la reutilización directa, que es aquella en la cual se realiza un segundo uso a continuación del primero, sin que entre ambos el agua se incorpore al dominio público hidráulico.

La reutilización directa o planificada tiene un origen más reciente y supone el aprovechamiento directo de efluentes depurados, con un mayor o menor grado de tratamiento previo, mediante su transporte hasta el punto de utilización a través de una conducción específica. El proceso de tratamiento necesario para adecuar la calidad al uso de destino se denomina generalmente “regeneración” y el resultado de este proceso “aguas regeneradas”.

En lo que se refiere a los recursos hídricos en España, las estimaciones establecidas en el Libro Blanco del Agua (2000), cifran los recursos totales renovables (superficiales más subterráneos en régimen natural) en 111.000 hm<sup>3</sup> por año, de los cuales el 74% proceden de escorrentías superficiales y el 26% son subterráneos. Un rasgo fundamental es la gran irregularidad y diversidad hidrológica existente, siendo muy variable la precipitación en función de las zonas de que se trate. Otros factores tales como los distintos tipos de suelo, la vegetación, la evapotranspiración y la naturaleza de los acuíferos, hacen que la respuesta frente a fenómenos pluviométricos, sea completamente diferente.

Debido a esto, en España, se han ido realizando infraestructuras que han aumentado el recurso disponible. En la actualidad, hay más de un millar de presas con una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 56.000 hm<sup>3</sup> siendo 300 de ellas las que almacenan el 98% del total, y se estima en más de un millón, el número de pozos y captaciones subterráneas existentes, con más de 5.000 km de conducciones de abastecimiento y más de 10.000 Km en conducciones de riego.

Las demandas hídricas recogidas en los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) dan un valor global de la demanda anual estimado en aproximadamente 35.300 hm<sup>3</sup> por año. En la Tabla 1.1 se presenta el desglose de estas demandas entre los principales usos. Estos valores son máximos teniendo datos más concretos de la demanda en el uso agrícola recogida por entidades como el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2008) o el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente (MAGRAMA, 2014) donde se muestra un incremento continuo de la superficie regada en España, que pasa de 3,3x10<sup>6</sup> hectáreas en 2002 a 3,6x10<sup>6</sup> hectáreas en 2014 mientras que el uso del agua en el sector agrario desciende de 17.681 hectómetros cúbicos en 1999 a 15.833 en 2012.

Una vez definidos tanto los recursos como las demandas anteriormente indicadas y se realizan balances hídricos temporales, refiriendo éstos a los sistemas de explotación existentes en la actualidad, se presentan amplias zonas en las cuales bien de forma coyuntural o permanente hay déficit de recursos hídricos.

Las zonas de déficit permanente se concentran en el litoral mediterráneo y en los archipiélagos canario y balear, y es por tanto en estas áreas, donde existen más proyectos realizados y más expectativas de reutilización. Además, el déficit hídrico ha aumentado como consecuencia del fuerte

desarrollo turístico y agrícola, y la imposibilidad de obtener recursos convencionales debido al deterioro del medio hídrico y a la dificultad para realizar nuevas obras civiles de captación del recurso.

La capacidad y reserva de los embalses es limitada, 55.586 hm<sup>3</sup> y 37.167 hm<sup>3</sup> anuales respectivamente en 2010, y la sobreexplotación de acuíferos para atender la demanda es un problema a resolver al afectar directamente a la conservación del medioambiente y en un futuro próximo, a la actividad económica de ciertas zonas.

Otro factor a tener en cuenta es el efecto del cambio climático, donde se estima que para 2027, habrá entre el 2 y el 11 % menos de aportaciones en las cuencas españolas según el Plan Nacional de Reutilización de Aguas (PNRA), (MAGRAMA, 2009).

**Tabla 1.1** Demandas hídricas en España, (Libro Blanco del Agua, 2000)

Usos	Demanda anual (hm <sup>3</sup> .año <sup>-1</sup> )	Porcentaje %	Porcentaje consumido, %	Vertido (hm <sup>3</sup> .año <sup>-1</sup> )
Urbana	4.667	13,2	20	3.733,6
Industrial	1.647	4,6	30	1.152,9
Regadío	24.094	68,2	80	4.818,8
Refrigeración	4.915	14,0	0	4.915,0
Total	35.323	100,0	58	14.620,3

Dentro de las posibilidades de disponibilidad de los recursos hídricos, se considera la reutilización como un recurso no convencional que puede incrementar los usos del agua ya utilizada y en el caso de los vertidos de depuradoras directos al mar, aumentaría no solo la cantidad de usos sino también el volumen de los recursos hídricos disponibles en la zona. La mejora de la calidad de los efluentes es el elemento clave en la disponibilidad y gestión del agua. El agua regenerada puede sustituir usos que no requieran una calidad elevada, liberando volúmenes de mejor calidad para otros usos más exigentes o si la necesidad hídrica es extrema, y económicamente el balance es favorable, se puede alcanzar cualquier calidad para cualquier uso. En definitiva, hay que establecer dónde realmente es necesaria esta intervención y esta decisión suele tomarse en base a unos riesgos, unos costes de oportunidad y unos beneficios.

Estas posibilidades y beneficios de la reutilización, se materializan en actuaciones concretas que se definen en los diferentes PHC, 2009-2015, y en los que se están desarrollando, segundo ciclo que cubren del 2015 al 2021. En ellos se observa, en el programa de medidas, actuaciones de reutilización concretas con diferentes fines (MAGRAMA, 2015).

El beneficio de una actuación de reutilización tiene que ser visto desde la globalidad y no únicamente desde el beneficio directo del usuario, al que se le aporta el agua, debiendo considerarse, aquellos beneficios medioambientales y sociales que repercutirían a la baja en el precio del agua regenerada.

La reutilización en la realidad española contribuye, fundamentalmente, a garantizar una mayor fiabilidad y regularidad del agua disponible, liberar recursos de mejor calidad y resolver problemas medioambientales tales como la mejora de la calidad de los ríos, en zonas de baño a no tener que recurrir a infraestructuras como los emisarios submarinos para asegurar la calidad de la costa, la preservación de los caudales ecológicos o la intrusión marina en los acuíferos.

Otro punto importante que determina el futuro avance de la reutilización en España es la percepción que tiene la sociedad y potenciales usuarios de este recurso. Además, en los últimos años esta práctica ha sido tenida en cuenta en diferentes foros nacionales e internacionales debido a algunos beneficios ya nombrados como:

- El incremento sustancial de los recursos existentes en las zonas donde los efluentes depurados se vierten al mar (Cumbre Mundial Johannesburgo, 2002).
- Ahorro de agua prepotable por sustitución de éstos volúmenes por agua regenerada (Ley 11/2005 que modifica Ley 10/2001, Plan Hidrológico Nacional).
- La reutilización es parte de las actuaciones de incremento de la disponibilidad y mejora de la gestión de los recursos hídricos (Ley 11/2005).
- Suministro estable en unas condiciones de calidad constantes (USEPA, 2004).
- Reducción del aporte de contaminantes a los cursos de agua (DMA, 2000).
- Evita la necesidad de realizar infraestructuras para transportar recursos adicionales desde zonas alejadas y con un elevado coste económico y medioambiental (Plan Nacional de Reutilización, MAGRAMA, 2009).
- Permite, en el caso que el destino de la reutilización sea la agricultura, un aprovechamiento de los nutrientes contenidos en el agua residual, lo que reduce la cuantía de abonos a utilizar por los agricultores (MEDPOL, 2005).
- La reducción de riesgos sobre la salud para los usuarios aguas abajo (OMS, 2006).
- Opción viable en el manejo de las sequías (FAO, 2013).

Estas consideraciones hacen de la reutilización de efluentes depurados un instrumento válido y eficaz para lograr una gestión renovada de los recursos hídricos, más equilibrada y sostenible, que ponga énfasis en el ahorro, el reuso y en la satisfacción de las necesidades medioambientales, tal y como planteó el MAGRAMA en su programa AGUA, 2007-2015 o en los PHC (2009-2015) (<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/>), donde este recurso entra dentro del programa de medidas como objetivo ambiental o satisfacción de demandas (CEDEX,2011).

En los PHC, dentro del proceso de la planificación hidrológica, se establece el inventario de presiones, donde se estiman el total de extracciones de agua superficial y subterránea para cubrir las demandas de usos como: abastecimiento, regadío, industrial, recreativo, acuicultura y otros, sin contar con el uso hidroeléctrico. En la Tabla 1.2 se muestran estas extracciones dando un total de 33.264 hm<sup>3</sup> anuales. Algunas de estas demandas, sobretudo riego agrícola, están siendo sustituidas por aguas regeneradas en los programas de medidas de estos PHC.

**Tabla 1.2** Extracciones de agua superficial y subterránea, (PHC, 2009-2015)

PHC	Extracción anual (hm <sup>3</sup> .año <sup>-1</sup> )
Ebro	7.536
Segura	1.762
Guadalquivir	4.007
Guadiana	5.185
Duero	4.800
Tajo	3.046
Júcar	2.771
Miño-Sil	334
Cantábrico occidental	1.905
Cantábrico oriental	353
Baleares	115
Canarias	64
Mediterráneas andaluzas	1.386
Total	33.264

Dependiendo de la zona, la incidencia y el uso que tiene esta sustitución de agua superficial o subterránea por agua regenerada es diferente, consiguiendo un aumento de los recursos en las zonas donde las depuradoras vierten al mar además de una opción medioambiental.

---

Sin embargo, todavía quedan por resolver puntos controvertidos como:

- Influencia de la no devolución de volúmenes reutilizados al cauce de procedencia.
- Incorporación de contaminantes a través del vertido indirecto, como riego agrícola en relación a las aguas subterráneas (RD 1514/2009; RD 261/1996).
- Manejo de la salinidad que proviene de las tecnologías de desalación utilizadas en los tratamientos de regeneración.
- Coste, riesgo medioambiental y sanitario de la regeneración de aguas frente a otras fuentes no convencionales como la desalación de aguas marinas.
- Costes de mantenimiento y explotación de los tratamientos de regeneración e infraestructuras de distribución para satisfacer el actual marco normativo de calidad de las aguas y reutilización de efluentes depurados.
- Contaminantes emergentes y sustancias prioritarias (Directiva 2008/105/CE; RD 60/2011; RD 817/2015).

Una de las exigencias para poder planificar las actuaciones de reutilización es la disponibilidad del efluente de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs).

Las actuaciones en materia de saneamiento y depuración comienzan en España en los años setenta mediante el desarrollo de planes parciales en algunas zonas turísticas del litoral. Las EDARs se han incrementado y muchas otras ampliado o reformado por la obligatoriedad de la directiva 91/271 CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, desarrollada en el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 1995-2005 (PNSD, 1995). Este Plan es la pieza fundamental de planificación que tiene el Ministerio de Medio Ambiente junto a las CCAA para la realización de las diferentes infraestructuras en materia de saneamiento y depuración y que promueve garantizar la calidad del vertido. Con la promulgación de la Ley 11/1995 y el Real Decreto 509/1996, se transponen al ordenamiento jurídico español todos los elementos normativos establecidos en la citada Directiva.

En 1998 se publica la Directiva 98/15/CE, que modifica Directiva 91/271/CEE (requisitos indicados en el Anexo I de esta directiva) respecto a los requisitos exigidos en fósforo y nitrógeno total en zonas sensibles y que se transpone en el RD 2116/1998, que modifica RD 509/1996.

En España, el 84 % de la población equivalente total está afectada básicamente por la aplicación de esta Directiva 91/271/CEE, correspondiéndose con las aglomeraciones mayores de 2.000 h-e en aguas continentales y estuarios, y mayores de 10.000 h-e en aguas costeras, con una carga contaminante total que sobrepasa los 80 millones de h-e y un número de aglomeraciones afectadas de unas 2.700.

Para el 16 % restante, unos 13 millones de h-e, la Directiva 91/271/CEE exige realizar "un tratamiento adecuado" para el cumplimiento de otras Directivas o de los objetivos de calidad fijados en el medio receptor.

Con respecto a la carga contaminante por tipo de zona según la Directiva, el 87% del total de la población afectada se encontraba en "zonas normales", el 2% en "zonas menos sensibles" y el 11% en "zonas sensibles". Estos porcentajes se revisaron en 2009 ampliando las zonas sensibles hasta el 24%.

La magnitud de los esfuerzos económicos en principio cuantificada en 11.400 millones de euros aproximadamente obligó a la coordinación de las actuaciones de las distintas Administraciones (Central, Autonómica y Local) y a realizar un Plan Nacional de Depuración y Saneamiento. Este PNDS canalizó las ayudas de la UE (Fondos de Cohesión y otros Fondos europeos) que fueron de vital importancia.

El número total de estaciones depuradoras en el año 2007 era de 2.335 y en 2010 se estimó que incrementaría a 2.950 EDARs según el Informe Especial de DBK: "Depuración de Aguas" (BDK, 2007). Según el MAGRAMA en España existen 2.533 EDARs que tratan un caudal total de 3.375 hm<sup>3</sup> por año, aunque la capacidad del total de las instalaciones puede llegar a ser un 30% superior (MAGRAMA, 2009). Este avance ha sido posible mediante la aprobación del Plan Nacional de Calidad de las Aguas, PNCA 2007- 2015 (PNCA, 2007) como continuación del PNSD 1995-2005. El esfuerzo del Plan se centra fundamentalmente en los núcleos urbanos mayores de 5.000 h-e. Cuenta con una inversión de 19.007 millones de euros que pretende cumplir los objetivos del anterior Plan y ampliar las actuaciones previstas en el mismo para alcanzar un buen estado ecológico en los ríos, tal y como exigen la Directiva Marco del Agua y el Programa AGUA (Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua) del MAGRAMA. Tanto en el PNCA como en el Programa AGUA, se establecen convenios bilaterales con cada una de las Comunidades Autónomas que incluyen actuaciones de desalación y reutilización de aguas depuradas para conseguir una gestión más sostenible del agua.

El PNCA dentro de las actuaciones derivadas de la aplicación de la Directiva Marco del Agua (Directiva 60/2000/CE), tiene como principales retos:

- La depuración de las pequeñas poblaciones, dando prioridad a los núcleos rurales que vierten a Parques Nacionales o espacios protegidos (Red Natura 2.000).
- La adecuación de las estaciones depuradoras existentes a los nuevos requerimientos derivados de la ampliación de zonas sensibles o de las nuevas obligaciones derivadas de la aplicación de la Directiva Marco del Agua.
- Mejora de las redes de colectores y tratamiento de las cargas de episodios de lluvia.
- Mejorar la gestión, explotación y mantenimiento de las infraestructuras actuales.
- Promover la I+D+I en materia de saneamiento, depuración, calidad de las aguas, biodiversidad y ecosistemas asociados.
- Promover la reutilización de aguas depuradas.

Puede estimarse que la ejecución del PNCA va a significar un incremento de los volúmenes de aguas residuales depuradas de unos 1.500-1.800 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, lo que permitirá aumentar el volumen de agua susceptible de reutilización, y acercarlas a las zonas potenciales de demanda. Este nuevo Plan, además, quiere dar cobertura a las pequeñas poblaciones, lo que obliga a profundizar en el estudio de las tecnologías adecuadas para este segmento de población, tanto para la depuración de sus aguas residuales, como para la regeneración de sus efluentes depurados.

Teniendo en cuenta los datos facilitados anteriormente, la reutilización de efluentes depurados puede llegar a cubrir sobre el 5,4 % de las demandas respecto al total de los usos (Tabla 1.2). Este porcentaje puede alcanzar más del 25 % en zonas como Canarias o suponer más del 15 % del total de agua disponible para riego en Murcia.

La situación en la que se encontraba el PNCA en función de los niveles de tratamiento establecidos en la Directiva 91/271/CEE, puede verse en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3** Estado del saneamiento y la depuración según las exigencias de la Directiva 91/271/CEE, (MAGRAMA, 2009)

Conformidad	Nº aglomeraciones afectadas	Población afectada h-e	Porcentaje sobre Población (%)
Conforme	1.276	56.608.111	77,0
En construcción	280	10.140.864	14,0
No conforme	800	6.516.753	9,0
Total	2.356	73.265.728	100,0

---

Aunque se ha avanzado considerablemente en el estado de la depuración, hay que huir de proyecciones triunfalistas. El aumento de los volúmenes depurados no va a significar un incremento automático de la reutilización, existiendo diversos factores que pueden frenar su extensión.

Se debe destacar que existen todavía deficiencias en la depuración, sobretudo en poblaciones por debajo de los 2.000 h-e, no sólo en la construcción de los tratamientos adecuados para toda la carga contaminante que se exige en la Directiva, sino en la regularidad de la calidad de los efluentes que ya se están depurando. En ocasiones, las variaciones de calidad del efluente depurado, son consecuencia del mal manejo de la planta, bien por la inexperiencia de los operarios, costes a la baja ofrecidos por el explotador e insuficientes para una correcta explotación, o por carencias constructivas de la misma. Otras veces, el efluente se ve afectado por vertidos incontrolados, normalmente de procedencia industrial, y en los casos donde el deterioro de la red de saneamiento permite entradas de salinidad muy altas a través de los colectores que están a ras de costa, el efluente no solo afecta al medio receptor, sino que exige un tratamiento adicional de desalación para su reutilización.

La necesidad de utilizar los efluentes depurados para garantizar el caudal ecológico, especialmente en los momentos de estiaje o épocas de sequía, también limita el uso de los efluentes depurados que en ocasiones son el único caudal que tiene el río.

La dificultad de convertir las demandas potenciales en reales, especialmente en el caso de reutilización en riego agrícola, es debida a la resistencia de los agricultores a sustituir los recursos tradicionales por el agua regenerada (prevenciones sanitarias, mayores costes del agua regenerada, etc.)

Otro factor que frena la posible reutilización sería la ausencia de una cultura de la planificación en la toma de decisiones respecto a las actuaciones de reutilización, que implica la adopción de iniciativas sin los necesarios estudios de viabilidad. Estos estudios de viabilidad tienen que recoger cómo se va a sostener la actuación de reutilización en el tiempo.

Al ser los efluentes depurados “la materia prima” de la reutilización, sus características deben ser uniformes para garantizar un resultado adecuado en los posteriores tratamientos de regeneración y evitar desviaciones apreciables en los costes previstos de los mismos.

España cumple la Directiva 91/271 en un 84% según el último informe entregado a Europa del año 2013. La población afectada asciende a 96.759.891 h-e. Sin embargo, discerniendo el cumplimiento por artículos, se observa que en el artículo 5, España cumple sólo entre el 40% y el 60%. Artículo 5 que corresponde a tratamiento más riguroso en vertidos a Zonas Sensibles con eliminación de Nitrógeno y Fósforo. Este incumplimiento es consecuencia de que gran parte de España está declarada como Zona Sensible (CONAMA, 2014).

La no conformidad está generalmente relacionada con resultados analíticos. La mayoría de las CCAA tienen canon o figura similar con valores de 0,4-0,5 €·m<sup>-3</sup>. El canon resultante final con tratamientos de afino por diferentes circunstancias sería del orden de 0,6-0,7 €·m<sup>-3</sup> con la excepción de Madrid y País Vasco que estaría en 0,8 €·m<sup>-3</sup>. El coste medio para EDARs por habitante equivalente y caudal tratado por debajo de 50.000 h-e es respectivamente de 400-200 euros/h-e y de 0,4-0,6 €·m<sup>-3</sup> y por debajo de 100 €·h-e<sup>-1</sup> y 0,2 €·m<sup>-3</sup> cuando la población a tratar está por encima de los 250.000 h-e, según lo presentado por la Dirección General del Agua (DGA) en el Congreso Nacional de Medioambiente en 2014.

La Directiva 91/271/CEE facilita la reutilización, no por ser un objetivo de la misma sino por crear un ámbito de mejora de la calidad de los efluentes depurados y un incremento del volumen de los mismos. La forma de financiarse ha sido a través de Presupuestos Generales del Estado, Fondos Europeos y la recuperación mediante Tarifa de Utilización del Agua (según Art. 114.2 del Real

---

Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas). Además, participan Comunidades Autónomas (CCAA), Ayuntamientos, usuarios beneficiados (Convenio Específico).

La situación actual en cuanto a la explotación de las EDAR en ocasiones no es buena, ya que existe por parte de las empresas especializadas, una tendencia muy marcada a presentar ofertas a la baja y una aquiescencia por parte de la Administración al admitir dichas ofertas totalmente alejadas de la realidad respecto a los costes de explotación y mantenimiento. Esta escasez de medios repercute en la regularidad de la calidad del efluente depurado con la correspondiente incidencia en el tratamiento de regeneración y a la larga en el coste que supone la regeneración.

La necesidad que promueve la Directiva 91/271/CEE de obtener un agua depurada con una buena calidad en el vertido, puede relacionarse con las características que pudieran exigir ciertos usos aguas abajo. Existen casos donde el agua depurada con un tratamiento adicional de desinfección, puede ser adecuada para algunos usos de reutilización. Son los casos donde las depuradoras están todavía holgadas y consiguen efluentes de menos de 20 mg. L<sup>-1</sup> en SS y DBO<sub>5</sub>. Esta situación hace reflexionar sobre si es más rentable diseñar depuradoras para conseguir efluentes de mayor calidad que permiten la reutilización del efluente sin tratamientos adicionales más complejos como son los físico-químicos o las filtraciones.

En la actualidad para reutilizar se hace necesario un tratamiento adicional más completo. En algunos planes de saneamiento, este tratamiento de regeneración ya está siendo incorporado, no con el objetivo del uso posterior, sino como un objetivo de afino de la calidad de vertido. Por lo tanto, los costes de implantación de los tratamientos de regeneración, se están realizando a través de la financiación del saneamiento, evitando la repercusión del coste del tratamiento de regeneración al usuario del agua regenerada. Esta situación desvirtúa en ocasiones la planificación de la reutilización y dificulta el uso eficiente del recurso.

Finalmente, no se puede terminar esta exposición relativa a la planificación hidrológica y disponibilidad del recurso hídrico, sin citar el Plan Nacional de Regadíos (Real Decreto 329/2002). Esta figura, cuya redacción ha sido sensiblemente paralela a la elaboración del Plan Hidrológico Nacional, se considera clave a la hora de planificar correctamente los recursos hidráulicos, ya que en la actividad agrícola se consume más del 68% del consumo total de agua en España. Este Plan, aprobado en abril de 2002 y con horizonte hasta el 2008 y ampliado por la Estrategia Nacional para la Modernización Sostenible de los Regadíos a 2015 (ENMSR, 2015), tiene como finalidad la modernización y mejora de las infraestructuras actuales del regadío. Según lo anotado anteriormente esta ENMSR ha conseguido rebajar el volumen de agua utilizada habiendo aumentado las hectáreas de regadío. Esta medida podría ser un buen marco de actuación para planificar conjuntamente las infraestructuras necesarias para la reutilización directa de efluentes depurados, incorporando este recurso a zonas con riego agrícola.





### **Objetivo 1**

Estudiar la situación de la reutilización de efluentes depurados en España dentro de la planificación hidrológica y el marco normativo al que está sujeta dicha actividad.

El análisis se realiza a través del desarrollo y explotación de una Base de Datos diseñada con tal fin, junto con otras fuentes de información como Planes de cuenca, Planes directores de saneamiento y depuración autonómicos, y consultas a las distintas entidades gestoras y explotadoras de este recurso a nivel local, autonómico y estatal.

Describir los distintos escenarios y planteamientos de la reutilización en diferentes zonas y plantear una propuesta para el avance sostenible de la reutilización de efluentes depurados en base a la situación descrita anteriormente.

### **Objetivo 2**

Analizar el desarrollo del marco normativo para la reutilización de efluente depurados.

Presentar las diferentes normas y recomendaciones desarrolladas en España hasta llegar al actual marco normativo y estudiar los criterios y estándares internacionales más relevantes que hacen referencia a la calidad necesaria para la reutilización, con objeto de evidenciar diferencias en cuanto a indicadores, criterios de control y gestión de esta práctica.

Evaluación del Real Decreto 1620 /2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de efluentes depurados en España, respecto a su aplicabilidad, proponiendo posibles mejoras a éste u otros aspectos.

### **Objetivo 3**

Realizar una propuesta de líneas de tratamiento para el cumplimiento de la calidad en función de los usos establecidos en el Real Decreto 1620 /2007.

Presentar unos costes de implantación y explotación de las líneas propuestas, con objeto de tener una herramienta a nivel de planificación de recursos hídricos.

Para acometer este objetivo se estudiarán los principales tratamientos de regeneración implantados en España en relación a su fiabilidad y eficiencia a la hora de cumplir con los estándares de calidad exigidos en el Real Decreto 1620/2007.

La estimación de costes estará basada en los costes de implantación y explotación de cada una de las unidades de tratamiento que compongan la línea de regeneración propuesta.

### **Objetivo 4**

Evaluar los biorreactores de membrana como tratamiento de regeneración de aguas residuales urbanas.

Para desarrollar este objetivo se llevarán a cabo los siguientes objetivos parciales:

---

Objetivo 4.1. Evolución de los biorreactores de membrana en España: número de instalaciones, capacidades y usos del efluente.

Objetivo 4.2. Conocimiento de la tecnología: descripción, sistemas de filtración mediante membrana, operación y diseño.

Objetivo 4.3. Determinación de los costes de implantación y explotación de esta tecnología frente a otras líneas de tratamiento de regeneración, con el fin de establecer una herramienta de selección.

---

## 3 LA REUTILIZACIÓN DE EFUENTES DEPURADOS EN ESPAÑA

---

### 3.1 La reutilización en España: caudales reutilizados, principales usos y tratamientos

El volumen máximo de reutilización en España está limitado por la cantidad de agua urbana depurada, la situación geográfica respecto al uso de estas instalaciones (no hay que olvidar que en la mayoría de los casos el coste de distribución del agua regenerada por  $\text{m}^3$  es muy superior al del tratamiento de regeneración de este  $\text{m}^3$ ), la demanda, la aceptación que tenga este recurso y la viabilidad económica y medioambiental del mismo.

En el Libro Blanco del Agua en España (2000) se preveía un volumen máximo de efluentes depurados, una vez finalizado el PNSD en cumplimiento con la Directiva 91/271/CEE, de unos  $3.500 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , de los cuales, aproximadamente  $1.200 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  podrían ser susceptibles de ser reutilizados. Además, daba una proyección de caudal reutilizado de unos  $636 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  para el año 2006.

En el año 2001, se realizó por parte del CEDEX la primera estimación de actuaciones de reutilización que existían en España, alrededor de 140 actuaciones, que cubrían una demanda de aproximadamente  $346 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  (P. Catalinas and E. Ortega, 2002). Entre el año 2006 y 2009, se realizó una base de datos de reutilización a nivel estatal (BDR, 2009), donde se registraron 322 actuaciones que disponían de un caudal concesionado, o en trámite de obtener la concesión, de  $506,8 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ . Se encontraban en fase de proyecto y construcción otra serie de actuaciones que ponían una ampliación del volumen reutilizado en unos  $290 \text{ hm}^3$  por año adicional, en un periodo no superior a cinco años. Con estas estimaciones para el año 2014 el volumen reutilizado con concesión se estimaba en  $796,8 \text{ hm}^3$ .

El volumen anual de aguas depuradas reutilizadas en España se estimó en unos  $368,2 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , (Iglesias R., 2009) lo que representa aproximadamente el 11% del caudal total depurado del país en aquel momento. Este caudal fue tomado de actuaciones de reutilización que pueden incluir o no tratamientos de regeneración (en funcionamiento, construcción o en proyecto), y con volúmenes reutilizados anuales superiores a  $0,2 \text{ hm}^3$ . Este caudal es el que se estaba reutilizando en el momento de la toma de datos, teniendo en cuenta que el caudal que se reutiliza anualmente varía en función de las necesidades de los usuarios, en especial de los agricultores que optan por este recurso cuando no hay disponibilidad de aguas superficiales o subterráneas.

Para la realización de la BDR se elaboró una Ficha-Cuestionario, ver Anexo I, que se estructura en tres apartados:

A) Datos generales y concesionales del sistema de reutilización. Este apartado se subdivide en dos partes diferenciadas. En una se incluyen los datos generales, como la fecha de realización del cuestionario, propietario y gestor de la instalación de regeneración, comunidad autónoma, municipio, aglomeración y cuenca hidrográfica a la que pertenece. En otra se disponen los datos referentes a las concesiones asociadas a ese sistema de reutilización, contemplándose tanto los usos que están sin ella, como las concesiones que están en trámite y concedidas, su fecha de petición, el caudal concedido y el uso permitido. Además, se señala la ubicación de los usos y el consumo de agua reutilizada durante un año completo.

---

B) Datos referentes a la EDAR de la que proviene el efluente a reutilizar. En este apartado se recogen los datos básicos de la estación depuradora: nombre, línea de tratamiento, caudal de diseño, caudal depurado y la calidad del efluente desarrollada en cuatro parámetros básicos, demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), sólidos en suspensión (SS), turbidez (UNT) y conductividad eléctrica (CE).

C) Datos referentes a la estación regeneradora. Este apartado se desarrolla en varios subapartados: El primero incluye el código de instalación, ubicación (coordenadas UTM 30), estado de desarrollo de la estación regeneradora (en funcionamiento, en construcción, en proyecto o no prevista), fecha de la puesta en marcha, capacidad y caudal regenerado, punto de entrega y el número de días al año que está la estación en funcionamiento. El segundo, se dedica a las líneas de tratamiento que componen la estación regeneradora. Aquí se incluye todo tipo de tecnologías de regeneración que están instaladas o previstas en los sistemas de reutilización españoles. El tercero, recoge la calidad del efluente regenerado en referencia a los parámetros de calidad que marca el Real Decreto 1620/2007, y otros de carácter agronómico. Estos parámetros son: Nematodos intestinales, E. coli (*Escherichia coli*), sólidos en suspensión, turbidez, DBO<sub>5</sub> y conductividad eléctrica. El cuarto, está dedicado a los costes de operación de la estación regeneradora y el quinto a los tipos de reactivos y consumos.

La principal fuente para detectar las EDARs con reutilización de su efluente fueron las Confederaciones Hidrográficas (CCHH) a través de las concesiones para la utilización de efluentes procedentes de depuradora. Cuando se detectaba una EDAR se planificaba las visitas de campo, solicitando los permisos oportunos y contactando con los gestores y/o explotadores de las distintas plantas, a los que se les enviaba previamente las fichas de toma de datos.

En la fase de toma de datos se utilizó MS Access para guardar la información recogida y se realizó una aplicación en VBA (Visual Basic para Aplicaciones) para comprobar la validez de la misma. La base de datos está gestionada por un Sistema Gestor de Bases de Datos Relacionales (SGBDR) Informix en su versión 9.40 sobre un sistema operativo Sun Solaris 8, Figura 3.1. La carga del modelo almacenado en Informix se realiza mediante una serie de scripts que permiten volcar los datos provenientes de campo (MS Access) en el modelo almacenado de la BDR. Dado que los datos disponen de información geográfica, resulta sencilla su incorporación a un SIG. El SIG permite al usuario exportar los resultados obtenidos a diferentes formatos en función del resultado (tablas, gráficos, etc.). El programa propuesto para el desarrollo del SIG es el ArcGIS.

Desde que se realizó la BDR se han realizado otras estimaciones del volumen reutilizados, usos de destino del agua regenerada y descripción de las diferentes actuaciones de reutilización por parte de diferentes organismos y entidades tanto públicas como privadas. Los datos que se exponen a continuación pertenecen en su mayoría a esta base de datos (BDR, 2009).

Desde el 2012, el MAGRAMA mantiene como dato oficial unos 408 hm<sup>3</sup> anuales de agua reutilizada en España no habiéndose revisado esta cifra desde entonces. En publicaciones anteriores, 2008, el Ministerio hablaba de unos 447 hm<sup>3</sup> según lo manejado por las CCHH. Estas diferencias de caudales vienen a veces justificadas por incluir o no en el balance actuaciones medioambientales de recuperación de caudales ecológicos o zonas con valor medioambiental.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen del caudal de agua reutilizada en función de los usos en la cual se puede observar que el riego agrícola es el uso más generalizado, si bien se está detectando una tendencia creciente respecto a los usos medioambientales, recreativos y urbanos.

Este aumento del volumen de agua reutilizada en fines medioambientales y descenso en el agrícola está siendo reforzado por las exigencias de Directivas como la Marco y políticas europeas como el cumplimiento de la PAC (Política Agraria Común) que obligará a una reducción de la producción y extensión agrícola. Este uso tiene una tendencia a crecer de forma sustancial a corto plazo. Sólo teniendo en cuenta los 30 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> de agua regenerada procedentes de la EDAR de Pinedo



**Tabla 3.1** Caudal de agua reutilizada en función de los usos, (Iglesias R., 2009)

Usos	Caudal $\text{hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$	Porcentaje %
Riego agrícola	261,4	70,9
Usos municipales	14,7	4,03
Usos recreativos y campos de golf	26,0	6,8
Usos ambientales	65,1	17,7
Usos industriales	1,0	0,27
Otros usos	1,0	0,30
Total	368,2	100,0

El riego agrícola supone unos  $261,4 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  (70,9% del total), sin contar con los riegos de zonas forestales o cultivos leñosos que aprovechan también el agua residual. Contado con estos volúmenes se alcanzarían los  $310 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , más del 80% del total reutilizado. Es sin duda el uso que más puede contribuir al ahorro de agua superficial y subterránea.

El segundo uso en importancia es el ambiental, en el que se incluyen la restauración de humedales, recuperación de acuíferos, infiltraciones para evitar la intrusión salina o la restitución de caudales ecológicos. En este uso se reutilizan unos  $65,148 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  (17,69% del total), destacando las Comunidades Autónomas de Cataluña ( $28,68 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ). Valencia ( $27,539 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ) y el País Vasco ( $8,571 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ) y las Demarcaciones Hidrográficas del Ebro e Internas de Cataluña que aglutinan las Comunidades Autónomas antes nombradas.

El tercer lugar lo ocupan los usos recreativos, especialmente el riego de campos de golf, con unos  $25,98 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , destacando las Comunidades Autónomas de Andalucía y Baleares. Para este uso se prevé también un importante crecimiento al existir en la actualidad en España unos 300 campos de golf con unas necesidades hídricas de unos  $80 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  y constatarse una tendencia en casi todas las Comunidades Autónomas de ir obligando a estas instalaciones a abastecerse con aguas regeneradas.

En uso urbano se reutilizan  $14,69 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , destacando la Comunidad de Madrid, debido al riego de parques urbanos por parte del Ayuntamiento de Madrid y La Comunidad Balear.

El uso industrial representa solamente 1% del total del caudal reutilizado ( $1,014 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ) si bien sus perspectivas de crecimiento son muy importantes. Dado que el interés de los empresarios de este sector por utilizar este recurso va en aumento, existiendo un número importante de solicitudes de concesión para uso industrial (papeleras, plantas de producción energética, industrias químicas, etc.).

En la Figura 3.2 se representa este mismo volumen anual distribuido por Demarcaciones Hidrográficas y en la Figura 3.3 se muestra la ubicación geográfica de las actuaciones de reutilización que aportan este caudal.

Por Demarcaciones Hidrográficas destacan la del Júcar ( $97,62 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ) y la del Segura ( $103,00 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ), que en conjunto suponen el 75,85 % del caudal reutilizado en España en uso agrícola.

El mayor caudal reutilizado se da en el arco Mediterráneo, Andalucía y los archipiélagos de Baleares y Canarias, destacando la Comunidad Valenciana, que reutiliza  $149 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  (40,4% del total del caudal reutilizado) y la Comunidad de Murcia, que reutiliza  $85 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  (22,95% del total del caudal reutilizado). En el interior de la península destaca Madrid sobre el resto de las CCAA (1,49% del total reutilizado), Figura 3.4.

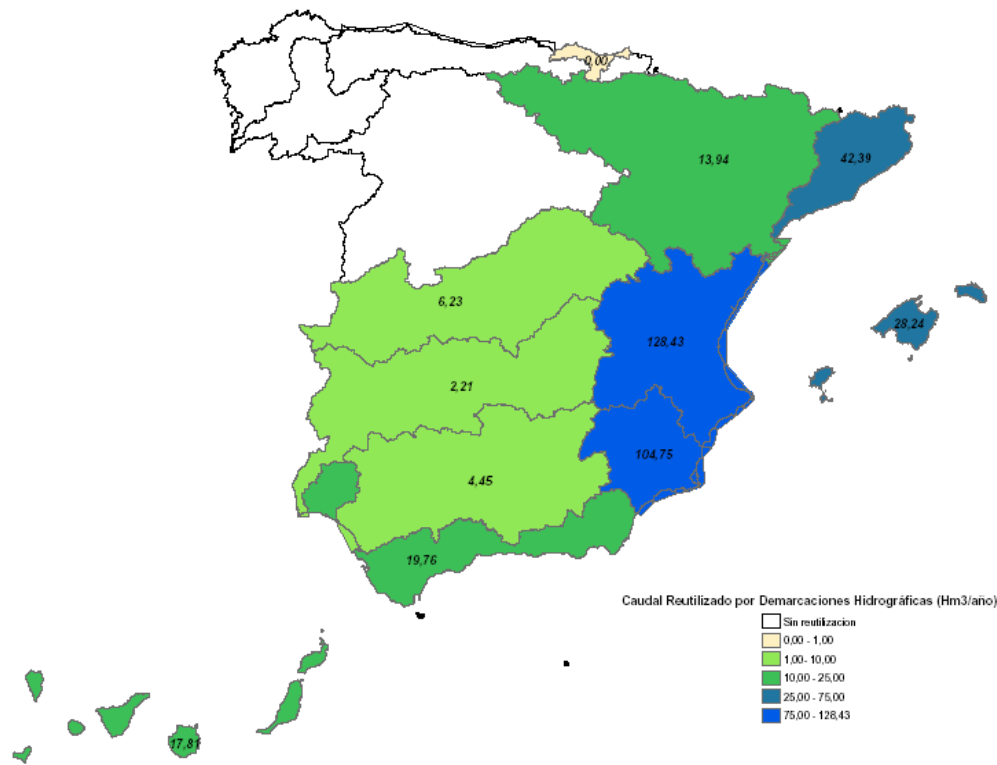


Figura 3.2 Caudal reutilizado por demarcaciones hidrográficas, hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, (BDR, 2009)

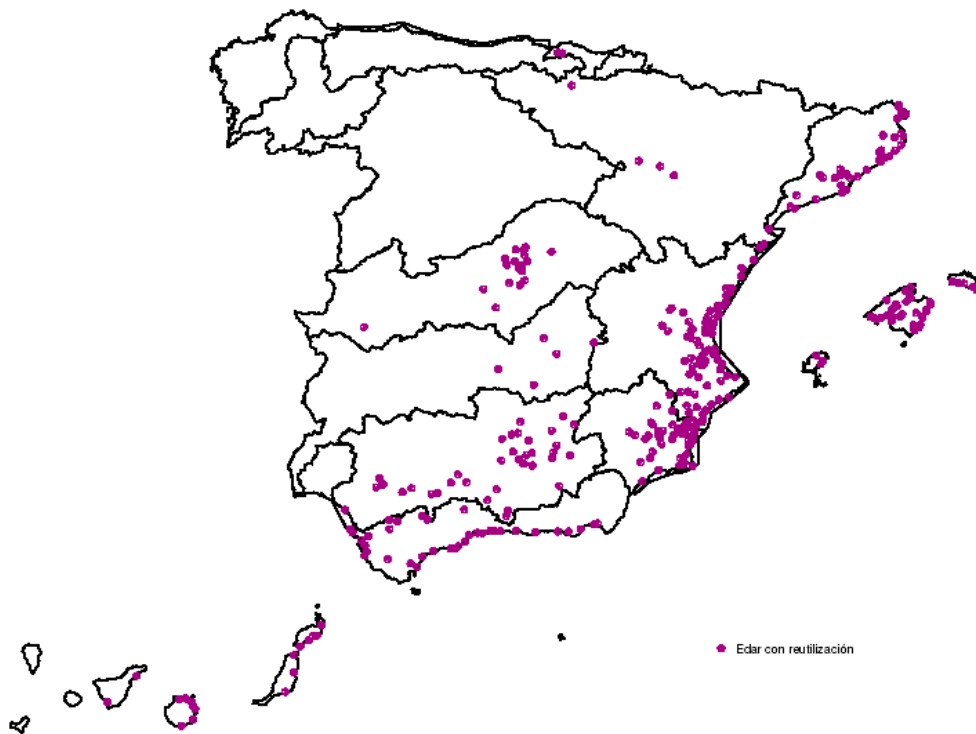


Figura 3.3 Ubicación geográfica de actuaciones de reutilización en España, (BDR, 2009)

Destacar los archipiélagos de Baleares y Canarias, zonas donde existe una alta demanda urbana y/o agrícola y dificultades para obtener recursos suficientes, debido al agotamiento o no existencia de las fuentes de abastecimiento tradicionales, la progresiva salinización de los acuíferos y al insuficiente régimen de precipitaciones de estos lugares.

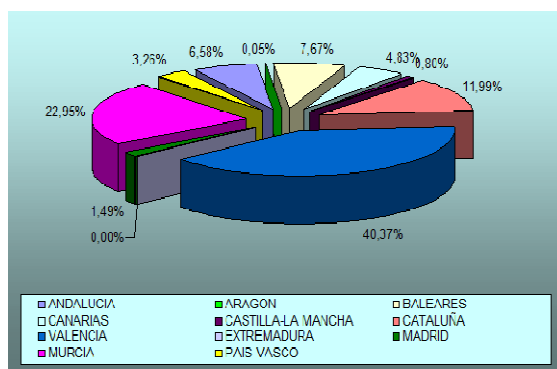


Figura 3.4 Porcentajes de caudal reutilizado por CCAA, (BDR, 2009)

Las aguas reutilizadas, si bien representan apenas el 1,04 % de la demanda de los recursos hídricos totales en España, en algunas zonas representa es un recurso estratégico para el desarrollo turístico o agrícola de la zona.

Las actuaciones más destacadas en España por posible volumen de agua reutilizada serían: Pinedo en la Comunidad Valenciana, proyectado para reutilizar 103 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>; Baix Llobregat en Cataluña, proyectado para reutilizar 100 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>; Benidorm y Rincón de León en la Comunidad Valenciana, proyectados para reutilizar entre los dos 18 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>; Rejas, La Gavia y Arroyo Culebro en la Comunidad de Madrid, proyectados para reutilizar 21 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, 8 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> y 11 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> respectivamente ; sistemas de reutilización Campo de Dalias, en la Comunidad de Andalucía, proyectados para reutilizar conjuntamente 10 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> o Barranco Seco en la Comunidad de Canarias, proyectado para reutilizar alrededor de 8 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> (BDR,2009).

Del caudal reutilizado total (368,2 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>), sólo el 61% (223,7 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>) cuenta con un tratamiento de regeneración, mientras que el 39 % se reutilizaba con una calidad de tratamiento secundario. Estos porcentajes han ido cambiando desde 2009 con la ejecución de tratamientos de regeneración que entonces estaban en construcción o proyectados. Los volúmenes reutilizados de aguas no regeneradas corresponden en su mayor parte a riego de leñosos.

En la BDR se recopilaron 216 estaciones con tratamiento de regeneración (ERA), 149 en funcionamiento con una capacidad de regeneración de 706,59 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, 35 en proyecto con una capacidad de regeneración de 151,51 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> y 32 en construcción con una capacidad de regeneración de 153,72 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>. Por lo tanto, se podría estimar una capacidad de regeneración de 1011,83 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> una vez se finalicen todas las estaciones de regeneración planificadas.

En la Tabla 3.2 se muestra el número y líneas de tratamiento de las 149 estaciones regeneradoras en funcionamiento. Estos tratamientos dan una idea de la tipología de líneas de tratamientos que se están utilizando para regenerar efluentes depurados.

De las 149 estaciones regeneradoras en funcionamiento, 18 (el 12%) disponen solamente de un tratamiento de desinfección, el resto, 131 (el 88%) disponen al menos de un tratamiento de filtración previo a la desinfección.

El tratamiento de regeneración con más número de instalaciones sin tener en cuenta los tratamientos que solo tienen desinfección, es la filtración con una desinfección posterior (45% del



total), seguido de los tratamientos físico-químicos, con filtración y desinfección posterior (21%), los tratamientos extensivos (14%) y finalmente los sistemas de membranas: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF) y biorreactores de membrana (MBR) (8%).

**Tabla 3.2** Número y tipología de líneas de tratamientos de regeneración implantadas en España (BDR, 2009)

Tipo de tratamiento	Nº de tratamientos	Porcentaje %
<b>Sin desalación</b>	<b>133</b>	<b>89,3</b>
Desinfección	18	12
Filtración + desinfección	58	39
F-Q + filtración + desinfección	28	18,9
F-Q + filtración + membranas	9	6
Biorreactores de membrana	2	1,4
Sistemas extensivos	18	12
<b>Con desalación</b>	<b>16</b>	<b>10,7</b>
F-Q + Filtración + EDR + desinfección	6	4
F-Q + Filtración + OI	2	1,4
F-Q + Filtración + membrana + OI	8	5,3
<b>TOTAL</b>	<b>149</b>	<b>100</b>

Incluyendo en el recuento los tratamientos de regeneración en construcción y en proyecto, la línea predominante es la compuesta por un tratamiento físico-químico más una filtración con arena seguida de una desinfección por radiación ultravioleta con dosificación de hipoclorito para mantenimiento de la calidad del agua en la red de distribución. Este tratamiento es seguro, fiable y bien conocido y está siendo el tratamiento más empleado en aquellas EDARs de nueva construcción cuyo efluente va a ser objeto de reutilización, agrícola o medioambiental excepto recarga de acuíferos por inyección directa que incorporan a esta línea membranas de UF o MF seguida ósmosis inversa (OI). En caso de tener que tratar aguas salobres a esta misma línea se incorpora una ósmosis inversa o una electrodiálisis reversible.

Otra tendencia clara de tratamiento vista en los proyectos son los biorreactores de membranas que combinan en un mismo tratamiento la depuración y regeneración del agua residual mediante membranas tipo UF o MF.

En el caso de utilización exclusiva de filtros como pretratamiento de la desinfección, las tecnologías más utilizadas son los filtros de arena (por gravedad o presión) y las anillas, si bien se observa una tendencia a la implantación de sistemas avanzados como, el puente móvil, la doble filtración con recirculación y los filtros de tamiz.

Los filtros de anillas han demostrado ser la tecnología menos eficaz en cuanto la eliminación de SS, turbidez y patógenos, ya que suelen crear caminos preferenciales además de necesitar un tamizado y una desinfección previa para evitar crecimientos bacterianos, por lo que en general se está abandonando su implantación.

Los tratamientos que incluyen desalación representan un 13% del total, sin contar con los tratamientos que tienen solo desinfección, y están ubicados en las Islas Canarias principalmente. Las líneas más extendidas incluyen una filtración seguida de electrodiálisis reversible (EDR) y desinfección por hipoclorito sódico o filtración mediante membranas (UF o MF) seguida de OI. En este segundo caso, las últimas instalaciones incluyen una etapa de filtración como pretratamiento de las membranas.

Respecto a los sistemas de desinfección predomina la cloración, dosificación de hipoclorito sódico (53%), sobre la radiación con ultravioleta (43%), si bien en los últimos años esta segunda tecnología

---

es la que mayoritariamente se está implantando, combinada en muchas ocasiones con una posterior dosificación de hipoclorito, que aporta capacidad residual de desinfección.

El resto de tratamientos (4%), corresponde mayoritariamente a ozono, en la mayoría de los casos este tratamiento va a ser sustituido por radiación ultravioleta o hipoclorito.

A nivel mundial los tratamientos empleados para la regeneración de efluentes depurados son similares a los detectados en España habiendo una tendencia general a incluir membranas para usos con calidades exigentes como vertidos a zonas sensibles, inyección de acuíferos o industrial.

Respecto al tratamiento de desinfección hay países como EEUU que son defensores de la desinfección con cloro, aunque luego tengan que declarar debido a la sensibilidad medioambiental derivada del empleo de este compuesto, sin embargo, países como Alemania tienen reservas a la hora de utilizar este desinfectante siendo defensores de la radiación ultravioleta. Estas tendencias se pueden apreciar en las distintas recomendaciones y normativas que cada país desarrolla para el tratamiento de sus aguas.

Tras la entrada en vigencia del Real Decreto 1620/2007, donde se marcan las calidades mínimas en función del uso, se han implantado numerosos tratamientos de regeneración y adecuado algunas de las estaciones regeneradoras existentes para que su efluente se adapte a las calidades exigidas.

En principio este esfuerzo económico se iba a articular por medio del Plan Nacional de Reutilización que comenzó su redacción a principios del 2008 con un alcance hasta 2015. La situación económica de los últimos cuatro años no ha permitido llevar a cabo este plan en su totalidad siendo solo algunas actuaciones financiadas por los Presupuestos Generales del Estado, el mayor esfuerzo en este sentido ha sido acometido por CCAA, Ayuntamientos y comunidades de regantes u otros usuarios que han invertido en el tratamiento de regeneración en ocasiones con algún tipo de subvención o ayuda de algún fondo europeo.

Con estos datos, España tiene un lugar destacado entre los países que más volumen anual reutilizan a nivel mundial. Es difícil dar cifras exactas de lo que reutiliza cada país, ya que el volumen total depende de lo que considere cada uno como reutilización directa de aguas residuales. Considerando reutilización como el uso de las aguas depuradas antes de verterlas al dominio público hidráulico, donde existe una conducción desde el tratamiento hasta los usos, y en términos de volumen al año, España con unos 400 hm<sup>3</sup> estaría en sexto lugar a nivel mundial, detrás de EEUU con más de 2.700 hm<sup>3</sup> y Arabia, Egipto, Siria e Israel que superan los 400 hm<sup>3</sup> reutilizados al año (IWA, 2008).

Respecto a los usos, a nivel mundial la agricultura representa más del 75% del volumen reutilizado, un 20% los usos industriales y menos del 5% para los urbanos. En Europa, sin embargo, casi el 50% del agua reutilizada es para usos industriales y en los últimos años ha aumentado el porcentaje en los usos urbanos o recreativos. En España, sigue siendo el uso agrícola el mayoritario, con el 70% del total del volumen reutilizado, seguido de los usos medioambientales que superaban el 20% de este volumen.

Referente al desarrollo tecnológico, decir que ha ido incluso por delante de lo normativo, contando actualmente con una gran variedad de tratamientos que permiten cumplir con las calidades exigidas por la normativa vigente. La mayoría de las tecnologías aplicables al campo de la regeneración, vienen de adaptaciones del tratamiento de otro tipo de aguas, como las potables o las industriales. Destacar el avance que se ha producido en los últimos diez años los tratamientos con membranas, en principio motivado por la necesidad de desalar agua salobre, y últimamente para asegurar calidades en usos exigentes como la inyección directa de acuíferos.

El notable desarrollo alcanzado por la reutilización en España en los últimos veinte años se ha debido principalmente al aumento de los volúmenes de aguas depuradas al tener que cumplir con la

---

Directiva 91/271/CEE, el mayor mercado y conocimiento de las tecnologías de regeneración y el desarrollo normativo, este último materializado en el Real Decreto (RD) 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Actualmente no existe una norma internacional común ni unos estándares para la Unión Europea que regulen la reutilización de efluentes depurados, aunque se está trabajando en unas recomendaciones conjuntas para los países del área mediterránea. Puede que esta iniciativa sea un primer paso para establecer en el futuro una directiva comunitaria que, sin duda, estimularía el desarrollo de la reutilización en países europeos donde esta práctica no ha sido habitual.

Para llegar a una normativa común, todavía queda por despejar dudas respecto los posibles riesgos sanitarios y/o medioambientales que puede implicar la reutilización de efluentes depurados a largo plazo, mejorar la percepción pública, conseguir un balance económico competitivo respecto otros recursos tradicionales y crear políticas de estímulo entendiendo las posibilidades que brinda este recurso a la gestión global del agua.

### 3.2 Los distintos escenarios de la reutilización en España

En España, existen distintos escenarios de reutilización con necesidades muy diversas dentro de la planificación de la reutilización de efluentes depurados.

Una de las actuaciones pioneras en el campo de la reutilización fue la que desempeñó la Comunidad de Regantes de Arrato en la década de los ochenta. Debido al desajuste hídrico que sufría la ciudad de Vitoria-Gasteiz y la agricultura desarrollada en la cuenca del río Arrato, la Diputación Foral de Álava, tras petición de los afectados, estableció en el año 1988, un Plan para la reutilización integral de las aguas residuales depuradas de esta zona. En este marco, la Comunidad de Regantes de Arrato solicitó una concesión por  $400 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  de las aguas depuradas de esta ciudad, ejecutando, como primera actuación, las infraestructuras necesarias para regar unas 3.500 ha. de cultivo. En el año 1995, invirtieron en un tratamiento de regeneración basado en tres módulos independientes basados en físico-químico con decantación lamelar más filtración por arena y desinfección por hipoclorito, que les permite tener una capacidad máxima de  $34.560 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  y un rango de  $400 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  hasta  $1.600 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . A partir del año 1996, se pone en marcha este tratamiento de regeneración satisfaciendo una demanda de  $3 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ .

Los resultados de esta experiencia fueron tan satisfactorios que se ha terminado la segunda fase del Plan que amplía el caudal reutilizado a  $12,5 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , de los cuales, una parte sirven para regar otras 6.500 ha. de cultivo y el resto, se transportarán al fondo de la presa que abastece la ciudad de Vitoria-Gasteiz, para poder mantener el caudal ecológico del río, sin detrimento del agua de abastecimiento.

En un intento de resumir la panorámica española, se podría decir que se distinguen cuatro escenarios dentro de la reutilización de los efluentes depurados:

#### 1) El Levante español

En este escenario la reutilización, sobre todo en agricultura, es un hecho desde tiempos inmemoriales. El "monouso agrícola" en las cuencas del Segura y el Júcar, con un 98 % del volumen total del agua reutilizada destinada a este uso, ya representaba en el 2001 más del 55% del agua reutilizada en toda España, dando muestra elocuente de la importancia de este recurso en estas cuencas a nivel global.

Dentro del Levante se distinguen los casos de la Región de Murcia, con una reutilización de marcado carácter histórico, dónde la distribución se realiza a través de canalizaciones construidas en tiempos

---

de los moriscos, y Valencia, donde las actuaciones de reutilización surgen de unas necesidades hídricas que promueven el uso de este recurso.

En Murcia, la reutilización de los efluentes depurados de una forma indirecta o con algún tipo de mezcla normalmente con retornos de riegos u otros recursos hídricos, “reutilización mixta”, y no una vez, sino repetidas veces, da una idea de la necesidad hídrica que padece esta Comunidad Autónoma tal y como está establecida su base de desarrollo socio-económico. Lo que al principio de la cuenca es una reutilización indirecta, pasa a ser aguas abajo una reutilización casi directa, al convertirse los cauces naturales, en meros sistemas de transporte del agua residual depurada. La descarga de las aguas depuradas en un complejo sistema de distribución constituido por canales, acequias, ramblas o azarbes, junto a los sistemas de recogida de las escorrentías de los regadíos con los que están conectados, y otras aportaciones de recursos hídricos como es el agua trasvasada Tajo-Segura, dificulta el establecimiento de una reutilización directa planificada.

Ante la realidad de no poder controlar este sistema de distribución tan complejo por sus múltiples ramificaciones a las distintas zonas de uso, parece que las administraciones murcianas competentes en estos temas, están instando por una solución de carácter “envolvente”, es decir, dotar a la mayoría de las aguas depuradas de la calidad sanitaria suficiente para el uso más extendido, el agrícola. Este objetivo se ha desarrollado dentro del Plan Director de Saneamiento, Depuración y Reutilización de la Región de Murcia (2001-2010) donde el 90 % de las nuevas estaciones depuradoras cuentan con un tratamiento de regeneración, que en la mayoría de los casos consiste en una línea de físico-químico con filtración de gravedad por arena y una desinfección por radiación ultravioleta. Esta línea de regeneración es más que suficiente para garantizar unas condiciones sanitarias aguas abajo, aun estando la capacidad de autodepuración del medio receptor muy mermada.

Esta forma de planificar los efluentes regenerados se aleja de un sistema de reutilización directa propiamente dicho, donde el efluente se trata en función de un uso predeterminado y la distribución es directa desde el tratamiento hasta el punto de uso.

En Murcia en 2005 se reutilizaban de forma directa, indirecta o mixta unos 106 hm<sup>3</sup> al año, de los cuales, solamente el 20 %, tenían algún tipo de tratamiento de regeneración teniendo en cuenta que el 90% de las aguas residuales tienen al menos un tratamiento de depuración. En menos de diez años esta comunidad autónoma está a la cabeza en el número de tratamientos de regeneración, más del 50 % de las depuradoras que tiene un posible reuso directo o indirecto tiene añadido un tratamiento de regeneración basado en su gran mayoría por un físico químico más una filtración por arena seguida de una desinfección por radiación ultravioleta y/o cloración.

Se inventariaron 31 actuaciones de reutilización que daban un volumen de agua reutilizada de 84,92 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, el 98% de este caudal dedicado al uso agrícola (BDR, 2009). En 2010 la comunidad daba un volumen de 110 hm<sup>3</sup> de agua reutilizada y en la cuenca del Segura, un total de 140 hm<sup>3</sup> (ESAMUR, 2012).

Respecto a la Comunidad Valenciana, una actuación de la planificación de efluentes depurados que cabe destacar por contar con un volumen potencial de 200 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, es la del plan referente a la reutilización de efluentes depurados de la periferia del área metropolitana de Valencia. Este plan pretende satisfacer las demandas de los regadíos tradicionales de L’Horta sin dejar de lado las necesidades ambientales de la zona. En este cometido están implicadas unas siete depuradoras, los tratamientos de regeneración pertinentes e infraestructuras necesarias, incluyendo modernización de regadíos, con el objetivo de producir al menos 103 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> de agua regenerada, de los cuales 72 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> irán a estos regadíos y el resto, con un tratamiento de eliminación de nutrientes, fluirán como caudal ambiental para mantener las condiciones naturales de la laguna litoral de la Albufera.

---

La Comunidad Valenciana, reutilizó 124 hm<sup>3</sup> en el año 2000, en su mayoría como efluentes mixtos, y en 2009 se detectaron 96 actuaciones de reutilización que daban un volumen reutilizado de 148,66 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, del cual, el 76 % se dedicaba a la agricultura y el 18 % a uso ambiental (BDR, 2009).

Desde el 2003, en el II Plan director de saneamiento de la Comunidad Valenciana, Valencia apuesta por la reutilización incluyendo directrices, objetivos, criterios y actuaciones de reutilización. Haciendo un esfuerzo tanto en planificación como en inversión en tratamientos de regeneración para alcanzar una desinfección de al menos 200 UFC. 100 mL<sup>-1</sup> E.coli para los efluentes regenerados destinados a la agricultura.

Durante 2014 tenían en servicio 466 instalaciones de saneamiento y depuración, que han tratado un volumen de agua de 419,81 hm<sup>3</sup>. Como consecuencia del déficit hídrico existente en algunas zonas de la Comunidad Valenciana, se realiza el aprovechamiento de los caudales depurados en diversas instalaciones, habiéndose reutilizado en el ejercicio 2014 un total de 266,91 hm<sup>3</sup> que representa el 63,58 % del volumen depurado. Existen 41 EDARs con tratamiento terciario o avanzado con una capacidad total de tratamiento de 332,5 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, (EPSAR, 2014).

## 2) Los archipiélagos Canario y Balear

En este escenario, totalmente insular, la salinización de los acuíferos y la inexistencia de recursos hídricos superficiales han creado una situación de déficit hídrico estructural que se ha ido solventando con desalación y reutilización desde hace más 20 años.

En lo que se refiere al archipiélago canario, desde los años setenta, las islas orientales han sido pioneras en la reutilización directa de aguas residuales regeneradas. La aportación de este recurso ha sido, desde los inicios de esta práctica, base para la planificación hidrológica de las islas a la hora de complementar y sustituir otros recursos convencionales.

En el periodo 1996-99 surgen los distintos Planes Hidrológicos de cada isla donde se incluían criterios y planes de reutilización. Las propuestas de estos planes estaban encaminadas a conseguir el 100 % de la reutilización de los efluentes depurados para usos como el agrícola, recreativos, zonas verdes o recarga de acuíferos. Para llegar a este fin incluían en la planificación las redes de distribución necesarias, que en ocasiones comportaba la construcción de muchos kilómetros para trasvasar el agua de un lado al otro de la isla, el apoyo a la construcción de nuevas redes de riego, así como la modernización de las ya existentes y la constitución de organismos específicos para la gestión global de este recurso.

La necesidad de aplicar tecnologías de desalación, al contar con un efluente depurado con altas concentraciones en sales inaceptables para el riego de cultivos de estas zonas, incitó a iniciar líneas de investigación en estas tecnologías, realizándose múltiples estudios por parte de entidades públicas y privadas que ayudaron a establecer las líneas de tratamiento más oportunas.

En los años ochenta, el Cabildo Insular de Tenerife, inició un ambicioso proyecto cuyo objetivo era trasvasar los efluentes depurados generados en la ciudad de Santa Cruz al Valle de San Lorenzo situado en el sur de la isla, donde se encuentra, en estos momentos, la mayor extensión de regadío de todo archipiélago, unas 750 ha de cultivo. Para este cometido, se realizaron importantes esfuerzos económicos en infraestructuras, como la construcción de un acueducto de más de 50 Km. de longitud, un depósito de almacenamiento de 15.000 m<sup>3</sup> de capacidad y una balsa de regulación final de 250.000 m<sup>3</sup> y líneas de tratamientos de regeneración que incluían etapas de desalación, con una capacidad total de 8.000 m<sup>3</sup>. d<sup>-1</sup>. Además, la gestión de todas estas infraestructuras y tratamientos está garantizada al existir una empresa pública BALTEN encargada de la misma, que ya en el año 2001, satisfacía una demanda de 6 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>. En el año 2002, a pocos kilómetros del Valle de San Lorenzo, se construyó un nuevo tratamiento de regeneración en la línea de los anteriores, filtración,

EDR e hipoclorito sódico, con una capacidad de 12.000 m<sup>3</sup>. d<sup>-1</sup>. En 2006, la producción era de más de 8 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>.

Dentro del archipiélago canario, la isla de Gran Canaria, es un ejemplo a seguir a la hora de la planificación y gestión de los efluentes regenerados. Para el horizonte 2012, esperaban reutilizar más del 50 % del total de volumen estimado depurado para todas las islas, unos 43,5 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, y haber construido una red de distribución de más de 180 Km.

Según datos recogidos en la Encuesta sobre Suministro y Tratamiento del Agua del Instituto Canario de Estadística (ISTAC, 2010), en el 2008 se depuraron algo más de 124 hm<sup>3</sup> de aguas residuales, de los cuales sólo se reutilizaron aproximadamente 33 hm<sup>3</sup>.

Gran Canaria, en el año 2001, ya reutilizaba más de 27 hm<sup>3</sup>, alrededor del 38 % de sus aguas residuales depuradas, constituyendo sin duda, el caso más avanzado de la planificación de efluentes depurados en España. En sus actuaciones, se incluían las infraestructuras necesarias para la distribución y el control del efluente, estudios de viabilidad e incluso análisis de tecnologías, a través de diferentes entidades públicas y privadas, de las que se sacaron importantes conclusiones en campos como el de la desalación (informes del DERE, Centro de investigación de Demostración en Reutilización de Aguas).

Respecto a los tratamientos de desalación la mayoría de ellos son con EDR que han venido sustituyendo a las OI por sus problemas de incrustaciones y ensuciamiento biológico de la membrana. El pretratamiento más habitual tanto de EDR como de OI era otra membrana de MF o de UF y en la actualidad estos tratamientos han sido sustituidos por dobles filtraciones de arena.

Por la trayectoria adoptada desde el año 1993 (ver Tabla 3.3), las Islas Canarias tendrían que haber llegado en 2012, a 95 hm<sup>3</sup> de agua reutilizada. Este dato está sin confirmar, ya que con la crisis económica de los últimos años muchas plantas, como en otras muchas zonas de España, han parado su producción de agua regenerada.

**Tabla 3.3** Oferta de agua en Canarias, hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, ([www.gobiernodecanarias.org](http://www.gobiernodecanarias.org), 2015)

Tipo de recurso	1993	1997	2004	2012
Reutilización	1,0	17,5	35,0	95,0
Desalación	37,0	76,0	130,0	188,0
Subterráneo	262,4	326,0	273,0	40,0
Superficial	21,1	24,1	50,0	24,1

En lo referente a las Islas Baleares, en el año 1988, la creciente necesidad de recursos hídricos provocados por la masiva afluencia de turistas a las islas, trajo consigo leyes como la 12/1988 referente al uso de agua regenerada en campos de golf. En el año 1995, vio la luz el primer Plan de Depuración y Reutilización de las aguas depuradas y unas guías para su uso. Se publicó un documento técnico donde se declaraba la necesidad de un informe preceptivo y vinculante de la Conselleria de Sanidad, según establece RD 849/1986, Reglamento del Dominio Público Hidráulico, y los criterios sanitarios para cada tipo de uso. En 1997, se aprobó un “Plan Integrado para la Reutilización de Aguas Tratadas en las Islas Baleares” en el que se planteaba la reutilización del 100% de las aguas depuradas. Se desarrolló en el 2001, dentro del Plan Hidrológico de las Islas Baleares, las infraestructuras necesarias para que en el año 2016 se reutilice más del 90 % estas aguas depuradas, unos 75 hm<sup>3</sup>. En este mismo año 2001, se reutilizaban unos 25,85 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, alrededor del 32% de las aguas residuales depuradas en las islas.

Según la BDR de 2009 en Baleares había 38 actuaciones de reutilización con un total de volumen reutilizado de 28,24 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>. El 67% del agua reutilizada tenía un uso agrícola y el segundo en importancia, con un 17 %, era el uso urbano.

---

En la actualidad, en el archipiélago Balear existen muchas iniciativas en este campo de la reutilización por parte de las diferentes empresas gestoras del agua depurada, aunque en la práctica, el avance es menor que en el archipiélago canario.

### 3) Otras zonas con reutilización planificada y diversificada

En el tercer escenario de la reutilización en España se podría incluir aquellas zonas donde se está diversificando más el recurso en cuanto a usos y el agrícola deja de ser el uso predominante. Son los casos de la Comunidad de Madrid o Cataluña donde se percibe una mayor colaboración entre las distintas administraciones e instituciones implicadas en estas actuaciones de reutilización y un mayor avance en cuestiones de normativa.

En Cataluña, el Departamento de Sanidad de la Generalitat, ya en el año 1994, sacó una guía de prevención del riesgo sanitario derivado de la reutilización de aguas depuradas y unas recomendaciones para el diseño y control de estas actuaciones. En el 2003, en base al borrador estatal de Real Decreto de 1999 sobre las calidades mínimas para la reutilización de aguas depuradas, publicaron unas calidades del agua depurada para los distintos usos. En 2005, han sacado una normativa para el riego de campos de golf y están en pleno desarrollo de un Plan de Reutilización.

Dentro de este ámbito de la reutilización en Cataluña, se debe destacar la labor que ha venido realizando el Consorcio de la Costa Brava (CCB) durante estos últimos 20 años. El Consorcio, desde su fundación en 1971, agrupa más de veinte municipios y dedica su actividad tanto al abastecimiento como a la depuración y reutilización de las aguas depuradas, cerrando así el ciclo del agua y dando una idea, del interés que tiene esta región en reutilizar sus aguas de una manera controlada y directa. La creación del CCB tuvo como objeto paliar una necesidad económica, vinculada al desarrollo turístico de la zona. Con sus proyectos han demostrado que la preservación del medio ambiente asegura el crecimiento de las actividades turísticas y, por lo tanto, el desarrollo económico no es antagónico a la conservación medioambiental.

Hay que agradecer la preocupación que ha demostrado el CCB a la hora de aportar experiencias en estos temas y realizar, desde el año 1985, jornadas técnicas, donde expertos, científicos y profesionales de la reutilización, tienen la oportunidad de intercambiar nuevos trabajos y reflexiones. Sin duda, es una buena práctica para propiciar el avance y el entendimiento de la reutilización en este país.

Otro ejemplo de la buena disposición por realizar actuaciones de reutilización, es el del Ayuntamiento de Sabadell donde se está desarrollando un reglamento municipal que no se limita exclusivamente a los criterios de calidad para los distintos usos, sino que recoge incluso la ejecución de la distribución y metodología de control de estos efluentes regenerados.

En el año 2004 Cataluña reutilizó unos  $30 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  y en 2006 la capacidad de reutilización llegó hasta los  $53,2 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , sin contar con grandes actuaciones como la del Baix Llobregat que por sí sola aportará unos  $50 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , como ya se comentó con anterioridad, para recarga de acuífero y mantenimiento del caudal ecológico. Este tratamiento cuenta con varias líneas diferenciadas, una convencional para mantenimiento de caudal ecológico y posibles riegos de la zona, que incluye un físico-químico más filtración por arena y desinfección por UV, otra línea que complementa a ésta con UF más OI, que es el caudal que se manda a infiltración del acuífero para luchar contra la intrusión marina y en otra instalación se encuentra un EDR para bajar la conductividad del agua y poder utilizar el caudal en riesgo de cultivos más sensibles a la concentración de sales.

En Cataluña se inventariaron 37 sistemas de reutilización y se reutilizaban unos  $44,16 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ . EL 12,5 % del agua regenerada era para usos recreativos, el 7,8 % para agrícola y el 64,5 % tenía uso ambiental (BDR, 2009).

---

Con las actuaciones en curso y previstas para los próximos años, la ACA quiere conseguir el objetivo de llegar a los 200 hm<sup>3</sup> de agua reutilizada en el año 2015, lo que supondría utilizar aproximadamente un 31% del agua depurada (<http://aca-web.gencat.cat>).

La reutilización en la Comunidad de Madrid llegó de una manera puntual para satisfacer una serie de necesidades de agua no potable, sobretodo de carácter urbano, riego de jardines, baldeo de calles y limpieza de los colectores de la red de saneamiento, pero, en estos últimos años, la concienciación social respecto a los temas medioambientales ha establecido nuevos objetivos en el uso de este recurso no convencional.

En el 2001 la Comunidad de Madrid estaba reutilizando entre 14 y 15 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> de los cuales, sin duda, el Ayuntamiento de Madrid es el que más volumen gestiona. La ciudad de Madrid reutilizó unos 21,7 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> en 2008 en usos municipales y completó la red de distribución a este efecto. En tema de normativa la Comunidad de Madrid ha estado amparada por la Cuenca Hidrográfica del Tajo que ya en el 2000, incluyó en su cuerpo legislativo el tema de la reutilización. La Confederación fijó unos límites y recomendaciones basados en el borrador de Real Decreto de las calidades mínimas para la reutilización de aguas depuradas propuesto por el MAGRAMA en el 1999 para la práctica de esta actividad. Aun así, el Ayuntamiento de Madrid llegó a más allá, y desarrolló un reglamento para la ejecución de obras y el uso de este tipo de instalaciones. Las dos plantas que en estos momentos están aportando casi la totalidad del volumen de agua reutilizada a la ciudad de Madrid son Viveros y La China, con una capacidad total de ambas de 0,2 hm<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> y un caudal reutilizado de 4,53 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>.

La Comunidad de Madrid y el Canal de Isabel II (CYII) en 2006 empezaron a trabajar conjuntamente en la elaboración de un Plan de Reutilización. El CYII por su parte, tenía diferentes proyectos de reutilización en el territorio de la Comunidad de Madrid de los que se puede destacar los 0,63 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> destinados al parque temático situado en Ciempozuelos y el campo de golf de Fuente El Saz.

En comunidad de Madrid se inventariaron 13 sistemas de reutilización y se reutilizaban unos 5,48 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>. EL 93 % del agua regenerada tenía destino de riego de parques y jardines junto a otros usos recreativos (BDR, 2009).

En 2014 el CYII gestionaba 33 plantas de regeneración de aguas que daban un volumen de 17,45 hm<sup>3</sup> para servicio a ciudades, el 3,2 % del agua depurada en toda la comunidad. Los usos más destacados son el industrial y el riego de parques y jardines de 24 municipios. La superficie regada asciende a 2.532 ha contando con parques, campos de golf y agricultura ([www.canalgestion.es](http://www.canalgestion.es),2015).

Destacar en el uso industrial de la papelera Holmen Paper, que ha permitido sustituir el 100% del agua de alimentación potable por agua regenerada, hasta 5 hm<sup>3</sup> por año. Esta agua se utiliza en los rociadores de la máquina de papel donde se requiere agua de alta calidad para evitar la formación de depósitos y riesgo de inhalación por parte de los operadores de la planta. Por tanto, para alcanzar los requisitos de calidad definidos por la industria, se decidió estudiar un tratamiento de doble membrana –ultrafiltración y ósmosis inversa– seguido por un proceso de desinfección. En la actualidad el tratamiento instalado en la EDAR Arroyo Culebro cuenta con un físico-químico más filtración por arena con posibilidad de pasar el agua por filtros de carbón activo (en caso de detectar hidrocarburos, por ejemplo) más radiación UV para evitar ensuciamiento de la membrana de UF que viene a continuación, filtros de cartucho y OI, añadiendo hipoclorito en el tanque de almacenamiento para mantenimiento de la calidad y de la red de distribución. Este tratamiento supone un ahorro de agua potable equivale al consumo en un año de una población de 80.000 habitantes. Esta actuación se incluye en el Plan Madrid Depura, el cual prevé una inversión de 600 millones de euros para poder obtener 70 hectómetros cúbicos de agua regenerada en los próximos años.



---

#### 4) Zonas con reutilización puntual

El último escenario de la reutilización en España incluiría a aquellas zonas donde se reutiliza puntualmente con objeto de paliar una necesidad concreta sin que exista una planificación global de los recursos hídricos disponibles. Son los casos donde ni la comunidad autónoma ni el organismo de cuenca correspondiente, han incluido en su planificación la reutilización de los efluentes depurados. Es el ejemplo de Andalucía, donde se han establecido importantes actuaciones de reutilización en función de las necesidades de la actividad turística o agraria y la problemática del déficit hídrico u orografía de las zonas a tratar.

En materia de legislación, en el año 1995 la Consejería de Sanidad en Andalucía publicó unos criterios de evaluación de los proyectos de reutilización y pocos años más tarde se publicó un reglamento autonómico en el que se obligaba a los nuevos proyectos de campos de golf a contemplar la alternativa de regar con agua regenerada.

Las áreas más importantes en cuanto a actuaciones de reutilización en Andalucía se podrían dividir en:

- La Costa del Sol Occidental, donde se concentra una de las mayores infraestructuras turísticas de España con una amplia oferta al turismo asociado a los campos de golf.
- La Costa del Sol-Axarquía, donde los objetivos de la reutilización en usos como jardinería y agricultura entran dentro del Plan de Saneamiento integral para conseguir la depuración del 100% de las aguas y mejorar la calidad de las aguas de baño.
- El área correspondiente a la costa almeriense, donde la reutilización ha tenido sus éxitos, proyectos como el desarrollado por la Comunidad de Regantes de las Cuatro Vegas que están regenerando más de  $6 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  para uso agrícola, y sus probables fracasos, como lo proyectado dentro del Plan de Depuración y Reutilización integral del año 1993 para la comarca "Campo de Dalías". En esta área se implantaron tratamientos de regeneración para más de  $10 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  en el año 2008, al encontrarse la zona, en un proceso de degradación tanto de las costas, por la calidad de los vertidos urbanos emitidos, como de los acuíferos, por intrusión marina y agotamiento de los mismos, debido fundamentalmente, a la masiva agricultura invernadero desarrollada en la zona.

La Costa del Sol Occidental desde los años 90, ha ido desarrollando dentro del Plan de Saneamiento, Depuración y Reutilización de la zona, y en colaboración del MAGRAMA y la Confederación Hidrográfica del Sur, una serie de actuaciones con el objeto de depurar el 100% de las aguas residuales urbanas y tener una capacidad de reutilización de unos  $20 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ . Desde entonces, ha sido la empresa pública ACOSOL, S.A. la que ha realizado un meritorio esfuerzo en la gestión de estos efluentes regenerados, para poder satisfacer una demanda que se estimaba para el 2002 en aproximadamente  $11 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  proveniente de más de 30 campos de golf que estarían establecidos en la zona. En 2006 esta empresa amplió su capacidad de regeneración en las plantas de depuración que gestionan y suministra a 28 campos de golf un volumen de agua regenerada que está entre los 3 y  $5 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  en función de la cuantía disponible en otros recursos hídricos existentes.

En comunidad andaluza se inventariaron 71 sistemas de reutilización y se reutilizaban unos  $24,21 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  de los cuales el 90% tenía algún tipo de tratamiento. EL 57 % del agua regenerada tenía destino agrícola y casi el 37 % a recreativo tipo campos de golf (BDR, 2009).

En Andalucía, la reutilización de aguas residuales se está introduciendo fundamentalmente en las zonas costeras, sobre todo en el Distrito Hidrográfico Mediterráneo donde más déficit se registra para atender las necesidades de agua para abastecimiento. En total se reutilizan en torno a  $50 \text{ hm}^3$  de aguas residuales, más de la mitad en el D.H. Mediterráneo ([www.juntadeandalucia.es](http://www.juntadeandalucia.es), 2015).

---

### 3.3 Propuestas para el avance sostenible de la reutilización

Para el avance de la reutilización, no basta con tener un recurso o una financiación del mismo, hace falta generar un marco sólido donde se cumplan las exigencias que precisa una reutilización directa planificada. Algunas de estas necesidades están incluidas en las propuestas que se realizan a continuación (Iglesias R., 2006).

#### **1. Necesidad de integración de la reutilización en la planificación y gestión de los recursos hídricos**

Las actuaciones de reutilización de aguas depuradas no deben contemplarse aisladamente y en función exclusiva del beneficio que pueda producir en el usuario. Las aguas regeneradas deben considerarse como un recurso no convencional cuya gestión debe integrarse en una planificación integral de los recursos hídricos, que tenga en cuenta los aspectos económicos, sociales y medio ambientales.

Si bien la reutilización permite, como se ha dicho anteriormente, la mejora de la gestión de los recursos hídricos, y en los casos de vertidos de aguas residuales al mar, su incremento neto, su utilización abusiva puede provocar daños medioambientales. Este es el caso cuando en la actuación no se tiene en cuenta los caudales ecológicos necesarios para mantener los ecosistemas fluviales. Sin una planificación adecuada a todos los niveles, la extracción de los efluentes regenerados que antes vertían en los cauces puede producir desecación aguas abajo y ser la causa de la degradación del medio hídrico.

La planificación debería hacerse a diferentes niveles: a nivel local, a nivel de Comunidad Autónoma, a nivel de Cuenca Hidrográfica y a nivel estatal.

Hay que señalar que en España antes de los PHC del 2009, la mayoría de las actuaciones de reutilización se han llevado de forma aislada y en muchos casos, sin cumplir con las mínimas exigencias que comporta la reutilización planificada. En los casos en que ha existido planificación, ésta se ha realizado principalmente a nivel local y en algún caso, a nivel de Comunidad Autónoma, casi siempre integrada como un apéndice de los planes de saneamiento y depuración.

Hay que hacer especial hincapié en la importancia de incluir la reutilización de los efluentes depurados en los Planes Hidrológicos de Cuenca, ámbito idóneo en donde analizar la viabilidad de las actuaciones concretas, en función de las demandas existentes, los recursos disponibles y las necesidades medioambientales. Desafortunadamente pocos Planes Hidrológicos han tenido en cuenta este factor, sólo los relativos a las Islas Canarias orientales (Gran Canaria, Lanzarote y Fuerteventura) y a las Islas Baleares, incluyen la reutilización en su planificación.

La planificación a nivel estatal, nunca se ha planteado de forma rigurosa. En el Plan Hidrológico Nacional, podrían plantearse las líneas estratégicas de la reutilización y los criterios generales para su impulso dentro de un marco de desarrollo sostenible. A nivel estatal, existen condiciones básicas para la reutilización de las aguas (R.D. 1620/2007), precisando la calidad exigible a las aguas depuradas según los diferentes usos previstos tal y como ordena, en su capítulo III, Art.109, la Ley de Aguas. En vista a esta normativa en 2010 se desarrolla un Plan Nacional de Reutilización de las Aguas Depuradas (PNRAD) todavía en estado preliminar, con intención de potenciar esta actividad en el conjunto del estado, coordinando el esfuerzo inversor necesario y las condiciones propias para que se realice la reutilización. Con la crisis del 2008, el PNRAD se queda desprovisto de financiación.

A nivel de Comunidad Autónoma, las actuaciones de reutilización se han llevado a cabo, en general, en el marco de los Planes de Saneamiento y Depuración, utilizando fundamentalmente las ayudas de la Unión Europea. Estas actuaciones se hicieron sin unos estudios de demanda y viabilidad económica fiables, lo que ha ocasionado en algunos casos el desuso y consiguiente pérdida de las instalaciones

---

realizadas. Estas situaciones desacreditan las buenas actuaciones de reutilización y visualizan la importancia que tiene la planificación en cualquier campo. Otro tanto cabe decir de las actuaciones llevadas a cabo por el MAGRAMA bajo el amparo del interés general o por convenio con las CCAA. Sólo en los años recientes se observa un cambio de actitud en distintas administraciones, que están desarrollando Planes de Reutilización específicos a nivel local.

Para poder realizar una buena planificación es necesario contar con un mínimo de información de referencia. La dificultad de contar con información centralizada generada por las distintas AAPP (Administraciones Públicas) y entidades de gestión de este recurso, evita el poder consensuar datos y saber realmente el desarrollo a nivel global. El recopilar y evaluar esta información, que por el momento es escasa y fragmentada, es un trabajo necesario para poder potenciar esta actividad y presentarla de forma rigurosa en foros de interés como el de la Unión Europea.

Hay que fortalecer la cultura de la transparencia y la libre información, aportar más medios para centralizar y evaluar datos, y contar con estudios e investigaciones suficientes para justificar correctamente las decisiones de lo que podría ser un proyecto de reutilización más global.

La reutilización de los efluentes depurados debe realizarse en aquellos lugares donde sea necesario hacerse, es decir, donde la existencia de demanda real, de efluente depurado, la viabilidad económica y la falta de alternativas medioambientales mejores lo permita.

Como resumen a este punto y preámbulo de los siguientes puntos a tratar en este apartado, hay que poner de manifiesto que para que la planificación de la reutilización pueda ser considerada como tal, son necesarias al menos las exigencias que se esquematizan a continuación:

- ✓ Disponibilidad de efluentes depurados con una determinada calidad
- ✓ Realización de estudios de viabilidad técnico-económica, que deberían incluir:
  - Análisis de recursos y demandas
  - Análisis de riesgo
  - Estudio de posibles usuarios
  - Sustentabilidad económica de la reutilización. Análisis de coste-beneficio de los aspectos económicos, ambientales y sociales. Sea el usuario o la AAPP hay que recuperar el coste
  - Estudio de los impactos ambientales y sanitarios
- ✓ Análisis de los impactos sociales y aceptación pública de la reutilización. Información a los ciudadanos de los proyectos de reutilización y participación de los agentes interesados en su desarrollo.
- ✓ Adopción de instrumentos eficaces para eliminar o reducir a límites aceptables los riesgos sanitarios de la reutilización:
  - Normativas que definan la calidad del agua regenerada en función de los usos
  - Guía de buenas prácticas en todas las etapas: planificación, proyectos, gestión y usos
  - Sistemas de análisis de riesgos y de identificación y control de puntos críticos
- ✓ Selección de los tratamientos de regeneración adecuados, fiables y eficaces. Institutos de verificación y acreditación de tecnologías.
- ✓ Estudio de los sistemas de transporte y regulación del agua regenerada.
- ✓ Definición de los sistemas de gestión y explotación de los sistemas de reutilización en el contexto de la explotación de los sistemas de calidad y de control interno.

- 
- ✓ Establecimiento por parte de la Administración de los sistemas de control externo de la calidad de los efluentes regenerados.
  - ✓ Establecimiento de un sistema de financiación, tanto de los costes de implantación, como de gestión y mantenimiento de las instalaciones, que permita la sustentabilidad a la reutilización.

Del 2007 al 2015 ha habido cambios sustanciales en lo que respecta a la normativa con la publicación del RD 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de efluentes depurados, una Guía que desarrolla ciertos aspectos de este RD y algunos de los comentados anteriormente, y un intento de Plan Nacional. Aun así, la reutilización sigue siendo en muchas ocasiones una alternativa para paliar periodos de sequía, siendo relegada a un segundo plano cuando se cuenta con agua de otras fuentes.

## **2. Necesidad de impulso político y voluntad de coordinación entre administraciones**

El desarrollo de la reutilización implica la existencia de procesos complejos en la toma de decisiones, en los que intervienen los intereses de diversos actores (administraciones, posibles usuarios, ciudadanos, etc.), por lo que su potenciación necesita de un fuerte impulso político.

En las zonas donde la reutilización es una alternativa real, se está realizando al margen de otras administraciones implicadas y de forma aleatoria en función de los problemas hídricos de sus zonas. Este modo de operar está ocasionando incluso distorsiones en el mismo concepto de lo que es la reutilización.

A veces la descoordinación entre las actuaciones de las Administraciones implicadas constituye todavía hoy uno de los aspectos limitantes en el desarrollo de la reutilización. Hay que tener en cuenta la distribución actual de competencias entre las distintas administraciones hidráulicas respecto a la reutilización:

- Los organismos de Cuenca son responsables de las concesiones o permisos administrativos, pero también las Consejerías de Sanidad de la CC.AA. deben realizar un informe preceptivo vinculante para el otorgamiento de dicha concesión.
- La planificación y a veces su ejecución pueden realizarse a través de los Organismos de Cuenca, Comunidades Autónomas y la Administración Local.
- La Administración Central del Estado que establece las condiciones básicas de la reutilización según los distintos usos.
- La responsabilidad de la gestión y explotación de los sistemas de reutilización puede recaer en empresas dependientes de Comunidades Autónomas, entidades estatales, Ayuntamientos, Comunidades de Regantes, etc.
- El control de la calidad de los efluentes regenerados corresponde a los organismos dependientes de Sanidad (en los aspectos sanitarios), a los de Agricultura (parámetros agronómicos) y a los Organismos de Cuenca (aspectos concesionales), etc.

Unificar metodologías de gestión, control, y planificación en este recurso es de vital importancia para conseguir una concienciación social y una minimización de los riesgos.

## **3. Establecimiento de un marco legislativo común para la reutilización**

Antes de que saliera el RD 1620/2007 que se analizará más adelante, existían algunas normativas de ámbito autonómico y normativas dentro de algunas CCHH como en la del Tajo, donde se aprecia que la mayoría de ellas se basan en los límites establecidos en la revisión del borrador de Real Decreto de criterios mínimos para la reutilización de efluentes depurados propuesto por el MAGRAMA-CEDEX en el año 1999. El borrador de Real Decreto, consiguió establecerse como referencia de las directrices y normativas en otros niveles de la administración española.

En la Tabla 3.4 se resumen los parámetros tanto físicos como biológicos propuestos por diferentes normativas y para los usos más extendidos, tanto nacionales como internacionales, apreciándose la similitud que existe entre ellas. Esta tabla deja patente los diferentes escenarios descritos, parece que ha habido un consenso en los parámetros de calidad a adoptar, con sus consiguientes límites, basados todos ellos en la propuesta del MMA, actual MAGRAMA, del año 1999.

**Tabla 3.4** Comparación de criterios de calidad entre diferentes normativas (Iglesias R., Ortega E., 2006)

Usos	Parámetros	MMA	C.H. Tajo	Cataluña	Baleares	OMS	EPA
Usos y servicios urbanos	Nemátodos, u.L <sup>-1</sup>	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	-
	E. coli, ufc.100 mL <sup>-1</sup>	< 200	< 200	< 200	< 200	<	0
	SS, mg.L <sup>-1</sup>	< 20	< 25	< 20	< 30	1.000	-
	DBO <sub>5</sub> , mg.L <sup>-1</sup>	-	< 25	-	< 20	-	< 10
Riego de campos de golf	Turbidez, UNT	< 10	-	< 5	< 5	-	< 2
	Cloro residual, mg.L <sup>-1</sup>	-	-	-	0,3	-	1
Riego de cultivos de consumo en crudo	Nemátodos, u.L <sup>-1</sup>	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	E. coli, ufc.100 mL <sup>-1</sup>	< 200	< 10	< 200	< 200	<	0
	SS, mg.L <sup>-1</sup>	< 20	< 20	< 20	< 45	1.000	-
	DBO <sub>5</sub> , mg.L <sup>-1</sup>	-	< 20	-	< 30	-	< 10
	Turbidez, UNT	< 10	-	< 5	-	-	< 2
	Cloro residual, mg.L <sup>-1</sup>	-	-	-	-	-	1

Esta propuesta del MAGRAMA fue revisada en varias ocasiones desde su creación en 1996. En todas ellas, el CEDEX como colaborador técnico del MAGRAMA en la redacción de la misma, ha estado presente.

A pesar del R.D. sigue habiendo ciertas diferencias entre CCAA a la hora de afrontar las actuaciones de reutilización y sin duda hay claras diferencias con otras normas internacionales.

No tener un marco legislativo claro puede ralentizar el desarrollo de la reutilización en aquellos casos que no es una primera necesidad, pudiendo causar confusiones a las CCHH a la hora de poder tramitar una concesión. Otro punto son algunas deficiencias que se han encontrado en el R.D y que ya que se comentarán más adelante.

En el caso de exportaciones de productos agrícolas, por ejemplo, al no tener una norma internacional de referencia o al menos europea para la reutilización de efluentes depurados, puede generar rechazo de estos productos en determinados países importadores.

Lo más novedoso en este sentido, son las normas ISO (ISO/TC 282/SC 2) en redacción en 2015, para el uso de agua regenerada en el ámbito urbano. Existe cierta inquietud por parte de la U.E. en sacar una Guía de recomendaciones y para ello ha comenzado con diversos proyectos de demostración tipo DEMOWARE (Innovation Demonstration for a Competitive and Innovative European Water Reuse Sector, <http://demoware.eu/en>) dentro del 7º Programa marco de investigación y desarrollo tecnológico y la Comisión ha pedido a los diferentes estados miembros (EM) que propongan sobre la mesa sus experiencias en este tema para llegar a un futuro acuerdo que bien podría terminar en una directiva comunitaria.

---

#### **4. Instaurar metodologías fiables para la gestión del riesgo sanitario en las actuaciones de reutilización.**

El agua urbana residual es medio transmisor de microorganismos patógenos y sustancias químicas tóxicas que le confieren unos riesgos sanitarios y medioambientales a la hora de su manejo.

En los estudios epidemiológicos realizados por la OMS, el empleo de aguas residuales en la agricultura implica un riesgo real de infección de patógenos como los nematodos y bacterias intestinales teniendo una menor influencia los virus o los protozoos.

Para controlar estos riesgos inherentes a la reutilización, la OMS 2006 propone la siguiente metodología cuyas fases son: evaluación del riesgo, definición del riesgo admisible, fijación de criterios de calidad con su correspondiente tratamiento, gestión del riesgo y evaluación de la eficacia del sistema de gestión del riesgo.

El riesgo en la reutilización del agua residual, viene dado sobre todo por la difusión de enfermedades de origen hídrico, lo cual implica casi a parte iguales, a las administraciones sanitarias y ambientales. Sin un procedimiento de actuación claro y coordinado por parte de estas dos autoridades, no se podrá asegurar un marco de confianza sanitario hacia el ciudadano.

Respecto a los tratamientos de regeneración, se empiezan a resolver algunas incógnitas sobre la fiabilidad y control que proporcionan estos sistemas en la eliminación de organismos patógenos. Aun no siendo necesaria en algunos usos la eliminación total de patógenos, existe una tendencia a conseguir dicha eliminación independientemente del uso. Hay que trabajar intensamente para poder ofrecer un binomio razonable entre el riesgo asumible y la tecnología disponible que es necesario utilizar.

El riesgo está vinculado al contacto de los organismos patógenos con los huéspedes, por lo que se hace necesario un Manual de Buenas Prácticas consensuado y por usos que reduzca este contacto. Las características de la gestión del riesgo deberían estar basadas entonces, en una reducción del contacto, control de los puntos de riesgo en el sistema global, unos sistemas de muestreo y control y una evaluación de datos para poder retroalimentar la fiabilidad de los sistemas de regeneración. Todo este proceso de gestión del riesgo, lleva a los sistemas de regeneración a tener que comportarse como un proceso industrial, donde asegurar la calidad del producto es el objetivo final. Esta gestión en las industrias se está consiguiendo a través de normas de buena manufactura o por sistemas de análisis de riesgos e identificación y control de puntos críticos (APPCC) y parece que esta metodología va a ser la que se imponga para los sistemas de regeneración o al menos es una de las que se está planteando en los grupos de trabajo de la U.E.

Dado que los equipos empleados para la regeneración de efluentes depurados no están exentos de fallos, es necesario establecer unas pautas de funcionamiento y unos puntos de control que permitan conocer la calidad del efluente en todo momento y actuar de forma inmediata sobre el sistema. Es conveniente, por lo tanto, incrementar los estudios en este campo.

En este tipo de sistemas de reutilización deberían estar definidos y consensuados al menos, las técnicas analíticas, puntos y frecuencias de muestreo del sistema de regeneración y sus sistemas auxiliares como almacenaje y distribución, sistemas de predicción y gestión de errores y los procedimientos de alerta para minimizar el impacto de los posibles fallos.

En definitiva, cualesquiera que sean los instrumentos a establecer para la gestión de riesgo, éstos deben servir para establecer un marco de confianza hacia el consumidor de este recurso.

---

## **5. Establecer como objetivo la aceptación social de la reutilización, potenciando la transparencia y participación ciudadana**

Sin el apoyo de la sociedad, la reutilización será un recurso marginal y secreto dentro del debate entre las administraciones concesionarias y los usuarios del mismo, normalmente agricultores.

Si se quiere potenciar realmente este recurso, es necesaria la participación y aceptación social. Hay que difundir los beneficios y los riesgos de esta práctica de manera que la sociedad decida si les compensa o no contar con ella.

La concienciación social es una ardua tarea que no hay que despreciar. Seguramente que, si se pregunta a un conjunto de personas, sin una información previa, sobre lo que piensa del uso del agua depurada regenerada, el 50 % de ésta será reticente a su uso. Para hacer frente a esta realidad, hay que dejar claro para qué usos se va a destinar esta agua regenerada y las posibilidades de control y riesgo que existen.

El informar a la sociedad de los posibles proyectos de reutilización, implica a la misma, generando una participación que mejora indiscutiblemente los proyectos a realizar. No sería la primera vez que los proyectos a realizar o construidos no han cumplido su fin por falta de apoyo social.

Para que exista este apoyo es necesario entre otras actividades informar a través de medios de comunicación como la televisión o/y la prensa y realizar programas de educación desde las escuelas sobre la importancia de esta actividad.

Hay que informar y no convencer, y, sobre todo, hacer partícipes en el proceso de planificación a los ciudadanos en general y en particular, a los grupos que más presión social pueden ejercer en estos temas como son los usuarios, ecologistas, investigadores, planificadores de otros recursos hídricos y demandantes del agua regenerada.

La transparencia y el acceso a la información da confianza al ciudadano respecto a esta u otra actividad.

El hecho de tener tecnología y medios suficientes para realizar esta actividad no asegura el desarrollo de la misma sino se cuenta con un amplio apoyo social.

## **6. Desarrollo de una nueva cultura de la gestión de las infraestructuras de reutilización**

La reutilización de aguas depuradas en España precisa en estos momentos de una cierta redefinición para poder ser acogida de forma uniforme y sin confusiones tanto por las supuestas administraciones gestoras como por la sociedad. Hay que definir qué es y para qué sirve esta práctica, sus objetivos, ventajas e inconvenientes, para poder generar así una plataforma sólida de discusión o simplemente saber de qué estamos hablando, ya que actualmente, existen diferentes interpretaciones de esta actividad.

En lo relativo a la Gestión de la reutilización, en principio parece lógico que se apoye en las estructuras de gestión que ya se han desarrollado para la Gestión del Saneamiento y la Depuración en España. La gestión del Saneamiento corresponde a los entes locales, los cuales pueden llevarla a cabo bien directamente o bien a través de una empresa gestora contratada al efecto. En algunos casos esta gestión es desempeñada directamente por un organismo creado por la Administración regional o autonómica que se hace cargo, mediante una subrogación de competencias, de la gestión del citado servicio.

La gestión de la reutilización a nivel local parece lógica dentro del marco de gestión de la depuración, ya que ésta le proporciona el agua a tratar en cantidad y en calidad. Esta situación, no debe confundir

---

a este recurso con el aprovechamiento de un vertido, ya que, si se quiere promocionar esta práctica, el concepto de la reutilización debería ir desvinculado al agua residual y aparecer como un recurso similar al de abastecimiento y, por lo tanto, parejo en metodología de gestión, teniendo solamente en cuenta la calidad producida y no el origen del agua.

El hecho de que la reutilización conlleve riesgos potenciales, no debe generar un rechazo si se realiza con un control riguroso y una visión correcta. Si el agua regenerada se gestionara como suministro, con cánones del abastecimiento sobradamente conocidos e instaurados, y no como subproducto de la depuración, ayudaría a minimizar los miedos referentes a la sanidad pública. Hay que diferenciar, por tanto, entre la depuración y la regeneración, son conceptualmente distintas y eso debería observarse en la terminología, por ejemplo, hablar de agua regenerada y no agua depurada o proveniente de un terciario, y diferenciar claramente las EDARs de las ERAs.

Esta nueva cultura de gestión de la reutilización de efluentes regenerados incentiva a establecer controles e instrumentos más rigurosos que los señalados para la depuración lo que exige laboratorios homologados en las propias instalaciones y personal cualificado. Esta filosofía de gestión abriría una nueva puerta de negociación más favorable con las entidades sanitarias responsables más reticentes.

### **7. Establecer sistemas de financiación que permitan la viabilidad de la reutilización**

El coste del agua regenerada, teniendo en cuenta en su caso posibles subvenciones por criterios objetivos de la Administración, debe repercutir única y exclusivamente sobre el usuario, abandonándose la práctica de incluirlo en el coste del agua depurada.

Se hace necesario por tanto unos planes de reutilización que incluyan los costes de las instalaciones y la forma de financiación de todos sus conceptos.

Este punto es sin duda uno de los más comprometidos a la hora de establecer un programa para el avance de la reutilización en nuestro país. El concepto del beneficio económico es necesario para encajar esta actividad en los actuales canales económicos, pero la valoración del impacto sobre el medioambiente o la sociedad de cualquier actividad, es un tema a solventar.

Conceptos como el que está desarrollando la Agencia Catalana del Agua (ACA) con el Canon de disponibilidad, puede facilitar la sustitución de recursos convencionales por agua regenerada al proporcionar un precio más competitivo en función al bien común generado en el cambio.

### **8. Desarrollar un programa de Investigación, Desarrollo y Experimentación (I+D+I), cuyos objetivos sean la reducción del riesgo sanitario y la mejora de la eficiencia de los sistemas de regeneración.**

La evolución de las normas para acotar los riesgos de la reutilización de efluentes depurados, han impulsado algunos estudios e investigaciones como los mejores indicadores de bacterias y virus, desarrollo de técnicas de determinación de protozoos, posible implantación de determinaciones de toxicidad o el mejor empleo de técnicas analíticas para evaluar la desinfección.

Es necesario desarrollar y destinar más fondos a estudios sobre la salud y el impacto medioambiental de la reutilización para poder evaluar con criterio la gestión de este recurso.

El análisis de la eficiencia, eficacia y fiabilidad de nuevas tecnologías de regeneración con respecto al cumplimiento de unos límites de calidad establecidos es base para cumplir con garantías una cierta normativa.



---

## 4 DESARROLLO DEL MARCO NORMATIVO

---

### 4.1 Marco normativo para la reutilización directa de efluentes depurados

La incorporación al marco normativo español de directivas sobre la calidad de las aguas continentales y marítimas tales como la Directiva Marco (Diario Oficial de las Comunidades Europeas núm. L327/1-71.Directiva 60/2000/CE) o de calidad de las aguas de baño (Diario Oficial de las Comunidades Europeas núm. L64/37-51.Directiva 2006/7/CE), junto a la necesidad de tratamientos cada vez más estrictos debido a la presencia de contaminantes como los prioritarios o emergentes (Decisión nº 2455/2001/CE Diario Oficial nº L 331 de 15/12/2001 p. 0001 – 0005), han hecho del agua regenerada una opción a tener en cuenta al proporcionar un tratamiento adicional al agua depurada que permite reforzar la calidad del efluente regenerado, tanto desde punto de vista sanitario como medioambiental.

El agua a tratar en una estación de regeneración se ve afectada por la normativa establecida para el control de los vertidos como por ejemplo ordenanzas municipales de vertidos a la red de alcantarillado. En muchas ocasiones, el mal tratamiento y control de estos vertidos merma las posibilidades de reutilización de estas aguas depuradas.

El agua regenerada tiene que cumplir lo primero con lo especificado en la autorización de vertido para aguas depuradas y después con lo especificado para el uso donde vaya a ser destinada, por tanto, tiene que estar acorde con toda la normativa que afecta a las aguas residuales y con la relativa al uso en concreto. Ejemplos a este respecto podrían ser:

- El RD 849/86, de Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Este Real Decreto parcialmente modificado por los Reales Decretos 1315/1992, 419/1993, 1771/1994, 995/2000, 606/2003 y por la Orden MAM/1873/2004, Art. 257 a 259 donde se establece las condiciones de vertido en aguas subterráneas, que en el caso de recarga de acuíferos habrá que tenerlas en cuenta.
- Vertidos en zonas costeras: Ley de Costas 22/1988; RD 258/1989, Orden 31/10/1989 y 28/10/1992. Incorporan las Directivas 76/464/CEE y 86/280/CEE, relativas al vertido de determinadas sustancias peligrosas al mar y los valores límite que pueden alcanzar dichas sustancias en los casos donde la estación regeneradora vierta al mar o en zonas sensibles de la costa.
- Real Decreto 60/2011, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, que tiene por objeto establecer normas de calidad ambiental (NCA) para las sustancias prioritarias y otros contaminantes de riesgo, que modifica el RD 606/2003 de 23 mayo y el RD 907/2007 de 6 julio. Esta legislación afecta a cualquier tipo de uso de reutilización de aguas donde debe asegurarse las NCA o cualquier otro contaminante no peligroso contenido en la autorización de vertido.
- Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis aplica en todos los usos donde se prevea riesgo de aerosolización.

Respecto al tratamiento de las aguas residuales urbanas en concreto, la Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas (Diario Oficial núm. L 135 de 30/05/1991 pág. 0040-0052) y sus transposiciones al ordenamiento jurídico español mediante el RD Ley 11/95 y RD 509/96, son la base y las que marcan las mínimas necesidades de calidad del agua para poder ser reutilizadas.

---

El cumplimiento de esta Directiva 91/271/CEE se realizó a través del Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (PNSD) 1995-2005, que coordinó las actuaciones de las diversas Administraciones Central, Autonómica y Local. Tras la finalización del PNSD, el Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino (MARM) en colaboración con las Comunidades Autónomas, redactó el Plan Nacional de Calidad de las Aguas, Saneamiento y Depuración 2007-2015 (PNCA), cuyos objetivos se centran en el cumplimiento de los requerimientos todavía no satisfechos de la Directiva 91/271/CEE y las actuaciones derivadas de la aplicación de la Directiva Marco del Agua (Directiva 60/2000/CE).

El desarrollo de este PNCA ha supuesto un nuevo impulso de la depuración y por tanto de la regeneración, alcanzando esta vez a las pequeñas poblaciones, lo que obliga a profundizar en el estudio de las tecnologías adecuadas para este segmento de población, tanto para la depuración de sus aguas residuales, como para la regeneración de sus efluentes depurados.

La reutilización de las aguas depuradas está regulada a nivel Estatal de manera específica por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. En 2010 el MARM publica una Guía para orientar y proponer procedimientos y criterios para la aplicación del citado Real Decreto 1620/2007 y este mismo año lanza la primera versión del Plan Nacional de Reutilización de Aguas (PNRA) donde se contemplan numerosas actuaciones para ayudar a cumplir con el nuevo marco normativo.

Este RD 1620/2007 desarrolla el artículo 109 de la Ley de Aguas del 2001 donde se indica que el Gobierno establecerá las condiciones básicas para la reutilización de las aguas, precisando la calidad exigible a las aguas depuradas según los usos previstos. Igualmente se establece que la reutilización requerirá una concesión administrativa, salvo en el caso de que fuese solicitada por el titular de la autorización de vertido que dio lugar a la depuración de dichas aguas, en cuyo caso se requerirá solamente una autorización administrativa.

El Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RDPH) aprobado por Real Decreto 849/1986 de 11 de abril, determina las condiciones y trámites necesarios para la concesión de la reutilización de aguas. El otorgamiento de dicha concesión corresponde al Organismo de Cuenca, previo informe preceptivo de las autoridades sanitarias de las Comunidades Autónomas, que tendrá carácter vinculante.

El Real Decreto 1620/2007 establece las condiciones básicas para la reutilización, así como los procedimientos necesarios para obtener las concesiones y autorizaciones, derogando los artículos 272 y 273 del RDPH.

Tanto el Real Decreto-ley 11/1995, por el que se establecen normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas, como RDPH han sido recientemente modificados por el RD 1290/2012, donde se indica que en el caso de que el solicitante de la autorización de vertido deba solicitar, además, una concesión para el aprovechamiento privativo de las aguas, o pretenda la reutilización de las aguas, la documentación que se precise, se presentará conjuntamente con la que resulte necesaria a los efectos de obtener dicha concesión.

Hasta la promulgación del R.D. 1620/2007, las condiciones de la reutilización eran establecidas en cada concesión por el Organismo de Cuenca en base a unos criterios establecidos en sus planes o en recomendados que habían propuesto algunas Comunidades Autónomas o incluso en normativa promovida por Ayuntamientos. Algunas de estas recomendaciones y condiciones para la reutilización se recogen en la Tabla 4.1.

Esta dispersión de criterios respecto a los límites de calidad de las aguas regeneradas generaba una falta de equidad respecto a las obligaciones de los concesionarios y en ocasiones incluso el rechazo de peticiones por parte de las administraciones implicadas.

**Tabla 4.1** Normativas y recomendaciones sobre condiciones de la reutilización establecidas en diferentes ámbitos de la administración española (Iglesias R., 2009)

<b>En los Planes Hidrológicos de Cuenca</b>	
Tajo	Establece con detalle las condiciones sanitarias de la reutilización: aspectos generales, calidad de las aguas reutilizadas según usos, parámetros tóxicos, criterios de cumplimiento, métodos de análisis y frecuencia de muestreo, 1999.
Baleares	Plan Hidrológico de las Islas Baleares, 2001.
Guadalquivir	Incluye los criterios de calidad del agua residual para uso agrícola y forestal, 1999.
<b>En el ámbito autonómico</b>	
Cataluña	Guía para la prevención del riesgo sanitario derivado de la reutilización de las aguas depuradas. Consejería de Sanidad de la Generalitat, 1994. Guía para el diseño y control de sistemas de reutilización. Consejería de Sanidad de la Generalitat, 1994. Criterios de calidad del agua depurada según usos. Agencia Catalana del Agua, 2003. Directrices para la reutilización de aguas depuradas en campos de golf". Agencia Catalana del Agua, 2005.
Baleares	Guía para la reutilización de las aguas depuradas. Consejería de Sanidad, 1995. Ley de campos de golf (Gobierno Balear, 1988)
Comunidad Valenciana	2º Plan Director de Saneamiento y Depuración". Generalitat Valenciana. 2004
<b>En el ámbito local</b>	
Ayuntamiento Madrid	Ordenanza Municipal de Gestión y uso eficiente del agua de la ciudad de Madrid. 2006

En la Tabla 4.2 se resumen los valores límites recogidos en las normas y recomendaciones citadas en la Tabla 4.1 además de los establecidos en el Real Decreto 1620/2007 frente a las recomendaciones dadas por alguno de los grupos de trabajo europeos para la reutilización en países mediterráneos (G. Kamizoulis, A. Bahri, F. Brissaud, and A.N. Angelakis. Wastewater recycling and reuse practices in Mediterranean region: Recommended Guidelines, 2001).

Se aprecia una gran similitud entre los criterios de las distintas recomendaciones españolas y los establecidos finalmente en el Real Decreto, sin embargo, en comparación con el marco normativo internacional, nos alejamos en algunos aspectos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) o las establecidas en EEUU (Título 22, 2000).

El RD 1620/2007 se ha quedado, por decirlo de alguna manera, en medio de la OMS y el Título 22. Existen grupos de expertos que siguen apostando por la ausencia de coliformes en prácticamente todos los usos, ya que, en costes de tratamiento, una mejor desinfección no supone apenas coste adicional. Sin embargo, las recomendaciones para una posible normativa europea parecen inclinarse más por lo promulgado por la Organización Mundial de la Salud. En este sentido, la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS) ha publicado en 2011, un Manual de Buenas Prácticas de uso de aguas regeneradas basado en la aplicación de los sistemas APPCC (Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico) tal y como propone la revisión de la OMS del 2006.

En la actualidad, la normativa contempla muchos otros aspectos como el medioambiental, el económico o los requerimientos específicos de cada uso. La Tabla 4.3 (Salgot M., 2005) recoge parte de estas recomendaciones, criterios e informes sobre normativa de reutilización a lo largo del tiempo.

**Tabla 4.2** Comparativa de criterios de calidad entre recomendaciones y normativas, (Iglesias R., 2009)

Usos	Parámetros	RD 1620	C.H. Tajo	Cataluña	Baleares	Valencia	MED
Usos urbanos. Riego de campos de golf	Nemátodos, u.L <sup>-1</sup>	< 0,1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	E. coli, ufc.100 mL <sup>-1</sup>	< 200	< 200	< 200	< 200	< 200	< 200
	SS, mg.L <sup>-1</sup>	< 20	< 25	< 20	< 30	< 20	< 10
	DBO mg.L <sup>-1</sup>	-	< 25	-	< 20	-	-
Riego de cultivos sin restricción	Turbidez, UNT	< 10	-	< 5	< 5	-	-
	Nemátodos, u.L <sup>-1</sup>	< 0,1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	E. coli, ufc.100 mL <sup>-1</sup>	< 100	< 10	< 200	< 200	< 300	< 1000
	SS, mg.L <sup>-1</sup>	< 20	< 20	< 20	< 45	< 29	< 20
	DBO, mg.L <sup>-1</sup>	-	< 20	-	< 30	-	-
	Turbidez, UNT	< 10	-	< 5	-	-	-

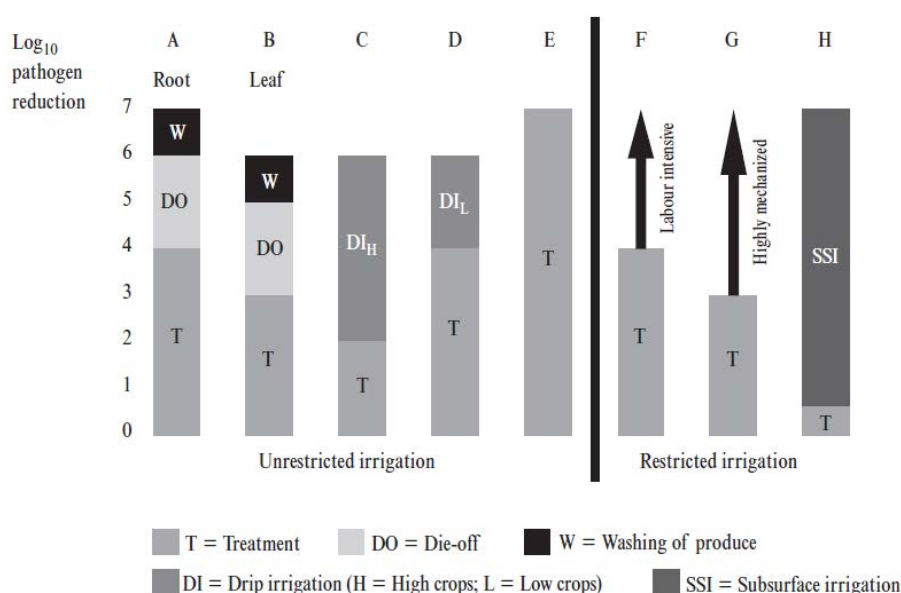
**Tabla 4.3** Datos históricos y estándares de calidad del agua residual regenerada (adaptado de Paranychianakis et al., 2010 y modificado Iglesias R., 2015)

AÑO	DATOS Y CRITERIOS DE CALIDAD
1918	El California State Board of Public Health publica las "First regulations for use of sewage for irrigation purposes in California"
1952	Primeras normas en Israel
1973	OMS: 100 CF/100 mL, 80% de muestras
1978	Nuevas normativas de reutilización del Estado de California: 2.2 CT/100 mL
1978	Normas en Israel: 12 CF/100 mL en el 80% de muestras; 2,2 CF/100 mL en el 50% de muestras
1983	Informe del Banco Mundial (Shuval <i>et al.</i> , 1986)
1983	Estado de Florida: No detección de <i>E. coli</i> en 100 mL
1984	Estado de Arizona: Estándares para virus (1 virus/40 L) y <i>Giardia</i> (1 quist / 40 L)
1985	Informe de Feachem <i>et al.</i> , 1983
1985	Informe de Engelberg (IRCWD, 1985)
1989	Recomendaciones de la OMS: 1000 CF/100 mL 1 huevo de nemátodo/L
1990	Estado de Texas: 75 CF/100 mL
1991	Recomendaciones sanitarias francesas: Basadas en la OMS
1992	Recomendaciones de la US EPA para la reutilización: No detección de CF en 100 mL (media de 7 días. No más de 14 CF/100 mL en ninguna muestra)
2000	Revisión de los criterios del estado de California (Title 22)
2003	Revisión de las recomendaciones de la OMS (1989) Recomendaciones italianas basadas en el Título 22 de California
2004	Aparece el nuevo manual de la US EPA
2005	La OMS sugiere que se apliquen criterios de riesgo en vez de estándares
2006	Revisión de las recomendaciones de la OMS (1989)
2007	España: Real Decreto 1620/2007 de 7 diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. (100 UFC.100 mL <sup>-1</sup> , 1 huevo/10 L nematodos, 10 UNT de turbidez)
2010	Francia establece criterios para la reutilización (Journal Officiel de la R'epublique Francaise,
2011	Grecia regula algunos temas referidos al reuso (Common Ministerial Decision 2011)
2014	La CE empieza con trabajos enfocados a sacar una posible normativa
2015	Se trabaja en unas normas ISO sobre la reutilización en el medio urbano.

## 4.2 Criterios y estándares internacionales

Las recomendaciones de referencia a nivel mundial, y en concreto para el uso agrícola, son las de la OMS (Organización Mundial de la Salud) publicadas 1989, con sus posteriores revisiones y ampliaciones (OMS, 2006). Esta norma combina tratamientos básicos de depuración y unas buenas prácticas basadas en diferentes niveles de protección para evitar problemas sanitarios, tal y como muestra la Figura 4.1. En este sentido se adaptaría mejor a sistemas basados en el análisis de peligros y cálculo de riesgos, es decir, no siempre se tiene que optar por el tratamiento tecnológicamente más desarrollado sino uno que permita llegar a la calidad suficiente para el uso al que va destinado, donde el riesgo sea aceptable y el proyecto viable dentro de la circunstancia de cada país.

La gestión del riesgo que propone la OMS del 2006 basado en la identificación de puntos de control, como por ejemplo el sistema APPCC de la traducción de HACCP (Hazard Assessment Critical Control Points) usado en la industria alimentaria, ayudaría a establecer un nivel de tolerancia del riesgo ajustado a las necesidades de cada actuación de reutilización (Havelaar, 1994). El manejo del riesgo consiste fundamentalmente, en un control cuantitativo químico y manejo del riesgo microbiológico (Godfrey et al., 2004).



**Figura 4.1** Reducción de patógenos con diferentes medidas de protección, (OMS, 2006)

Este concepto del manejo del riesgo tiene seis pasos fundamentales: definir la tolerancia de una población a una determinada enfermedad, asumir un porcentaje de infectados, estimar el máximo número de patógenos a los que el usuario puede estar expuesto, estimar la reducción necesaria del patógeno para llegar al máximo anteriormente descrito, establecer medidas de protección (tratamiento del agua o impedir contacto del agua con el usuario por ejemplo), establecer un sistema de control y monitorización del sistema.

En contraposición a lo propuesto por la OMS, los EEUU, país pionero en normativa específica de reutilización, marca otra tendencia donde los estándares de calidad y manejo de este recurso se acercan más al concepto de suministro del agua potable, como es el caso del Título 22 de California (State of California, 1978). Optan por el mejor tratamiento disponible y altas calidades del agua suministrada evitando así tener que realizar recomendaciones en el uso que minimicen los posibles riesgos de una calidad sanitaria inferior.

En este país cada estado tiene su propia normativa y los que no la han desarrollado basan su regulación en las recomendaciones dadas por la Agencia Medioambiental Estadounidense (USEPA). Esta agencia sacó sus primeras recomendaciones en 1980 y las han revisado en 1992, 2004 y en 2012.

En la Tabla 4.4 se recogen los criterios de calidad establecidos en la última revisión de la USEPA, los del estado de California (Título 22 completado en California Code of Regulations, 2001) y los de la OMS del 1989 revisados en 2006 para algunos usos, en los que se puede observar notables diferencias en los niveles de calidad y recomendaciones establecidas por cada organismo.

**Tabla 4.4** Comparación de criterios de calidad de algunas normativas Internacionales, (Iglesias R. 2012)

Usos	Parámetros	Título 22	USEPA, 2012	OMS, 2006
Usos urbanos sin restricción. Incluye campos de golf, riego de calles y parques.	Nemátodos, u.L <sup>-1</sup>	-	-	
	Coliformes fecales, ufc.100 mL <sup>-1</sup>	< 2,2	No detectable	
	SS, mg.L <sup>-1</sup>	-	-	
	DBO mg.L <sup>-1</sup>	-	< 10	
	Turbidez ,UNT	< 2	< 2	No regula
	pH	-	6-9	
	Condiciones de tratamiento	Oxidación	Secundario	
		Coagulación	Filtración	
		Filtración	Desinfección	
		Desinfección	1mg/L Cl <sub>2</sub> residual	
Riego de cultivos sin restricción y sin procesar para comercialización	Nemátodos, u.L <sup>-1</sup>	-	-	< 1
	Coliformes fecales, ufc.100 mL <sup>-1</sup>	< 2,2	No detectable	< 1.000
	SS, mg.L <sup>-1</sup>	-	-	-
	DBO, mg.L <sup>-1</sup>	-	< 10	-
	Turbidez, UNT	< 2	< 2	-
	pH	-	6-9	-
	Condiciones de tratamiento	Oxidación	Secundario	Secundario
		Coagulación	Filtración	BPR*(almacenaje,
		Filtración	Desinfección	riego localizado)
		Desinfección	Desinfección	MPS**(vacunas,
			1mg/L Cl <sub>2</sub> residual	higiene personal)

\* Buenas Prácticas Reutilización para el riego \*\* Medidas de Protección Sanitarias

En Europa prácticamente todos los países del mediterráneo realizan algún tipo de reutilización de sus aguas residuales. En la actualidad no existe legislación europea y la única referencia al respecto está en el artículo 12 de la Directiva 91/271/CEE que propone la reutilización del efluente depurado cuando sea apropiado, sin especificar cuáles son estas condiciones de posible uso.

Algunos países europeos con normativa específica en reutilización son Francia (Journal Officiel de la République Française, 2010; JORF num. 0153, 4 julio 2014), Portugal (NP 4434, 2005), Grecia (Creek Common Ministerial Decision, CMD NO 145116 2011), Chipre (KDP 772/2003; KDP 269/2005) o Italia (Decreto legislativo nº185, 2003; Decreto legislativo nº152, 2006). Estudios comparativos (Angelakis, 1999) muestran una disparidad de criterios entre estas normativas donde países como Italia optan por criterios muy restrictivos tipo Título 22 de California mientras Francia se aproxima más a lo recomendado por la OMS.

Respecto a la calidad según el uso, AQUAREC, (www.aquarec.org) un proyecto financiado por la Unión Europea (U.E.) finalizado en el 2006, identificó cinco calidades: a) agrícola, b) urbano, recarga de acuíferos y recreativo, c) industria d) producción agua potable directa o indirecta y e) mixtos y dio unas calidades mínimas por uso.

---

En general, los parámetros que se están regulando en este tipo de normas para las aguas reutilizadas son patógenos, metales pesados, nutrientes, salinidad, compuestos orgánicos tóxicos y sustancias endocrinas y farmacéuticas. Dentro de los posibles patógenos indicadores (bacterias, helmintos, protozoos, y virus) los más utilizados a nivel mundial son *Escherichia coli*, enterococci, *Clostridium* y bacteriofagos (Havelaar et al. 1993). Respecto a los metales pesados, suelen estar regulados en la normativa para vertidos o en normas específicas en función del tipo de suelo. Los más regulados son el cadmio, mercurio, cromo, cobre, níquel y plomo.

Los nutrientes contenidos en las aguas depuradas, nitrógeno, fósforo y potasio, son fuente de nutrientes para los cultivos. Las cantidades de estos compuestos en el agua depurada pueden llegar a cubrir las necesidades de algunos cultivos, aunque otros, pueden verse afectados en caso de no hacerse un buen manejo de los mismos. Por otro lado, el exceso de estos nutrientes tiene que ser controlado ya que contribuyen a nitrificar las aguas subterráneas y a eutrofizar las superficiales, por ello, existe una tendencia a eliminar los nutrientes en las aguas depuradas y realizar la gestión habitual de nutrientes en los cultivos que utilizan esta agua reutilizada.

La aplicación de agua depurada sin desalar incrementa la salinidad del suelo debido a los contenidos altos en sales (sodio, boro y cloro) en comparación con las aguas continentales. Existen limitaciones en sales en función de los cultivos y los suelos. El RAS, relación de absorción de sodio, es un parámetro que frecuentemente se añade como limitante en normas de reutilización cuando el uso es agrícola.

Las aguas de procedencia doméstica y con contenidos industriales contienen un amplio rango de sustancias orgánicas, alguna de ellas persistentes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), bifenilos policlorados (PCBs) o los orgánicos más comunes que son los detergentes o surfactantes. Todos ellos, al igual que los contaminantes emergentes tipo hormonas y fármacos, están en estudio y no se tiene todavía, una relación clara entre la concentración en la que se hayan este tipo de sustancias en los efluentes depurados y la posible causa-efecto en el medioambiente o la salud pública. Por ello todavía no se han incluido como parámetros a limitar en normativas para la reutilización. Sin embargo, en usos como la recarga directa de acuíferos, se realizan tratamientos muy exhaustivos con membranas o desinfecciones avanzadas con radiación ultravioletas y ozono, para eliminar en lo posible, este tipo de sustancias.

Como ya se comentó en la introducción, la Comisión Europea tiene intención de sacar para el 2016 algún tipo de guía de recomendaciones o reglamentación que podría convertirse en directiva, para la reutilización de efluentes depurados dando así un marco de actuación de lo que sería apropiado dentro de esta práctica.

El tema es complejo ya que se sigue intentando controlar en una sola norma varios niveles de actuación como son el sanitario, el medioambiental y el agronómico en el caso de que el agua fuera para este fin. Aún se antoja más difícil de abordar si se pretende solucionar el vertido de contaminantes prioritarios y emergentes en esta etapa, cuando lo razonable sería evitarlo en etapas anteriores, por ejemplo, en origen, retirando los productos químicos que los producen.

El European Parliamentary Research Service (EPRS, 2015) presentó un informe "Water Legislation: Cost of Non-Europe Report" donde desarrollaba cinco casos de estudio del actual marco legislativo europeo en aguas y su implementación, así como una posterior evaluación de las posibles consecuencias de un mayor desarrollo de este marco, concluyendo, para cada caso, unas recomendaciones. Uno de los casos de estudio es el de la reutilización de las aguas residuales donde concluye que sería interesante realizar un marco común para el uso seguro. En este mismo año, la internacional estándar (ISO/TC 282/SC 2), tratan de recoger todas las facetas de la reutilización en el uso urbano, diseño, manejo y evaluación, donde se muestra tanto los posibles parámetros que habría que controlar como la manera de actuar para evitar posibles riesgos (<http://www.iso.org>).

---

La Comisión Europea (C.E.) viene impulsando desde el 2014 una iniciativa sobre reutilización de aguas residuales como una medida de mejora de la eficiencia del uso del recurso, sin perder las condiciones de calidad y salubridad necesarias. En esta iniciativa se ha venido trabajando en el marco de la Estrategia Común de Implantación de la Directiva Marco del Agua, y fundamentalmente a través del grupo de trabajo de “Programas de medidas”. En el seno de este grupo, en el que se encuentran representados todos los países de la U.E., se han ido presentando las normas o prácticas de cada país sobre reutilización. Además, la Comisión encargó a la consultora BIO-Deloitte y al JRC estudios recopilatorios sobre la reutilización en Europa como base de partida para una posible guía de recomendaciones donde se dieran unos mínimos requerimientos de calidad y un sistema de mantenimiento de esa calidad. Toda la documentación generada se encuentra en <https://circabc.europa.eu/w/browse/657861df-abc2-4d8a-bb4a-227e12c72dad>.

A continuación, se lista cronológicamente los documentos más representativos llevados a cabo por la Comisión Europea, el MAGRAMA, EurEau y la ISO para entender a nivel normativo en qué punto estamos en relación a las normativas y recomendaciones que afectan de algún modo a la reutilización de efluentes depurados:

1985: Ley 29, de Aguas. En su artículo 101 propone la elaboración por parte del Gobierno de una normativa nacional sobre reutilización de aguas. Esta consideración se repite de manera similar en el artículo 109 del RD 1/2001, texto refundido de la Ley de Aguas. 1991. Directiva 91/271 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

1998: Directiva 98/83, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.

2000: Directiva 2000/60 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de agua. Directiva Marco del Agua.

2006: La OMS publica con la colaboración de la Comisión Europea la “Guía para el uso seguro de aguas residuales, grises y excreciones”. Actualmente en revisión. Documento muy extenso que consta de 4 volúmenes: Aspectos normativos y regulatorios; uso en agricultura; uso en acuicultura y; aguas grises y excreciones en agricultura.

2007: Comunicación COM/2007/0414 de la Comisión Europea: Afrontar el desafío de la escasez de agua y la sequía en la Unión Europea. Este documento referido a los problemas de escasez del recurso y eficiencia en el uso dentro de una situación de cambio climático cita la reutilización como Buena Práctica de eficiencia.

Estudio de reutilización de la Iniciativa Europea del Agua en el Mediterráneo de la Comisión Europea (MED-EUWI). Participación del MAGRAMA y de EurEau. Incluye casos de estudio de municipios de España, Europa y de todo el mundo.

RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

2010. Plan Nacional de Reutilización de las Aguas. A finales del 2010 se presentó la Consulta Pública de la versión preliminar del Plan Nacional de Reutilización de Aguas y de su Informe de Sostenibilidad Ambiental.

Guía para la aplicación del RD1620/2007 publicada por el MAGRAMA.

2012: Acciones del BluePrint. Informe sobre la reutilización de las aguas residuales en Europa. Documento encargado por la Comisión Europea a raíz de la Comunicación COM/2007/0414 y



---

elaborado por TYPSA que resume el trabajo realizado por el Grupo de Trabajo de Reutilización del MED-EUWI. Actualizado en la edición del 2013.

Real Decreto 1290/2012, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Consulta Pública sobre las opciones normativas para optimizar la reutilización en la Unión Europea. Las respuestas fueron realizadas principalmente desde España (23,7%), Francia (21,1%), Alemania (9,9%) e Italia (9,9%).

2015: Presentación de los Estudios sobre el potencial de optimización de la reutilización en Europa, encargados por la DG de Medio Ambiente (DG ENVI) de la Comisión Europea y elaborados por las consultoras JRCentre y BIO Deloitte. Además, en paralelo la Comisión Europea ha colaborado con la EIP (Alianza Europea en Innovación del Agua), especialmente con sus grupos: InduRE (Reutilización industrial y reciclado) y WIRE (Resiliencia en agricultura)

Una vez estudiada toda esta información que está generando la CE, es clara la necesidad de un marco común de reutilización en Europa donde se disipen dudas sobre esta práctica. España en este sentido tiene mucho que decir, ya que es el país de la UE que más agua depurada reutiliza y tiene suficiente experiencia para poder demostrar la viabilidad de este recurso tanto en lo que respecta el aspecto sanitario como el medioambiental. Sin duda somos el país que debería liderar la posible normativa europea dado los intereses y experiencia que tenemos en esta actividad.

Tener agua disponible en cantidad y calidad es clave para el desarrollo de una comunidad. Existen publicaciones que claramente demuestran que el uso de aguas depuradas contribuye a este desarrollo y al mantenimiento de las buenas condiciones ecológicas de las masas de agua, pero para ello es necesario establecer un marco normativo lógico y adaptado a las condiciones de cada país para no causar un efecto de desaliento hacia este tipo de actuaciones. Normativas como la griega, italiana o la española podrían evitar continuar con el desarrollo de la reutilización en estos países debido a los altos costes que supone el control, mantenimiento y la necesidad de tratamientos avanzados para cumplir con los criterios de calidad que en estas normas se exigen (N. V. Paranychianakis, M. Salgot, S. A. Snyder & A. N. Angelakis, 2015).

Para finalizar con este apartado comentar que dentro de la comunidad científica todavía no hay consenso sobre los indicadores que habría que utilizar para asegurar un buen control del agua regenerada y entienden que no ajustar bien los límites y el control de la práctica puede suponer el fracaso de esta actividad a futuro.

## 4.3 Legislación española en materia de reutilización

### 4.3.1 El Real Decreto 1620/2007 sobre reutilización de aguas depuradas

El Real Decreto (RD) 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Boletín Oficial del Estado, BOE, núm.294 de 8 diciembre 2007, pág. 50639), ha supuesto un avance considerable en la regulación de la reutilización al clarificar tanto las responsabilidades de las Administraciones Públicas, como las correspondientes a los concesionarios y usuarios finales. Establece los usos permitidos y los criterios de calidad para cada uno de ellos, la frecuencia mínima de muestreos, los métodos analíticos de referencia y los criterios de conformidad. También clarifica los trámites relacionados con las concesiones y autorizaciones, incluyendo un modelo de solicitud para obtenerlas.

---

En el artículo 2 del R.D. se exponen las siguientes definiciones:

- a) Reutilización de las aguas: aplicación, antes de su devolución al dominio público hidráulico o al marítimo terrestre para un nuevo uso privativo de las aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios para alcanzar la calidad requerida en función de los usos a que se van a destinar.
- b) Aguas depuradas: aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable.
- c) Aguas regeneradas: aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.
- d) Estación regeneradora de aguas: Conjunto de instalaciones donde las aguas residuales depuradas se someten a procesos de tratamiento adicional que puedan ser necesarios para adecuar su calidad al uso previsto.
- e) Infraestructuras de almacenamiento y distribución: conjunto de instalaciones destinadas a almacenar y distribuir el agua regenerada hasta el lugar de uso por medio de una red o bien depósitos móviles públicos y privados.
- f) Sistema de reutilización de las aguas: conjunto de instalaciones que incluye la estación regeneradora de aguas, en su caso, y las infraestructuras de almacenamiento y distribución de las aguas regeneradas hasta el punto de entrega a los usuarios, con la dotación y calidad definidas según los usos previstos.
- g) Primer usuario: persona física o jurídica que ostenta la concesión para la primera utilización de las aguas derivadas.
- h) Usuario del agua regenerada: persona física o jurídica o entidad pública o privada que utiliza el agua regenerada para el uso previsto.
- i) Punto de entrega de las aguas depuradas: lugar donde el titular de la autorización de vertido de aguas residuales entrega las aguas depuradas en las condiciones de calidad exigidas en la autorización de vertido, para su regeneración.
- j) Punto de entrega de las aguas regeneradas: lugar donde el titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas entrega a un usuario las aguas regeneradas, en las condiciones de calidad según su uso previstas en esta disposición.
- k) Lugar de uso del agua regenerada: zona o instalación donde se utiliza el agua regenerada suministrada.

Se exponen a continuación los aspectos más relevantes del Real Decreto:

#### Régimen jurídico y disposiciones generales

La reutilización requerirá concesión administrativa, salvo en el caso de que sea solicitada por el titular de una autorización de vertido de aguas ya depuradas, que requerirá solamente una autorización administrativa (Art. 3).

Se establece un orden de preferencias en la obtención del título para poder reutilizar dependiendo de quien lo solicite: cuando el solicitante es el titular de la autorización de vertido tendrá prioridad ante el primer usuario de las aguas y éste frente a terceros.

En todos los casos de reutilización de aguas depuradas, el organismo de cuenca solicitará de las autoridades sanitarias un informe previo que tendrá carácter vinculante (Art. 4)

Se concretan las responsabilidades de los distintos implicados en la reutilización: a) el titular de la concesión o autorización es responsable de la calidad del agua regenerada y de su control desde el momento en que las aguas depuradas entran en el sistema de reutilización hasta el punto de entrega

---

del agua regenerada. El usuario del agua regenerada es responsable de evitar el deterioro de su calidad desde el punto de entrega del agua regenerada hasta los lugares de uso.

Se contempla la posibilidad de que se suscriban contratos de cesión de derechos de uso de agua entre el titular de la concesión de reutilización o de la autorización para la reutilización y otro concesionario o titular de derechos de igual rango (Art.6).

Con el objetivo de fomentar la reutilización del agua depurada y el uso más eficiente de los recursos hídricos, se contempla que las administraciones públicas (estatal, autonómica y local), dentro de sus respectivas competencias, podrán llevar a cabo planes y programas de reutilización (Art. 7). En estos planes se deben establecer las infraestructuras necesarias para la reutilización, así como los usos previstos. También debe especificarse el análisis económico-financiero realizado y el sistema tarifario que corresponderá aplicar en cada caso.

El titular de la concesión o autorización de reutilización deberá sufragar los costes necesarios para adecuar la reutilización a las exigencias de calidad vigentes en cada momento (Art. 11).

Se establece un plazo de 2 años, desde la entrada en vigor del R.D., para que los actuales sistemas de reutilización, que cuenten con concesión o autorización administrativa, realicen las adaptaciones que resulten necesarias para poder cumplir las condiciones y obligaciones impuestas en el R.D. (Disposición transitoria primera). Los expedientes de reutilización iniciados y no resueltos a la entrada en vigor de este R.D, se resolverán de acuerdo a la legislación vigente en el momento de su solicitud (Disposición transitoria segunda).

#### Usos y criterios de calidad de las aguas regeneradas

Los usos admitidos y los criterios de calidad para cada uso se recogen en el Anexo I.A del Real Decreto, especificando que, para usos no contemplados en el citado anexo, el organismo de cuenca exigirá las condiciones de calidad correspondientes (Art.4).

Se prohíbe la reutilización de aguas depuradas, para los siguientes usos (Art. 4):

- Para el consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofes; para los usos propios de la industria alimentaria.
- Para uso en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.
- Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.
- Para el uso recreativo de agua de baño.
- Para el uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, salvo para uso exclusivamente industrial en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas, ni cerca de lugares con actividad pública o comercial.
- Para el uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos.
- Para cualquier otro uso que la autoridad sanitaria o ambiental considere un riesgo para la salud de las personas o perjuicio para el medio ambiente.

En la Tabla 4.5 se recogen las calidades mínimas exigidas para cada uno de los 14 usos establecidos en el Anexo I del en el Real Decreto. Estos usos se agrupan en cinco grandes apartados: 1) “Urbanos”, 2) “Agrícolas”, 3) “Industriales”, 4) “Recreativos” y 5) “Ambientales”.

**Tabla 4.5** Criterios de calidad para la reutilización de las aguas según usos (RD 1620/2007)

Usos del Agua residual Regenerada	Valores Máximos Admisibles				Otros Criterios
	Huevos de nematodos intestinales	<i>Escherichia Coli</i> UFC/100 mL	Sólidos en suspensión mg.L <sup>-1</sup>	Turbidez UNT	
<b>1.- USOS URBANOS</b>					
CALIDAD 1.1 Residenciales:					
a) Riego de jardines domésticos.	1 huevo	0	10	2	<i>Legionella</i> spp. 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosoles)
b) Descarga de aparatos sanitarios	/10 L				
CALIDAD 1.2 Servicios urbanos:					
a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos, etc).	1 huevo	200	20	10	Otros contaminantes (1)
b) Baldeo de calles.	/ 10 L				
c) Sistemas contra incendios.					
d) Lavado industrial de vehículos					
<b>2.- USOS AGRÍCOLAS (2)</b>					
CALIDAD 2.1.					
a) Riego de cultivos para alimentación humana en fresco, con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles	1 huevo	100	20	10	<i>Legionella</i> spp. 1000 UFC/L (cuando se prevea riesgo de aerosoles)
	/10 L				
					Otros contaminantes (1) Presencia/ausencia de patógenos (3)
CALIDAD 2.2					
a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior	1 huevos	1.000	35	No se fija límite	<i>Taenia saginata</i> y <i>Taenia solium</i> 1 huevo / L (en riego de pastos para consumo de animales productores de carne)
b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.	/10 L				
c) Acuicultura					Otros contaminantes (1)  Presencia/ausenci a de patógenos (3)
CALIDAD 2.3					
a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana.	1 huevo	10.000	35	No se fija límite	Otros contaminantes (1)
b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones	/10 L				
c) Riego de cultivos industriales, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.					<i>Legionella</i> spp. 100 UFC/L

---

### 3.- USOS INDUSTRIALES

---

#### CALIDAD 3.1

a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria.	No se fija Límite	10.000	35	15	<i>Legionella</i> spp. 100 UFC/L
b) Otros usos industriales					Otros contaminantes (1)

---

#### CALIDAD 3.1

c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria.	1 huevo /10 L	1.000	35	No se fija límite	<i>Legionella</i> spp. 100 UFC/L Otros contaminantes (1) Presencia/ausencia de patógenos (3)
--	------------------	-------	----	----------------------	--

---

#### CALIDAD 3.2

a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos	1 huevo /10 L	Ausencia	5	1	<i>Legionella</i> spp. Ausencia UFC/L Uso exclusivamente industrial lejos de zonas urbanas Para su autorización requerirá la aprobación por la autoridad sanitaria del programa de control contemplado en el RD 865/2003
---	------------------	----------	---	---	---

---

### 4.- USOS RECREATIVOS

---

#### CALIDAD 4.1

a) Riego de campos de golf	1 huevo /10 L	200	20	10	Si el riego se aplica directamente a la zona del suelo (goteo, microaspersión) se fijan los criterios del grupo de Calidad 2.3- <i>Legionella</i> spp. 100 UFC/L (cuando se prevea riesgo de aerosoles)  Otros contaminantes (1)
----------------------------	------------------	-----	----	----	---

---

#### CALIDAD 4.2.

a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua	No se fija límite	10.000	35	No se fija límite	Fósforo total : 2 mg P/L (en agua estancada) Otros contaminantes (1)
---	----------------------	--------	----	----------------------	--

---

## 5.- USOS AMBIENTALES

### CALIDAD 5.1.

a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno	No se fija Límite	1.000	35	No se fija límite	NitrógenoTotal:10 mg /L NO <sub>3</sub> : 25 mg /L
---	-------------------	-------	----	-------------------	---

### CALIDAD 5.2.

a) Recarga de acuíferos por inyección directa	1 huevo /10 L	0	10	2	Art. 257 a 259 del RD 849/1986
---	---------------	---	----	---	--------------------------------

### CALIDAD 5.3.

a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público	No se fija Límite	No se fija Límite	35	No se fija límite	Otros contaminantes (1)
b) Silvicultura					

### CALIDAD 5.4.

a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares)	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso				
--	--	--	--	--	--

NOTA (1): Se deberá limitar la entrada al medio ambiente de otros contaminantes contenidos en la autorización de vertido de las aguas residuales (Ver el Anexo II del R.D. 849/1986, de 11 de abril). En el caso de que se trate de sustancias peligrosas (Ver Anexo IV del R.D. 849/1986, de 11 de abril, modificado por el R.D. 606/2003 de 23 de mayo) deberá asegurarse el respeto a las Normas de Calidad Ambiental (Ver el artículo 245.5 del R.D. 849/1986, de 11 de abril, modificado por el R.D. 606/2003 de 23 de mayo).

(2) Información adicional y VMA en : CE 3 dS/m;RAS:6meq/L;Bo:0,5mg/L;As:0,1 mg/L,Be:0,1mg/L;Cd:0,01mg/L;Cr:0,1 mg/L;Co:0,2mg/L ;Mn:0,2 mg/L;Mo:0,01mg/L;Ni:0,2 mg/L;Se:0,02mg/L;Va:0,1mg/L.

(3) Teniendo en cuenta un plan de muestreo de tres clases con un nº de unidades de la muestra =10 de las cuales 3 como máximo se sitúan entre el; valor máx de recuento 10.000 UFC/100mL y el valor límite admisible de 1.000 UFC/100 mL.

Para cada uso se establece, con carácter general, cuatro parámetros, dos de tipo biológico (Huevos de nemátodos intestinales y *Escherichia coli*) y dos de tipo físico-químico (SS y Turbidez).

En algunos casos se establecen otros parámetros complementarios como la *Legionella spp*, en el uso de refrigeración industrial o en aquellos casos en que se prevea riesgo de aerosoles, en consonancia con el Real Decreto 865/2003; la *Taenia saginata* y la *Taenia solium*, en el caso de riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne; el fósforo total, en los usos ambientales y recreativos (estanques, láminas de agua y caudales circulantes); o el nitrógeno total y los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), en el caso de recarga de acuíferos. En el caso de algunos usos agrícolas (calidades 2.1 y 2.2) y en el uso de agua de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria (calidad 3.1) se obliga a realizar la detección de patógenos "Presencia/Ausencia", tras obtener los resultados del muestreo a tres clases. Como patógeno pone por ejemplo la salmonella, dejando el campo abierto a cualquier otro tipo de microorganismos. Los colifagos y *Clostridium perfringes*, pueden ser buenos indicadores de la existencia o no de patógenos.

Los organismos de cuenca podrán incluir otros parámetros o fijar niveles de calidad más estrictos cuando otorguen las concesiones o autorizaciones, en el caso que así lo requiera la autoridad sanitaria o cuando lo prevea la normativa sectorial de aplicación al uso previsto.

### Control de la calidad de las aguas regeneradas

Con el fin de comprobar que el tratamiento de regeneración cumple con los objetivos de calidad establecidos en el Real Decreto el titular deberá llevar a cabo el programa de control analítico o

---

AUTOCONTROL. Este programa consiste en la realización de una serie de mediciones de los distintos parámetros, con las frecuencias establecidas para cada uno de ellos y en cada uno de los puntos de control.

Los puntos de control establecidos en el R.D. se sitúan en la salida de la estación regeneradora y en cada uno de los puntos de entrega al usuario. De esta forma se comprueba que el efluente regenerado no ha sufrido ningún cambio durante su distribución respecto a la calidad inicial. Además, el control del agua regenerada en estos puntos permite identificar si un incumplimiento de la calidad del agua se debe al mal funcionamiento del tratamiento de regeneración o bien ha sido generado durante la distribución del agua. De esta forma se pueden determinar las medidas más adecuadas para solucionarlo.

En el Anexo I.B del Real Decreto se establece la frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro, Tabla 4.6.

En el Anexo I.C se recogen los métodos o técnicas analíticas propuestas como referencia o guía, pudiéndose emplear métodos alternativos siempre que estén validados y den resultados comparables a los obtenidos por el de referencia. Los análisis deberán ser realizados en laboratorios de ensayo que dispongan de un sistema de control de calidad según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025.

Existen tres supuestos en los que se puede modificar la frecuencia de análisis, Tabla 4.6, uno para reducirla y dos para aumentarla: 1) Si tras un año de control, el titular demuestra que la presencia de un parámetro no es probable, el organismo de cuenca puede reducir su frecuencia de análisis hasta un 50%; 2) Tras un trimestre o fracción, en caso de periodos de explotación inferiores, si el número de muestras con concentración inferior al Valor máximo Admisible (VMA) Tabla 4.7, del Anexo I.A del Real Decreto es inferior al 90% de las muestras, se duplicará la frecuencia de muestreo para el periodo siguiente; 3) Si un control supera, al menos en uno de los parámetros, los rangos de desviación, se duplicará durante el resto de este periodo y el siguiente.

La evaluación de la calidad de las aguas regeneradas se realiza mediante la aplicación de los criterios de conformidad y las medidas de gestión frente a posibles incumplimientos, recogidos ambos en el Anexo I.C del Real Decreto. El sistema de explotación es conforme si cumple simultáneamente que:

- El 90% de las muestras tienen resultados inferiores a los VMA en todos los parámetros especificados en el Anexo I.A.
- Las muestras que superan el VMA, no sobrepasan los Límites de Desviación Máxima (LDM) establecidos en el Anexo I.C (Los LDM son las diferencias entre los valores medidos y los VMA).
- Se respetan las normas de Calidad Ambiental (NCA) para las sustancias peligrosas en el punto de entrega de las aguas regeneradas, según la legislación propia de aplicación.

Las medidas de gestión establecidas en caso de incumplimientos son las siguientes: 1) Se procederá a la suspensión del suministro de agua regenerada en los casos en que no se cumplan los criterios de conformidad; 2) Si en un control se superan en un parámetro los límites de desviación máxima, se procederá a realizar un segundo control a las 24 horas. En el caso de persistir esta situación se procederá a la suspensión del suministro; 3) El suministro se reanudará cuando se hayan tomado las medidas oportunas en lo relativo al tratamiento para que la incidencia no vuelva a ocurrir, y se haya constatado que el agua regenerada cumpla los VMA del Anexo I.A durante cuatro controles efectuados en días sucesivos; 4) En los casos de incumplimiento descritos en los puntos 1, 2 y 3 será de aplicación la modificación de frecuencias de control previstas en el Anexo I.B.

**Tabla 4.6** Frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro (RD 1620/2007)

USO	Calidad	Nematodos intestinales	E. coli	SS	Turbidez	NT y PT	Otros contaminantes	Otros Criterios
Urbano	1.1 1.2	Q	2 S	S	2 S	-	El organismo de cuenca valorará la frecuencia de análisis sobre la base de la autorización de vertido y del tratamiento de regeneración	M
	2.1	Q	S	S	S	-		M
Agrario	2.2	Q	S	S	-	-		Q
	2.3	Q	S	S	-	-		-
Industrial	3.1	-	S	S	S	-		M
	3.2	S	3 S	D	D	-		Legionella ssp: 3 S
Recreativo	4.1	Q	2 S	S	2S	-		-
	4.2	-	S	S	-	M		-
Ambiental	5.1	-	2 S	S	-	S		-
	5.2	S	3 S	D	D	S		S
	5.3	-	-	S	-	-	-	
	5.4						Frecuencia igual al uso más similar	

NOTA: D = diario; S = semanal; 2 S = 2 veces semana; 3 S = 3 veces semana Q = quincenal; M = mensual

**Tabla 4.7** Límites de Desviación Máxima permitidos (RD 1620/2007)

PARÁMETRO	LÍMITE DE DESVIACIÓN MÁXIMA (VMA)
Nematodos intestinales	100% del VMA
Escherichia coli	1 unidad logarítmica
Legionella ssp	1 unidad logarítmica
Taenia saginata	100% del VMA
Taenia solium	100% del VMA
Sólidos en suspensión	50% del VMA
Turbidez	100% del VMA
Nitratos	50% del VMA
Nitrógeno total	50% del VMA
Fósforo total	50% del VMA

#### Procedimientos para obtener el permiso de reutilización de aguas

El R.D. establece que el procedimiento para obtener la concesión de reutilización sigue la tramitación ordinaria de cualquier concesión de aguas públicas, tal como establecen los artículos 59.1 y 109 del texto refundido de la Ley de Aguas. Es preciso que este procedimiento esté acompañado de un informe vinculante de las autoridades sanitarias.

Los procedimientos para obtener una concesión se establecen en función de quien sea el solicitante:

1. *El solicitante es el concesionario para la primera utilización del agua:* El procedimiento se realiza sin competencia de proyectos, en función de los establecidos en el artículo 8. El peticionario deberá presentar un proyecto de reutilización de aguas cuyo contenido se define con claridad en el citado artículo. Es conveniente subrayar que en el caso de uso agrícola es necesario acreditar la titularidad de las tierras. El organismo de cuenca después de examinar la documentación presentada e informar sobre la compatibilidad o no de la solicitud con el Plan Hidrológico de Cuenca, elaborará, en su caso, una propuesta en la que se establecerán las condiciones en que se otorgaría la concesión de la reutilización de aguas, sobre la que se solicitará la conformidad expresa del peticionario. En caso de disconformidad



- 
- del peticionario, éste podrá presentar motivación justificada que la administración deberá contestar mediante resolución expresa. En el Anexo II del Real Decreto se recoge un modelo de solicitud para obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas.
2. *El solicitante es titular de la de la autorización de vertido:* En este caso se le otorgará una autorización administrativa que tendrá el carácter de complementaria a la de vertido, en la que se establecerán los requisitos y condiciones en los que podrá llevarse a cabo la reutilización del agua. Como ocurre en el caso anterior, el peticionario deberá presentar el modelo de solicitud incluido en el Anexo II del Real Decreto y acreditar la titularidad de las tierras a regar, en caso de uso agrícola.
  3. *El solicitante es un tercero que no es concesionario de la primera reutilización, ni titular de la autorización de vertido:* En este caso se seguirá el procedimiento que establece el Reglamento del Dominio Público Hidráulico para las concesiones en general, previa presentación de la solicitud para obtener la concesión de reutilización de aguas según el modelo del Anexo II del Real Decreto y la presentación del correspondiente proyecto de reutilización de aguas.

Los plazos de los procedimientos, según lo establecido en el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, son de 18 meses para las concesiones y 6 meses para las autorizaciones.

Tras la entrada en vigor del Real Decreto 1620/2007, usuarios y administraciones han venido detectando una serie de deficiencias y errores que sin duda tendrán que irse corrigiendo en revisiones futuras. Son muchos los que a nivel particular o a través de diferentes asociaciones han realizado propuestas para la mejora de esta norma. Entre ellos destaca la labor del grupo de trabajo de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS) que en repetidas ocasiones se ha reunido para sacar un documento de propuestas de modificación del R.D. 1620/2007.

Entre las propuestas se propone hablar de aguas regeneradas, definir mejor las responsabilidades de las administraciones implicadas, clarificar términos como el de láminas ornamentales, cambio de frecuencias mínimas de muestreo en parámetros como los helmintos que no nematodos intestinales, o redistribuir las calidades establecidas en el uso recreativo entre usos urbanos y ambientales entrando golf en la calidad 1.2 servicios y la calidad 4.2 de estanques y masas de agua circulantes en usos medioambientales.

#### 4.3.2 Guía para la aplicación del Real Decreto 1620/2007

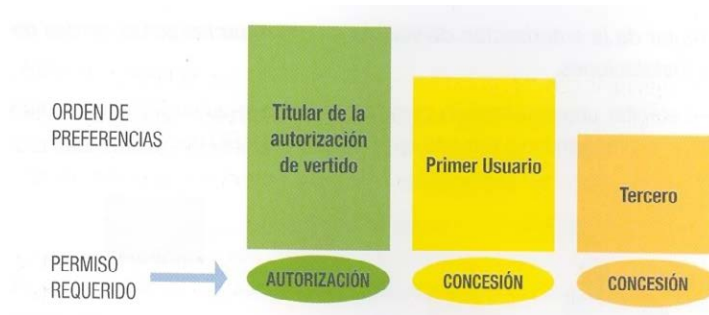
En octubre de 2010 MAGRAMA publica una Guía para la aplicación del citado Real Decreto 1620/2007. El objetivo es, como dice en su introducción, *“orientar y proponer procedimientos y criterios para la aplicación del Real Decreto 1620/2007 a los distintos agentes involucrados, facilitando el trabajo de comprensión e interpretación del mismo. Su fin último es garantizar los niveles de calidad y el buen uso de las aguas regeneradas exigido por el citado Real Decreto”*.

A lo largo de la Guía se aclara el sistema de responsabilidades, se exponen los aspectos clave del Real Decreto de reutilización, se analizan las relaciones con otras normas europeas y nacionales, se contestan una serie de preguntas frecuentes, se presentan algunas prescripciones técnicas básicas para un sistema de reutilización y se indican diferentes normas de uso del agua regenerada que, junto a un glosario de terminología relativa a la reutilización de aguas regeneradas, facilitan la aplicación del Real Decreto de reutilización.

La Guía comprende los siguientes apartados: aplicación del R.D. calidades de las aguas regeneradas, prescripciones técnicas básicas para un sistema de reutilización y normas de uso.

#### a) Aplicación del Real Decreto de Reutilización

Se exponen los aspectos clave del Real Decreto, haciendo hincapié en los procedimientos para obtener el permiso de reutilización de aguas y se analizan las cuestiones que con frecuencia suscitan dudas en su aplicación, Figura 4.2. Se ponen ejemplos respecto al agua reutilizada en la industria, a los retornos de riego, a los filtros verdes, a los permisos requeridos, al orden de preferencias, a los títulos concedidos antes de publicarse el R.D., a los contratos de cesión de derechos y sobre la calidad de las aguas.



**Figura 4.2** Orden de preferencia en la solicitud y permiso requerido, (MAGRAMA, 2010)

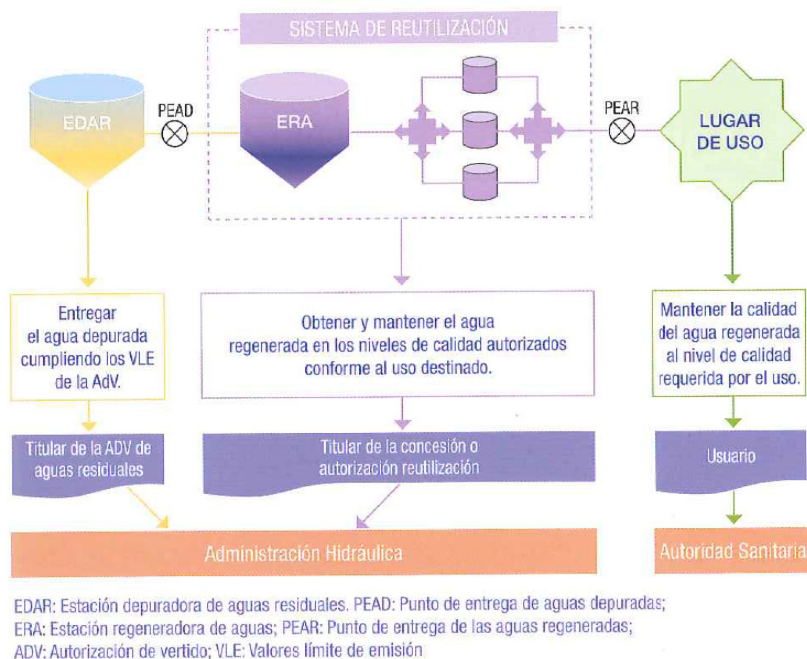
#### b) Calidad de las aguas regeneradas

Se abordan los distintos aspectos relacionados con los programas de control de la calidad de las aguas regeneradas, Figura 4.3, desde los puntos de control, las frecuencias mínimas de muestreo, los métodos analíticos, los sistemas de análisis en continuo, el mantenimiento y la evaluación de la calidad de las aguas regeneradas, las medidas de gestión necesarias ante la degradación de su calidad, pasando por la distribución de responsabilidades de los distintos actores de la reutilización, hasta la inspección por parte de las administraciones competentes.

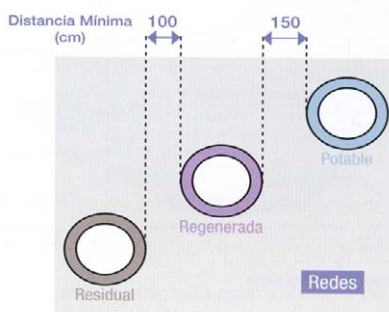
#### c) Prescripciones técnicas básicas para un sistema de reutilización.

Se establecen una serie de prescripciones y de normas de buenas prácticas respecto a los distintos elementos de un sistema de reutilización (estación de regeneración de aguas y sistema de transporte y almacenamiento).

Respecto a los tratamientos de regeneración se proponen distintos tipos en función de la calidad exigida al agua regenerada para cada uso. Para las redes de transporte y almacenamiento se exponen criterios generales de diseño, recomendaciones sobre el trazado de las redes, Figura 4.4, limitaciones por afecciones al dominio público, distancias a otros servicios, señalizaciones, recomendaciones para el diseño de balsas, depósitos y bombes de agua regenerada y criterios de prevención sobre episodios de reflujos.



**Figura 4.3** Distribución de responsabilidades en la calidad y en la inspección, (MAGRAMA, 2010)



**Figura 4.4** Distancias mínimas de la red de reutilización, respecto a las redes de agua potable y saneamiento, (MAGRAMA, 2010)

#### d) Normas del uso del agua regenerada

Los usuarios del agua regenerada, ya sean trabajadores de las empresas gestoras de agua regenerada o usuarios finales de las mismas, deben respetar una serie de normas que aseguren que se está realizando un uso adecuado de la misma con total garantía para la salud pública. Para esta finalidad, se dedica un capítulo donde se establecen una serie de recomendaciones y normas de seguridad relativas al uso de las aguas regeneradas, encaminadas a proteger al público, trabajadores y usuarios potencialmente expuestos a la misma.

Entre estas normas están las prescripciones sobre señalización de las instalaciones que han sido recogidas en el apartado anterior. En este apartado se recogen normas de buenas prácticas relativas a los principales usos del Real Decreto; urbano (riego de parques, baldeo de calles, descarga de aparatos sanitarios, lavado de vehículos industriales), riego agrícola, riego de campos de golf, usos industriales y usos ambientales.

---

### 4.3.3 El Plan Nacional de Reutilización de Aguas

El R.D. 1620/2007 ha supuesto una homogenización de criterios a la hora de realizar actuaciones de reutilización en el territorio español por lo que se favorece la planificación de este recurso dentro del global de los recursos hídricos del país.

La aplicación de esta normativa que exige unas calidades y un procedimiento para la utilización de las aguas regeneradas, ha obligado a la adecuación de una parte importante de los actuales sistemas de reutilización.

Pasado los dos años permitidos por el R.D para adaptarse a la norma, numerosos sistemas siguen teniendo problemas para alcanzar las calidades requeridas o realizar el control exigido. Esto ha generado una cierta bajada de la demanda por parte de los usuarios, en su mayoría regantes, al no poder costear el adaptarse a este nuevo marco normativo.

El MARM publicó a finales de 2009 una versión preliminar del Plan Nacional de Reutilización de aguas (PNRA) donde uno de sus objetivos es ayudar a esta adaptación normativa. Además, este plan da desarrollo al artículo 7 capítulo IV del R.D. 1620/2007 donde con objeto de fomentar y realizar un uso más eficiente de los recursos hidráulicos, las distintas administraciones públicas podrán llevar a cabo planes y programas de reutilización de aguas estableciendo infraestructuras y el sistema tarifario que corresponda aplicar en cada caso.

Este PNRA complementa el Plan Nacional de Calidad de las Aguas, PNCA 2007- 2015, y a su vez continua con el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 1995-2005. Éste último pretende ampliar las actuaciones actuales para alcanzar un buen estado ecológico en los ríos, tal y como exigen la Directiva Marco del Agua y el Programa AGUA (Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua) del MARM ([http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/PP\\_2009P006.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/PP_2009P006.aspx)).

El ámbito del Plan son todas las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias, y su vigencia comprende el ciclo de planificación 2009-2015 de los PHC correspondientes.

Tanto en el PNCA como en los PHC, se establecieron convenios bilaterales con cada una de las Comunidades Autónomas donde se incluyeron actuaciones de desalación y reutilización de aguas depuradas para conseguir una gestión más sostenible de los recursos hídricos. En base a lo anterior, el PNRA iba a financiar éstos y realizar otros nuevos sistemas de reutilización que ayuden a alcanzar entre otros objetivos: el “vertido cero” en zonas costeras, sustituir en zonas de interior concesiones de agua prepotable por aguas regeneradas para los usos que sea viable o fomentar la reutilización sostenible de aguas regeneradas para los usos agrícola, ambiental, recreativo, industrial y urbano, como una opción viable con respecto al medio ambiente, la seguridad, salud, economía y tecnología disponible.

Este PNRA se coordinará con otros instrumentos de planificación a parte de los ya comentados anteriormente y habituales como los Planes Hidrológicos de Cuenca, como son, el Plan Nacional de Regadíos, Planes Especiales en Situación de Alerta y Eventual Sequía o el Plan de Choque de Tolerancia Cero de Vertidos.

Tras la publicación del informe de sostenibilidad ambiental no publicó el plan definitivo. La crisis económica que comenzó en el 2008, dejó sin fondos a este plan y otras iniciativas de las distintas AAPP. Desde entonces se han hecho nuevas ERAs aunque a un ritmo muy inferior de lo previsto, siendo AcuaMed, sociedad estatal, ha sido el principal instrumento del MAGRAMA para la contratación, construcción, adquisición y explotación de toda clase de obras hidráulicas. Estas

---

actuaciones de interés general se realizan en el ámbito de las siguientes cuencas hidrográficas Segura, Júcar, Ebro, Cuenca Mediterránea Andaluza y Cuencas Internas de Cataluña.

En el plan se aborda tanto las fuentes de financiación como el tema de instrumentos para la recuperación del coste. Según lo definido en el art. 114 del texto refundido de la ley de agua, los beneficiados de obras hidráulicas financiadas total o parcialmente a cargo del Estado, satisfarán por la disponibilidad o uso del agua una exacción denominada “tarifa de utilización del agua”, destinada a compensar los costes de inversión que soporte la Administración estatal y a atender a los gastos de explotación y conservación de tales instalaciones. La obra hidráulica comprenderá el conjunto de las obras e instalaciones interrelacionadas que constituyan un sistema capaz de proporcionar un servicio completo de suministro de agua regenerada.

Tras terminar este PNRA se estimaba aumentar el número de actuaciones de reutilización en 144 y la capacidad de tratamiento de regeneración en 249 hm<sup>3</sup> por año, pasando a tener en 2015 un número total de actuaciones, de 466, y una capacidad de tratamiento de 1.260 hm<sup>3</sup> anuales, contando con las 322 actuaciones y 1011,83 hm<sup>3</sup> de capacidad recogidos en la BDR, 2009.

En el preliminar del PNAR se realiza una diagnosis de la reutilización de la reutilización en España y unos tratamientos de regeneración cuya información base es parte de los objetivos del presente documento, al ser el CEDEX colaborador del grupo coordinador de este Plan.

#### 4.4 Estudio y evaluación del R.D. 1620/2007

A continuación, se entra a valorar algunos aspectos del RD 1620/2007, desde cuestiones conceptuales, de fondo y jurídicas; dudas de interpretación y problemática de aplicación; cuestiones técnicas de desarrollo hasta defectos de redacción.

##### Aspectos generales:

- El R.D. depende de dos departamentos ministeriales, sanidad y medioambiente, por lo que en el documento se podría tratar de diferenciar, entre los aspectos que requieren de mayor desarrollo, los que corresponderían a cada Ministerio.
- El RD no se puede analizar aisladamente, sino que debe hacerse en el marco legislativo completo en el que se encuadra (básicamente el texto refundido de la Ley de Aguas y la Ley General de Sanidad, así como reglamento de Dominio Público, Planes de cuenca y otra normativa citada en el RD).

##### Definiciones:

- La primera duda que se presenta ya desde las definiciones y se mantiene en todo el RD es la concordancia entre los conceptos de reutilización de aguas y aguas regeneradas. El concepto de reutilización de aguas se liga a la existencia de un nuevo uso privativo antes de la devolución a dominio público. Sin embargo, aguas regeneradas se liga al cumplimiento de unos niveles de calidad para determinados usos. Entre los usos que posteriormente se contemplan hay algunos que no son privativos y consisten precisamente en la devolución al dominio público. Por todo ello, se puede interpretar que el RD realmente regula dos asuntos que no son completamente coincidentes: la reutilización de aguas y las normas de calidad para determinados usos no privativos con agua regenerada.
- De entenderse en este doble sentido, el régimen jurídico de la reutilización no afectaría a algunos de los usos ambientales, que quedarían también exentos, por ejemplo, de un informe de sanidad. En cualquier caso, la norma o sus desarrollos posteriores deberían aclarar en mayor medida este doble planteamiento.
- En general las definiciones y, en particular, la definición de sistema de reutilización se ha planteado desde una perspectiva algo simplista, por lo que podría haber problemas de

---

encaje de determinadas situaciones reales. Podrían quedar fuera disposiciones donde entran en juego varias depuradoras o varios tratamientos de regeneración en paralelo o en serie; sistemas donde las aguas regeneradas se mezclan con otras de otra procedencia antes de realizar la entrega al usuario.

- El concepto jurídico de punto de entrega puede ser adecuado, pero obligar al control de calidad en todos ellos puede no ser posible por su coste en las situaciones donde haya sistemas con muchos puntos de entrega. En estos casos podría seguirse un procedimiento similar al empleado en agua potable, tomando al azar algunos puntos de muestreo o los que se consideren más proclives al empeoramiento de la calidad dentro de la red de usuarios.
- Resulta difícil entender algunos de los usos ambientales como usuarios y por tanto aplicar el concepto de punto de entrega.
- El titular de la concesión es el que tiene que dar la calidad para los usos. Esto puede ser un problema para los pequeños usuarios que están reutilizando las aguas en la actualidad.
- El R.D. deja fuera muchos casos que en un primer momento podrían seguir el criterio sanitario que propone esta norma. Por ejemplo, los casos de reutilización en industrias que vierten a colectores y no a DPH. En este caso el procedimiento no es claro.

#### Régimen jurídico y procedimiento para la reutilización de aguas depuradas

- El planteamiento del RD es dar prioridad al que está llevando a cabo la depuración de aguas frente a los otros usuarios. Para ello establece unas prioridades (titular de vertido, primer usuario y terceros) y un sistema de concesiones, que en el caso del titular de vertido se limita a una autorización. Posteriormente dedica un capítulo a los contratos de cesión de derechos.
- El Texto refundido de la Ley de aguas establece unas condiciones generales para las concesiones y la cesión de derechos al uso privativo de las aguas. Sin embargo, atendiendo al RD podría parecer, que el titular de la autorización de vertidos puede pedir la reutilización de las aguas, hacerles un tratamiento de regeneración y luego vender el agua a unos terceros.
- Se da preferencia a los titulares de concesiones o autorizaciones por lo que se les está dando la oportunidad de sacarle "cierto beneficio" a un agua que antes era para verter al DPH. Es de destacar el ejemplo de la Guía para la aplicación del RD, donde se dice textualmente: "una entidad gestora que sea el titular de la autorización de vertido y solicite una modificación de la misma para la reutilización de aguas regeneradas, podrá ceder sus derechos a terceros usuarios, como campos de golf o industrias, mediante un contrato de cesión de derechos". Este planteamiento aparentemente no encajaría con el régimen concesional actual y puede resultar de difícil encaje con las prioridades de uso establecidas en los planes de cuenca (que son también un RD).
- No queda claro si en una misma concesión se puede pedir varios usos.
- El usuario final que no tiene la concesión no queda claro si tendría que hacer autocontrol.

#### Condiciones básicas para la reutilización:

- Se habla de uso de aguas regeneradas cuando el título es reutilización de aguas depuradas. Sin embargo, en el título del anexo al que se hace referencia, se vuelve a hablar de reutilización según usos.
- Sanidad en su informe vinculante debería distinguir entre riesgo y peligro del uso propuesto en unas determinadas condiciones de calidad y motivar su rechazo o admisión según los casos.
- Debería definirse mejor lo que son aguas de proceso en la industria alimentaria en coherencia con el RD 140/2003 de calidad de aguas de consumo humano. La explicación más lógica pasaría por entender que ha habido un error en la redacción del artículo 4.4.b) y donde dice "..., salvo lo dispuesto en el anexo I.A.3. calidad 3.1c)..." debería haber dicho "... En los demás casos, deberá cumplirse lo dispuesto en el anexo I.A.3. calidad 3.1c)..."

---

### Criterios de calidad:

- RD en su anexo I da mínimos obligatorios exigibles de calidad por lo que deja abierto nuevas exigencias por parte de sanidad, organismos de cuenca, lo que podría provocar a la hora de encarar proyectos de cierta envergadura problemas para unificar criterios y satisfacer todas las normativas aplicables.
- No se especifica cómo las autoridades sanitarias y ambientales realizarán el control de calidad.
- Definir mejor la responsabilidad del concesionario y del usuario a la hora de los controles de calidad.

### Anexo I. A Criterios de calidad según usos:

- Las exigencias de calidad por usos no son homogéneas. En el caso de usos agrícolas se incluyen más parámetros e incluso se regulan otros requerimientos agronómicos fuera del ámbito sanitario.
- Sería conveniente desarrollar en norma técnica los planes de muestreo de las Calidades 2.1. y 2.2 puesto que no quedan claros en el RD.
- En una norma debería estar más definido aspectos como: otros contaminantes, test de patógenos ausencia/presencia, etc. y no dejarlo para una guía al ser requisito de calidad obligatorio.
- Parece difícil técnicamente llegar a los límites de turbidez por debajo de 2 UNT si no se emplean procesos de membrana. Además, es incompatible 10 ppm de SS con 2 UNT de turbidez como en el caso de inyección directa de acuíferos.
- Por el contrario, un límite de 35 mg. L<sup>-1</sup> de SS para la inyección indirecta, parece excesivamente laxo desde el punto de vista técnico, pudiéndose colmatar el terreno.
- El RD prohíbe láminas ornamentales en espacios públicos, pero da la opción en la calidad 4.2 y dentro del uso recreativo este caso podría darse por ejemplo en los campos de golf.
- Debería clarificarse la definición de cultivo leñoso o zona de suelo (quizá a través de una norma técnica de desarrollo).

### Anexo I.B. Frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro:

- El usuario final puede no tener capacidad para el autocontrol y tampoco se define en qué consiste este autocontrol.
- Parece necesario concretar en mayor grado quién va hacer los controles y hasta dónde llega la responsabilidad de cada uno de los interesados.
- Hacer el control en todos los puntos de entrega puede ser inviable en sistemas de reutilización donde haya una cantidad importante de usuarios tirando de una misma red.
- La frecuencia mínima parece excesiva en parámetros como nematodos intestinales incluso en la propuesta de modificación, ya que estudios han comprobado la ausencia de estos parásitos en la mayoría de las EDARS y ausencia tras las ERAS.
- Las técnicas analíticas no están bien definidas y a veces ni siquiera lo están (caso de Taenia).
- Concretar cómo serían las frecuencias de análisis en instalaciones con funcionamientos discontinuos.

Como puede observarse el R.D. cuenta con algunos desencajes respecto a otras legislaciones españolas y no siempre están claros los conceptos que aborda, dejando en muchas ocasiones desprovistos algunos usos o circunstancias que se dan con frecuencia en las actuaciones de reutilización a lo largo del territorio español.

Con los años las Confederaciones Hidrográficas han ido interpretando de la mejor manera que han sabido este R.D. para poder otorgar las correspondientes concesiones y autorizaciones. No siempre

---

ha sido posible, y solicitudes de industrias con altos volúmenes de agua para su proceso, no han sido atendidas.

La guía para la aplicación del R.D. sacada por el MAGRAMA en 2010 aclara algunos de estos aspectos, pero sin duda la norma requiere de ciertas modificaciones que ya han sido valoradas dentro del ámbito técnico y científico.



---

## 5 LÍNEAS DE TRATAMIENTO APLICABLES EN FUNCIÓN DE LAS CALIDADES ESTABLECIDAS R.D.1620/2007 Y SUS COSTES ASOCIADOS

---

### 5.1 Tecnologías de regeneración más implantadas en España

La fiabilidad de los tratamientos y su coste son de vital importancia para el desarrollo de la reutilización a todos sus niveles desde la planificación del recurso hasta el éxito de la implantación de los proyectos.

En los últimos años ha habido un avance considerable en el desarrollo e investigación de tecnologías dirigidas a este campo de la reutilización de efluentes depurados, de manera individual y combinada. Destacan los avances en procesos con membranas, oxidaciones avanzadas y diferentes tratamientos de desinfección que permita llegar a los estándares de calidad de una manera regular.

En este marco se ha notado un creciente aumento de profesionales dedicados no solo al desarrollo tecnológico sino también al control de su funcionamiento a través de diferente instrumentación y redacción de buenas prácticas de uso, siendo cada vez más habitual encontrar publicaciones dedicadas a la explotación de estos sistemas.

Los tratamientos de regeneración tienen como fin mejorar la calidad del efluente depurado para cumplir con los requisitos establecidos en el Real Decreto 1620/2007. El objetivo principal es llegar a una calidad sanitaria y medioambiental suficiente, lo que convierte al proceso de desinfección en un tratamiento clave.

En este apartado se realiza una breve descripción de las unidades de tratamiento más representativas dentro de las ERAs españolas, mostrando los rendimientos que alcanzan estas unidades en los principales parámetros de calidad establecidos en la actual normativa, indicando posibles condicionantes, ventajas e inconvenientes de su operatividad.

#### 5.1.1 Descripción de las tecnologías: físico-químicos, filtraciones, membranas, desalación y desinfección

El desarrollo tecnológico puede surgir tanto de las necesidades que plantea una determinada actividad económica como de las derivadas de un nuevo marco normativo.

La aplicación y el desarrollo de tecnologías en los tratamientos fisicoquímicos o en los de desalación, han ayudado a mejorar la calidad del agua de procedencia residual para usos como el agrícola.

Las tecnologías que más se están estudiando son las que hacen frente a tres objetivos de calidad: agronómico, medioambiental y sanitario. Por este motivo, en los últimos diez años la inversión más fuerte se ha venido haciendo en las tecnologías con membranas, aunque todavía se sigue investigando sobre la composición de las mismas y en los pretratamientos más adecuados para conseguir que funcionen con regularidad con aguas de procedencia residual.

En las tecnologías de desinfección son objeto de estudio aspectos como su espectro de acción, que en la actualidad se reduce al control de ciertos microorganismos y en un futuro podría ampliarse a otros indicadores de calidad sanitaria tales como los bacteriófagos o protozoos. También la acción

conjunta de desinfección y eliminación de contaminantes emergentes a través de tratamientos de oxidación avanzada.

#### Clasificación y breve descripción de las principales tecnologías de regeneración

A modo de introducción, la estación regeneradora más extendida en España está compuesta por un fisicoquímico con decantación lamelar seguida de una filtración por gravedad con lecho de arena y una desinfección mediante radiación ultravioleta. Dado que la radiación UV no tienen efecto permanente se añade una dosificación posterior de cloro con una doble función: mantenimiento de las condiciones de limpieza de la red y aseguramiento de la calidad bacteriológica del agua regenerada hasta el punto de entrega.

Esta línea de tratamientos, puede alcanzar con regularidad un efluente regenerado con calidad E. coli < 100 UFC.100mL<sup>-1</sup>, SS < 20 mg.L<sup>-1</sup>, turbidez < 10 de UNT y huevos de nematodo < 0,1 u.L<sup>-1</sup>, lo que permite su utilización para todos los usos establecidos en el R.D. 1620/2007, a excepción de los usos residenciales (calidad 1.1), torres de evaporación y condensadores evaporativos (calidad 3.2) y recarga de acuíferos por inyección directa (calidad 5.2), donde se exige menos de 2 UNT.



**Figura 5.1** Tratamiento de regeneración mediante físico-químico, decantación lamelar, filtración sobre arena y desinfección por hipoclorito, Vitoria (Iglesias, R)

La primera instalación de este tipo se puso en marcha en Arrato (Vitoria-Gazteiz) en 1996 con capacidad para 34.500 m<sup>3</sup>. d<sup>-1</sup> (Figura 5.1), reutilizándose 6,5 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>.

Cuando se requiere eliminar las sales del agua depurada, la línea de tratamientos más extendida la constituye una filtración mediante membranas, más una electrodiálisis reversible (EDR) u ósmosis inversa (OI). Se trata de un tratamiento delicado en la explotación, cuyas primeras instalaciones se pusieron en marcha en las Islas Canarias a mediados de los años 90.

Con la utilización en la primera etapa de membranas de ultrafiltración se consiguen efluentes con la máxima calidad posible (SS < 0,2 mg. L<sup>-1</sup>; Turbidez < 1 UNT; E. coli: ausencia; Nematodos: ausencia). En ocasiones es necesario un pretratamiento para laminar tanto las puntas de concentración como variaciones de caudal influente.

Hay que tener en cuenta que la calidad del efluente secundario es fundamental para el buen rendimiento de la planta regeneradora como ya se ha mencionado en capítulos anteriores. Se considera necesario que para instalar una estación regeneradora de aguas (ERA) debe asegurarse un influente secundario que cumpla como mínimo y de forma regular la calidad establecida en la Directiva 91/271/CEE.

Para trabajar a caudal constante y laminar las variaciones de calidad del efluente depurado, se recomienda la instalación de un tanque de almacenamiento y homogenización a la entrada de la ERA.

Esta medida ayuda al mejor funcionamiento de los tratamientos y permite dimensionar estaciones más pequeñas al no tener que hacerlo para caudal punta.

En el caso de los tanques abiertos existe un inconveniente, la formación de algas. En este sentido se puede optar por la instalación de un dispositivo de ultrasonidos o bien utilizar lonas correderas u otro sistema de cerramiento móvil.

También se puede optar por tanques cerrados, aunque en este caso no hay que perder de vista los inconvenientes a la hora de realizar las limpiezas del tanque que son más dificultosas. Por otra parte, es preciso tener en cuenta que, durante las limpiezas de los tanques, que pueden durar varios días, la ERA tendría que tratar unos caudales punta para los que no está preparada, por ello, sería bueno que el tanque tuviera un tabique central que lo divida en 2 cámaras, de forma que mientras una cámara se limpia la otra sigue laminando el caudal.

En general se puede hablar de cuatro grandes grupos de tecnologías: las basadas en procesos físico-químicos, las que realizan una separación líquido-sólido a través de un elemento filtrante, y dentro de este grupo las que este elemento es una membrana, las que reducen el contenido en sales y las que tienen por objeto desinfectar o eliminar microorganismos patógenos.

**Tabla 5.1** Rendimiento de las distintas tecnologías de regeneración, (Iglesias R. y Batanero G., 2009)

	Reducción SS (%)	Reducción Turbidez (%)	Reducción E. coli (u.log)
<b>Físico-químico</b>			
Convencional	50-70	30-50	1-2
Lastrada	85-95	80-90	≥ 2
<b>Filtración:</b>			
Arena (gravedad y presión)	60-80	30-50	<1
Anillas	20-30	20-30	<1
Lecho pulsante	75-85	40-50	<1
Puente móvil	50-80	40-50	<1
Dualsand	80-90 <sup>(1)</sup>	85-95	1-2
Dynasand	80-85 <sup>(1)</sup>	85-95	1-2
Filtro textil	60-80	30-50	<1
Filtro de tamiz	40-50	30-50 <sup>(2)</sup>	<1
<b>Filtración por membranas:</b>			
Microfiltración	90-95 (<1mg/L)	96-98	3-4 <sup>(3)</sup>
Ultrafiltración	90-95 (<1mg/L)	96-98	> 6 (Ausencia) <sup>(6)</sup>
<b>Eliminación de sales:</b>			
Electrodialisis Reversible <sup>(4)</sup>	No reduce	No reduce	No reduce
Osmosis Inversa <sup>(5)</sup>	100	-	> 6 (Ausencia) <sup>(6)</sup>
<b>Desinfección:</b>			
Radiación Ultravioleta <sup>(6)</sup>	-	-	4-6 <sup>(7)</sup>
Hipoclorito sódico <sup>(8)</sup>	-	-	4-6 <sup>(9)</sup>
Ozono	-	-	6 (< 10 UFC.100 mL <sup>-1</sup> )

1) Con 4-5 ppm de cloruro férrico o policloruro de alúmina; 2) Con un influente menor de 15 ppm en SS; 3) Ausencia con una pequeña dosificación de hipoclorito sódico; 4) El influente debe tener como máximo 20 ppm de SS y 10 UNT de Turbidez; 5) Influyente con índice de ensuciamiento (SDI) < 3; 6) El influente debe tener una turbidez <15 UNT para garantizar el funcionamiento 7) El valor de <10 UFC.100 mL<sup>-1</sup> se consigue con tratamiento Secundario + F-Q + Filtración por arena; Con un tratamiento de regeneración mediante filtración se consigue: < 200 UFC.100 mL<sup>-1</sup>; 8) Fundamentalmente se usa como desinfección de mantenimiento 9) Si se somete previamente a un F-Q+ Filtración por arena puede conseguir < 10 UFC.100 mL<sup>-1</sup>.

---

A continuación, se describen de forma resumida las tecnologías de regeneración más utilizadas en España, cuyos rendimientos respecto a los principales parámetros establecidos en R.D. 1620/2007 se recogen en la Tabla 5.1. En esta tabla se puntualizan las condiciones para un correcto funcionamiento de cada unidad de tratamiento (Iglesias, R. y Batanero G., 2009).

### **Unidades de tratamiento físico-químico.**

El objetivo de un tratamiento físico-químico es la eliminación de sólidos en suspensión y coloidales y procurar un sistema que permite amortiguar la variabilidad del efluente de entrada a la ERA, con el fin de permitir un funcionamiento correcto de las etapas posteriores, como la desinfección. Constituye una excelente barrera frente a posibles irregularidades del efluente depurado. También permite eliminar sulfatos, fósforo o metales pasados, en caso de que fuese necesario.

Se basa en la precipitación química mediante la adición de un reactivo. En los sistemas con físico-químico en línea donde el filtro es el elemento que retira los sólidos formados, se están viendo problemas de operación debido al rápido ensuciamiento de los mismos por lo que se recomienda, en los casos de nueva implantación, físico-químicos con decantación. Esta inclusión se considera imprescindible en el caso de que la filtración se realice mediante tamices.

Como consecuencia de lo anterior, consta normalmente de tres etapas: coagulación, floculación y decantación, casi siempre lamelar. Los reactivos empleados suelen ser coagulantes inorgánicos (sales de hierro o aluminio) o bien polímeros orgánicos (polielectrolitos) y a veces se combinan ambos.

Tiene una cierta acción desinfectante, ya que las bacterias y virus fijados a los sólidos en suspensión son eliminados con éstos.

Su eficacia en la reducción de SS, Turbidez, y E. coli se muestra en la Tabla 5.1. Respecto a nematodos parásitos este tratamiento es eficaz ya que éstos se eliminan por decantación. Se ha comprobado que tras un tratamiento físico-químico y una filtración por arena hay siempre ausencia de nematodos.

Una variante del tratamiento físico-químico convencional es la utilización de micro arena como agente que ayuda a la floculación y la decantación, con el fin de conseguir velocidades ascensionales mucho más altas. Este sistema permite una reducción del espacio utilizado en la ERA para un mismo caudal y una barrera eficaz de puntas en SS del influente. Un posible inconveniente de este tratamiento es el control preciso que hay que realizar en la dosificación de coagulante y floculante ya que afecta directamente a la formación del floculo, con pérdidas de arena por flotación, y en el ensuciamiento y abrasión de tratamientos posteriores, normalmente filtración por tamices rotativos. Estos casos se suelen dar por sobre dosificación de químicos o por mala elección de los mismos.

En opinión de los explotadores, los tratamientos físico-químicos con decantación lamelar son eficaces ante variaciones de caudal y carga del influente, seguros, robustos y bien conocidos, no apreciándose diferencias en cuanto a su eficacia en la eliminación de SS entre éste y los que incluyen arena como lastre cuando se trata de efluentes secundarios. Por otra parte, estos últimos se adaptan peor a las paradas y arranques del sistema teniendo como consecuencia pérdidas de arena, además de ser más sensibles a una incorrecta dosificación de reactivos.

### **Convencional con decantación lamelar**

La tecnología convencional consiste en una coagulación-floculación y una decantación posterior, generalmente de tipo lamelar.

El proceso comienza con la coagulación-floculación que se desarrolla de la siguiente forma: en la cuba de coagulación se inyecta un reactivo (se emplea habitualmente el sulfato de alúmina) que se mezcla mediante una agitación enérgica con el agua a tratar.

La fase de floculación se compone de dos etapas que se realizan en dos cubas independientes: la cuba de inyección y la de maduración. En la cuba de inyección se inyecta polielectrolito como coagulante que consigue que las materias en suspensión se agreguen favoreciendo la formación de flóculos. En la cuba de maduración el flóculo se espesa y finaliza su maduración. Ambas cubas se equipan con mezcladores dinámicos con el fin de mejorar el proceso e impedir sedimentaciones no deseadas.

Una vez finalizado el proceso de coagulación-floculación, el agua a tratar se introduce en el decantador lamelar por la parte inferior del depósito. Allí, el agua circula a través de unas planchas separadas entre ellas unos pocos centímetros en sentido ascendente. El flóculo se deposita en estas láminas y, por gravedad y a contracorriente, va hacia el fondo del decantador. El agua tratada es evacuada por la parte superior mediante unas canaletas de recogida y distribución.

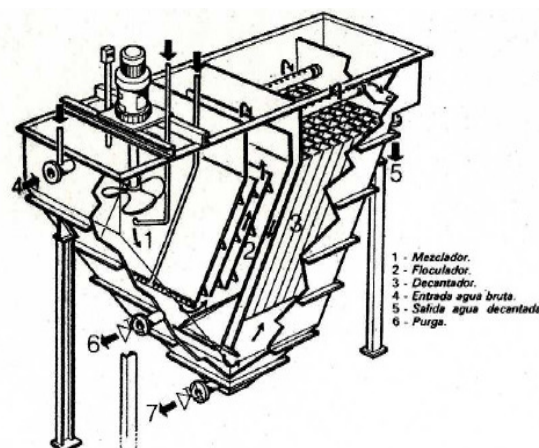


Figura 5.2 Esquema de funcionamiento de proceso físico-químico con decantación lamelar.

#### Avanzada (Densadeg®)

Esta tecnología patentada Densadeg®, Figura 5.3, es una variante de la convencional. Incluye cuatro operaciones básicas que se describen a continuación.

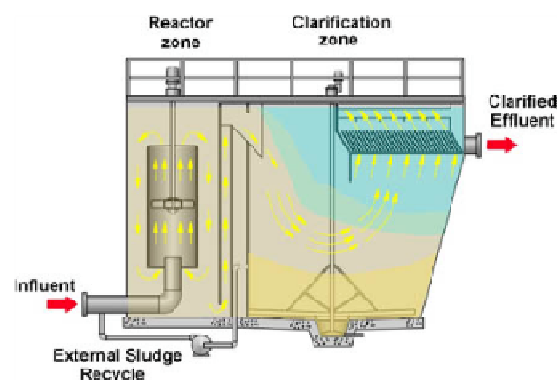


Figura 5.3 Esquema de funcionamiento del Sistema Densadeg®

Coagulación: el agua a tratar y el coagulante se mezclan y se agitan enérgicamente para conseguir una mezcla rápida en la zona de mezcla.

Reactor de mezcla: la mezcla pasa al reactor donde se le añade un polímero y el lodo recirculado procedente del decantador. Esta nueva mezcla se agita lentamente para conseguir la formación de flóculos alrededor de los lodos recirculados.

Decantador de lamelas: el licor mezcla es conducido al decantador de lamelas donde se produce la separación de los sólidos por decantación. El agua filtrada se evacua a través de los canales de recogida mientras que los sólidos decantados son recirculados al reactor de mezcla o son eliminados según las necesidades.

Recirculación y eliminación de lodos: los sólidos sedimentados son recirculados al reactor de mezcla para facilitar la formación de flóculos y mantener una carga de sólidos apropiada.

### Avanzada (Actiflo®)

La tecnología patentada Actiflo® se diferencia de las anteriores por la adición de microarena durante el proceso. De esta forma, se consigue una mayor formación de flóculos y se incrementa la rapidez y cantidad decantada de los mismos al ser más pesados. La Figura 5.4 muestra el esquema de funcionamiento que se describe a continuación.

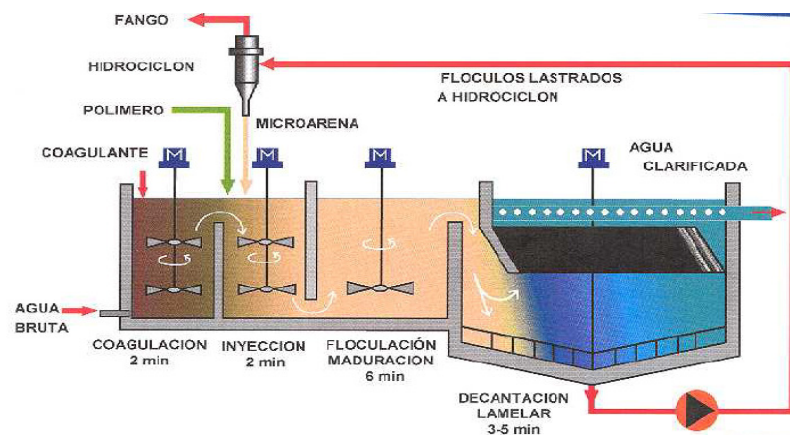


Figura 5.4 Esquema de funcionamiento del Sistema Actiflo®

En la cuba de coagulación se inyecta como reactivo sulfato de alúmina que se mezcla mediante una agitación enérgica con el agua a tratar para asegurar la formación de flóculos.

A continuación, tiene lugar la floculación. Esta fase se compone de dos etapas que se realizan en dos cubas independientes: la cuba de inyección y la de maduración. En la cuba de inyección se inyecta el floculante y microarena (tamaño efectivo de 130-150  $\mu\text{m}$ ). El floculante consigue que las materias en suspensión se pongan en contacto con la microarena y se produzca la floculación. La microarena, gracias a su alta densidad, permite lastrar los flóculos en formación lo que facilitará de manera importante su capacidad de sedimentación.

En la cuba de maduración, gracias a la agitación lenta y uniforme del licor mezcla, el floculo se espesa y finaliza su maduración. Ambas cubas se equipan con mezcladores dinámicos con el fin de mejorar el proceso e impedir sedimentaciones no deseadas.

---

Una vez finalizado la operación de coagulación-floculación, el agua a tratar se introduce en el decantador lamelar por la parte inferior del depósito. Allí el agua circula, a través de unas planchas separadas entre ellas unos pocos centímetros, en sentido ascendente. Los flóculos lastrados con la microarena decantan rápidamente y son recogidos en las láminas, y, por gravedad y a contracorriente, van hacia el fondo del decantador. El agua tratada es evacuada por la parte superior mediante unas canaletas de recogida y distribución.

Los fangos decantados y la microarena extraídos del fondo del decantador son recogidos mediante un rascador y enviados, mediante un dispositivo de bombeo, hacia el tratamiento de fangos de la planta. Previamente a la llegada a su destino, se separan mediante un hidrociclón (3-4% del caudal de entrada) donde se separa el fango y la microarena. La microarena se reinyecta en el tanque de inyección, para lo cual se dispone de un circuito de recirculación y reciclaje.

### **Unidades de filtración**

La filtración tiene como objetivo conseguir una segunda barrera de reducción y protección en sólidos en suspensión y del tamaño de las partículas en el agua tratada para conseguir una desinfección óptima y eliminar los huevos de nematodos, en el caso de que existan.

Los sistemas de filtración consiguen elevar la calidad a través de un lecho poroso compuesto por determinados materiales que retienen las partículas sólidas en su superficie, o dentro de su estructura, o ambas cosas a la vez. Suelen eliminar partículas de tamaños mayores a los 0,01 mm.

Los rendimientos son diferentes según el tipo de filtro y el tamaño de las partículas presentes en el influente, por lo que la elección de una tecnología u otra se debe realizar en función de los rendimientos que se quieran alcanzar, y de los costes de implantación y explotación. En caso de sistemas con radiación UV, parámetros como el tamaño de partícula o la transmitancia a la salida del filtro son cruciales, debiendo determinarse qué tipología de filtro se adapta mejor a estas exigencias.

En la Tabla 5.1 se muestran los rendimientos de eliminación de SS, Turbidez, y E.coli de las tecnologías de filtración más importantes. Los nematodos parásitos son retenidos más eficazmente en filtros de arena que tengan mayores profundidades de lecho. En la Tabla 5.2 se resumen las características principales y los rendimientos obtenidos de los distintos tipos de filtros que se describirán a continuación.

La operación completa de un filtro consta de dos fases: filtración y lavado a contracorriente para mantener la capacidad de filtración. Existen diferentes tipos según su funcionamiento, por gravedad o a presión, el sentido del flujo durante la filtración ascendente o descendente, el tipo de medio filtrante, la configuración del lecho, el control del flujo y finalmente el tipo de fuerza que provoca el movimiento de agua, gravitacional o a presión en caso de que exista un salto de agua aprovechable.

En función del medio filtrante podemos clasificar las distintas tecnologías de filtración: sobre arena, por anillas, de tamiz, mediante tela y con membranas, aunque con ésta última se realiza un permeado más que una filtración puramente física.

Son los filtros de arena los que más desarrollo han tenido a la hora de incorporar novedades con el objeto de hacerlos más eficientes frente a las aguas de procedencia residual ya que la mayoría de ellos vienen del tratamiento de aguas prepotables.

Estos nuevos sistemas, como los filtros de lecho pulsante y los filtros de puente móvil, son más complejos que los filtros de arena convencionales, pero permiten un funcionamiento prácticamente en continuo. Los de lecho pulsante llevan muchos años funcionando, aunque sus costes de implantación y explotación son más elevados que los convencionales. Los filtros de puente móvil pueden conseguir similares rendimientos de reducción de SS y de turbidez. Este tipo de filtros son

específicos para agua depurada y suelen trabajar a las mismas velocidades de filtración, entre 7 y 10 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>, que el resto de los filtros de lecho de arena.

**Tabla 5.2** Características de las distintas tecnologías de filtración y porcentaje de reducción de los parámetros establecidos en el RD 1620/2007

	Velocidad filtración (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	Partícula eliminada (mm)	Lecho (m)/ granulometría (mm)	Turbidez (%)	SS (%)	E.coli (%)	Nematodos (%)
Presión	7-10	> 0,01	0,8-1,2/0,8-1	20-30	30-50	50-95	95-99
Gravedad	7-10	> 0,01	1-1,5 /0,8 - 1	20-50	30-80	50-95	95-99
Anillas	4-5/mód.	> 0,02		20-30	20-30	50-60	90-95
Lecho pulsante	8	> 0,01	0,25-0,30/0,45	40-50	75-85	40-80	95-99
Puente móvil	5	0,01	0,30-0,40/0,45	60-80	50-80	40-80	95-99
Dualsand	7,5	> 0,0001	2-1/1,5-0,8	85-95	80-90*	99,8-99,99	Ausencia
Dynasand	7,5	> 0,001	2/1,2	80-90	80-90*	99,9	Ausencia
Filtro de tamiz	10-14 (10 micras)	> 0,01	Poliéster 0,01- 0,5	85-95**	60-80	50-95	Ausencia

\* con 4 – 5 ppm de cloruro férrico o policloruro de alúmina \*\*Con un influente menor a 15 ppm.

Mencionar dos sistemas de arena de implantación más recientes cuya particularidad es recircular la arena para su limpieza en lugar de contralavar como es habitual en un filtro convencional: son los Dynasand<sup>®</sup> y el Dualsand<sup>®</sup>. Estos sistemas han dado buenos resultados en las Islas Canarias en sustitución a algunas microfiltraciones como pretratamiento a etapas de desalación, siendo capaces de eliminar partículas de 10<sup>-4</sup>-10<sup>-5</sup> mm.

Algunos fabricantes, como es el caso de los filtros “hydroclear” (lecho pulsante), suministran el software cerrado, no permitiendo que el operador introduzca modificaciones en la programación, lo que a veces impide una correcta explotación del sistema.

Los sistemas de filtración de lavado en continuo, como los de lecho pulsante y puente móvil, pueden conseguir calidades en el efluente regenerado similares a la línea de tratamiento físico-químico con decantación lamelar y filtración convencional sobre arena en los casos en que el efluente de la estación depuradora sea de buena calidad (SS < 20 ppm).

#### Filtros de arena por gravedad y a presión

La tecnología de filtración de mayor implantación es la filtración sobre arena (a presión o gravedad) como pretratamiento a una desinfección con radiación UV y/o hipoclorito. Este tratamiento podría conseguir en el caso de buenos efluentes secundarios calidades de E. coli de < 100 UFC.100 mL<sup>-1</sup>, pero en general se emplean para conseguir calidades de E. coli <1.000 UFC.100 mL<sup>-1</sup>.

Respecto a los huevos de nematodos, la experiencia indica que tras una línea compuesta de físico-químico con decantación más filtración sobre arena, respetando los parámetros normales de funcionamiento de la EDAR, no se han encontrado huevos de nematodos. El tamaño partícula que pasa a través de este tipo de filtros no es superior a 25 micras, por lo que en principio pueden cumplir con las calidades 2.2, 2.3, 3.1, 4.2, 5.1 y 5.3, establecidas en el RD 1620/2007.

Se considera importante para cualquier tipo de filtro de arena, cara a su rendimiento en parámetros como la turbidez, el tamaño de la misma, su coeficiente de uniformidad y su disposición, espesor del lecho y nivelado. Se han encontrado lechos de arena con diámetros efectivos de 1,5 mm y otros de



1,0 mm, con grandes diferencias en sus prestaciones. A este respecto, se considera necesario que la arena no sobrepase el milímetro de diámetro y que sea lo más redondeada posible.



**Figura 5.5** Filtro convencional, monocapa y de flujo descendente (Iglesias, R.)

También es necesario diseñar adecuadamente el sistema de limpieza para garantizar una distribución homogénea del aire en todo el filtro y así evitar pérdidas de arena, la creación de caminos preferenciales y la utilización parcial del filtro.

Los filtros de gravedad son los más sencillos dentro de este tipo de filtros. En la Figura 5.5 se muestra un filtro convencional de flujo descendente con una profundidad del lecho que puede ir de 60 a 90 cm en función del tipo de filtro.

Su funcionamiento es el siguiente: el agua a filtrar se aplica por la parte superior del lecho del filtro y sale, ya filtrada, por la parte inferior. El lavado se realiza a contracorriente con aire y agua filtrada y no debería suponer más del 3% de la misma.

En los filtros a presión, la operación de filtrado se lleva a cabo en un recipiente cerrado en el que se han introducido condiciones de presión por medio de una bomba o por diferencia de cotas.



**Figura 5.6** Filtros de arena a presión (Iglesias, R.)

#### Filtros de anillas

En esta tecnología, la filtración tiene lugar por anillas planas de material plástico provistas de ranuras. Dichas anillas están colocadas una sobre otra y comprimidas, formando el elemento filtrante. Los cruces entre las ranuras de cada par de discos adyacentes forman pasos de agua, cuyo tamaño varía según las anillas utilizadas y la situación relativa de los discos.

Los pasos de agua en un mismo tipo de anillas son máximos donde la ranura de una anilla coincide con la ranura del otro y mínimos donde esta coincide con el espacio entre dos ranuras; el paso máximo es el que define el grado de filtración de las anillas.

Los filtros de anillas tienen poca aceptación en el ámbito de la regeneración de efluentes depurados. Los rendimientos de eliminación de SS son bajos y no eliminan las partículas < de 10  $\mu\text{m}$ , en comparación con otro tipo de filtros. No reducen apreciablemente ni el color ni la transmitancia y tienden a formar caminos preferenciales debido al sistema de limpieza que llevan.



Figura 5.7 Filtros de anillas. Dcha.) Ranuras de la anilla Izda.) Anilla y Elemento filtrante

#### Filtros de lecho pulsante (Hydroclear™)

Esta tecnología de filtración con lecho pulsante de mínima altura de lecho, patentada por Hydroclear®, Figura 5.8, se basa en una capa pulsante no estratificada de arena fina, que se regenera constantemente gracias al empleo de sistemas físicos de regeneración de superficie y de pulsación.

La idea es regenerar la superficie filtrante para así conseguir alargar el ciclo de filtración. Esto se consigue mediante un juego de difusores tubulares de aire emplazados sobre el medio filtrante que crean corrientes hidráulicas que provocan que la mayor parte de los sólidos permanezcan en suspensión en el volumen de líquido sobre dicho material. De esta forma, se evita la deposición de estos sólidos sobre el material filtrante y la colmatación de dicha superficie y se consigue prolongar los ciclos de filtración.



Figura 5.8 Filtros de lecho pulsante en funcionamiento (Iglesias, R.)

Debido al gradiente de velocidad dirigido perpendicularmente sobre la superficie filtrante, al cabo del tiempo se creará una pérdida de carga por depósito de los sólidos sobre la superficie. El sistema de pulsación permite periódicamente reducir esta acumulación de sólidos pulsando el lecho filtrante. Esta actividad pulsante regenera la superficie filtrante y traslada los sólidos acumulados sobre la superficie de nuevo a la columna de agua existente sobre el material filtrante. Al mismo tiempo, una fracción importante de los sólidos es transferida y atrapada por el medio filtrante (por debajo de su superficie).

El efecto combinado de los sistemas de regeneración de superficie y de pulsación permite alargar los ciclos de filtración y atrapar una mayor cantidad de sólidos en el lecho filtrante que en sistemas alternativos.

---

Otra ventaja importante del diseño de estos filtros consiste en la mínima altura del lecho, menos de 60 cm, y en el dimensionado del espacio de colección del agua filtrada, que permite fases de contra lavado extremadamente cortas y requiere sólo una fracción del volumen de agua de contra lavado imprescindible para el lavado de otros filtros convencionales.

#### Filtros de puente móvil

La filtración de puente móvil es una tecnología de filtración por gravedad cuya principal característica es el puente móvil de lavado en continuo que limpia el filtro de forma automática.

El lecho del filtro está dividido en células independientes dispuestas transversalmente a la marcha longitudinal del puente. Cada célula filtrante tendrá un espesor de la capa filtrante de unos 30 cm aproximadamente. Las aguas tratadas fluyen de forma descendente a través del lecho, dirigiéndose a la zona inferior de agua filtrada.



**Figura 5.9** Esquema de funcionamiento de un filtro de puente móvil (Iglesias, R.)

La limpieza de las células se produce de forma individual a contracorriente cuando el puente móvil se encuentra sobre ella, de manera que el resto de las células siguen funcionando. El agua de limpieza se bombea directamente desde el lecho filtrante haciéndola pasar a través de él para ser recogida posteriormente en un foso. Durante el ciclo de lavado, el agua continúa filtrándose en el resto de células del filtro. El sistema de limpieza incluye una bomba que aspira en superficie y que ayuda a retirar la costra y los lodos flotantes del filtro.

Este sistema ofrece bajas pérdidas de carga, lo que permite operar con alturas manométricas de tan solo 35 - 45 cm.

#### Filtros Dualsand®

Esta tecnología de filtración de arena en dos etapas en continuo, DUALSAND®, mejora respecto a otro tipo de filtros los rendimientos de eliminación en turbidez, sólidos totales en suspensión y fósforo.

Este proceso consiste en dos filtros colocados en serie que disponen de un sistema de limpieza en contracorriente. Ambos filtros reciben el agua a filtrar a través de una tubería central perforada de manera que el agua sale por ella y atraviesa el filtro del fondo.

Cada uno de los filtros alberga un lecho de arena en profundidad, de uno a dos metros de lecho, con granulometrías de arena de 1,5 a 0,8 mm. Tras pasar el agua por el filtro, el agua tratada sube hacia la parte superior donde se evacua. El primero de ellos tiene mayor tamaño y granulometría de arena de forma que el tiempo de contacto del agua con el lecho es mayor favoreciendo la formación de flóculos y minimizando la colmatación del mismo.

En el segundo tanque, el filtro tiene un tamaño menor, lo que favorece la deposición de las partículas residuales formadas en la primera etapa. Al mismo tiempo, la arena es removida desde la parte baja del primer filtro y una vez limpia es devuelta a la parte alta del lecho arenoso. Una pequeña parte del agua filtrada se utiliza para la limpieza de la arena y abandona el filtro como rechazo. El agua de lavado del segundo filtro, dado el poco contenido en sólidos que arrastra, se recircula al primer filtro introduciéndola junto con el agua a tratar.



**Figura 5.10** Filtros de doble etapa de arena Dualsand (Iglesias, R.)

#### Filtros Dynasand®

Esta tecnología dio origen a la anterior. Su funcionamiento es el mismo pero la filtración se produce en una única etapa. El macizo filtrante supera los dos metros y la granulometría de la arena va en función de la calidad del influente. Como tratamiento de regeneración no suele ser inferior a 1,2 mm.

El sistema de lavado es también continuo a través de un air Lift que sube la arena al dispositivo de lavado. Aquí se lava con agua filtrada y se separa con un Hidrociclón que además reparte la arena ya limpia de forma uniforme de arriba abajo. Por el contrario, el caudal a tratar se reparte de abajo a arriba a través de un sistema distribuidor fijo. El agua tratada sale por la parte superior del filtro y existe un drenaje en el fondo, para manipular el lecho en caso de que existieran problemas de colmatación al igual que en el Dualsand.

En estos filtros con recirculación de arenas y lavado en continuo (Dualsand, Dynasand, etc.), sus resultados no dependen tanto de las características del efluente depurado, lo que supone una ventaja adicional a los anteriormente mencionados. Son fáciles de operar, obteniendo efluentes de buena calidad. Los rendimientos de eliminación de turbidez se encuentran en el entorno del 70-80%, pudiendo conseguir con una turbidez de entrada de 10 UNT, valores de 2-3 UNT de salida. Se ha observado en algunas instalaciones pérdidas de arena superiores a las indicadas por los fabricantes.



**Figura 5.11** Esquema de un filtro de arena Dynasand®, (Iglesias, R.)

### Filtración textil

En esta tecnología, el agua a tratar entra al tanque de alimentación y desde allí va introduciéndose en los discos al tiempo que se produce la filtración, al atravesar los tamices que están fijos sobre las dos caras de los discos. Una vez en el interior de los discos, el agua tratada llega al tubo central desde el que es evacuada. Cada disco está formado por 6 elementos iguales y el material del tamiz se fabrica de poliéster o de tejido sintético. Puede considerarse que filtran en profundidad, pudiendo alcanzar un tamaño nominal de poro de 10  $\mu\text{m}$ .

El filtro textil, pues, consiste en varios discos paralelos dispuestos verticalmente dentro de un tanque de almacenamiento y unidos por un tubo central.

El tejido filtrante está compuesto por fibras fabricadas bien de nylon o de poliéster, tejidas sobre un soporte de este último material. Durante la filtración, las fibras forman un lecho filtrante que filtra en profundidad, mientras que durante el lavado son aspiradas.



**Figura 5.12** Dcha) Interior de uno de los discos que componen el filtro textil. Izda) Disposición de los discos dentro de la línea de tratamiento (Batanero, G.)

Algunas instalaciones equipadas con filtros de puente móvil se están reconvirtiendo empleando esta tecnología de filtración a través de un medio textil. La obra civil existente se aprovecha prácticamente en su totalidad y, además, se multiplica la capacidad de filtración, al hacerlo la superficie filtrante.



**Figura 5.13** Ejemplos de reacondicionamiento a filtración mediante medio textil (Batanero, G.)

Esta tecnología de filtración está especialmente indicada para efluentes secundarios, es decir para filtración de partículas floculantes.

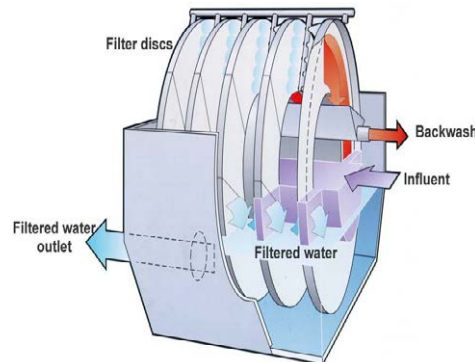
### Filtro de tamiz

En estos filtros la filtración es superficial mediante microtamizado, lo que implica la retención de la materia en suspensión por la separación mecánica producida en la superficie de un microtamiz de poco espesor. El tamaño de poro típicamente empleado se encuentra en el rango de 10 a 30  $\mu\text{m}$ .

En el caso de los filtros de tamiz rotativos se han detectado problemas en la regularidad del tamaño de partícula en el efluente filtrado, encontrando en ocasiones partículas mayores a 10  $\mu\text{m}$ . Pierden capacidad de filtración por ensuciamiento del tamiz en el momento que entra una concentración de sólidos superior a la definida en proyecto o se dosifica una cantidad de coagulante por encima de 8-10 ppm.

Su funcionamiento correcto se garantiza con un tratamiento físico-químico previo con decantación ya que en línea el tamiz se ensucia con facilidad.

No obstante, estos filtros tienen a su favor su fácil mantenimiento, un gasto energético mínimo y una fácil instalación debido a su compacidad.



**Figura 5.14** Esquema de funcionamiento del Filtro Hydrotech®

El equipo Hydrotech Discfilter desarrollado por US Filter (Veolia Environment), presenta un diseño del medio filtrante en monofilamento de PET y tamaño de poro de 10  $\mu\text{m}$ . Este tamaño de poro asegura en principio la eliminación de nematodos. En este proceso, los sólidos son separados de la fracción líquida gracias al medio filtrante fijado sobre las caras de los discos. Estos discos se encuentran divididos en sectores estancos conectados a una válvula rotatoria y van montados sobre un eje central, Figura 5.14.

Este proceso se desarrolla según la siguiente secuencia: El agua bruta llega por el centro del tambor entrando por gravedad a cada uno de los segmentos de los discos. Allí el agua fluye desde el centro del disco hacia fuera. Los sólidos se separan del agua debido a los paneles filtrantes dispuestos en los dos lados de los segmentos del disco (paneles filtrantes de 10  $\mu\text{m}$  de tamaño de paso). Los sólidos son retenidos dentro de los discos mientras que el agua limpia fluye hacia el exterior de los mismos recogándose en un tanque para agua filtrada. Este tanque actúa como almacén de agua limpia lo que elimina la necesidad de un suministro independiente de agua para contralavado.

Cuando el dispositivo presenta una elevada pérdida de carga, se inicia automáticamente un proceso de lavado a presión de las mallas filtrantes. El hecho de que los discos giren permite exponer al flujo de agua a filtrar una superficie de malla limpia, lo que asegura el funcionamiento del proceso de filtrado durante el lavado del resto de la superficie. El caudal de contralavado es de un 1-3 % del caudal afluente al equipo, aunque depende del flujo de diseño, y de la concentración pudiendo ser bastante superior.

### **Unidades de filtración por membrana**

En la tecnología de filtración por membranas, ésta se realiza en superficie, diferenciándose de otras por el tamaño del poro del medio filtrante. Los sistemas de filtración por membranas difieren únicamente en el tamaño de las partículas que separan, Figura 5.15, y las membranas empleadas.

Son utilizadas para eliminar materia particulada, incluyendo patógenos y materia orgánica no eliminados en las anteriores etapas.

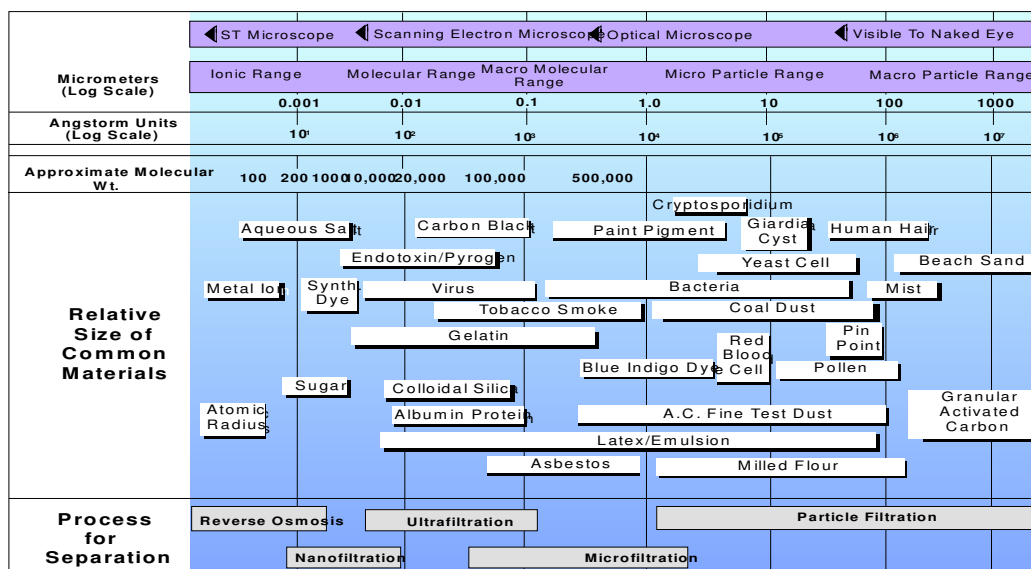


Figura 5.15 Separación de los distintos procesos de filtración por membrana (AEAS, 2006)

Según el tamaño de poro de la membrana se tiene dentro de las utilizadas en regeneración: la microfiltración, la ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Las dos primeras se utilizan como pretratamientos a la ósmosis inversa que por su tamaño de poro no retiran sales y las membranas de OI y EDR son las utilizadas para la eliminación de sales.

La nanofiltración no está por el momento implantada en España como parte de una ERA, pero está en estudio y con posibilidades en usos industriales.

En estos procesos, una mezcla de componentes químicos llega a la superficie de una membrana porosa. Por la acción de un gradiente de presión positivo o negativo, algunas sustancias atraviesan la membrana, mientras que otras son retenidas, Figura 5.16.

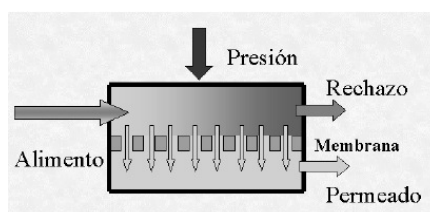


Figura 5.16 Esquema general de un proceso de filtración con una membrana (AEAS, 2006).

Todas las membranas precisan de pretratamientos, como los filtros de arena en caso de que el influente sea de mala calidad e irregular en SS. La utilización de membranas como tratamiento de regeneración debería ser objeto de un estudio cuidadoso, si es posible con ensayo en planta piloto durante más de 6 meses, dada la sensibilidad de las membranas a la calidad del agua a tratar.

La limpieza de las membranas se realiza mediante retrolavados, ciclos de relajación y aireación continuada a través de una parrilla colocada debajo de las membranas, en caso de las de fibra hueca, y aireación y ciclos de relajación en caso de las membranas planas. Ocasionalmente se realizan tratamientos con soluciones químicas para eliminar la capa creada durante la filtración, bien de origen bacteriano y/o químico y recuperar así la permeabilidad de la membrana.

En experimentaciones prácticas, se ha podido observar que las prestaciones de las membranas de ultrafiltración (UF) y en particular las que funcionan a depresión, son superiores a las de microfiltración (MF), para costes de explotación similares, por lo que la tendencia actual es de un predominio de las primeras sobre las segundas. Una diferencia sustancial se encuentra en la eliminación de patógenos; consiguiendo la UF ausencia total de E. coli en su efluente, frente a la reducción de 3-4 unidades logarítmicas en la MF, salvo que se dosificase hipoclorito sódico en continuo.

Por el tamaño que tienen los nematodos, entre 30 y 60 micras, quedan retenidos tanto en membranas de UF como de MF.

En ambos casos la calidad del agua de alimentación influye mucho en la eficiencia, sensible a variaciones bruscas de SS y turbidez. Su eficiencia disminuye de forma importante cuando el influente presenta sólidos en suspensión superior a 25 mg. L<sup>-1</sup> o una turbidez mayor de 15 UNT. Por ello es aconsejable la instalación de una etapa de protección previa a la UF o a la MF mediante filtración por arena.

Los resultados expuestos en la Tabla 5.1 se han obtenido con influentes < 15 UNT. En el agua microfiltrada o ultrafiltrada podría alimentar directamente una instalación de ósmosis inversa.

Para mantener el flujo (LMH) a través de las membranas, y con ello la eficiencia de las mismas, se recomienda que, en caso de caudales variables, se incluya un depósito de laminación de caudales para evitar las puntas.

La rotura de membranas es un riesgo que debe controlarse, por lo que se recomienda disponer de un test de integridad que detecte dichas roturas. A título experimental se está estudiando la posibilidad de utilizar la transmitancia como detector de las citadas roturas, al ser éste un parámetro que describe muy bien variaciones muy pequeñas en la calidad del agua y un parámetro fundamental para la eficiencia de la desinfección por ultravioleta posterior.

La mayoría de los fabricantes de sistemas de filtración mediante membranas suministran el software cerrado, no permitiendo, al igual que hemos señalado en algunas marcas de filtros, que el operador introduzca modificaciones en la programación, lo que impide una correcta explotación del sistema.

### Microfiltración (MF)

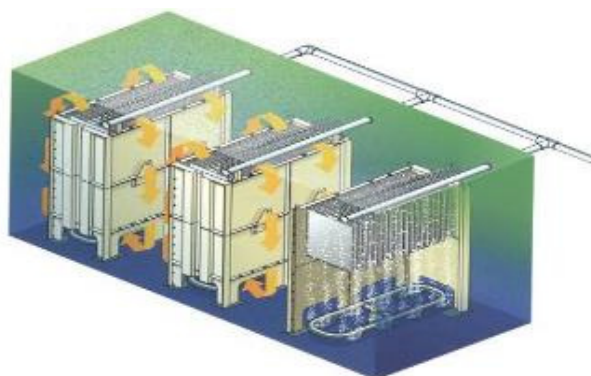
Las membranas empleadas en microfiltración retiene las partículas de tamaño entre 0,1 y 0,2 µm. Es efectiva eliminando y permite la retención de los materiales coloidales de origen inorgánico y orgánico. Sin embargo, no asegura la eliminación completa E. coli u otros agentes tales como los virus. Pueden estar fabricadas con distintos materiales. Los más utilizados en agua residual urbana son los poliméricos (poliamida, polisulfona, polipropileno).



**Figura 5.17** Microfiltración tubular en Canarias (Iglesias, R.)



En cuanto a su diseño, se pueden distinguir cuatro grandes grupos de membranas de microfiltración, pudiendo ser laminares o tubulares. Las planas pueden estar enrolladas en espiral o dispuestas sobre marcos, mientras que las tubulares son de fibra hueca dispuestas sobre bastidores o en tubo cerrado, dependiendo la disposición de la forma de trabajar sumergidas en el agua o externas.



**Figura 5.18** Esquema de microfiltración con membrana plana.

En caso de precisar eliminación de nutrientes, ésta debería realizarse previamente en la EDAR o posteriormente mediante un proceso de ósmosis inversa.

#### Ultrafiltración (UF)

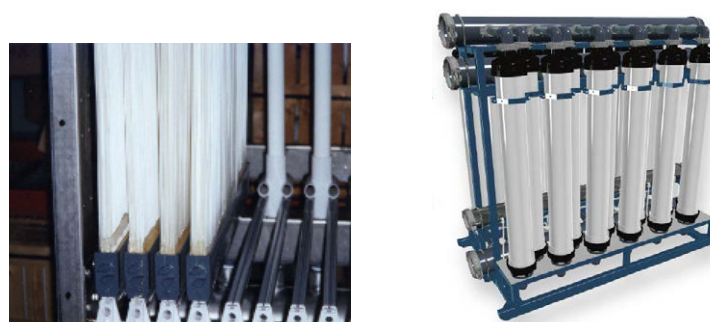
La ultrafiltración puede emplearse para eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes, de entre 0,01 y 0,1  $\mu\text{m}$ .

La ultrafiltración permite obtener un efluente regenerado susceptible de ser utilizado en todos los usos establecidos en el Real Decreto 1620/2007, a excepción de los que necesiten una eliminación de nitrógeno o fósforo. Estos usos son: a) los estanque, masas de agua y caudales circulantes ( $\text{PT} < 2 \text{ mg. L}^{-1}$ ); b) la recarga de acuíferos bien por percolación localizada a través del terreno, bien por inyección directa (en ambos casos  $\text{NT} < 10 \text{ mg. L}^{-1}$  y  $\text{NO}_3 < 25 \text{ mg. L}^{-1}$ ).

Se utiliza la ultrafiltración cuando deben eliminarse prácticamente todas las partículas coloidales (incluyendo la mayor parte de microorganismos patógenos).

Al eliminar los coloides, se consigue una turbidez por debajo de 1 UNT del agua tratada y SDI menores a 2, lo que permite un tratamiento posterior de OI.

Se observa que las prestaciones de la UF son superiores a las de la MF para costes de explotación similares, por lo que la tendencia es de una mayor implantación de las membranas de UF.



**Figura 5.19** Dcha) Bastidor de membranas de fibra hueca de ultrafiltración a depresión Izda) Bastidor de membranas tubulares a presión (Iglesias, R.)

---

La mayor diferencia se encuentra en la eliminación de patógenos puesto que la MF reduce los E. coli en 3 - 4 unidades logarítmicas, necesitando una dosificación de 10-20 ppm de hipoclorito sódico al 15 % para su reducción total en el agua de retrolavado. La UF consigue una ausencia total de E. coli en su efluente.

### **Unidades de desalación**

Canarias fue la región pionera en la utilización de las tecnologías de desalación de agua de mar y salobre, como la Ósmosis Inversa (OI) y la Electrodiálisis Reversible (EDR), en la regeneración de efluentes depurados, por los problemas de salinización de los acuíferos, el déficit hídrico estructural y la necesidad de buscar recursos no convencionales. Las dos tienen fundamentos diferentes y su eficacia es también diferente, así como sus problemas de funcionamiento. Se utilizan fundamentalmente para reducir el contenido de sales disueltas, pero en caso de OI la calidad del permeado es apta para todos los usos.

#### Electrodiálisis reversible

La Electrodiálisis es un proceso de separación de sales por vía electroquímica en el cual los iones son transferidos a través de membranas desde una solución menos concentrada a otra más concentrada como consecuencia de una diferencia de potencial (voltaje de corriente continua). Los cationes ( $\text{Na}^+$ ) son atraídos hacia el electrodo negativo, llamado cátodo y los aniones ( $\text{Cl}^-$ ) son atraídos hacia el electrodo positivo, llamado ánodo. Mediante el cambio de la polaridad eléctrica se controla continuamente la precipitación sobre las membranas y el ensuciamiento de las mismas.

La unidad fundamental de trabajo en un sistema de electrodiálisis es la pila de membranas, constituida por entre 300 y 600 pares de células. Las células están constituidas por: membrana de transferencia de cationes, espaciador de flujo de agua desmineralizada, membrana de transferencia de aniones y espaciador de flujo de agua concentrada.

Cuando el agua a tratar atraviesa la pila de membranas de EDR a través de los canales de agua a tratar, los minerales que contiene se mueve en cualquier dirección siendo atraídos por los campos eléctricos, de forma que se dirigen hacia las torres de membranas, las cuales los atrapan en los canales dedicados para contener la solución altamente concentrada. De esta forma, los iones con carga positiva migran a través de la membrana de intercambio catiónico y viceversa.

Finalmente, se recoge el agua que ha recorrido los canales de agua a tratar, mientras que, a su vez, el concentrado procedente de sus propios canales también es evacuado por otro conducto.

La EDR implica que se alterna periódicamente la polaridad en los electrodos (de 2 a 4 veces por hora), lo que genera una autolimpieza continua. De manera que, mientras en un ciclo los canales recogen el concentrado, en el siguiente, llevarán agua tratada, eliminando así los posibles residuos adheridos a las membranas en el ciclo anterior.

La EDR es una tecnología que no reduce SS ni elimina patógenos, se implementa exclusivamente para la eliminación de sales.

Una ventaja de la EDR es su robustez, pero su explotación es tediosa debido a las limpiezas manuales que se realizan de las membranas y espaciadores. Para intentar eliminarlas se están experimentando nuevas membranas más resistentes que puedan adaptarse a pH altos. Esta ventaja se traduce en un coste bastante elevado en personal.

Un factor que influye de una forma apreciable en el coste de explotación es la reposición de filtros de cartucho (200 micras) de protección del proceso. Problemas en la operación del pretratamiento o

una mala calidad del agua influente ( $SS > 20 \text{ mg. L}^{-1}$  y turbidez  $> 10 \text{ UNT}$ ) pueden elevar el coste de reposición de los cartuchos de tal forma que el funcionamiento de la EDR sea ineficiente.



**Figura 5.20** Esquema de funcionamiento de la electrodiálisis reversible (Iglesias R.)

Altos contenidos de fosfatos imposibilitan el funcionamiento de esta tecnología. En cuanto al hierro y al aluminio, los niveles permitidos en el agua a desalar son:  $Fe < 0,3 \text{ mg. L}^{-1}$   $Al < 0,1 \text{ mg. L}^{-1}$ .

Para evitar los niveles altos de turbidez y SDI, es necesario incluir un tratamiento previo, siendo los más comunes: a) los filtros de arena convencionales, b) el tratamiento físico-químico con decantación lamelar y filtros de arena. c) la ultrafiltración y d) la filtración en continuo en doble o única etapa (Dualsand o Dynasand). La línea de tratamiento con mayor predicamento en la actualidad en las Islas Canarias es la compuesta por: Filtración en continuo en doble etapa + filtro de cartucho autolimpiante de 10 micras + EDR + desinfección con hipoclorito.

El pretratamiento seleccionado debe evitar el paso de partículas superiores a 20 micras y asegurar que su funcionamiento sea en continuo, por lo que se recomienda sistemas de protección que permitan limpiezas en continuo y no sean inmediatamente recambiables como es el caso de los cartuchos ya que suponen una carga en el coste de explotación nada despreciable.

### Ósmosis inversa

Es una tecnología de membrana que funciona mediante la aplicación de presión mecánica con la que 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 filtrada.

El proceso consiste en hacer pasar el agua a filtrar a través de una membrana densa que retiene prácticamente todas las sales disueltas y solutos de bajo peso molecular.



**Figura 5.21** Ósmosis Inversa instalado, Gran Canaria (Iglesias R.)

---

La OI necesita siempre un tratamiento previo, siendo el más utilizado la ultrafiltración. El pretratamiento seleccionado debe evitar el paso de partículas superiores a 10 micras y asegurar que su funcionamiento sea continuo, por lo que se recomienda que los sistemas de protección que se instalen sean de limpieza en continuo.

El principal problema detectado es la tendencia al ensuciamiento de las membranas debido principalmente a la materia orgánica disuelta. Este ensuciamiento hace disminuir la eficiencia, en ocasiones, drásticamente. Para evitar este ensuciamiento la OI suele tener un pretratamiento por doble filtración de arena o incluso por membranas de UF o MF. Si el material de la membrana lo permite, también se dosifica hipoclorito sódico para evitar el crecimiento de microorganismo o "biofouling".

El poner un pretratamiento con UF, significa que se traslada el problema del ensuciamiento microbiológico a esta unidad. Para evitar la dosificación de hipoclorito a la unidad de UF que por el tipo de material no suele ser tolerante, se tiende a desinfectar el agua con radiación UV con anterioridad.

Las membranas se disponen en espiral dentro de un tubo presurizado, Figura 2.21. Son de acetato de celulosa o poliamida aromática de tamaño de paso entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$  micras, que permiten la separación de los microcontaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, junto con los iones disueltos, además de la eliminación total de E. coli y virus, ver Tabla 5.1. Su empleo permite la reutilización de su efluente para todos los usos recogidos en el R.D. 1620/2007.

La calidad del agua a tratar por esta tecnología es limitante no recomendando su uso con aguas con SDI por encima de 3.

Como en el caso de la EDR, altos contenidos en fosfatos imposibilitan en la práctica el funcionamiento de esta tecnología. Otros problemas que pueden reducir la eficacia de la OI están originados por la presencia de hierro y aluminio.

La existencia de experiencias negativas con esta tecnología ha retraído su aplicación en algunas zonas donde la desalación es necesaria.

Esta tecnología ha mejorado su eficacia y eficiencia, a través de la experimentación llevada a cabo por administraciones y empresas en los últimos 10 años, especialmente respecto a la búsqueda de membranas específicas para las aguas residuales y a la selección de pretratamientos adecuados.

### **Unidades de desinfección**

Las actividades de desinfección son consideradas como los mecanismos principales en la desactivación o destrucción de la carga bacteriana (coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales, E. Coli, etc.) para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua. Estas actividades consisten en la aplicación de agentes desinfectantes químicos como cloro, hipoclorito, dióxido de cloro, ozono, etc., y físicos como la radiación ultravioleta.

El rendimiento respecto a los principales parámetros exigidos en el R.D 1620/2007, de las tecnologías de desinfección que se describirán a continuación se especifican en la Tabla 5.1 anteriormente dada.

En España la desinfección de las aguas depuradas se ha llevado a cabo a través de agentes físicos (radiación ultravioleta) o a través de agentes químicos, fundamentalmente hipoclorito sódico. El ozono se ha utilizado en contadas ocasiones y en muchas de ellas, por su complejidad y altos costes de implantación y explotación, se ha sustituido por otra tecnología.

La técnica tradicional de desinfección ha sido la dosificación de hipoclorito sódico, que todavía sigue estando muy extendida. Sin embargo, el desarrollo de fuentes de radiación ultravioletas más baratas y eficaces, su amplio espectro de desinfección y la creciente preocupación por los posibles efectos tóxicos de los compuestos orgánicos derivados del cloro, ha hecho que la radiación UV sea en la actualidad la tecnología más aplicada en los nuevos tratamientos de regeneración. La única desventaja de esta tecnología es que sólo desinfecta el agua durante su paso por la cámara de radiación, no aportando capacidad residual de desinfección, por lo que en la actualidad se está tendiendo a combinar la dosificación de radiación UV, con una posterior dosificación de hipoclorito sódico.

Para la desinfección de caudales de poca cuantía, en España existen instalaciones de tratamientos extensivos tipo lagunas de maduración y filtros de infiltración-percolación.

### Hipoclorito sódico

El hipoclorito sódico es un desinfectante potente y muy utilizado. La dosis de cloro necesaria para conseguir una determinada desinfección se define como la concentración de cloro por el tiempo de contacto con el agua a tratar.

El hipoclorito sódico diluido en medio acuoso da las formas químicas hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) y ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ), en función del pH. Ambas formas químicas se denominan cloro libre. El hipoclorito con el agua residual reacciona con el amonio formando cloraminas, con mayor persistencia que el ácido hipocloroso. Compuestos orgánicos nitrogenados, como las proteínas contenidas en el agua residual, forman organocloraminas, que tienen bajo poder desinfectante.

Los efluentes depurados contienen compuestos orgánicos que reaccionan con el cloro formando subproductos tóxicos, tipo trihalometanos (THMs) o nitrosodimetilamina (NDMA), no admitidos en agua de consumo humano. En principio, en zonas de vertido, donde no haya influencia de captaciones para uso potable, se podrá hacer uso de este tipo de desinfección al no existir normativa de vertido que limite este tipo de subproductos por el momento.

La dosis necesaria es diferente en función de las características del agua a tratar, así, para un efluente de un tratamiento secundario, se consiguen valores de *E. coli*  $< 200 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$ , con una dosis de  $10 \text{ mg. L}^{-1}$  de cloro y con un tiempo de contacto de 30 minutos. Si se incluye un tratamiento mediante filtración, se consiguen valores de *E. coli*  $< 10 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$ , dosificando  $5 \text{ mg. L}^{-1}$  de cloro en ese mismo tiempo de contacto. En caso de tratar efluentes nitrificados, la concentración necesaria de cloro sería aún menor.

Para el cálculo de la dosis seleccionada ( $D=C \times t$ ) donde  $C \text{ (mg. L}^{-1}\text{)}$  es la concentración de cloro, y  $t$  el tiempo de contacto en minutos, se puede utilizar como aproximación la ecuación:  $N/N_0 = (1 + 0,23 \times C \times t)^3$ , modelo Collins-Selleck (Collins H.F., 1972), donde  $N$  y  $N_0$  son la concentración de fecales en el efluente y el influente respectivamente.

**Tabla 5.3** Dosis de hipoclorito para diferentes tipos de agua residual

Tipo de agua a tratar	Concentración ( $\text{mg.L}^{-1}$ )
Depurada no nitrificada	10-15
Depurada nitrificada	6-8
Depurada y filtrada	1-5

En Tabla 5.3 se muestran rangos de concentración de hipoclorito que han sido necesarios en función del tipo de agua a desinfectar en algunas ERAs para llegar a unos valores de *E. coli* por debajo de  $1.000 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$  con tiempos de retención de unos 30 minutos.

En general se consigue una buena desinfección de un efluente depurado,  $E. coli < 2,2 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$ , con una dosis inmediatamente después de realizar el tratamiento de  $450 \text{ mg.min.L}^{-1}$  de cloro residual total por el tiempo de contacto que al menos debe ser de 90 minutos en caudal punta (DHS, 2007).

El cloro se suministra normalmente como  $\text{Cl}_2$  o  $\text{NaClO}$  siendo este último el más utilizado en la desinfección de agua regenerada. La dosificación es sencilla. Se precisa de un depósito de almacenamiento, otro dónde se haga la dilución y unas bombas dosificadoras de caudal variable. Para conseguir el tiempo de contacto necesario, el agua a tratar previa mezcla con el cloro, pasa por un laberinto, Figura 5.25, con volumen suficiente para llegar a tiempo retención de diseño.



**Figura 5.22** Laberinto de cloración de un tratamiento de desinfección (Iglesias R.)

En el inicio del laberinto se suele habilita una zona de mezcla normalmente un salto hidráulico tipo cascada donde se dosifica el hipoclorito.

El control puede hacerse proporcional al caudal, enviando la señal del medidor de caudal, bien a una válvula reguladora o bien al posicionador de la bomba de membrana. También se puede combinar la señal del medidor de caudal con la del analizador, mediante un sumador. El control de lazo compuesto, utilizando las dos señales independientemente, sólo es posible con bombas de membrana que puedan recibir señales para el rectificador del motor y para el posicionador.

El hipoclorito se viene empleando como desinfectante para aguas regeneradas de manera eficaz desde hace años, pero la presencia de materia orgánica, ácidos húmicos, y sólidos en el agua reduce su eficiencia y produce subproductos indeseados. En la actualidad, prácticamente todas las desinfecciones mediante hipoclorito para la regeneración de efluentes disponen de una filtración previa asegurando así el límite exigido en la normativa además de un ahorro significativo de producto.

#### Radiación ultravioleta (UV)

El sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo (ADN o ARN). Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, esta destruye la capacidad de reproducción de la célula. Se emplea la radiación de longitudes de onda de 253,7 nm, que se considera la más adecuada para el proceso. Es activo especialmente contra bacterias y virus y con lámparas de media intensidad tiene un importante efecto biocida contra Giardia y Cryptosporidium.

Se emplean lámparas de media y baja presión. Hasta el momento las más utilizadas en desinfección de aguas residuales son las de baja presión. Es importante que el efluente a desinfectar tenga pocos sólidos en suspensión y una transmitancia superior al 50%.

Uno de los problemas más importantes de esta tecnología es el proceso de limpieza de las lámparas, que en su mayoría es automática ya que de forma manual repercute en un coste de mantenimiento elevado.

El nivel de desinfección de la radiación UV depende de la exposición de los microorganismos a las radiaciones, siendo importante los componentes absorbentes de la luz ultravioleta: materia orgánica disuelta, coloides y sólidos en suspensión, junto al tamaño de partícula que reducen su intensidad útil en un sistema diseñado.

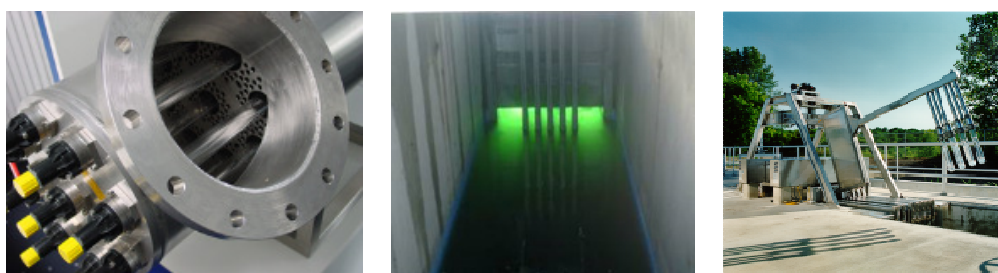
En la Tabla 5.4 se recoge el nivel de desinfección conseguido en diversas instalaciones en función de la transmitancia (UVT), los Sólidos Suspensión (SS) y el tamaño de las partículas presentes en el agua a desinfectar.

**Tabla 5.4** Nivel de desinfección mediante radiación UV en función de la transmitancia

TIPO DE PROCESO	UVT (%)	SS (mg.L <sup>-1</sup> )	Tamaño medio de partícula (micras)	Nivel de desinfección UFC.100 mL <sup>-1</sup>
Secundario	40-75	10-30	25-45	< 200-240
Terciario (filtración)	60-75	5-10	20-30	< 14-23
Terciario avanzado	65-80	1-5	15-20	< 1-2,2

Dos son los criterios fundamentales para el diseño de la cámara de radiación ultravioletas, para evitar, en lo posible, la acción protectora de las partículas sobre los microorganismos y posibles cortocircuitos que originen que parte del caudal a desinfectar no reciba la dosis adecuada: El flujo, a través de la misma, debe ser turbulento y el agua debe recibir la radiación UV desde todas direcciones.

Básicamente, pueden considerarse dos tipos de reactor, abierto o en canal y cerrado en tubería. En el caso de canal, los módulos se montan longitudinalmente en el mismo, mediante soportes de apoyo, son paralelos a la dirección del flujo y sus lámparas pueden ser encendidas y apagadas individualmente, siendo regulable la intensidad de las mismas. Para asegurar la eficiencia del reactor, es imprescindible hacer un bioensayo para la validación del reactor UV. El bioensayo consiste en determinar la recta de eliminación, dosis/unidades logarítmicas de organismo eliminadas, mediante el ensayo del haz colimado, y compararla con la obtenida con el reactor a instalar. Variando el caudal que pasa por el reactor se puede llegar a que ambas rectas sean coincidentes, con lo que se determinaría el caudal que dicho canal es capaz de tratar para una dosis determinada.



**Figura 5.23** Diferentes disposiciones y lámparas de radiación ultravioleta (Iglesias R.).

La dosificación en el caso de la radiación ultravioleta se mide en julios por metro cuadrado que corresponde a la intensidad de la lámpara por el tiempo de contacto. El tiempo de contacto en este tipo de desinfección es de segundos. Para efluentes depurados sin filtrar se precisa unos 400 J.m<sup>-2</sup>

mientras que para aguas filtradas  $330 \text{ J.m}^{-2}$ , siempre en función de la transmitancia que tenga el agua a tratar, para llegar a menos de  $200 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$  de E. coli.

### Desinfección mediante ozono

El ozono es un gas de color azul pálido, de olor característico. Es tóxico y corrosivo. Es uno de los agentes oxidantes más poderosos que se conocen. La solubilidad en agua es un factor limitante: a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  es sólo de  $570 \text{ mg. L}^{-1}$ , 12 veces menos que el cloro.

La dosis puede ser determinada empíricamente, mediante la expresión:  $\text{O}_3 \text{ (mg/l)} = 1,5 + 0,38 \times \text{TSS}$ , siendo TSS los sólidos suspendidos del efluente secundario, y el tiempo de contacto de 10 minutos. Dado que la vida media del ozono en el agua es solo de 20 minutos, es necesario suministrarlo escalonadamente para alcanzar el tiempo de contacto necesario.



**Figura 5.24** Generador de ozono (Iglesias R.).

La dosificación de ozono para aguas depuradas filtradas es del orden de  $5 \text{ mg. L}^{-1}$  con un tiempo de contacto de diez minutos, para obtener menos de  $1.000 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$  de E. Coli y de  $15 \text{ mg. L}^{-1}$  si se quiere menos de  $10 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$ .

En cuanto al control y el coste de este tratamiento en comparación con los anteriormente descritos para la desinfección de efluentes depurados es bastante más elevado por lo que las pocas instalaciones que había se han ido sustituyendo por la combinación de radiación ultravioleta más hipoclorito.

El ozono deja el agua tratada con ausencia de E. Coli y elimina además olores, que puede ser un requerimiento del uso al que vaya destinada el agua.

Como punto final a este apartado se resume en la Tabla 5.5 el rendimiento de los distintos tipos de tratamiento descritos anteriormente, en relación a los principales parámetros de calidad establecidos en el R.D. 1620/2007, Anexo IA del R.D.

**Tabla 5.5** Rendimiento de las distintas etapas de tratamiento

	<b>SS (%)</b>	<b>Turbidez (%)</b>	<b>E. Coli (Unidades log.)</b>	<b>Nematodos (%)</b>
Físico-químico	50-70	30-50	1-2	80
Filtración	60-80	30-60	0,5- 1,5	99
Membranas	90-95	90-95	ausencia	ausencia
Desinfección	-	-	4-5	-



## 5.1.2 Costes de las distintas tecnologías de regeneración estudiadas

Una vez estudiadas las diferentes tecnologías de regeneración y conocidos sus rendimientos y eficacia para alcanzar los criterios de calidad establecidos en el R.D 1620/2007, este apartado se centra en el coste que supone la implantación y explotación de cada unidad de tratamiento descrita anteriormente.

Los costes incluidos aquí, se basan en datos reales de instalaciones en funcionamiento, con capacidades de tratamiento por debajo de los 10.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>. También se ha recurrido a la información suministrada por las casas comerciales y a una revisión bibliográfica cuando no se ha dispuesto de suficientes datos (Iglesias R. y Batanero G., 2009).

Para acometer este objetivo se contaba con toda la experiencia de los rendimientos y problemas de operación que suponían las diferentes líneas de tratamiento que están operando en España, fruto de la realización de la BDR 2009 (ver apartado 3.1), y se realizaron unas fichas-cuestionario (Anexo II), para recopilar información sobre el funcionamiento y el coste de explotación de cada una de las unidades que conformaban las diferentes líneas de tratamiento. Se recibió información de unas 50 instalaciones con capacidades, en su mayoría comprendidas, entre 2.000-20.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>, del ACA, ESAMUR, ACOSOL, CCB y del gobierno balear y canario. Se solicitó, además, presupuesto a diferentes ingenierías y casas comerciales de las distintas unidades y líneas de tratamiento para poder así evaluar mejor los costes de implantación.

Los costes de implantación no incluyen amortización, IVA, beneficio industrial ni gastos generales. Respecto a los costes de explotación, en los fijos se incluye una estimación de personal en aquellas unidades de tratamiento donde es considerable, membranas y unidades de desalación, y en relación a los costes variables, se estima el coste de productos químicos, consumo de energía y reposiciones de membranas u otros consumibles en función de cada unidad.

Los costes referentes a la energía corresponden a un valor del kWh en el entorno de 0,07 euros, siendo este término variable en el tiempo y la zona de estudio.

Las unidades de tratamiento evaluadas a continuación, no incluyen la obra civil de llegada. Obviamente el coste en proyecto de toda una línea de tratamiento incluida la obra civil, tanto para la instalación de cada unidad como de la obra de llegada del agua a tratar, supondrá una variación a lo aquí estimado.

### Costes de implantación y explotación de los tratamientos físico-químicos

Este tratamiento se utiliza para regular los posibles picos de carga que puedan venir de la EDAR, eliminación de metales o nutrientes. Dependiendo del objetivo que se persiga la cantidad de productos químicos es distinta. El coste de consumo de reactivos más energía para bajar puntas de SS puede estar entre los 0,017-0,023 €.m<sup>-3</sup> dependiendo de la cantidad de sólidos en suspensión en el influente y del tipo de químico a consumir.

**Tabla 5.6** Costes de implantación y explotación de la decantación lamelar

<b>Coste de implantación (€.m<sup>-3</sup>.h)</b>	<b>Coste de reactivos (€.m<sup>-3</sup>)</b>		<b>Coste de energía (€.m<sup>-3</sup>)</b>
500 - 700	Coagulante	Floculante	0,0004-0,0005
	0,015 – 0,020	0,0015 – 0,0017	

Los costes de la decantación lastrada con microarena son los siguientes:

**Tabla 5.7** Costes de implantación y explotación de la decantación lamelar lastrada con arena

Coste de implantación (€.m <sup>-3</sup> .h)	Coste de reactivos (€.m <sup>-3</sup> )			Coste de energía (€.m <sup>-3</sup> )
	Coagulante	Floculante	Microarena	
300-600	0,014-0,02	0,0025-0,0033	0,00038	0,002 – 0,0025

Los costes totales están entre 0,019 – 0,026 €.m<sup>-3</sup> al incorporar este nuevo insumo (microarena), pudiendo llegar a 0,03 €.m<sup>-3</sup> si las puntas de SS persisten en el tiempo o se requiere eliminar algún tipo de elemento como fósforo o hierro.

Los costes de implantación medios pueden estar entre 432-600 €.m<sup>-3</sup>.h tomando cualquiera de los tipos descritos.

Este tipo de tratamiento no tiene pérdidas del agua tratada, es decir, toda el agua que entra sale, por lo que el coeficiente de recuperación es del 100%.

#### Costes de implantación y explotación de los tratamientos de filtración

Los costes de implantación y funcionamiento y las características se indican a continuación, Tabla 5.8, debiéndose el coste de los reactivos a la adición de éstos en línea.

**Tabla 5.8** Costes de implantación y explotación unidades de filtración

	Costes implantación (€.m <sup>-3</sup> .h)	Costes reactivos (€.m <sup>-3</sup> )	Costes energía (€.m <sup>-3</sup> )
Presión	200-300	0,01-0,02	0,01-0,04
Gravedad	150-300	0,02-0,03	0,02-0,03
Anillas	450-550	0,03-0,04	0,03-0,05
Lecho pulsante	700-900	0,02-0,03	0,05-0,06
Puente móvil	750-900	0,005-0,02	0,005-0,01
Dualsand	1500- 1900	0,05-0,07*	0,02-0,04
Filtro de tamiz	450-800	0,01-0,03	0,0004-0,0005

\* con 4 – 5 mg. L<sup>-1</sup> de cloruro férrico o policloruro de alúmina

Siempre existe economía de escala siendo los que más se benefician de esta circunstancia los filtros de gravedad.

La adición de reactivos en línea es posible cuando la calidad del influente sea tal que el contenido de SS esté por debajo de 15 mg. L<sup>-1</sup>. En caso de mayor concentración en SS la necesidad de lavados del filtro encarecería considerablemente la explotación, además de la disminución de agua filtrada por caudal tratado. En condiciones normales este coeficiente de recuperación de caudal tratado es del 97%.

El coste de un filtro de arena bien por gravedad o presión, tiene un coste de implantación de 120 a 264 €.m<sup>-3</sup>.h y de explotación entre 0,04 y 0,07 €.m<sup>-3</sup>.

#### Costes de implantación y explotación de los tratamientos con membranas

Los costes expuestos a continuación son para una calidad del agua a tratar de menos de 15 UNT. En el caso de que la calidad del agua influente empeore, los costes en productos químicos, en el caso de membranas a presión, pueden duplicarse.

Los costes de implantación de membranas de UF y MF se recogen en la Tabla 5.9.

**Tabla 5.9** Costes de implantación de unidades de UF y MF

	<b>Ultrafiltración</b>	<b>Microfiltración</b>
Costes de implantación (€.m <sup>-3</sup> .h)	3.800 - 7.500	2.400– 5.800

Los costes de explotación de la ultrafiltración y microfilmación se reflejan en las Tablas 5.10 y 5.11

**Tabla 5.10** Costes de explotación de unidades de UF

	<b>UF depresión (€. m<sup>-3</sup>)</b>	<b>UF presión (€. m<sup>-3</sup>)</b>
Productos químicos	0,002 –0,005	0,020 - 0,050
Consumo eléctrico	0,012 - 0,015	0,015 - 0,020
Reposición de membranas	0,020 – 0,040	0,020 – 0,040
Costes totales	0,034 – 0,060	0,055 – 0,110

La energía consumida va a depender fundamentalmente de la presión de trabajo, el tipo de bomba de alimentación utilizada, el punto desde donde se realiza la alimentación, la frecuencia de limpiezas químicas y contralavados que equivale a un coeficiente de recuperación medio del 87%, etc. En general y para la mayor parte de los desarrollos existentes, tanto para UF como para MF, el consumo específico oscila entre 0,12 kWh.m<sup>-3</sup> y 0,28 kWh.m<sup>-3</sup>.

**Tabla 5.11** Costes de explotación de unidades de MF

<b>Costes reactivos (€. m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Costes energía (€. m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Reposición (€. m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Costes totales (€. m<sup>-3</sup>)</b>
0,010 - 0,015	0,012 - 0,020	0,020-0,040	0,04 - 0,07

Respecto a la reposición de membranas no existen todavía datos significativos sobre la vida útil de este tipo de membranas, sobre todo porque la misma va a venir muy influenciada por factores como la frecuencia de limpiezas químicas. En la mayor parte de los casos las garantías del fabricante oscilan entre los 3 y los 5 años. Por tanto, el coste de reposición de membranas, con garantía del fabricante de 5 años se puede estimar en 0,020-0,040 €.m<sup>-3</sup>.

Los productos químicos van a determinar el coste de explotación. En general no se utiliza ningún reactivo de proceso durante la producción. Los productos químicos necesarios son los empleados en las limpiezas químicas como el ácido sulfúrico, hidróxido sódico o el hipoclorito sódico.

Los costes totales contando con el personal, reposición de membranas y reposición de consumibles de una unidad de UF o MF está entre 0,076 a 0,18 €. m<sup>-3</sup>.

#### Costes de implantación y explotación de los tratamientos de desalación

##### **Electrodialisis reversible**

Los costes de implantación están entre 4.990 y 8.780 €.m<sup>-3</sup>.d, dependiendo del tamaño de la instalación y del número de etapas.

Los costes de explotación expresados €.m<sup>-3</sup> se resumen en la Tabla 5.12.

**Tabla 5.12** Costes de explotación de unidades EDR

Concepto	€.m <sup>-3</sup>
Productos químicos	0,05-0,08
Consumo eléctrico	0,06-0,10
Reposición de cartuchos	0,02-0,05
Membranas y electrodos	0,07-0,09

La reposición de filtros de cartuchos depende directamente de la calidad del agua de alimentación. Cualquier mal funcionamiento del pretratamiento puede elevar el coste por este concepto de tal forma que el funcionamiento de la EDR sea ineficiente. Con un agua a tratar de calidad aceptable, el consumo promedio de filtros de cartucho puede estar en 0,023 €.m<sup>-3</sup>.

Con respecto a las membranas, hay que tener en cuenta la reposición normal de las mismas durante la vida de la instalación. La garantía del fabricante suele ser de un 5 % anual, aunque la duración suele ser mayor. La garantía dada para los electrodos es del 25 % anual, aunque, también, la duración suele ser mayor.

El consumo de energía oscila, de acuerdo con los datos suministrados, entre 0,86 y 1,43 kWh.m<sup>-3</sup>.

Considerando los conceptos anteriores y el personal, un coste medio con una operación normal de la instalación puede ser del orden de 0,25 – 0,35 €.m<sup>-3</sup>.

El ensuciamiento excesivo de membranas por precipitación de sustancias en las membranas puede elevar considerablemente el coste del personal, al realizarse las limpiezas a mano.

En condiciones normales de operación el porcentaje de recuperación de una EDR está entre el 80-85%.

### **Osmosis inversa**

El coste de implantación de una ósmosis inversa tiende a reducirse conforme aumenta la competitividad de las membranas utilizadas. Se estima en unos 3.670 a 4.150 €.m<sup>-3</sup>.h.

Los costes de explotación se exponen en la Tabla 5.13.

**Tabla 5.13** Costes de explotación de unidades OI

Concepto	€.m <sup>-3</sup>
Productos químicos	0,017-0,03
Consumo eléctrico	0,086-0,09
Membranas y consumibles	0,06-0,07

Los sobrecostes de explotación aumentan hasta el 31% cuando el efluente no cumple con las condiciones mínimas, menos de 15 UNT el influente; la operación discontinua deteriora los equipos y disminuye el rendimiento; la sobrecarga de trabajo produce el envejecimiento prematuro de las membranas.

Dadas las diferencias entre los efluentes secundarios a tratar por cada sistema de ósmosis inversa y las distintas frecuencias de limpiezas químicas que presentan cada una de ellas, existe mucha variabilidad en los costes de operación. De las instalaciones estudiadas se obtienen valores entre 0,20 y 0,25 €.m<sup>-3</sup> incluyendo personal.

Hay que tener en cuenta que esta tecnología es la que menos porcentaje de recuperación tiene, estando entre el 65 y 75%, según el tipo de membrana y características físico-químicas del influente a tratar.

#### Costes de implantación y explotación de los tratamientos de desinfección

##### **Radiación ultravioleta**

Los costes de implantación de un sistema de radiación UV en función de la calidad que se quiera obtener en el efluente, se recogen en la siguiente tabla:

**Tabla 5.14** Costes de implantación de unidades radiación UV

<b>E. Coli del efluente (UFC.100 mL<sup>-1</sup>)</b>	<b>Costes UV (€·m<sup>-3</sup>·h)</b>
200	96 - 216
10	168 - 264
Ausencia	288 - 384

Los costes de operación en función de la dosis y E. coli de salida se recogen en la Tabla 5.15, suponiendo un coste de mano de obra de unos 24 €·h<sup>-1</sup> y un coste de reposición de lámparas de 210 € la unidad.

**Tabla 5.15** Costes de explotación de unidades UV en función de la dosis

<b>Efluente</b>	<b>UVT %</b>	<b>SS mg·L<sup>-1</sup></b>	<b>E.coli &lt; 1000 ufc.100mL<sup>-1</sup></b>		<b>E. coli &lt; 100 ufc.100mL<sup>-1</sup></b>		<b>E.Coli &lt; 10 ufc.100mL<sup>-1</sup></b>		<b>E. coli &lt; 2,2 ufc.100mL<sup>-1</sup></b>	
			<b>D (J·m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Coste (€·m<sup>-3</sup>)</b>	<b>D (J·m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Coste (€·m<sup>-3</sup>)</b>	<b>D (J·m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Coste (€·m<sup>-3</sup>)</b>	<b>D (J·m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Coste (€·m<sup>-3</sup>)</b>
Secundario	50	25	300	0,0028	400	0,00426	-	-	-	-
			250	0,0020	370	0,00288	-	-	-	-
Terciario	60	10	240	0,0019	350	0,00278	600	0,00426	-	-
	65	5	230	0,0018	330	0,00230	550	0,00348	1.400	0,00858
	70	3	220	0,0014	300	0,00177	500	0,00288	1.200	0,00630

Estos costes también pueden variar si el sistema tiene limpieza automática de lámparas o es manual, con el consiguiente incremento del coste de explotación por horas de personal dedicado a estas limpiezas que serán más o menos frecuentes en función de la calidad del agua a tratar. Los costes dados anteriormente son aproximaciones a través del consumo eléctrico de las lámparas y revisión bibliográfica (AWWA, 2008; USEPA, 2007).

En general el coste de implantación de una unidad de radiación UV para conseguir ausencia de E. Coli está sobre los 336 €·m<sup>-3</sup>·h y un coste de explotación entre los 0,002-0,003 €·m<sup>-3</sup>.

##### **Hipoclorito**

Los siguientes costes de explotación e implantación son orientativos para una dosis de tratamiento de 10 mg·L<sup>-1</sup> de cloro y un tiempo de contacto de 30 minutos, tratando agua nitrificada con concentraciones en SS de 5 mg·L<sup>-1</sup> y calidad del efluente menor 1000 UFC.100 mL<sup>-1</sup> de E. Coli. Para llegar a mayores grados de desinfección la dosis establecida podría ser de 15-20 mg·L<sup>-1</sup> en función del tipo de agua a tratar. En todos los casos hay que realizar ensayos para ajustar la concentración de hipoclorito a las necesidades de calidad deseadas en el efluente.

**Tabla 5.16** Costes de explotación de unidades de hipoclorito

E. Coli efluente (ufc.100mL <sup>-1</sup> )	Dosis (mg.L <sup>-1</sup> )	Costes (€.m <sup>-3</sup> )
1.000	10	0,005
10	15	0,009

Costes de implantación de equipos más obra civil, el laberinto de hormigón con volumen suficiente para retener el caudal a tratar de 20-30 minutos es de 200-253 €.m<sup>-3</sup>.h.

En caso de utilizar el hipoclorito como tratamiento de mantenimiento, es decir, dosificando hasta dejar un cloro residual combinado de 0,2 mg.L<sup>-1</sup> tras una desinfección por radiación UV, el coste de explotación se estima en 0,001-0,002 €.m<sup>-3</sup>. El coste de implantación en este caso no se contemplaría ya que se utiliza la propia red de distribución, donde si fuese necesario habría que volver a clorar en los depósitos de almacenamiento para conseguir la calidad establecida hasta el punto de uso.

### **Ozono**

Los costes de explotación del ozono pueden encarecerse por un mal mantenimiento de la instalación. En condiciones normales se puede aproximar el coste a 0,01- 0,02 €.m<sup>-3</sup> para una dosis de ozono trasferida al agua de 15 mg.L<sup>-1</sup> con un tiempo de contacto de quince minutos, que puede considerarse suficiente para un contenido en sólidos del agua a desinfectar de 5 mg.L<sup>-1</sup> y obtener menor 10 UFC.100 mL<sup>-1</sup> (Metcalf & Eddy, 2007).

Los costes de implantación dependen de la dosis a dar como se refleja en la siguiente tabla:

**Tabla 5.17** Costes de implantación de unidades de ozono

E. Coli efluente (ufc.100mL <sup>-1</sup> )	Dosis (mg.L <sup>-1</sup> )	Costes (€.m <sup>-3</sup> .h)
1000	5	336-456
10	15	720- 960

### Respecto a los costes por unidad de tratamiento

El cálculo de estos costes por unidad de tratamiento, aun siendo orientativos, es una herramienta muy útil para poder estimar el coste de una línea de tratamiento completa basada en la suma de los costes individuales de cada unidad.

Los rangos amplios presentados, tanto de implantación como de explotación en algunas unidades de tratamiento, son consecuencia de las diferentes fuentes de información utilizadas, distintas capacidades de tratamiento y circunstancias de la licitación de los proyectos consultados. Por ejemplo, los costes de implantación de proyectos y costes de explotación de plantas de Canarias y Cataluña, en general presentan unos costes más elevados que el resto de CCAA, debido al coste de los materiales, productos químicos y personal. Aun así, existe un efecto de escala generalizado, siendo más barato el tratamiento cuanto mayor sea su capacidad.

El coste de energía medio tomado para realizar el estudio es 0,07 euros el kWh, siendo este término variable a lo largo de los años y teniendo especial repercusión en los costes de explotación en aquellas tecnologías con consumos energéticos más elevados, tratamientos mediante membrana, la OI y la EDR. En la actualidad el coste medio del kWh como media de todas las CCAA podría estimarse en 0,11 euros el kWh, esto es un aumento del 57 % en los últimos 5 años. Este término representa como máximo el 35% del total de los costes de explotación en las tecnologías que más consumen, por lo que variaciones en el coste del kWh suponen como máximo una variación en el coste total de explotación del 20%, un porcentaje asumible para el fin que tiene este estudio, que es dar un orden de magnitud del coste de cada tecnología tanto en la inversión como en la explotación.

---

Respecto a los costes de personal, se han tenido en cuenta en las unidades de tratamiento que más personal precisa. El coste de personal es difícil de estimar debido a que las entidades que explotan este tipo de ERAs, subcontratan el servicio a costes fijos, no pudiendo saber con exactitud, lo que se dedica de personal contratado a cada una de ellas, y menos a cada unidad de tratamiento. En otras ocasiones, el mismo explotador de la ERA también es de la EDAR, siendo aún más imprecisas las horas que se dedica a cada tratamiento.

## 5.2 Líneas de tratamiento aplicables en función de las calidades por usos establecidas en el R.D 1620/2007

El R.D. 1620/2007 obliga a cumplir unos criterios de calidad para la reutilización de las aguas regeneradas según los usos a los que vayan destinadas. Para alcanzar esta calidad, es necesario implementar una serie de tratamientos. Debido a la gran variedad de tratamientos utilizados para la regeneración de efluentes depurados, en este apartado se seleccionarán aquellos que mejor resultado han dado con condiciones reales de funcionamiento.

Para acometer este objetivo se han evaluado en el apartado anterior de este documento los siguientes puntos:

- Eficacia real de los distintos tratamientos respecto a los criterios de calidad para la reutilización de las aguas regeneradas según los usos establecidos en el R.D. 1620/2007.
- Fiabilidad de los citados tratamientos, sus problemas de funcionamiento, ventajas e inconvenientes.

Una vez conocidas las unidades de tratamiento se procede a:

- Establecer para cada tipo de calidad y uso establecida en el R.D. 1620/2007 o para cada conjunto de usos con criterios de calidad similares, la línea compuesta por unidades de tratamiento de regeneración más adecuada.
- Estimar unos costes de implantación y explotación de la línea propuesta en base a la suma de los costes estimados por unidad de tratamiento.

A la hora de seleccionar un tratamiento de regeneración con independencia del uso, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Que su objetivo fundamental es obtener una calidad sanitaria adecuada, por lo que la desinfección constituye la operación fundamental y las operaciones previas son, en definitiva, pretratamiento para garantizar la eficacia de ésta.
- Que la fiabilidad de la tecnología es un factor fundamental para el control de la misma, por lo que, dada la relativa inestabilidad de la calidad en el agua depurada, es aconsejable la existencia de varias etapas sucesivas en la línea de tratamiento de regeneración, de forma, que cada una de ellas, actúe de barrera frente a la siguiente, minimizando los efectos de la variabilidad en las características del influente.

En la Tabla 5.18 se clasifican los tratamientos seleccionados para ser incluidos en las distintas líneas de tratamiento de regeneración.

**Tabla 5.18** Clasificación de las unidades de tratamiento seleccionadas

<b>Físico-químicos</b>	<b>Filtración</b>	<b>Filtración por membranas</b>	<b>Desinfección</b>	<b>Desalación</b>
Convencional con lamelas	Presión	Ultrafiltración	Radiación ultravioleta	Ósmosis inversa
Lastrado con arena	Gravedad		Hipoclorito	Electrodiálisis reversible
	Dualsand			

Los biorreactores de membrana serán estudiados específicamente en el capítulo 6.

### 5.2.1 Calidades establecidas en el R.D. en función de los distintos usos

Para poder seleccionar unos tratamientos básicos por calidad se ha establecido en primer lugar un agrupamiento de las 14 calidades recogidas en el R.D. 1620/2007 en función de su valor máximo admisible (VMA) respecto a la calidad bacteriológica exigida.

En la Tabla 5.19 se establecen 6 tipos de calidad (A, B, C, D, E y F), teniendo en cuenta los límites indicados respecto a E. coli, Nematodos intestinales y Legionella spp.

Hay que tener en cuenta que la calidad F para usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos, etc.), no es posible establecer límites precisos ya que éstos deberán ser determinados en cada caso por el Organismo de Cuenca. También hay que considerar la existencia de usos en los que se limitan el nitrógeno o el fósforo, que exigirán un tratamiento complementario. Estos usos son: a) los estanque, masas de agua y caudales circulantes fósforo total (PT) < 2 mg.L<sup>-1</sup>); b) la recarga de acuíferos bien por percolación localizada a través del terreno, bien por inyección directa (en ambos casos nitrógeno total (NT) < 10 mg.L<sup>-1</sup> y NO<sub>3</sub> < 25 mg.L<sup>-1</sup>).

De acuerdo a la eficacia, fiabilidad y rendimientos asociados a cada línea de tratamiento dados con anterioridad, y a las calidades exigidas en el R.D. 1620/2007 agrupadas tal como se exponen en la Tabla 5.20, se realiza una propuesta de líneas de tratamiento adecuadas para cada tipo de calidad, separando los casos que precisan eliminación de sales y de los que no la necesitan.

Esta propuesta se recoge en las Tablas 5.20 y 5.21, recordando que constituye un ejercicio de acercamiento y que para seleccionar un tratamiento adecuado deben analizarse en profundidad las características específicas correspondientes a cada caso concreto.

Hay que tener en cuenta, además, que existen otro tipo de tratamientos no recogidos en la Tabla 5.18, como son los extensivos, tipo lagunaje de maduración e infiltración-percolación o los humedales. Estos tratamientos que proporcionan también calidad suficiente para reutilizar en usos como el agrícola, no han sido recogidos en este estudio, al no estar todavía muy implantados en las zonas de reutilización españolas, seguramente por ocupar grandes extensiones de terreno, sobretudo humedales y lagunaje, y no poder tratar todo el rango y tipo de caudales con la garantía establecida en el R.D, sobre todo en lo que se refiere a SS en el caso del lagunaje y a E. coli en el caso de los humedales.



**Tabla 5.19** Grupos de calidad por límites microbiológicos establecidos en el R.D. 1620/2007

USOS		Calidad	E.coli UFC/100 mL	Nematodos huevos/10 L	Legionella spp UFC/100 mL
Industrial 3.2 a)	Torres de refrigeración y condensadores evaporativos	A	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Urbano 1.1 a) y b)	Riego de jardines privados Descarga de aparatos sanitarios		Ausencia	< 1	< 100
Ambiental 5.2 a)	Recarga de acuíferos por inyección directa		Ausencia	< 1	No se fija límite
Urbano 1.2 a), b), c) y d)	Servicios urbanos, sistemas contra incendios y lavado de vehículos	B	< 100 -200	< 1	< 100
Agrícola 2.1 a)	Riego agrícola sin restricciones				
Recreativo 4.1 a)	Riego de campos de golf				
Agrícola 2.2 a), b) y c)	Riego de productos agrícolas para consumo humano no en fresco Riego de pastos para animales productores Acuicultura	C	< 1.000	< 1	No se fija límite
Industrial 3.1 c)	Aguas de proceso y limpieza para uso industria alimentaria				< 100
Ambiental 5.1 a)	Recarga de acuíferos por percolación a través del terreno		< 1.000	No se fija límite	No se fija límite
Agrícola 2.3 a), b) y c)	Riego de cultivos leñosos sin contacto con los frutos Riego de cultivos de flores, viveros e invernaderos, sin contacto con producción Riego de cultivos industriales no alimentarios	D	< 10.000	< 1	< 100
Industrial 3.1 a) b)	Otros usos industriales				
Recreativo 4.2 a)	Estanques, masas de agua y caudales ornamentales, con acceso impedido al público				
Ambiental 5.3 a) y b)	Riego de bosques y zonas verdes no accesibles al público Silvicultura	E	No se fija límite	No se fija límite	No se fija límite
Ambiental 5.4 a)	Mantenimiento de humedales, caudales mínimos	F	La calidad requerida se estudiará caso por caso		

## 5.2.2 Tipos de líneas de tratamiento válidas para cumplir con las calidades establecidas en el R.D

Los tratamientos propuestos están seleccionados como una línea de regeneración adicional a una instalación de depuración ya existente. En caso dónde el diseño de ambas instalaciones, EDAR y ERA pudiera hacerse en conjunto, los resultados serían más optimizados tanto en costes como en diseño.

En caso de tener un efluente depurado estable y de buena calidad en cada línea propuesta se indica que tratamientos pueden ser eliminados.

Las unidades seleccionadas corresponden a las que mejores rendimientos han demostrado en los diferentes parámetros de calidad exigidos por la norma y la fiabilidad de los mismos. Además, se han tomado unidades de tratamiento con los costes de implantación más competentes en relación a las garantías de la calidad del efluente.

Otro punto importante es la experiencia que han ido adquiriendo las distintas entidades gestoras y explotadoras en estos tratamientos, las cuales se han tenido en cuenta a la hora de tomar una u otra unidad de tratamiento dentro de la línea propuesta. Es el caso de la etapa de filtración, donde existen multitud de posibilidades y se ha tomado los filtros de arena convencionales frente a otras opciones al ser los más numerosos en implantación y conocidos. Respecto a la filtración mediante membranas, la tendencia es a instalar ultrafiltración frente a microfiltración, ya que la primera, garantiza la ausencia de E. coli mientras que la microfiltración requiere de un tratamiento de desinfección posterior para llegar a calidades donde se requiera ausencia en coliformes fecales.

**Tabla 5.20** Tipos de tratamiento de regeneración, sin desalación, cumplimiento RD 1620/2007

TIPO DE CALIDAD	TIPO DE TRATAMIENTO Y LÍNEA DE REGENERACIÓN VALIDAS	
	TIPO	LÍNEA
<b>A</b>	1	Físico-químico con decantación <sup>1</sup> + Filtración + filtración con membrana <sup>2</sup> + Desinfección de mantenimiento (normalmente NaClO) Un tratamiento físico-químico convencional con decantación + filtración + desinfección combinada con radiación UV e hipoclorito, puede conseguir los límites establecidos para los parámetros biológicos (E. coli, legionella spp y huevos de nematodos), pero tiene dificultades para conseguir 1-2 UNT de turbidez, lo que le inhabilita para este tipo de calidad, excepto en casos específicos en que la calidad del efluente depurado es muy alta. En el uso recarga directa de acuíferos se está implantando la línea 5a <sup>3</sup>
<b>B</b>	2	Físico-químico con decantación + Filtración + Desinfección (tendencia a emplear radiación UV) + Desinfección de mantenimiento (normalmente NaClO)
<b>C</b>	3	Filtración + Desinfección (tendencia a emplear radiación UV) + Desinfección de
<b>D</b>		mantenimiento (normalmente NaClO)
<b>E</b>	4	Filtración <sup>4</sup>
<b>F</b>	-	En función de la calidad requerida en cada caso

<sup>1</sup> Con efluente depurado de calidad constante puede se puede prescindir del tratamiento físico-químico con decantación.

<sup>2</sup> Se utiliza mayoritariamente la ultrafiltración

<sup>3</sup> En la totalidad de las líneas estudiadas se incluye una OI para eliminar nitratos y posibles contaminantes prioritarios y emergentes.

<sup>4</sup> La calidad requerida es la de efluente del secundario, pero es recomendable a efectos operativos de la red de distribución pone al menos una filtración.

**Tabla 5.21** Tipos de tratamiento de regeneración, con desalación, cumplimiento RD 1620/2007

TIPO DE CALIDAD	TIPO DE TRATAMIENTO Y LÍNEA DE REGENERACIÓN VALIDAS	
	TIPO	LÍNEA
TODAS	5a	Físico- químico con decantación <sup>5</sup> + Filtración + Filtración con membranas <sup>6</sup> + desalación mediante OI + Desinfección de mantenimiento (normalmente NaClO)
B, C, D, E	5b	Físico-químico con decantación <sup>7</sup> + Filtración <sup>8</sup> + desalación mediante EDR + Desinfección (tendencia a emplear radiación UV) + Desinfección de mantenimiento (normalmente NaClO)

Como puede observarse, el tratamiento base o convencional adoptado es el de un físico-químico seguido de una filtración en profundidad en lecho de arena, una desinfección mediante radiación ultravioleta y adición de hipoclorito para el mantenimiento de la calidad en la red de distribución hasta el punto de uso. Esta línea aparte de ser la más implantada en España, es la que aconseja el Título 22 de California y la que mejores resultados ha dado a la hora de llegar a las calidades exigidas en el R.D 1620/2007.

Respecto a la desinfección se opta por unidades de UV al detectar una clara tendencia a nivel internacional de no utilizar hipoclorito sódico debido a los subproductos ya mencionados y las posibles toxicidades en el medio natural, sin embargo, se mantiene una dosificación posterior a la desinfección para evitar recrecimientos bacterianos en la red de distribución o en los depósitos de almacenamiento.

Para poder tratar el agua con UV de una forma eficiente es necesario que el agua esté filtrada y con transmitancia por encima de 50%. Una vez tratada, la dosificación de hipoclorito necesaria para mantener unos 0,2 mg.L<sup>-1</sup> de cloro residual combinado es de unos 10 mg.L<sup>-1</sup> en el peor de los casos, dejando la red de distribución como zona de tiempo de contacto.

En caso de tener que acondicionar aguas salobres, entre 8.000 y 12.000 ppm de sales disueltas totales, se utilizarán unidades de tratamiento basadas en electrodiálisis reversible y ósmosis inversa para bajar la salinidad por debajo de 2.000 ppm. Esto significa incluir al menos dos etapas en ambos tratamientos, ya que se elimina una media del 50-70% en cada una de ellas.

Los costes de explotación, en los casos como los tratamientos con membranas, son difíciles de calcular, ya que dependen de múltiples factores como la vida útil de las mismas, limpieza de las mismas en función de la calidad del agua que tratan, etc., lo que dificulta establecer unos costes de mantenimiento o de amortización del tratamiento. En los proyectos revisados se suele dar una garantía de vida media de las membranas de 5 a 8 años en función del tipo de membrana y características del agua a tratar, aunque la experiencia está demostrando que duran más tiempo sin ser remplazadas. Se ha incluido entre un 12,5 y 20% anual de reposición del coste inicial de las membranas a los costes de explotación. Este concepto supone un incremento de la explotación entre 0,02 a 0,04 €.m<sup>-3</sup> producido.

<sup>5</sup> Este pretratamiento a la membrana se incluye como barrera de protección ante posibles variaciones de calidad del influente.

<sup>6</sup> Idem nota 2

<sup>7</sup> Idem nota 5

<sup>8</sup> Se utiliza mayoritariamente doble filtración con recirculación de arena y limpieza en continuo.

### 5.2.3 Costes de implantación y explotación de los distintos tipos de líneas de tratamiento adoptadas.

En la Tabla 5.22 se recogen los costes de los tipos de tratamiento descritos en las Tablas 5.20 y 5.21. Los valores se han obtenido principalmente del estudio de costes presentado en el apartado 5.1.2 del presente documento junto algún otro proyecto consultado.

En el caso de los costes de implantación se refieren a ejecución por contrata sin IVA. Respecto a los costes de explotación, recogen unos costes fijos de personal y analítica rutinaria y unos variables (energía, reactivos químicos, reposición de fungibles, etc.) del agua producto sin IVA y sin amortización, sin contar con las analíticas fijadas por el RD 1620/2007 sobre huevos de nematodos, *Legionella* spp. y nutrientes en sus respectivos casos, (en 2015 el coste medio de estas analíticas puede suponer unos 5.000 euros al año según entidades como el ESAMUR o el ACA).

**Tabla 5.22** Costes de implantación y explotación de las unidades de tratamiento adoptadas

Tratamientos	Coste (€ .m <sup>-3</sup> .d)	Coste (€ .m <sup>-3</sup> producido)
Físico-químico con decantación <sup>9</sup>	18-25	0,01-0,02
Filtración arena gravedad	5-11	0,04-0,07
Doble filtración arena lavado continuo	62-80	0,07-0,08
Membranas de ultrafiltración	158-315	0,08-0,10
Desalación por OI	153-173	0,20-0,25
Desalación por EDR	208-366	0,25-0,35
Desinfección radiación ultravioleta	5-7-11 <sup>10</sup>	0,002-0,003 <sup>11</sup>
Desinfección de mantenimiento	1-2	0,001-0,002

En el caso de la desinfección, el coste de implantación de las unidades de UV depende de la dosis que se requiera, afectando al número de lámparas a instalar. En la Tabla 5.22 se dan tres valores correspondientes a las dosis necesarias para llegar a menos de 10, 200 o 1.000 UFC.100 mL<sup>-1</sup> de *E. coli*, respectivamente.

A la hora de interpretar estos costes conviene tener en cuenta que se trata de tecnologías en constante desarrollo, por lo que se están realizando mejoras tanto en los costes de implantación como de explotación. Los costes por tanto son conservadores y tienen perspectiva de ir hacia costes menores en los próximos años, en particular en las unidades de tratamiento con membranas.

En la Tabla 5.23, se muestran por tipos de líneas de tratamiento los que han resultado válidos para alcanzar los valores máximos admisibles (VMA) establecidos en el RD 1620/2007, y los costes de implantación y explotación, teniendo en cuenta los porcentajes de recuperación de cada una de las unidades de tratamiento que componen la línea. Para el cálculo de dichos costes se han tenido en cuenta los porcentajes medios de recuperación indicados en la Tabla 5.24. Los tipos de tratamiento estudiados corresponden a:

Tipo 1: Físico-químico con decantación lamelar, más filtro de arena por gravedad seguido de una membrana de ultrafiltración, más desinfección de mantenimiento con hipoclorito sódico.

Tipo 2: Físico-químico con decantación lamelar, más filtración de arena por gravedad seguida de una desinfección por radiación ultravioleta con desinfección de mantenimiento por hipoclorito sódico.

<sup>9</sup> Incluye los físico-químicos con decantación lastrada

<sup>10</sup> Se toma rango inferior en tipo III al ser la calidad necesaria <1.000 E. coli

<sup>11</sup> Se toma un sistema con lavado automático de las lámparas

Tipo 3: Filtración de arena por gravedad seguida de una desinfección por radiación ultravioleta con desinfección de mantenimiento por hipoclorito sódico.

Tipo 4: Filtración de arena por gravedad

Tipo 5a: Físico-químico con decantación lamelar, más filtro de arena por gravedad seguida de una membrana de ultrafiltración, más una ósmosis inversa seguida de una desinfección de mantenimiento con hipoclorito sódico.

Tipo 5b: Físico-químico con decantación lamelar, más doble filtración de arena con lavado en continuo, seguida de una electrodiálisis reversible, más una desinfección mediante radiación UV y de mantenimiento con hipoclorito sódico.

**Tabla 5.23** Costes de implantación y explotación de cada tipo de tratamiento adoptado

TRATAMIENTOS	COSTES	
	Implantación $\text{€} \cdot \text{m}^3_{\text{alimentación}} \cdot \text{d}$	Explotación $\text{€} \cdot \text{m}^3_{\text{producido}}$
TIPO 1	185 - 398	0,14 - 0,20
TIPO 2 <sup>12</sup>	28 - 48	0,06 - 0,09
TIPO 3	9 - 22	0,04 - 0,07 <sup>13</sup>
TIPO 4	5 - 11	0,04 - 0,07
TIPO 5.a	416 - 736	0,35 - 0,45 <sup>14</sup>
TIPO 5.b	310 - 506	0,35 - 0,45 <sup>15</sup>

Respecto a los porcentajes de recuperación, citado anteriormente, los rendimientos de cada tratamiento son variables en función del sistema de funcionamiento, los lavados, etapas de las que se compongan, concentraciones de parámetros de entrada como SS o sales, etc. Por este motivo estos porcentajes tienen un rango y al aplicarlos, se sobredimensiona los tratamientos que menos factor de conversión tienen respecto a etapas anteriores. El efecto es más acusado en membranas y se ha aplicado una media de 17,5 % para EDR y un 30% en OI, a la hora de dar los costes considerando el agua de entrada al tratamiento, y el coste de agua producto de toda la línea.

En la Tabla 5.24 se exponen los diferentes porcentajes de recuperación que se suelen utilizar en los proyectos, contrastados con la experiencia en planta de diferentes explotadores consultados.

**Tabla 5.24** Porcentajes de recuperación de las distintas unidades de tratamiento

Tratamientos	Recuperación %
Físico-químico con decantación	100
Filtración arena gravedad	97
Doble filtración arena lavado continuo	97
Membranas de ultrafiltración	85-90
Desalación por OI	65-75
Desalación por EDR	80-85
Desinfección radiación ultravioleta	100
Desinfección de mantenimiento	100

<sup>12</sup> Este tratamiento se propone además para los usos industriales 3.1a), b) y c) debido a la limitación que plantea el DR 1620/2007 en E. coli o en turbidez.

<sup>13</sup> La influencia de la desinfección supone 0,005  $\text{€} \cdot \text{m}^3_{\text{producto}}$  no se aprecia con dos decimales.

<sup>14</sup> En los casos donde se pueda prescindir del físico-químico y filtración por arena el rango podría bajar hasta los 0,30-0,40  $\text{€} \cdot \text{m}^3_{\text{producto}}$ .

<sup>15</sup> En los casos donde se pueda prescindir del físico-químico el rango podría bajar hasta los 0,30-0,40  $\text{€} \cdot \text{m}^3_{\text{producto}}$ .

---

Cabe señalar que el concepto más significativo dentro de los costes anuales totales del m<sup>3</sup> producido es la mano de obra y el mantenimiento, pudiendo alcanzar el personal de 0,05-0,1 €.m<sup>-3</sup> producido en función de la tipología de tratamiento. No se ha evaluado la repercusión de la amortización de la implantación en los costes anuales del agua producto, puesto que depende del período de funcionamiento, y es muy variable en cada caso.

Dentro de los rangos dados, que en general son tan amplios debido a efectos de economía de escala, es necesario comentar que los costes también puedan variar en función de otros factores, como la calidad del efluente de la EDAR, así como el terreno disponible para la ejecución del tratamiento de regeneración. En el diseño de los tratamientos tipo, con objeto de quedar del lado de la seguridad, se han considerado todas las etapas necesarias para garantizar que se alcanza la calidad establecida para el uso previsto del agua regenerada. Ello puede dar lugar a que, en determinados casos en los que las características del agua residual sean buenas no sean necesarias todas las etapas, lo cual conduciría a una reducción del coste.

Recordar que los costes de explotación y mantenimiento recogidos en la Tabla 5.23 se refieren a un agua a tratar que cumple con lo establecido para el vertido, y no contemplan todos los muestreos y análisis impuestos por el Real Decreto 1620/2007, este control y diferencias del agua a tratar, puede llegar a suponer una fracción muy significativa de los costes de explotación y mantenimiento, los cuales habrá que tenerlos en cuenta para evaluar la viabilidad económica de un determinado proyecto, y muy especialmente, en los de pequeña capacidad.

Respecto al personal y la energía, la distribución entre cada una de las etapas que pueden integrar las diferentes líneas de tratamiento, con objeto de obtener el coste total de la línea, no es sencilla y puede constituir un ejercicio esencialmente teórico. A ello contribuye la dependencia de este concepto del sistema de explotación seguido en el tratamiento de depuración y el de regeneración. Así, si la entidad explotadora es la misma para ambos, el personal será compartido, con una economía evidente para el tratamiento de regeneración, mientras que si se trata de dos entidades diferentes el coste se incrementaría.

La contribución del consumo energético a los costes de explotación de las diferentes líneas recomendadas oscila entre el 18% y el 33%. En consecuencia, cabe señalar que una variación del 50% del precio de la energía con respecto al valor estimado supondría una modificación inferior al 20% del total de los costes de explotación. Por tanto, puede concluirse que, si bien puede producirse una modificación no despreciable del coste total en función de la energía, dicha modificación está razonablemente acotada.

En el caso de los tratamientos de regeneración, la estacionalidad puede ser muy grande en función del uso del agua y más en el uso de agua para riego agrícola donde la demanda se concentra en los meses de verano. No obstante, cabe señalar que, previsiblemente, para períodos de servicio iguales o superiores a 6 meses, la mano de obra y el mantenimiento supone más del 50% del total, por tanto, es aconsejable diseñar líneas de regeneración con tratamientos robustos y de fácil manejo, aun siendo sensiblemente más costosos en implantación que otros tratamientos de sus mismos rendimientos.

Como conclusiones finales a este capítulo se podría destacar las siguientes:

- La línea compuesta por un físico-químico con decantación seguida por un filtro de arena más desinfección mediante radiación ultravioleta y dosificación de hipoclorito para mantenimiento ha resultado ser la línea que mejor se adapta a los actuales sistemas de depuración, al conseguir llegar a todas las calidades establecidas en el RD 1620/2007 con la única excepción del parámetro turbidez. Límites de turbidez por debajo de 2 UNT obligan en cierto modo al uso de membranas de UF o MF para garantizar este valor.

- 
- Usos como la refrigeración de torres industriales, domésticos y recarga de acuíferos precisan de un tratamiento de regeneración avanzado donde se incluyan membranas de UF o MF. En el caso de la recarga directa de acuíferos se opta por la inclusión de la OI para evitar otro tipo de contaminantes como los nitratos.
  - El coste medio de implantación y explotación referido a caudal producto de un tratamiento de regeneración convencional es de 38 €·m<sup>-3</sup>·d y 0,075 €·m<sup>-3</sup> respectivamente.
  - El coste medio de implantación y explotación referido a caudal producto de un tratamiento de regeneración avanzado es de 291 €·m<sup>-3</sup>·d y 0,17 €·m<sup>-3</sup> respectivamente.
  - En caso de necesitar desalar, los costes de implantación ascienden a 408 €·m<sup>-3</sup>·d y a 0,40 €·m<sup>-3</sup> los de explotación.
  - El coste medio del agua regenerada en España con un tratamiento convencional de regeneración es diez veces menor en implantación y cinco en explotación que un tratamiento que precisa EDR, entendiendo ésta como desalación de aguas salobres.





---

## 6 LOS MBR COMO TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN

---

### 6.1 La evolución de los biorreactores de membrana en España

Un biorreactor de membranas (MBR), tal y como se describe en el punto 6.2 del presente documento, es un tratamiento de depuración de fangos activos donde el decantador secundario es sustituido por un sistema de membranas de UF o MF. La calidad del efluente, por tanto, es la misma que el de una EDAR de fangos activos convencionales (FAC) seguida de un tratamiento Tipo 1, Tabla 5.20, también llamado de regeneración avanzado (TRA) por incluir membranas, y de calidad similar a un Tipo 2, llamado tratamiento de regeneración convencional (TRC) por ser el más implantado en España.

El MBR no ha sido considerado en la propuesta realizada anteriormente como tratamiento de regeneración que alcanza los límites del RD 1620/2007, debido a que los MBRs son un tratamiento de depuración y no exclusivamente de regeneración de aguas depuradas. Esta característica les da ciertas ventajas y desventajas frente a los tratamientos propuestos en el apartado 5.2, las cuales se puntualizarán más adelante.

En la Tabla 6.1 se reflejan las calidades normales del efluente depurado de los MBRs y de los FACs con eliminación de nitrógeno.

**Tabla 6.1** Calidades del efluente tratado por MBR y FAC (Iglesias R., 2014)

Parámetro	MBR	FAC
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	1-5	10-20
SS (mg/L)	1-5	8-20
NT (mg/L)	5-15	5-15
Turbidez (UNT)	< 1,5	5-10
E.coli (UFC.100 mL)	Ausencia	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>

En España, el aumento de las necesidades de agua en zonas con recursos escasos, el endurecimiento de las legislaciones de vertido, la necesidad de realizar ampliaciones de EDARs con escaso terreno y la bajada significativa del consumo energético y del precio de las membranas, han convertido a esta tecnología en destacada dentro de las actuaciones de reutilización de aguas depuradas.

Han pasado más de diez años desde que se construyeron las primeras instalaciones de MBR: Haría (Lanzarote-2002), La Bisbal d'Empordá (Gerona-2003) y Riells i Viabrea (2004). En todas ellas la tecnología se implantó remodelando antiguas plantas de aireación prolongada para aumentar su capacidad y producir un efluente depurado de alta calidad y tener así opciones de reutilizar en momentos de déficit hídrico.

El objetivo en Haría era reutilizar el agua depurada en riego agrícola, por lo que, dados los problemas de salinidad existentes en las aguas residuales de Lanzarote, el efluente del MBR se trató con un proceso de ósmosis inversa. En el caso de La Bisbal, se trataba de conseguir un efluente de la mayor calidad posible, dada la existencia de pozos de captación de agua para abastecimiento próximos al punto de descarga en el río Daró. Estas instalaciones constituyeron un primer banco de pruebas para estudiar las posibilidades reales de esta tecnología.

Desde estas primeras experiencias, en España ha habido un incremento exponencial tanto en el número como en la capacidad de tratamiento de este tipo de plantas, tal y como refleja la Figura 6.1.

Se ha pasado de 13 instalaciones de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> en el 2006, a más de 55 instalaciones en operación o construcción a finales del 2014, seis de ellas con capacidades por encima de los 15.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>.

Entre 2007 y 2010 se ponen en marcha las plantas de más capacidad, como San Pedro del Pinatar (20.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>), Gavá-Viladecans (32.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>) y Sabadell-Riu Sec (35.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>) y la implantación de dos tratamientos avanzados de tipo dual, la planta de Terrassa que consta de un MBR de 15.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> en paralelo un sistema sobre soporte fijo IFAS (Integrated Fixed Film Activated Sludge) y la citada planta de Gavá-Viladecans que consta de un MBR y en paralelo un sistema de soporte plástico móvil HYBAS (Hybrid Biological Activate Sludge).

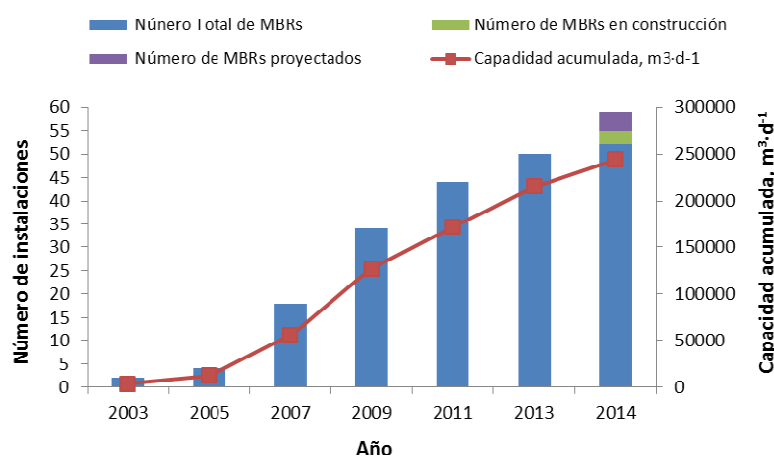


Figura 6.1 Evolución de los MBR en España: nº de plantas y capacidad instalada, (Iglesias R., 2015)

El total de agua regenerada que podría ser tratada por MBR asciende a 89 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> en 2014, un caudal nada despreciable si lo comparamos con el total de agua reutilizada, unos 408 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>.

En España, al igual que en el resto de Europa, se ha optado mayoritariamente por las casas comerciales Zenon y Kubota aunque en los últimos años se han implantado MBR de marcas como Huber, Puron, Toray o Microdym-Ecotec, Figura 6.2.

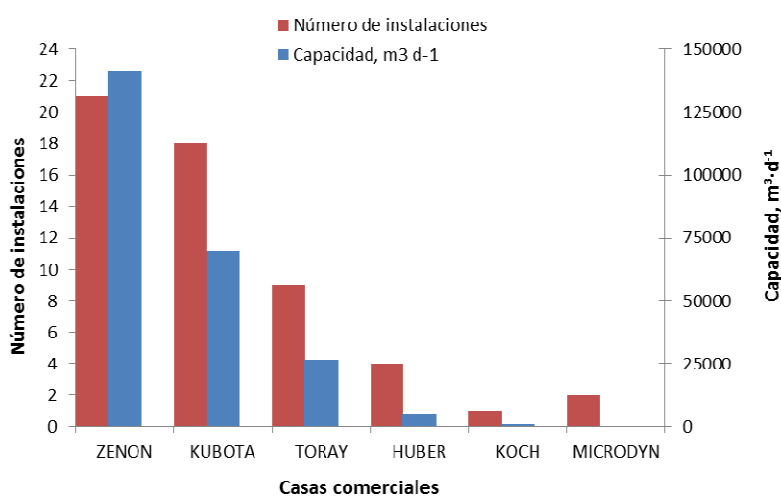


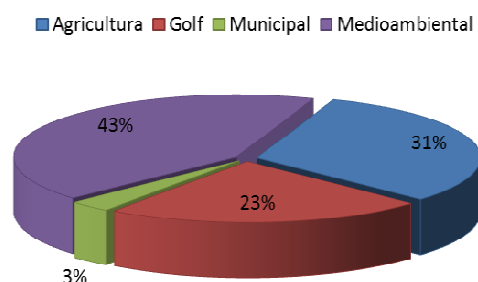
Figura 6.2 Capacidad y nº de instalaciones de MBR por casas comerciales, (Iglesias R., 2015)

El sistema más implantado es de membrana de fibra hueca (MFH), sobre todo para instalaciones con capacidad por encima de los  $5.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , destacando Zenon que cuenta con el 57% de la capacidad total instalada. Koch-Puron utiliza también este tipo de tecnología, pero su implantación está en la actualidad por debajo del 1% de la capacidad total.

La segunda casa comercial con mayor número de plantas es Kubota, con membranas de configuración placa plana (MPP), que cuenta con el 30 % de la capacidad total instalada. Toray y Huber, utilizan también este tipo de membranas disponiendo de instalaciones con capacidades del 11% y 2% respectivamente, de la capacidad total instalada. En el apartado 6.3 se recogen las características de las principales casas comerciales que operan en España.

Respecto a los usos a los que va el agua regenerada mediante MBR, en la Figura 6.3 puede observarse que el medioambiental es el más extendido, es decir, cuando el efluente vierte a zonas sensibles que requieren de alta calidad como son: zonas de captación de agua potable o alto valor ecológico, zonas de costa, deltas, explotación piscícola o con algún tipo de protección como son humedales, zonas salmonícolas, etc.

Se puede concluir que la tecnología, aunque es novedosa comparada con otros tratamientos convencionales, tras estos doce años de experiencia, los MBR pueden ser considerados como un sistema de depuración más, con ciertas particularidades respecto a la operación, control y automatización, pero con la ventaja de conseguir un efluente de alta calidad y constante en el tiempo al no depender de las variaciones de la calidad del agua de entrada.



**Figura 6.3** Porcentajes sobre el total del volumen tratado por MBR por usos, (Iglesias R., 2015)

#### Ventajas e inconvenientes de los MBR

A continuación, se recogen algunas ventajas e inconvenientes de los sistemas MBR, en función de la experiencia existente en la explotación de este tipo de plantas en España:

##### Ventajas:

- La calidad del efluente es excelente y constante en el tiempo.
- Permite la desinfección del efluente depurado haciéndolo apto para su reutilización en la mayoría de los usos establecidos en la legislación vigente y su vertido a cauces con especial protección.
- Bajos requerimientos de espacio.
- El efluente puede alimentar directamente a un tratamiento de ósmosis inversa y de EDR, proporcionando a este último tratamiento complementario de desinfección.
- Puede utilizarse como solución a remodelaciones de plantas donde ya ha superado la capacidad de tratamiento.
- Proceso automatizado que permite dedicar menos horas del personal de la planta.

---

Inconvenientes:

- EL MBR precisa de personal cualificado y externo para realizar los ajustes necesarios en los sistemas de membranas.
- Influencia de los vertidos industriales sobre la integridad de las membranas.
- Es un tratamiento que aporta mucha fiabilidad respecto a la calidad del efluente, pero si fallan las membranas y no existe un tratamiento alternativo, el agua residual se vierte sin ningún tipo de tratamiento biológico desde el primario, aunque la probabilidad de fallo de todo el sistema de membranas es muy baja.
- Los costes de inversión son más altos que los de un proceso convencional debido al coste de las membranas.
- Altos consumos energéticos en comparación a un proceso convencional.
- Requieren un pretratamiento más estricto.
- La duración de las membranas y por tanto su coste de reposición, no puede establecerse todavía de forma fiable.
- Precisa de un sistema de gestión de caudal ya que las membranas trabajan mejor a caudal constante.
- La eliminación de nutrientes es más problemática que en los tratamientos convencionales.
- Se necesitan instalaciones de dosificación de reactivos químicos para limpieza de las membranas.
- No están estandarizados los sistemas de membranas, por lo que, al seleccionar una marca determinada, su sustitución por otra diferente es difícil.
- En caso de no tener que reutilizar toda el agua tratada por no haber demanda, no es posible regular los caudales que se quieren tratar mediante membranas.

#### Aspectos a considerar en la implantación de los MBR

Los aspectos que condicionan más la implantación de un MBR son: la calidad requerida del efluente depurado, los terrenos disponibles, los costes de implantación y los costes de explotación. Cuanto más estricta sea la calidad requerida y menor sea la superficie de los terrenos disponibles, mayor probabilidad tiene el MBR de ser el tratamiento seleccionado.

También se analizarán otros aspectos que pueden incidir en la selección de esta tecnología, como la durabilidad de las membranas, su capacidad ante variaciones de caudal y carga, la influencia de las condiciones del terreno, el tipo de contaminación a tratar, el rango de población recomendable, la producción de fangos y los impactos ambientales.

Una característica importante de los sistemas MBR es la menor necesidad de espacio requerido debido a la reducción del volumen del reactor biológico al poder trabajar con concentraciones altas de sólidos, y por no precisar de una decantación secundaria.

Si se compara con un sistema de FAC, hay que tener en cuenta si se trata de una aireación prolongada o de media carga con digestión anaerobia de fangos. También hay que tener en cuenta los caudales tratados, ya que el porcentaje de reducción varía según el tamaño de la planta. En general un FAC ocupa entre 0,2-0,4 m<sup>2</sup>.h-e<sup>-1</sup> en función de lo comentado anteriormente. Se estima que la superficie ocupada por los MBRs supone entre un 40 y un 60% de lo que ocuparía un FAC (R. Iglesias, 2014).

#### Marco donde los MBR son una opción real de depuración frente a otras tecnologías

La aprobación de la Directiva 60/2000/CE, que establece el marco de actuación comunitaria en el ámbito de la política de aguas, y la ampliación y el endurecimiento en los últimos años de la legislación nacional de vertidos hace necesaria crear medidas de conservación, protección y uso

---

sostenible del agua, así como una investigación continua de nuevos tratamientos que alcancen las exigencias de los vertidos.

En este contexto, los MBR, a pesar de los inconvenientes expuestos anteriormente, surgen como una tecnología no convencional que ofrece una alta calidad del efluente y con menores requerimientos de espacio que los tratamientos convencionales. Su desarrollo e implantación, por tanto, puede resultar conveniente en determinadas situaciones.

En concreto, la tecnología MBR se considera especialmente interesante en las siguientes circunstancias:

- Uso en zonas con una sensibilidad ambiental elevada, en los que la legislación obligue a realizar vertidos de aguas residuales depuradas con un bajo contenido de contaminantes químicos o biológicos.
- Uso en zonas con escasez de agua, en las que sea necesario reutilizar el agua depurada.
- Disponibilidad de terrenos limitados para la implantación de la EDAR, que impidan utilizar tecnologías convencionales de fangos activos. Dentro de este epígrafe se incluirían las ampliaciones de la capacidad de tratamiento de EDAR convencionales que dispongan de poco espacio para la ampliación.
- Cuando el efluente de la EDAR deba alimentar un tratamiento de ósmosis inversa o de oxidación avanzada debido a la alta calidad del influente que precisan estas tecnologías.
- Cuando se quiera desalar mediante EDR con objeto de reutilizar el agua. En este caso el MBR proporciona el pretratamiento a la etapa de desalación y una desinfección necesaria para poder reutilizar el agua.
- En instalaciones hoteleras, complejos de ocio o similar, donde sea importante que los tratamientos sean compactos, los altos costes de implantación y explotación puedan ser asumidos por la actividad económica y dispongan del personal de mantenimiento que pueda realizar la explotación de la planta.

Por otro lado, existen diversos estudios sobre la utilización de MBR para la eliminación de contaminantes emergentes. Los resultados de estos estudios son dispares en función de la sustancia que se quiera eliminar, pero en general por la forma en la que operan, con altas edades de fango, y por tratarse de un agua ultrafiltrada, los rendimientos de eliminación de este tipo de sustancias son mejores que los procesos de fangos activos convencionales. Futuras investigaciones y avances en esta línea dirán si la eliminación de contaminantes emergentes da a la tecnología MBR un valor añadido o no, frente a otros tratamientos de depuración.

## 6.2 Descripción de la tecnología MBR

Los biorreactores con membranas combinan el proceso de fangos activados y la filtración mediante membranas, eliminando la decantación secundaria. Esta tecnología elimina los problemas clásicos de los fangos activados originados por bulking, desnitrificación incontrolada, etc., reduce los volúmenes de obra y garantiza un efluente de calidad para la mayoría de los usos de reutilización, siempre que no sea necesaria la reducción de salinidad.

Aunque se trata de un sistema de depuración, se incluye en el ámbito de los tratamientos de regeneración ya que el efluente que produce tiene la calidad suficiente para ser utilizado prácticamente en todos los usos recogidos en el R.D. 1620/2007.

En un MBR se podrían diferenciar dos procesos: el de la depuración biológica, y el de la filtración a través de membranas.

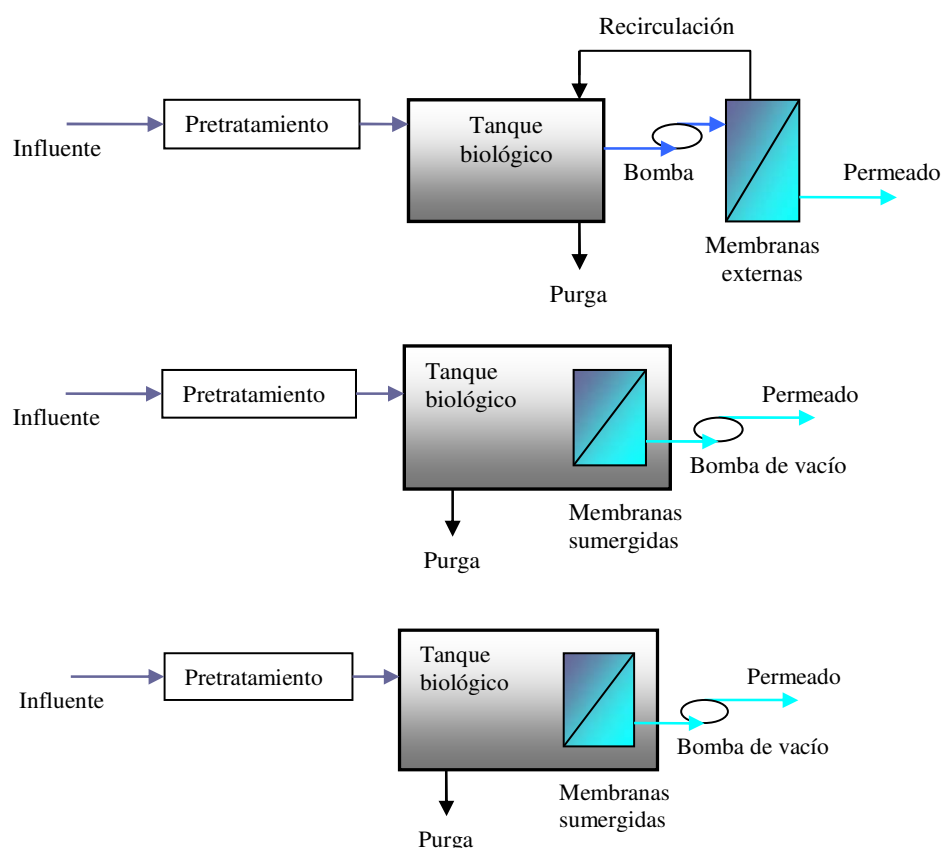
## Proceso biológico

Los principales parámetros que caracterizan el funcionamiento y el diseño del proceso biológico son los mismos que en cualquier proceso de fangos activos: la edad del fango ( $\theta_c$ ), la carga másica ( $C_m$ ), la concentración de sólidos en suspensión en el licor mezcla (SSLM), la recirculación ( $Q_R$ ), la producción de fangos en exceso ( $Q_w$ ) y la capacidad de aireación necesaria.

Estos parámetros se relacionan de la misma manera que en el diseño de los FAC. Para el dimensionamiento del reactor biológico existen distintos métodos y normativas, por ejemplo, la norma alemana ATV- DVWK-A131E (ATV, 2000), que contemplan el dimensionamiento de plantas de fangos activos con eliminación nutrientes.

La presencia de membranas permite trabajar con MLSS altos hasta  $18 \text{ g.L}^{-1}$  (Judd, 2006) (CWA 15897, 2008), lo que permite disminuir el volumen del reactor biológico, pero tiene como contrapartida, una disminución del coeficiente de transferencia de oxígeno ( $\alpha$ ) y un encarecimiento del coste energético de la aireación.

El control de la  $\theta_c$  se efectúa a través de la purga y la recirculación externa (Re) que tiene varios objetivos en función de las configuraciones descritas en la Figura 6.4.



**Figura 6.4** Configuraciones más frecuentes de biorreactores de membrana: a) externo b) sumergido integrado, c) sumergido no integrado, (Iglesias R.)

La Re constituye una operación con una incidencia significativa en el total de la energía consumida por un proceso MBR, por lo que tendrá que tenerse en cuenta a la hora de seleccionar la configuración y entre las posibles alternativas del diseño.

Respecto al proceso de filtración mediante membranas, las configuraciones más comunes de este proceso se muestran en la Figura 6.4. La disposición de los diferentes elementos que componen la línea depende principalmente del tipo de membrana y de si éstas trabajan sumergidas en el licor mezcla o por el contrario son externas. En el caso de las membranas sumergidas, la bomba genera una depresión, flujos en la membrana de fuera a dentro independientemente de la ubicación del tanque que las contiene que puede estar integrado en el reactor biológico o en un compartimento aparte.

Tanto en las membranas externas como en las sumergidas en un tanque separado, el proceso requiere de una recirculación para mantener una concentración de sólidos determinados en la zona de membranas. Normalmente esta concentración viene definida por los diferentes proveedores de membranas, ya que existen limitaciones de sólidos tanto mínimos como máximos con los que las membranas pueden trabajar sin verse comprometida su eficiencia, mantenimiento y la vida útil de las mismas.

En los sistemas sumergidos,  $Q_R$  está entre 2 a 5 veces el caudal medio tratado en función de las diferencias de SSLM entre el tanque de membranas y el tanque biológico, y de la configuración, integrada o no integrada, donde  $Q_r$  es mayor cuando más parecidas sean las concentraciones, y la configuración sea no integrada.

En los sistemas de membranas externas, la necesidad de filtrar a flujo tangencial de una determinada velocidad, requiere un  $Q_R$  de al menos 10 veces el caudal medio tratado. Se utilizan dos bombeos, uno para recircular al reactor biológico y otro para generar un caudal con velocidad suficiente a lo largo del módulo de membrana, ver apartado 6.3 sistema comercial Norit.

La producción de fangos en exceso en este tipo de sistemas es similar o ligeramente superior a la de los procesos de fangos activos convencionales operados con los mismos parámetros de diseño, debido a la mayor retención de sólidos que realizan las membranas.

En la Figura 6.5 se representa el diagrama de flujo típico de este tipo de instalaciones. Se trata de aireaciones prolongadas con eliminación de nitrógeno vía biológica. Cuenta con una obra de llegada y un pretratamiento compuesto por una etapa de desbaste y de desarenado-desengrasado más un tamizado que puede variar en función del sistema de membranas empleado. En general el tamiz debe tener un paso por debajo de los 3 mm para evitar en particular elementos fibrosos que son los que más interfieren en el correcto funcionamiento de las membranas, debiendo ser inferior a 1 mm en el caso de membranas tubulares de fibra hueca a depresión.

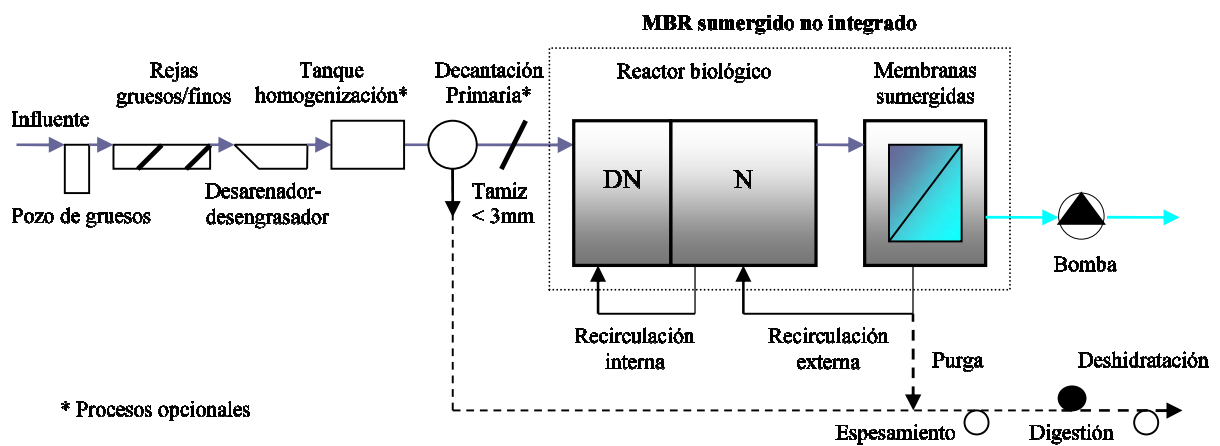


Figura 6.5 Diagrama de flujo de un proceso MBR con N-D. (Iglesias R.)

---

En función de la variabilidad del caudal pudiera incluirse un tanque de regulación, para evitar sobrecargas hidráulicas, ya que las membranas trabajan mejor a caudales constantes. Tras este tanque se procede al tamizado antes de entrar al biológico. Para mantener el proceso de depuración de materia orgánica y la eliminación de nitrógeno se precisa una Re y una recirculación interna (Ri).

El proceso de filtración de las membranas sumergidas se realiza siempre mediante depresión o succión, mientras que las membranas externas, pueden trabajar a presión o depresión. En ambos casos la presión o depresión se puede conseguir por bombeo o por gravedad.

### Separación por membranas

Los parámetros directamente relacionados con el proceso de separación por membranas son:

- Flujo (F): Es el caudal que atraviesa las membranas por m<sup>2</sup> de superficie en unas condiciones específicas de operación. El flujo determina la superficie de membrana necesaria independientemente de la concentración en el reactor biológico. Este parámetro depende fundamentalmente de la concentración del licor mezcla en zona de membranas, la viscosidad, la temperatura y el grado de ensuciamiento de la membrana.
- Presión transmembrana (PTM): Es la diferencia de presión que se crea entre uno y otro lado de la membrana durante el filtrado. La PTM es el parámetro clave en el control del funcionamiento de los MBR. Si se mantiene el flujo contante, la PTM se incrementa según se va ensuciendo la membrana. Los intervalos habituales de filtrado y limpieza los fija la casa comercial.
- Permeabilidad (K): Es la relación del flujo respecto a la presión transmembrana.
- Resistencia de la membrana (R): Es el concepto inverso a la permeabilidad. Es la resistencia que opone la membrana al paso de un fluido. Depende del material, el tamaño de poro, la superficie porosa, el grosor, etc.

En función del material y configuración de la membrana, se tiene una resistencia (R) determinada a que ésta sea atravesada por un fluido y en función de la viscosidad ( $\mu$ ) de este fluido se precisará más diferencia de presión (PTM) para mantener un mismo flujo (F) de paso. Estas variables están relacionadas por la ecuación de Darcy:

$$F = \text{PTM}/(R \cdot \mu), \text{ donde } F \text{ es el flujo en } \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ la PTM en bar, } R \text{ en } \text{m}^{-1} \text{ y } \mu \text{ en bar} \cdot \text{s}$$

Las membranas se pueden clasificar en función de alguna de sus características como por ejemplo el tamaño de poro, el material del que se componen, o por su morfología y estructura interna.

En función de las características físico-químicas de la membrana, como son el material de fabricación o tratamientos específicos de su superficie, y sobre todo el tamaño de poro, estas membranas tienen una selectividad específica, es decir, pueden retener o dejar pasar diferentes compuestos contenidos en el agua y tener una mayor o menor capacidad de paso de esta agua a través de ellas.

En el caso de los MBR, las membranas que se utilizan son de dos tipos: microfiltración (MF), con tamaños de poro entre 0,2 y 0,4 micras y retención de sustancias con pesos moleculares del orden de 500.000 Da y las de ultrafiltración (UF), con tamaños de poro entre 0,03 y 0,04 micras y retención de sustancias con pesos moleculares de unos 20.000 Da (Friedrich, 2003). Con estos tamaños de poro y pesos moleculares de rechazo no se retienen sales, nitrógeno, fósforo ni la mayoría de los contaminantes emergentes tipo herbicidas, fármacos o disruptores endocrinos como lo haría una ósmosis inversa.

El material utilizado es polimérico o cerámico. El más utilizado para tratar aguas urbanas es el polimérico: polivinilidenofluoruro (PVDF), la politietilsulfona (PES), el polipropileno (PP), el polivinil pirrolidona (PVP) y el polietileno (PE). La mayoría de estos polímeros no son hidrofílicos, por lo que tienen tendencia a la adsorción de compuestos, pero a cambio tienen una buena estabilidad química,



térmica y mecánica. En la mayoría de los casos se les realiza tratamientos de superficie para conseguir que sean hidrofílicas y poco rugosas.

El estudio de nuevos materiales y sus posibles tratamientos para evitar el ensuciamiento biológico es una de las líneas de investigación más activas en estos momentos, donde el objetivo es conseguir materiales más idóneos a las características y composición de las aguas residuales. Además del material, se estudia cómo alcanzar una alta resistencia mecánica de la misma.

Hay que tener en cuenta que existen otros materiales como son las resinas, plásticos tipo polipropileno (PP) o poliéster, y/o textiles que sirven de sujeción y estructura de estas membranas, que pueden ser susceptibles a estas sustancias agresivas, a cambios de temperatura, e incluso a los esfuerzos mecánicos.

Las membranas por sí solas no son funcionales y han de configurarse atendiendo a sus características (morfología, tipo y dirección del flujo) y su forma de disposición en módulos que permitan soportarlas y conectarlas con los elementos periféricos (válvulas, bombas, etc.).

El diseño del módulo debe tener como objetivos, disponer de la mayor superficie de membrana posible por volumen, conseguir una apropiada hidrodinámica, obtener un menor gasto energético por volumen filtrado, permitir las limpiezas necesarias de mantenimiento o que permita un buen acoplamiento con otros módulos, entre otros.

Los sistemas de filtración mediante membranas se clasifican en función de la configuración de sus unidades filtrantes, siendo lo más habitual clasificarlas en: membranas de placa plana (MPP), membranas de fibra hueca (MFH) y membranas tubulares (MT), con pasos de UF o MF. Las primeras trabajan sumergidas a succión o depresión mientras que las tubulares son todas externas, no están sumergidas dentro del licor mezcla, Figura 6.6.



**Figura 6.6** Ejemplos de configuraciones y módulos de membrana. De izquierda a derecha: Placa plana, fibra hueca (sumergidas) y tubular (externa).

Para que funcione con normalidad el sistema de filtración, se precisa generar un flujo tangencial en la zona de membranas y turbulencias para evitar la acumulación de sustancias en las mismas y por tanto el ensuciamiento excesivo de las mismas. Este flujo se crea con un sistema de aireación normalmente exclusivo para el sistema de membranas. El parámetro que determina el grado de aireación que precisan las membranas para el control del ensuciamiento es la demanda específica de

aireación (SAD). Este parámetro puede estar referido a la superficie de membranas ( $SAD_m$ , en  $m^3$  de aire. $m^{-2}$  de superficie de membrana y unidad de tiempo) o al volumen de permeado ( $SAD_p$ , en  $m^3$  de aire.  $m^{-3}$  de permeado).

Las necesidades de aireación, expresadas con el SAD, no se pueden calcular de forma teórica y los valores de aireación empleados se basan en experiencias previas. Normalmente los suministradores de membranas recomiendan los rangos apropiados de SAD a aplicar en la zona de membranas, que varían en función de la configuración empleada.

En la Tabla 6.2 se dan las características de las de las configuraciones de membranas más empleadas en plantas de tratamiento mediante MBR. En el apartado 6.3 se describen con más detalle estos sistemas de filtración desarrollados por las distintas casas comerciales, sus principales parámetros de diseño y su forma de operar. Todos los datos han sido aportados y verificados por las casas.

**Tabla 6.2** Características de las configuraciones de membranas más empleadas en los MBR

Parámetro	Placa plana	Fibra hueca	Tubulares
Dirección de flujo	Fuera-dentro	Fuera-dentro	Dentro-fuera
Tipo de flujo	Flujo perpendicular	Flujo perpendicular	Flujo tangencial
Sumergida/externa	Sumergida	Sumergida	Externa
Refuerzo textil	Si	Algunas	Si
Filtración (MF/UF)	MF/UF	UF	UF
PTM operación (bar)	0,03-0,1	0,1-0,3	0,1-0,5
Flujo a Qmedio (LMH)	18-30	25-30	50-65
SADm ( $m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	0,20-0,35	0,10-0,38	0,20-0,30

El diagrama de flujo más habitual en España es el presentado en la Figura 6.4, consistente en un sistema sumergido no integrado, donde las membranas están ubicadas en un tanque aparte del reactor biológico para facilitar el mantenimiento de las mismas. El proceso de filtración de las membranas se realiza mediante bombas de aspiración. La diferencia de presión que se crea entre uno y otro lado de las membranas durante el filtrado es la presión transmembrana (PTM) que en este tipo de sistemas está entre 0,03-0,3 bar y el caudal que atraviesa las mismas, denominado flujo (F), se encuentra entre 18 y 30  $L m^{-2} h^{-1}$  en función del tipo de membrana.

El sistema de aireación para evitar el ensuciamiento de las membranas suele dar caudales de aire entre 0,3-0,6  $Nm^3 h^{-1}$  por metro cuadrado de membrana.

Las membranas operan habitualmente por ciclos de filtración-contralavado, filtración-contralavado-relajación o filtración-relajación, con duración y secuencia variable en función de la casa comercial y configuración de la membrana, ver apartado 6.3.

Los ciclos de trabajo junto a las limpiezas químicas y físicas (efecto de arrastre del aire principalmente), tienen como objetivo mantener una PTM y/o flujo dentro de los límites marcados por los diferentes fabricantes de membranas.

Para un funcionamiento correcto y sin interrupciones por limpiezas imprevistas o deterioro, es necesario exigir a los suministradores de MBR un listado con las sustancias y productos químicos y sus concentraciones límite, a las que son sensibles las membranas. Estas sustancias serán diferentes en función del material de las membranas y el tipo de soportes que se utilicen en los módulos de filtración.

Al igual que en el caso del tratamiento de filtración mediante membranas, se recomienda disponer de un test de integridad que detecte las roturas de membranas, quizás comprobando en continuo los SS o la transmitancia.

En estos momentos la optimización del proceso respecto al consumo energético y al control del ensuciamiento de las membranas son las principales líneas de desarrollo e investigación. En los últimos años han salido al mercado modelos que cuentan con materiales más resistentes y menos vulnerables al ensuciamiento, sistemas de limpieza que permiten aireación intermitente e incluso mecánica, o diseños que ofrecen flujos más elevados y mejoras en la estabilidad mecánica del sistema.

Existen trabajos donde claramente se evidencia la relación que existe entre el proceso de filtración y el proceso biológico. La operación y el diseño de estos dos procesos no deberían ser independientes (Ferrero et al, 2012).

### 6.3 Sistemas de filtración mediante membrana

Existen muchos fabricantes de membranas y muchas casas comerciales que proporcionan sistemas de filtración mediante membrana para el uso externo o sumergido en una EDAR tipo MBR. En el apartado 6.1, se muestran las casas comerciales que tienen alguna instalación en funcionamiento en España y otras que tienen posibilidades de implantarse en el mercado español a corto plazo, estas son: Zenon, Kubota, Toray, Huber, Koch-Puron, Norit, Alfa Laval, Siemens-Memcor y Ecotec, aunque hay otras como MiA3-maxflow DE, LG/KoReD, Mitsubishi Rayon, Weise-Microclear, PCI membranas, etc.

En este apartado se van a describir los sistemas de membranas dados en la Tabla 6.3. (Iglesias R., et al., 2014). Para acometer esta descripción durante el año 2013 se hicieron reuniones con el departamento técnico de todas las casas comerciales que aquí se exponen. Estas reuniones sirvieron no solo para conocer las características de cada sistema de filtración sino también para validar las mejores prácticas en el diseño y la operación de los MBRs.

**Tabla 6.3** Clasificación de los sistemas comerciales seleccionados por tipo de membrana

Sumergidas		Externas
Fibra hueca	Lámina plana	Tubulares
Zenon	Kubota	Norit X-Flow
Siemens-Memcor	Toray	
Koch-Puron	Huber	
	Microdyn-Nadir Ecotec	
	Alfa Laval	

A la hora de describir los diferentes sistemas de membranas se ha optado por unificar los conceptos de módulo y bastidor y no entrar en las diferentes acepciones que pueden tener estos dos elementos según la casa comercial, facilitando así la comprensión y descripción de cada uno de los sistemas.

Todos los datos recogidos en este apartado, incluyendo esquemas y fotos, han sido facilitados por las casas comerciales a las que se les entregó una ficha-cuestionario tipo para facilitar la recopilación ordenada de la información (ver Anexo III).

Para homogeneizar la información cedida, se fija una temperatura estándar de 20°C a la que están referidos los parámetros de diseño. Del mismo modo, el valor de SSLM del tanque de membranas corresponde al valor que las casas comerciales consideran óptimo para el funcionamiento de sus sistemas.

En base a la temperatura de referencia y a los SSLM óptimos en el tanque de membranas se facilita, en cada caso, un valor de flujo a caudal medio y otro a caudal punta equivalente de 1,3-1,8 veces el caudal medio durante dos o tres horas.

---

Los modelos presentados son los más novedosos o los que se están instalando en estos momentos en instalaciones españolas.

### Sistema comercial Zenon

La casa Zenon cuenta ya en España con más de 20 instalaciones con capacidades entre 400 y 32.000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , con diferentes modelos instalados en función del año del proyecto. El modelo más habitual en las instalaciones españolas es el ZeeWeed 500D, posterior al ZeeWeed 500C. En función del año de presentación del proyecto, los diseños han ido mejorando la eficiencia energética, optimizando el sistema de aireación. En la actualidad Zenon cuenta con el modelo ZeeWeed 500D 370  $\text{ft}^2$ , Figura 6.8, que tiene como novedad principal respecto al ZeeWeed 500D 340  $\text{ft}^2$  un mayor número de fibras por módulo, consiguiendo pasar de 31,58  $\text{m}^2$  de membrana por módulo a 34,37  $\text{m}^2$ . Además, esta nueva versión cuenta con las mismas dimensiones del módulo anterior, pero optimiza el espacio de las resinas y coloca separadores entre los distintos módulos del bastidor evitando así la rotura de fibras por vibraciones.

### **Características del modelo ZeeWeed W500D**

La membrana de Zenon es de fibra hueca de ultrafiltración, Figura 6.7, con disposición vertical y un tamaño de poro nominal de 0,034  $\mu\text{m}$ .



**Figura 6.7** Membranas de fibra hueca que componen el módulo ZeeWeed 500.

La membrana está compuesta de difluoruro de polivinilo (PVDF), material de características no iónicas y alta resistencia mecánica y química. Su hidrofiliadad se consigue mediante un tratamiento superficial de la membrana.

La membrana va adherida a un soporte textil que le confiere resistencia mecánica y está inmovilizada por ambos lados dentro del módulo mediante un conglomerado de resinas, Figura 6.8.



**Figura 6.8** Izquierda: módulo. Derecha: bastidor del ZeeWeed 500D.

La ubicación de estas membranas puede ser tanto dentro del reactor biológico, sistema integrado, como en un tanque aparte subdividido en diferentes líneas en función del caudal a tratar y flexibilidad que se precise en el diseño de la planta. Los más habituales son los sistemas no integrados al ser más fácil el mantenimiento de las membranas en caso de necesitar realizar una limpieza en profundidad o reparar la rotura de alguna de ellas.



**Figura 6.9** Izquierda: Tanque de membranas con un bastidor extraído. Derecha: Tanque de membranas con conexiones de permeado y aire de limpieza.

En la Tabla 6.4 se resumen las características principales del sistema correspondiente al modelo ZeeWeed 500D, que cuenta ya con varias instalaciones en España.

El tipo de filtración es por succión, de fuera a dentro, permitiendo contralavados para mantener las membranas sin obstrucciones.

**Tabla 6.4** Resumen de las características generales del modelo ZeeWeed 500D

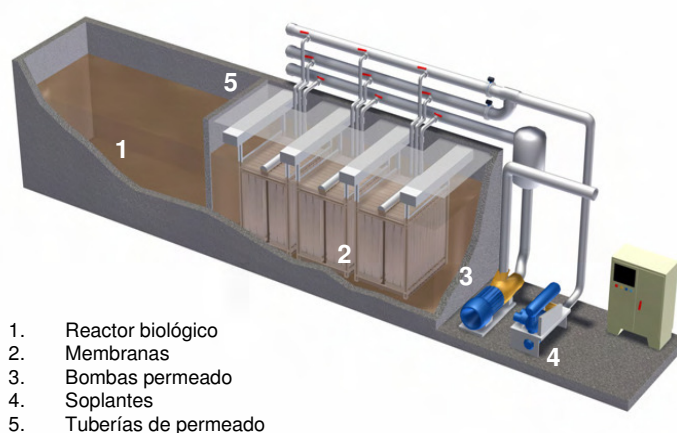
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>ZENON</b>
Modelo	<b>W500D</b>
Tipo de filtración (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Fibra hueca reforzada
Modo de filtración (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión
Material de la membrana	PVDF
Diámetro de poro nominal (micras)	0,034
Tipo de refuerzo	Textil
Dimensiones del módulo (mxmxm)	2,198 x 0,844 x 0,049
Dimensiones del bastidor (mxmxm)	2,112x1,745x 0,590
Nº de módulos por bastidor	≤ 48
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	34,37
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	1.649,76
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	378
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	172,84
Dirección del flujo	De fuera a dentro
Configuración del sistema	Sumergido

En la Figura 6.10 se representan varios bastidores situados en una línea de tratamiento con los elementos mínimos necesarios para el funcionamiento del sistema.

## Diseño y operación

Con objeto de evitar problemas en la operación, en instalaciones con decantación primaria se exige un tamizado de luz de paso de 1 mm ó 2 mm previo al biológico. Se aconseja que sean tamices de chapa perforada o de malla con flujo bidireccional donde la dirección de los flujos de entrada y salida sea de 90°. En plantas donde no exista decantación primaria, se requiere un tamizado de 1mm. En caso de plantas pequeñas también se tolera el uso de tamiz de 2 mm.

En las plantas existentes los reactores biológicos se diseñaron para trabajar con concentraciones de 10-12 g.L<sup>-1</sup> de SSLM, pero en los diseños actuales, la casa Zenon está optando por establecer concentraciones más bajas, en torno a los 6-8 g.L<sup>-1</sup> e incluso menores, siempre que no existan limitaciones de espacio muy estrictas, con objeto de mejorar la eficiencia energética del sistema. La membrana Zenon puede trabajar a bajas concentraciones sin que se vea comprometido su funcionamiento o calidad del permeado a diferencia de las MPP.



**Figura 6.10** Esquema del sistema Zenon

Los rangos de recirculación estándar suelen ser de 3-4 veces el caudal medio dependiendo de la diferencia de concentración a trabajar entre el reactor biológico y el tanque de membranas. La casa recomienda 10-12 g.L<sup>-1</sup> en el tanque de membranas es la concentración óptima para el funcionamiento de las mismas. Trabajar a concentraciones más elevadas puede provocar deshidratación del fango sobre las membranas cuando se opera a velocidades altas de filtrado. En estos rangos de concentración de SS tanto del biológico como de la zona de membranas, predomina más el ensuciamiento coloidal que es corregido mediante los contralavados, aunque en aplicaciones municipales se ha comprobado que el relax es un sistema eficaz de limpieza que no requiere contralavados.

Respecto a la edad del fango, se aconseja que esté por encima de los 8 días o que al menos se produzca una nitrificación completa en caso de temperaturas bajas. Las características del fango en estas condiciones propician una mejor filtrabilidad y reducen el ensuciamiento. El objetivo es conseguir un fango suficientemente mineralizado con concentraciones de materia orgánica soluble bajas. En principio Zenon no requiere aireación prolongada, aunque operar a bajas edades de fango aumenta la necesidad de contralavados al tener más concentración de materia orgánica coloidal.

En el diseño del reactor biológico se puede utilizar el volumen ocupado por las membranas, así como el aporte de oxígeno del sistema de aireación de las membranas. Sin embargo, esta aireación tiene un reducido coeficiente de transferencia de oxígeno al licor mezcla ( $\alpha$ ) por ser de burbuja gruesa,

aunque en los procesos de nitrificación –desnitrificación habrá que tenerla en cuenta para no afectar la zona anóxica del proceso.

Respecto a las características y parámetros de diseño y operación de las membranas Zenon, éstas operan con flujos entre 25-29 LMH a temperaturas entre 12 y 14°C y con presiones transmembrana constantes alrededor de 0,1 bar. La presión máxima de permeado es de 0,9 bar y la de contralavado máxima admitida de 0,55 bar.

Los ciclos de trabajo son de 10 minutos filtrando y 1 minuto en contralavado o en relajación, en función de la pérdida de permeabilidad. Para el contralavado se utiliza agua del depósito de permeado y en modo relajación se detiene la filtración, pero se mantiene la aireación, Figura 6.11.

**Tabla 6.5** Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del sistema ZeeWeed 500D

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado chapa perforada 1-2 mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSLM (g.L <sup>-1</sup> ) tanque membrana	12
Caudal de recirculación habitual	3-4Qm
Edad de fango mínima (días)	8
Flujo a caudal medio (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	27-29
Flujo a caudal punta (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	47-49
PTM operación (bar)	0,1
PTM máxima de permeado (bar)	0,9
PTM máxima de contralavado (bar)	0,55
Permeabilidad (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	250-290
Tipo de aireación	Burbuja gruesa intermitente con ciclos de trabajo 10" aire:10" parada a caudal punta y 10:30 a caudal nominal
Caudal de aire (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) por módulo /bastidor	9,7 / 465 por bastidor en 10:10 4,85/232 por bastidor en 10:30
Presión del aire suministrado (bar)	0,3-0,35
SADm (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,285-0,38
SADp (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	10,5 (modo 10:10)
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavado, etc.)	10 minutos filtración 1 minuto contralavado o relax a caudal nominal
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	Si. Con agua filtrada

La aireación de las membranas es intermitente, con ciclos de trabajo que funcionan en caudales punta en periodos de 20 segundos, 10 segundos aireando y 10 segundos sin aireación (10:10), o en caudales medios o inferiores en ciclos de 40 segundos, 10 segundos aireando y 30 segundos sin aireación (10:30).

El caudal de aire necesario trabajando con el tipo de aireación 10:30 es de 470 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> por bastidor que cuenta como máximo con 48 módulos, con superficie de membrana de 34,37 m<sup>2</sup> cada uno y un flujo medio de diseño de 27 LMH, lo que implica un SADm de 0,285 m<sup>3</sup> de aire por m<sup>2</sup> de membrana y hora y un SADp de 5,22 m<sup>3</sup> de aire por m<sup>3</sup> de permeado. Los datos anteriormente aportados son para temperaturas entre 12 y 14°C y SSLM de 10 g.L<sup>-1</sup> en la zona de membranas. Con estas mismas condiciones y en el tipo de aireación 10:10 el SADm y SADp se elevarían a lo indicado en la Tabla 6.5, a 0,38 m<sup>3</sup> de aire por m<sup>2</sup> de membrana y hora y a 10,5 m<sup>3</sup> de aire por m<sup>3</sup> de permeado respectivamente.



**Figura 6.11** Sistema de aireación del sistema Zenon



**Figura 6.12** Tubería de la parrilla de aireación del sistema Zenon

El sistema de distribución de aire proporciona una burbuja gruesa a 0,30-0,35 bar de presión en sumergencias sobre los 3 metros, Figura 6.12.

Como consecuencia de la aireación del proceso, parte del aire queda ocluido en el permeado y en las tuberías de salida del efluente. Para evitar problemas en el funcionamiento de los equipos durante la operación de contralavado, se debe realizar una purga periódica de aire del permeado. Esta purga puede llevarse a cabo mediante bombas de vacío o eyectores y/o mediante válvulas de escape de accionamiento manual, con frecuencia de 1 vez cada 5 contralavados.

Respecto al control del ensuciamiento de las membranas, además de la aireación y del contralavado, se deben programar limpiezas de mantenimiento que se realizan sin vaciar el tanque de membranas con  $\text{Cl}_2$  a concentraciones de 200 ppm y ácido cítrico a 2.000 ppm con una frecuencia semanal y una duración de 1 hora. Además, una vez al año, se suele realizar una limpieza de recuperación llenando el tanque con agua de permeado y  $\text{Cl}_2$  a concentraciones de 1.000 ppm y ácido cítrico a 2.000 ppm, realizando una filtración con PTM mayores de 0,5 bar al menos durante seis horas.

#### Sistema comercial Siemens-Memcor

En España, Siemens tiene presencia en el sector industrial con tecnología MBR y ha participado en concursos para tratamiento de aguas urbanas, no teniendo conocimiento de ninguna instalación en funcionamiento.

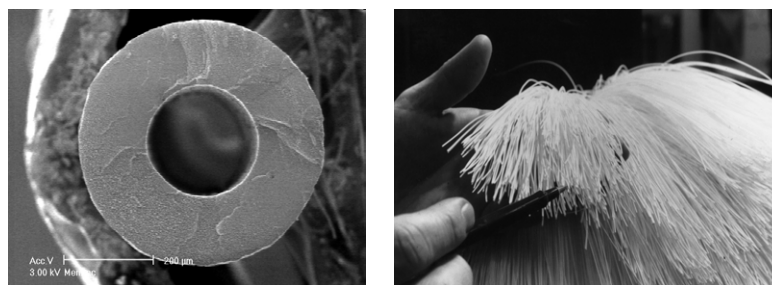
La casa comercial comenzó comercializando su sistema MemJet®, compuesto por membranas de fibra hueca con flujo fuera-dentro por succión y aireación con un sistema jet de difusión de aire de burbuja media. Desde 2008, se está utilizando el sistema MemPulse™, que utiliza la membrana de B40N y cuenta con un sistema patentado de acumulación de aire, formación y expulsión de una burbuja de gran tamaño que genera microturbulencias en las fibras de membrana. Este sistema, según la casa, mejora la limpieza de las membranas prolongando la permeabilidad de la misma



durante el tiempo y reduce el consumo energético destinado a la limpieza de la membrana por aireación en un 50%, comparado con sistemas de aireación constante por difusión.

### Características del sistema MemPulse™

La membrana de Siemens es de fibra hueca, tiene tamaño de poro nominal de 0,04  $\mu\text{m}$ . La fibra se fabrica con un solo material (PVDF) de un determinado grosor que le confiere a la membrana resistencia mecánica suficiente para evitar las roturas por fatiga y elimina la necesidad de materiales de refuerzo, minimizando así, posibles fragmentaciones entre capas de distintos materiales, ver Figura 6.13.



**Figura 6.13** Fibras huecas GEN2 que componen el módulo MemPulse™.

El sistema MemPulse™ cuenta con módulos de membrana B40N. Cada módulo posee fibras huecas equivalente a una superficie total de membrana de 37,6  $\text{m}^2$  por módulo. Estos módulos se configuran en grupos de 16 unidades que conforman en su conjunto un bastidor de dimensiones 3,5 m de largo, 2,3 m de alto y 0,21 m de ancho, Figura 6.14.

Estos bastidores cuentan con conexiones de agua y aire independientes y se ubican en tanques aparte del reactor biológico, Figura 6.15. El máximo número de módulos por bastidor es de 16.



**Figura 6.14** Izquierda: módulo. Derecha: bastidor del B40N.

El licor mezcla procedente del reactor biológico, accede al tanque con los bastidores de membranas por el lado más largo de la línea y por la parte inferior de la misma. El recorrido de agua residual es mucho más corto, minimizando así los gradientes de concentración en horizontal a lo largo de los distintos bastidores. Una vez filtrado, el permeado se recoge por la parte superior de las membranas mediante una bomba de permeado para cada línea.



**Figura 6.15.** Izquierda: Tanque de membranas con bastidores. Derecha: Detalle de conexiones de permeado y aire de limpieza

En la Tabla 6.6 se recogen las características generales del sistema correspondiente al modelo MemPulse™:

**Tabla 6.6** Resumen de las características generales del modelo MemPulse™

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>SIEMENS</b>
Modelo	<b>MemPulse™</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Fibra hueca
Tipo de filtración (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión
Material de la membrana	PVDF
Diámetro de poro nominal (micras)	0,04
Tipo de refuerzo	No tiene refuerzo (material monolítico)
Dimensiones del módulo (m x m x m)	0,20 x 0,20 x 1,60
Dimensiones del bastidor (m x m x m)	3,50 x 2,30 x 0,21
Nº de módulos por bastidor	16
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	37,6
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	601,6
Tipo de flujo	De fuera a dentro
Tipo de sistema	Sumergida

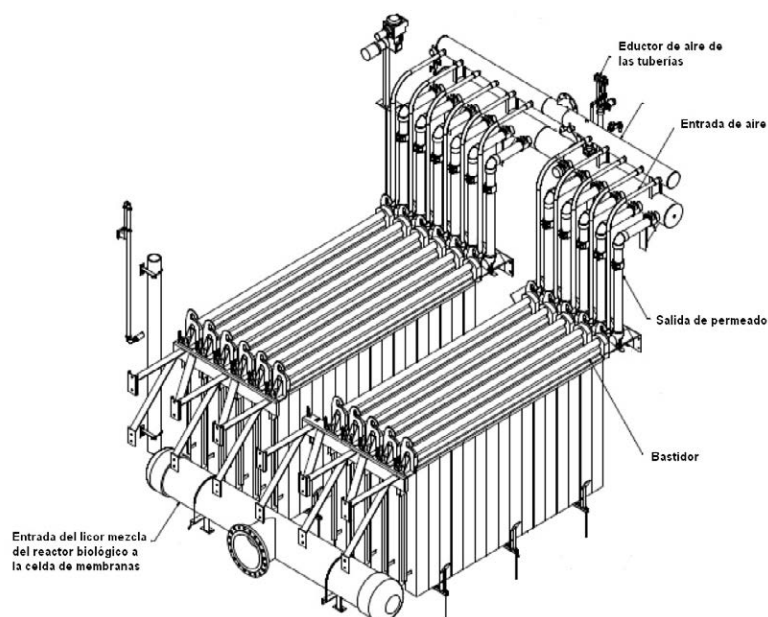
En la Figura 6.16, se representan varios bastidores con las conexiones mínimas necesarias para el funcionamiento del sistema.

### Diseño y operación

Para un buen funcionamiento de este tipo de membranas la casa comercial aconseja un pretratamiento adicional consistente en un tamizado rotatorio, de chapa perforada, con luz de paso de 1 mm, que debe utilizarse siempre, desde el arranque de la planta, para evitar la entrada de elementos fibrosos en la zona de membranas que pudiesen aglomerarse entre las fibras.

Para el cálculo del volumen del reactor biológico no se tiene en cuenta el volumen ocupado por las membranas.

La entrada de licor mezcla al tanque de membranas se realiza por bombeo o por gravedad y la recirculación, con un caudal de 3-4 veces el caudal medio, se realiza desde la parte superior del tanque de membranas.



**Figura 6.16** Esquema del sistema de membranas Siemens

Una vez calculada la superficie de membranas necesaria, se preparan los bastidores y se colocan ancladas en la parte superior a ambos extremos del tanque y apoyadas sobre unos raíles guía en la parte inferior.

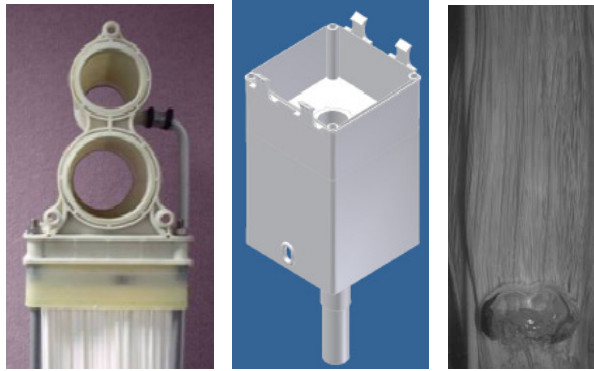
**Tabla 6.7** Resumen de los principales parámetros de diseño y operación sistema MemPulse™

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado chapa perforada 1 mm
Caudal de recirculación habitual	3-4Qm
Tipo de aireación	Sistema de aireación por pulsos MemPulse.
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	No hay contralavado

La operación en la zona de membranas se realiza en función del nivel del agua en el reactor biológico, es decir, a flujo variable y se controla con la medida de permeabilidad de las membranas.

Como estrategia de control del ensuciamiento de la membrana la casa opta por una aireación en continuo mediante el sistema MemPulse™, con ciclos de trabajo de filtración y de relajación.

Asimismo, el sistema MemPulse™, con su acumulación de aire y formación de una burbuja de gran tamaño que recorre las fibras de cada módulo, provoca un efecto de succión de licor mezcla que también favorece la limpieza de las membranas y la eliminación del ensuciamiento particulado mediante la generación de microturbulencias en la superficie de las fibras. Figura 6.17.



**Figura 6.17.** Sistema de aireación MemPulse™. Izquierda: conexiones de permeado y aire. Centro: Parte inferior del módulo – acumulador de aire. Derecha: burbuja ascendiendo por las fibras

La aireación se debe considerar como aporte de aire al reactor biológico a la hora de diseñar la aireación del proceso biológico. Asimismo, en la nitrificación –desnitrificación, habrá que tenerla en cuenta para no afectar la zona anóxica del proceso.

La aireación en las membranas Siemens es continua (de muy bajo caudal), incluso durante los periodos de relajación, sin embargo, existen opciones de aireación en situaciones de stand-by de alguna línea. Si la parada es de corta duración (horas), se aplica aireación constante, mientras que si la parada es de larga duración (por estacionalidad del afluente) se deben vaciar las líneas innecesarias, llenarlas con agua filtrada con una solución de NaClO y airearlas intermitentemente.

Cuando la permeabilidad y la presión transmembrana sobrepasan los rangos establecidos por la casa comercial, señalados anteriormente, se ponen en marcha los siguientes protocolos de limpieza:

- Limpieza de mantenimiento: se trata de limpiezas a contracorriente que se utilizan para la eliminación del ensuciamiento orgánico y biológico. Se realizan por un periodo de tiempo breve, sin necesidad de sacar la línea fuera de servicio. Incluye una secuencia con retrolavados cortos con una solución de NaClO, relajación y recirculación cerrada. Este procedimiento es automático con arranque manual.
- Limpieza de recuperación: se usa para la eliminación del ensuciamiento orgánico, biológico e inorgánico. En general se realiza con NaClO y con ácido cítrico (opcionalmente se puede suplementar con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Cada limpieza es por línea y ésta queda fuera de servicio durante la operación. La limpieza se realiza mediante un procedimiento automático con arranque manual.

#### Sistema comercial Koch-PURON®

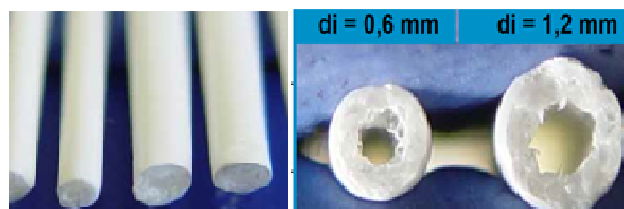
En España hay una instalación con este sistema. El sistema PURON® dispone de dos modelos de módulo, el PSH 37 y el PSH 41.

Antiguamente la fibra que ofrecía la casa era de PES pero los nuevos modelos vienen ya realizados en PVDF con un entrelazado del soporte a la fibra, es decir, no viene pegada la fibra al soporte. Posee más homogeneidad y número de poros por superficie lo que ha mejorado, entre otras características, la permeabilidad de la fibra y ha prevenido el deshilachado de la misma, al ser más difícil desprenderse del soporte.

Además, el número de fibras por elemento que las agrupa dentro del módulo ha aumentado, de 228 fibras por elemento a 280 fibras, por lo que ha aumentado el empaquetamiento del sistema, es decir la superficie de membrana por espacio ocupado, en un 20% aproximadamente. Este módulo con 9 elementos de 280 fibras de PVDF está disponible desde mediados del 2011.

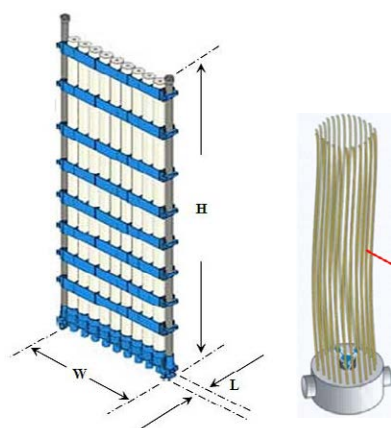
### Características del modelo PSH41 1800

Las membranas para el tratamiento de aguas residuales urbanas que está ofertando la casa son de fibra hueca, con poro nominal 0,03 micras de diámetro y con mejoras hidráulicas respecto a los anteriores modelos, al aumentar el diámetro interior de 0,6 mm a 1,2 mm y el exterior de 1,9 mm a 2,6 mm. Figura 6.18.



**Figura 6.18** Fibras huecas PSH que componen el módulo del sistema PURON®

Los dos modelos de módulos, PSH 37 y el PSH 41, del sistema PURON® tienen la misma manera de ensamblar los haces de fibras que componen un elemento, el mismo número de fibras y los mismos soportes. El módulo PSH 37 tiene una altura (H) de 2,151 m y el PSH 41 de 2,319 m mientras que el ancho (W) y el fondo (L) son iguales en ambos módulos, 0,828 m y 0,092 m respectivamente, Figura 6.19. Esta diferencia de altura proporciona al PSH 41 una superficie de membrana de 41 m<sup>2</sup> mientras que en el otro módulo la superficie es de 37 m<sup>2</sup>.



**Figura 6.19** Módulo PSH del sistema PURON® y elemento filtrante que lo compone

Estos módulos pueden ubicarse en bastidores tipo PSH 300 y PSH 600 en el caso del PSH 37, con 8 y 16 módulos por bastidor respectivamente, y tipo PSH 1800, que cuenta con 44 módulos del modelo PSH 41, Figura 6.20.



**Figura 6.20** Bastidores de módulos PSH de PURON®

Los bastidores se diferencian por lo comentado anteriormente, en el número y tipo de módulos que contienen, y además, en el tipo de conexiones para la salida del permeado siendo tipo tubería en el bastidor PSH 1800 y tipo brida en los bastidores PSH 300 y 600.

El sistema trabaja a succión de fuera a dentro, recogiendo el permeado en la parte baja del elemento, bajo la base de silicona donde se insertan las fibras.

La Figura 6.21 muestra las conexiones de aire y permeado de los bastidores PSH así como su ubicación en el tanque de membranas.



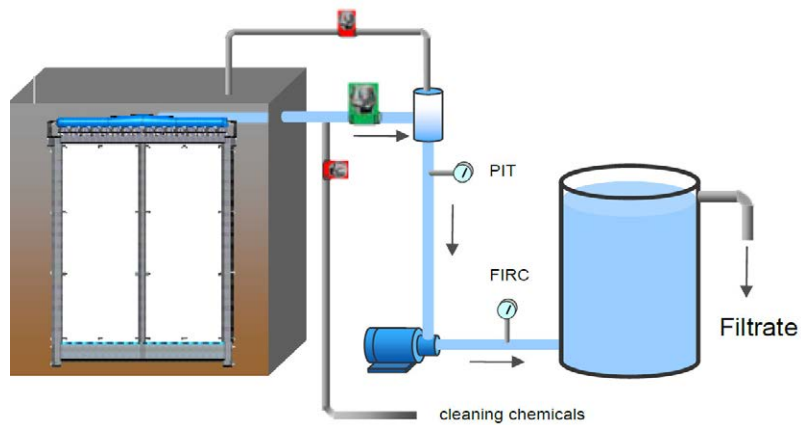
**Figura 6.21** Tanque de membranas con bastidores PSH de PURON.

En la siguiente Tabla 6.8 se resumen las principales características del bastidor 1800 con el módulo PSH 41.

**Tabla 6.8** Resumen de las características generales del PSH 41 1800 PURON®

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>PURON</b>
Modelo	<b>PSH41 1800</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Fibra hueca reforzada
Tipo de filtración (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión
Material de la membrana	PVDF
Diámetro de poro nominal (micras)	0,03
Tipo de refuerzo	Poliéster
Dimensiones del módulo (m x m x m)	2,319 x 0,828 x 0,092
Dimensiones del bastidor (m x m x m)	2,244 x 1,755 x 2,530
Nº de módulos por bastidor	44
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	41
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	1800
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	232
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	180,7
Dirección del flujo	De fuera a dentro
Configuración del sistema	Sumergida

En la Figura 6.22 viene representado el funcionamiento de un bastidor del sistema PURON® en modo de filtración, así como sus elementos mínimos necesarios.



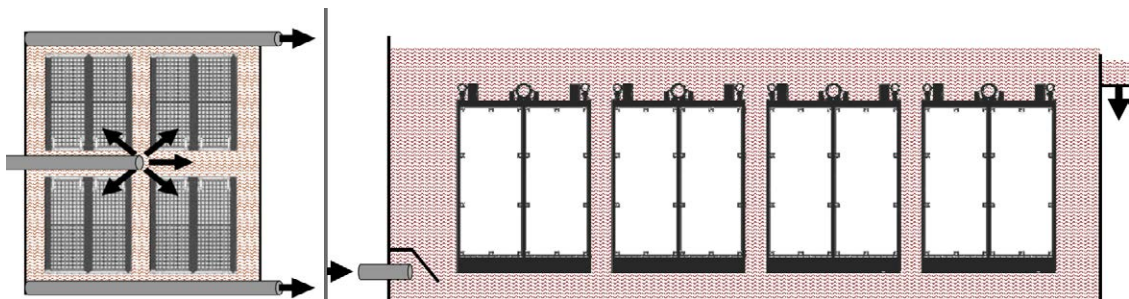
**Figura 6.22** Esquema general de funcionamiento del sistema PURON<sup>®</sup>

### Diseño y operación

En general, el sistema precisa de un pretratamiento adicional que consiste en un tamizado de 2 mm mediante chapa perforada.

Para evitar un gradiente excesivo de la concentración del licor mezcla en el tanque mayor de  $2 \text{ g.L}^{-1}$ , de membranas como consecuencia de la longitud del tanque, la casa comercial recomienda instalar como máximo 6 bastidores por línea.

La distribución del licor mezcla dentro de los tanques de membranas tiene que ser lo más homogénea posible por lo que la casa recomienda hacerla desde la parte central del tanque, Figura 6.23.



**Figura 6.23** Izq: Esquemas de distribución de bastidores; Dcha: entrada del licor mezcla

En principio la casa no pone un límite inferior a la concentración mínima a mantener en el tanque de membranas, pero sí recomienda no pasar los  $12 \text{ g.L}^{-1}$  por motivos de eficiencia energética.

En la Tabla 6.9 se indican algunos parámetros a tener en cuenta para el diseño y operación del modelo PSH 1800.

A  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  de temperatura del agua, con concentraciones de SSLM entre  $10$  y  $12 \text{ g.L}^{-1}$  en el tanque de membranas y recirculaciones de 4 veces el caudal medio a tratar en el biológico, la membrana tiene un rango de permeabilidad entre  $150$  y  $250 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  trabajando a PTM constante sobre los  $0,2$ - $0,3$  bar y rango de flujo medio entre  $25$ - $30 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ .

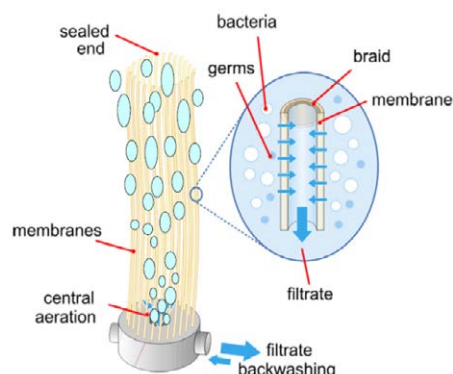
Para conseguir este rango de permeabilidad se recomienda edades de fango superiores a los 16 días, en cualquier caso, y según la temperatura del agua, es recomendable realizar una nitrificación completa para mejorar la filtrabilidad del fango.

**Tabla 6.9** Resumen de las principales características del diseño y operación del PSH 41 1800

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado chapa perforada 2 mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSLM (g.L <sup>-1</sup> ) tanque membrana	< 12
Caudal de recirculación habitual	4Qm
Edad de fango mínima (días)	16
Flujo caudal medio (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	25-30
Flujo caudal punta (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	40-50
PTM operación (bar)	0,2-0,3
PTM máxima de permeado (bar)	0,6
PTM máxima de contralavado (bar)	0,6
Permeabilidad (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	150-250
Tipo de aireación	Burbuja gruesa, discontinuo
Caudal de aire (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) por módulo /bastidor	5 por módulo / 220 por bastidor
Presión del aire suministrado (bar)	0,30-0,45
SAD <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> aire/ m <sup>2</sup> membrana.h)	0,12
SAD <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> permeado)	6,1
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavado, etc.)	6-8 contralavados/hora de 0,5 min
Contralavados	Con agua filtrada

El sistema de aireación está situado en el centro de cada elemento que compone el módulo. Consiste en tres salidas de aire que generan una burbuja gruesa en forma de pulsos de aire. Es intermitente, con una duración entre 31 y 93 segundos, en función del caudal medio o punta a tratar, y con una frecuencia media entre ciclos de aireación de 124 segundos. Figura 6.24.

La aireación se diseña para que pueda alternarse entre las distintas líneas y bastidores en función de lo que se precise en cada momento. Según ciclos de trabajo y flexibilidad en este diseño, el sistema de aireación puede operar al 50 %, 30 % y 25 % de su capacidad total, lo que contribuye al ahorro energético.



**Figura 6.24** Sistema de aireación central del sistema PURON ®

El aire que aporta este sistema de aireación para el mantenimiento de las fibras no se suele tener en cuenta para los requerimientos de oxígeno en la parte biológica del proceso, aunque la casa lo tiene en cuenta en algunos diseños. La contribución a la transferencia de oxígeno con este sistema está



---

sobre el 5 %, por lo que sí la tienen en cuenta a la hora de recircular a tanques anóxicos del biológico donde recomiendan otro tanque de retención hidráulica de al menos 10 minutos para no perturbar el proceso de desnitrificación.

El módulo PSH 41, tiene un caudal de aireación máximo instantáneo de  $0,55 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  mientras que el PSH 37 aguanta hasta los  $0,63 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , con sumergencias del bastidor de 30-50 cm. La presión del aire suministrado está entre 3,0 y 3,2 bar de promedio llegando a 4 bar cuando se trata caudal punta.

En función de la temperatura del agua a tratar se tendrá mayor o menor acumulación de aire en las membranas por lo que es necesario tener sistemas de ventilación y trampas de aire para sacar este aire acumulado. Para ello, el sistema cuenta con tres posiciones básicas de funcionamiento: modo filtrado, modo contralavado y modo relajación.

El modo filtración se alterna con el de contralavado en intervalos de 6 u 8 retrolavados por hora de filtrado con duraciones de 20 a 30 segundos cada uno en función del caudal a tratar, medio o punta, y la temperatura del agua que confiere unas características de viscosidad diferentes al licor mezcla a filtrar. Una vez al día el retrolavado se hace con NaClO a una concentración de  $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  con un caudal de 6 L por  $\text{m}^2$  de membrana y hora.

Las limpiezas de mantenimiento se realizan con ácido cítrico a concentraciones de  $2.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  una vez por semana con una duración entre 20-30 minutos. Esta frecuencia y duración de la limpieza puede variar en función de la temperatura de trabajo de las membranas y la utilización de coagulantes adicionales como el  $\text{Fe}_3\text{Cl}$  para la eliminación de fósforo, por ejemplo.

Las limpiezas de recuperación suelen hacerse una vez al año con NaClO a  $1.500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de concentración con membranas nuevas y hasta  $2.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de concentración con membranas más viejas. La duración de esta limpieza es de unas 16 horas y tiene como objetivo eliminar grasas y aceites adheridos a la membrana.

Se puede utilizar el HCl para ajustar a pH 2 para la limpieza de recuperación si hay alta alcalinidad en el agua. Normalmente para esta limpieza se utiliza el ácido cítrico a pH 3 a concentraciones de  $2.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  y duración entre 2 -3 horas.

### Sistema comercial Kubota

En España hay más de 17 plantas urbanas con esta tecnología. En 1991, la empresa desarrolló su primera unidad de membranas sumergidas de placa plana (modelo en un solo piso), y posteriormente aparecerían nuevos modelos con módulos de doble piso, más compactos, destinados a plantas de mayor escala.

En la actualidad, la casa comercial oferta los modelos ES que son de simple piso y los EK de doble piso con la membrana de tipo 510 ( $0,8 \text{ m}^2$ ), mientras que los módulos RM son de simple piso y los RW son de doble piso con la membrana tipo 515 ( $1,45 \text{ m}^2$ ).

Como novedades la casa tiene el modelo SP400, lanzado a principios del 2011, en el cual se modifica el concepto estructural del módulo y se incluyen 40 paquetes de membranas por bastidor de  $10 \text{ m}^2$  de superficie de membrana cada uno, Figura 6.25. La principal ventaja de este módulo frente a sus predecesores es el aumento de la eficiencia energética; debido a su menor altura y a la incorporación de un difusor de burbuja media que facilita la transferencia de oxígeno y que permite aprovechar una cantidad superior de oxígeno en el proceso biológico procedente de la aireación de las membranas.

La mejora del RW400 respecto al EK400 tanto en los flujos netos de operación, de 25 LMH del modelo EK400 a los 29 LMH del RW400, empaquetamiento de  $50 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  a  $80 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  junto a las realizadas en el sistema de aireación e hidráulica del módulo, han contribuido a reducir las demandas energéticas para la aireación del sistema en más de un 40 %, pasando de consumir  $0,48 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  habitual en el modelo EK400 a  $0,27 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  en una planta de  $10.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  de capacidad con el modelo RW400.



**Figura 6.25** Izquierda: Paquete de membranas SP400. Derecha: bastidor SP 400

El módulo EK de Kubota es el módulo con mayor presencia en las instalaciones españolas. Sin embargo, aunque este modelo todavía se fabrica, los módulos con mayor salida en el mercado urbano en la actualidad son los RM y RW debido a la mejora en la eficiencia energética del sistema. Los datos facilitados a continuación serán referidos al modelo RW400, Figura 6.26.



**Figura 6.26** Izquierda: módulo tipo 510. Derecha: bastidor RW 400

### Características del modelo RW400

El modelo RW 400 incorpora 400 módulos de membrana plana de Polietileno clorado de  $1,45 \text{ m}^2$  de superficie de membrana cada uno, dispuestos verticalmente en dos bastidores de acero inoxidable apilados (configuración doble piso). El bastidor cuenta con un sistema de difusores de burbuja gruesa. Estas membranas operan sumergidas con flujos de fuera a dentro.

El tamaño del poro medio es de 0,2 micras y el del poro máximo o nominal de 0,4 micras. Sin embargo, debido a la formación de una capa dinámica de proteína y material celular en la superficie de la membrana durante la operación, el diámetro efectivo de poro se ubica en el rango de la ultrafiltración.



**Figura 6.27** Izquierda: módulo tipo 515. Derecha: bastidor RW400.

En la Tabla 6.10 se describen las características principales del modelo RW400 suministrado por la casa Kubota:

**Tabla 6.10.** Resumen de las características generales del modelo RW400

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>KUBOTA</b>
Modelo	<b>RW 400</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	MF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Plana
Tipo de filtración (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión, gravedad, sifón
Material de la membrana	Polietileno clorado
Diámetro de poro nominal (micras)	0,4
Tipo de refuerzo	Resina ABS
Dimensiones del módulo (m x m x m)	1,56 x 0,58 x 0,006
Dimensiones del bastidor (m x m x m)	4,29 x 0,60 x 2,93
Nº de módulos por bastidor	400
Superficie de membrana por módulos (m <sup>2</sup> )	1,45
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	580
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	267
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	76
Dirección del flujo	Fuera-dentro
Configuración del sistema	Sumergida

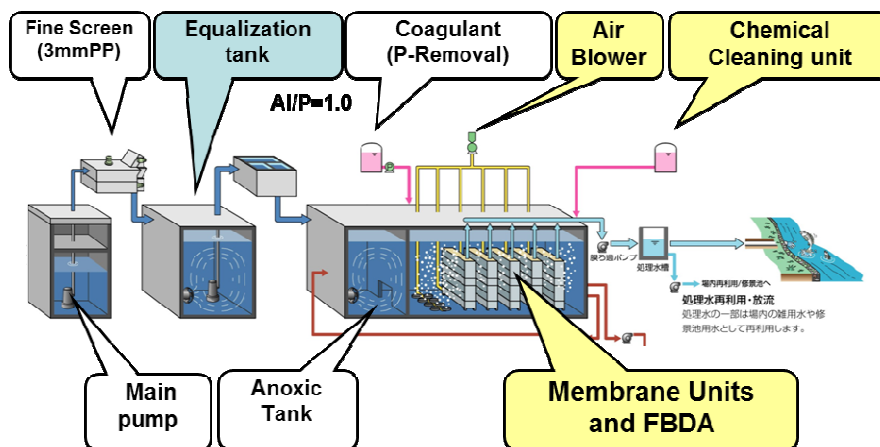
El bastidor de este modelo, representado en la Figura 6.28, se compone básicamente de dos elementos: una carcasa de difusores y dos casetes de membranas. El primero está compuesto por una estructura de acero inoxidable que incorpora en la parte inferior un difusor de burbuja gruesa (patentado) para la limpieza física efectiva de las membranas. Los casetes de membranas consisten en una estructura de acero inoxidable que contiene 200 módulos de membrana plana organizados en vertical. Cada módulo se encuentra conectado a los dos colectores de permeado, incorporados en cada casete, por dos tubos de poliuretano independientes, lo que permite extraer módulos de membrana individualmente proporcionando flexibilidad al sistema.



**Figura 6.28** Tanque de membranas con membranas RW400 Kubota.

La configuración de doble piso otorga al sistema una mayor eficiencia ya que duplica la superficie específica de membrana por bastidor y mejora la demanda específica de aire al aprovechar el mismo aire para la limpieza de las dos casetes de membranas. Sin embargo, al tener mayor altura de agua, hay que aportar un caudal de aireación a más presión.

En la Figura 6.29 se representa un ejemplo de una planta MBR Kubota con eliminación de nutrientes.



**Figura 6.29** Sistema de membranas Kubota con eliminación de nutrientes

### Diseño y operación

El pretratamiento habitual para este tipo de sistemas es un tamizado avanzado que en caso de ser de chapa perforada se recomienda de 3 mm y si es de barra, de 1 mm.

En las puestas en marcha la concentración mínima de sólidos en el tanque de membrana debería ser de  $5 \text{ g.L}^{-1}$ , siendo el rango óptimo de operación del sistema entre  $8\text{-}15 \text{ g.L}^{-1}$  con edades de fango superiores a 8 días cuando la temperatura supera los  $15^\circ\text{C}$ . El máximo de SSLM (operativo) de una aplicación MBR recomendado por la casa es de  $20 \text{ g.L}^{-1}$ . Los rangos en sólidos y retenciones celulares mencionados anteriormente, son para mantener un equilibrio entre espacio ocupado por el sistema y el ensuciamiento que provocaría el fango en otros rangos de concentración debido a su composición microbiológica.

Los rangos de recirculación para mantener las concentraciones anteriormente mencionadas oscilan entre 2-5 veces el caudal medio.

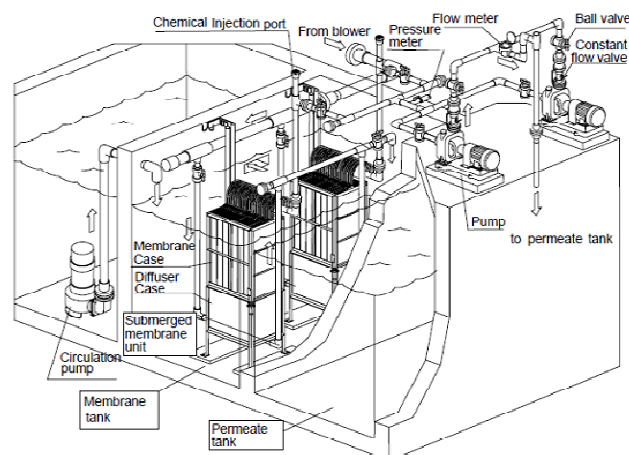
Los parámetros de diseño y operación del sistema se resumen en la Tabla 6.11.

**Tabla 6.11** Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del modelo RW400

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado chapa perforada 3 mm o tamizado de barra 1 mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSL <sub>M</sub> (g.L <sup>-1</sup> ) tanque membrana	8-15 g/L
Caudal de recirculación habitual	2-5.Q <sub>m</sub>
Edad de fango mínima (días)	8
Flujo caudal medio (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	29
Flujo caudal punta (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	55
PTM operación (bar)	0,05-0,1
PTM máxima de permeado (bar)	0,2
PTM máxima de contralavado (bar)	-
Permeabilidad (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	200-800
Tipo de aireación	Burbuja gruesa en continuo
Caudal de aire (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) por módulo/bastidor	0,42/ 168
Presión del aire suministrado (bar)	0,45-0,55
SAD <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> aire.m <sup>2</sup> membrana.h)	0,29
SAD <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> permeado)	9,9
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavado, etc.)	9 minutos filtrado:1 minutos relajación
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	Sin contralavados

La tecnología de membranas Kubota permite la filtración: por gravedad, succión o sifón. El tipo de filtración se define desde el diseño de la planta y condiciona la configuración y modo de funcionamiento de la misma. La

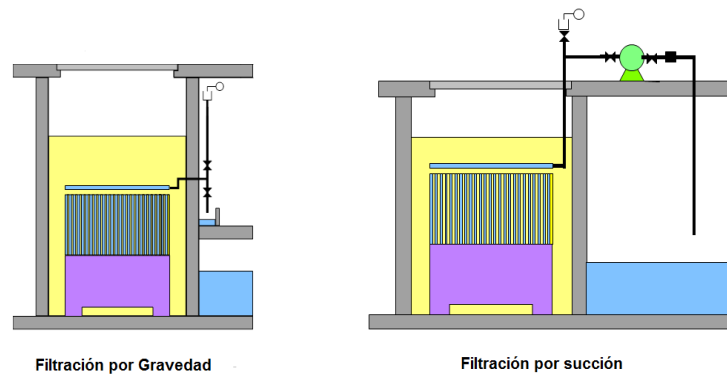
Figura 6.30 muestra un sistema de filtración por succión. La filtración por succión se encuentra en todas las referencias españolas. Este sistema necesita una menor profundidad en el tanque de membranas y da la posibilidad de funcionar a mayores PTM. La filtración por gravedad y por sifón tiene cada vez más aceptación, debido al ahorro energético representado por la ausencia de bombas de succión. En sistemas de filtración por gravedad es el agua sobre la membrana la que ejerce la presión de filtración, Figura 6.31, pero no siempre se dispone del nivel de agua sobre las membranas que permita conducir la filtración por gravedad, por ejemplo, en adaptaciones de plantas de fango activados convencionales, donde la profundidad de los tanques es reducida.



**Figura 6.30** Esquema de instalación de membranas Kubota

El control del ensuciamiento del sistema se realiza mediante dos tipos de limpiezas: física y química.

El sistema incorpora ciclos de trabajo de filtración-relajación. Cada ciclo consiste en 9 minutos de filtración (con aireación de la membrana en continuo) y 1 minuto de relajación; en donde la filtración se detiene, pero no la aireación de la membrana.



**Figura 6.31** Tipos de filtración membranas Kubota: succión y gravedad.

En este caso el caudal de aire por bastidor es de  $168 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a una presión de 0,5-0,55 bar en continuo, lo que representa un SADm de  $0,29 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  y un SADp de  $9.9 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  permeado a un flujo neto de operación sobre los 29 LMH.

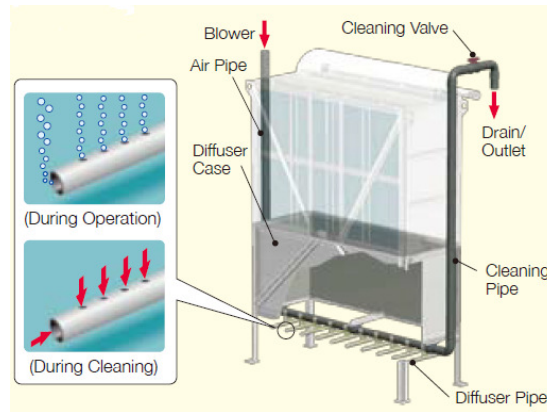
Con el fin de asegurar una limpieza física efectiva de las membranas durante la operación, el sistema incorpora un sistema de limpieza automático de los difusores de aire. El proceso de limpieza consiste en la apertura de una válvula automática en el colector de purga de aire, al lado opuesto al colector de alimentación de aire (siempre con la filtración detenida). La apertura de esta válvula genera una aspiración de fango en los difusores eliminando así cualquier depósito existente, Figura 6.32. Al final de la válvula de purga se devuelve al tanque de membranas una mezcla de aire-fango. Este ciclo se repite cada 24 horas y tiene una duración de 5 minutos.

Cuando la presión transmembrana incrementa de 0,05 – 0,1 bar de la presión inicial o alcanza y mantiene un valor de 0,2 bar durante la operación a flujo medio de trabajo, se recomienda hacer una limpieza química de membranas.

La limpieza química puede ser oxidante o ácida dependiendo del tipo de ensuciamiento de la membrana. Para eliminar el ensuciamiento orgánico se utiliza una solución de hipoclorito de sodio al 0,6%. La eliminación de deposiciones inorgánicas se realiza mediante el uso de una solución ácida del 0,5%-1%. Los ácidos a utilizar pueden ser ácido oxálico, ácido cítrico o HCl. Deposiciones inorgánicas son menos frecuentes que las orgánicas, pero hay que tenerlas en cuenta cuando el agua tiene altas concentraciones de carbonatos o cuando la planta tiene adición de coagulantes previamente al MBR. No se recomienda utilizar ácido oxálico cuando las deposiciones de las membranas sean de calcio.

La limpieza química consiste en dosificar por gravedad en contracorriente por los colectores de permeado, un volumen determinado de solución por bastidor, el cual depende del tipo de modelo, durante aproximadamente 10 minutos. Para realizar la limpieza química no es necesario vaciar el tanque o extraer las membranas.

Con un ensuciamiento normal, los periodos de limpieza son de 2 horas con agente oxidante (NaClO) y de 1 hora con ácido. Pasado este tiempo se reinicia el proceso de filtración comenzando con una filtración sin aeración durante un tiempo muy corto para vaciar el volumen remanente de la solución de limpieza en los módulos antes de comenzar con el ciclo de filtración normal.



**Figura 6.32** Limpieza de difusores sistema Kubota

Esta limpieza química se suele hacer cada 3-6 meses en caso del ensuciamiento orgánico y cada año, si fuese necesario, con ácido para eliminar el ensuciamiento inorgánico

#### Sistema comercial Toray

En España hay en funcionamiento 9 MBR urbanos con membranas Toray. La casa comercial dispone de una gran variedad de modelos que se diferencian principalmente en las dimensiones, número y área de módulos por bastidor y por tanto en el caudal que pueden permear por bastidor.

Los diferentes modelos (MEMBRAY™) pueden clasificarse en las series TMR090 y las series TMR140, pudiéndose destacar en estas últimas las S, W y D en función de la disposición de los módulos en los bastidores, de forma simple, doble ancho y doble piso. Al mismo tiempo cada bastidor tiene diferente numeración, 50, 100, 200 o 400, en función del número de módulos que contengan. Se trata de bastidores con superficie de membrana entre los 45 y 560 m<sup>2</sup>. Según el modelo, el bastidor permite tener más o menos empaquetamiento de estas membranas, es decir, más metros cuadrados de membrana por volumen ocupado y menos requerimiento de espacio respecto a la superficie de la planta, ver Tabla 6.12.

El modelo TMR140-100S es el bastidor más estándar. Las mejoras de los otros modelos se basan siempre en la disposición de los módulos para el ahorro de espacio.

**Tabla 6.12** Características de las series de los modelos MEMBRAY™

Tipo de bastidor	Número de módulos	Área, m <sup>2</sup>	Caudal permeado, m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	Dimensiones <sup>1</sup> , mm
TMR 090-050S	50	45	30	711 x 1.016 x 1.474
TMR 090-100S	100	90	60	711 x 1.719 x 1.474
TMR 140-050S	50	70	53	810 x 950 x 2.100
TMR 140-100S	100	140	105	810 x 1.620 x 2.100
TMR 140-200W	200	280	210	810 x 3.260 x 2.100
TMR 140-200D	200	280	210	810 x 1.620 x 4.160
TRM140-400DW	400	560	420	840 x 3.260 x 4.160

<sup>1</sup> Ancho x Largo x Alto

Las membranas pueden ubicarse dentro o fuera del reactor donde se realiza el proceso de oxidación biológica. La casa recomienda un sistema integrado en el reactor biológico, para plantas de capacidades reducidas. Para plantas de mayor tamaño, aunque también se utilizan en plantas pequeñas por geometría o reducido espacio del tanque biológico, la casa dispone de modelos de

doble piso, por ejemplo, el modelo TMR 140-200D, con los que se consigue reducir notablemente el espacio ocupado. En el caso de plantas grandes la casa recomienda sistemas no integrados, adquiriéndose una mayor flexibilidad de operación y mantenimiento.

Cabe destacar que este modelo es el más utilizado para depuradoras de aguas municipales no solo por el ahorro en espacio sino también en la aireación requerida.

En la misma línea, el nuevo modelo TRM140-400DW, constituye una cuádruple configuración, con 2 bastidores en anchura y 2 en altura.

### Características del modelo TMR 140-200D

El material de las membranas es de PVDF con refuerzo de resina ABS. La membrana es de configuración plana, trabaja sumergida con flujo de fuera a dentro y un tamaño de poro de 0,08 micras.



**Figura 6.33** Izquierda: módulo. Derecha: bastidor del TMR 140-200D.

Las características generales de este modelo se resumen en la Tabla 6.13.

**Tabla 6.13** Resumen de las características generales del modelo TMR 140-200D

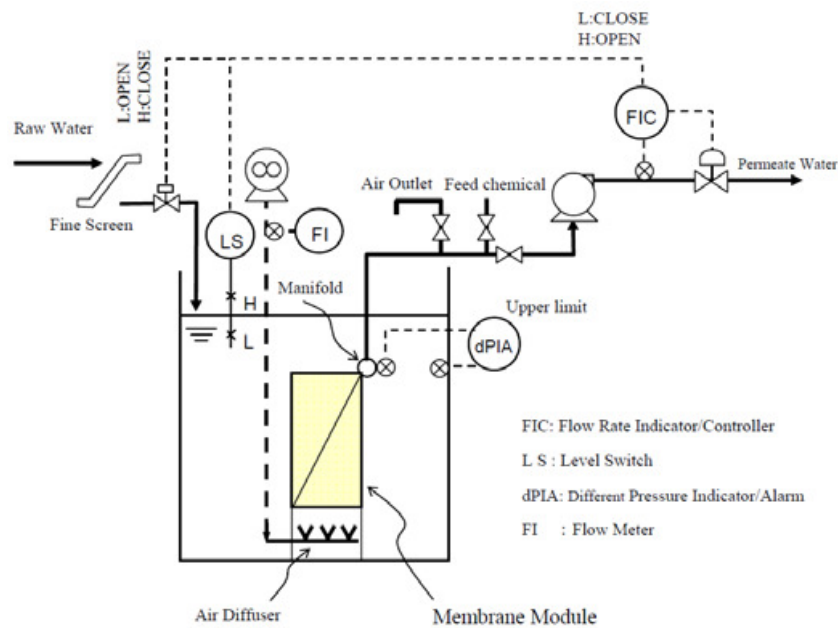
<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>TORAY</b>
Modelo	<b>TMR 140-200D</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Plana
Tipo de filtración (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión- gravedad
Material de la membrana	PVDF
Diámetro de poro nominal (micras)	0,08
Tipo de refuerzo	Resina ABS
Dimensiones del módulo (m x m x m)	0,0135 x 0,515 x 1,608
Dimensiones del bastidor (m x m x m)	1,620 x 0,810 x 4,160
Nº de módulos por bastidor	200
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	1,4
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	280
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	125
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	51
Dirección del flujo	Fuera-dentro
Configuración del sistema	Sumergida





**Figura 6.34.** Bastidor TMR140-200D. Izqa: Sistema integrado. Dcha: Sistema no integrado.

En la Figura 6.35 viene representado el esquema simplificado del sistema Toray con sus elementos de instrumentación y control necesarios.



**Figura 6.35** Esquema funcionamiento del sistema Toray

### Diseño y operación

Como pretratamiento adicional se recomienda tamices de al menos 3 mm de paso.

Respecto al diseño del tanque donde se contienen las membranas, es importante mantener los módulos bajo una altura de agua mínima, unos 50 cm, para evitar así vibraciones y roturas, además de dejar espacios entre los elementos de membrana de 7,5 mm para permitir que la corriente del licor mezcla generada pueda realizar el barrido que limpia las membranas durante el proceso de filtración.

El emplazamiento de las membranas, dentro o fuera del tanque biológico, así como la concentración del licor mezcla en el tanque de membranas tiene influencia directa sobre el caudal de recirculación, así como en los consecuentes costes energéticos. La casa establece el óptimo de trabajo en  $15 \text{ g.L}^{-1}$  para zona de membranas y  $10 \text{ g.L}^{-1}$  en el biológico, para mantener el equilibrio entre el consumo energético y el área ocupada por el sistema. Las plantas de Toray operan con PTM de 0,05-0,1 bar, y flujos entre  $29$  y  $31 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ .

---

El sistema permite trabajar por gravedad si la carga hidrostática es suficiente (2,5-3,5 m), la salida del agua debe estar situada por debajo de la superficie del agua en el tanque de membranas. En esta configuración, se precisa un control automático de cierre y apertura de válvulas para el control de los caudales y se recomienda una válvula de descarga de aire automática ya que el aire que se pudiese generar en el filtrado, debe salir adecuadamente para evitar su acumulación en el interior de la tubería que, a su vez, provocaría una reducción de la carga hidrostática efectiva.

El ciclo de trabajo estándar de este sistema de membranas es de 10 minutos, de los cuales en 9 minutos se realiza el proceso de filtración y durante 1 minuto se opera bajo relajación, es decir, parando la filtración, pero manteniendo la aireación.

La parrilla de distribución del aire de limpieza de las membranas, consiste en tuberías perforadas con orificios de 5 mm localizados en la parte inferior del bastidor de membranas.

Para mantener la eficacia de estos difusores se recomienda que se haga 1 o 2 limpiezas diarias durante 5 minutos.

Este sistema opera con aireación en continuo. El modelo TRM140-200D recomienda  $90 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  de caudal de aire por bastidor a una presión de 0,29 bar. La casa recomienda tener en cuenta en sus diseños este aporte de oxígeno de la aireación de las membranas para el proceso biológico, argumentando que puede suponer un potencial de ahorro energético entre un 26 % y un 43 %, en función del modelo.

Los valores de  $\text{SAD}_p$  y  $\text{SAD}_m$  para el modelo TMR 140-200D son  $10,7 \text{ Nm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  y  $0,32 \text{ Nm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  respectivamente. En este sentido la casa afirma, tras haber estudiado algunas plantas en operación y con modelos anteriores, que optimizando la operación del sistema se puede llegar a un potencial de ahorro energético del 75%. Esta optimización está basada en operar a flujos más altos mediante la utilización de trenes en stand by y tanques de eualización, en la aireación de los módulos en su punto óptimo de diseño si no hay variadores de frecuencia y si los hay, incluso en su valor mínimo (según la PTM) así como la mencionada utilización del oxígeno de la aireación para la oxidación biológica.

Además, esta optimización se puede mejorar más operando por gravedad en los casos que las planta lo permita y haciendo uso de los bajos caudales de recirculación que el sistema de membranas planas admite por poder trabajar a concentraciones muy altas en el tanque de membranas.

Las membranas no permiten la operación de contralavados por lo que la limpieza de las mismas recae en el caudal de aireación y en las limpiezas químicas.

La limpieza química de los bastidores deberá ser efectuada cuando se incrementa la presión transmembrana. El tiempo transcurrido entre las limpiezas químicas se determina de la siguiente manera:

- Cada 6 meses o cuando la presión transmembrana aumenta en 0,05 bar respecto a su nivel de operación inicial a un mismo caudal de permeado, lo que ocurra primero.
- Si la presión transmembrana crece rápidamente, ha de llevarse a cabo una limpieza química antes que lo establecido en el punto anterior. Una limpieza química realizada antes es más efectiva para recuperar y mantener la permeabilidad de la membrana.

La limpieza química se hace sin sacar las membranas del tanque con NaClO en concentraciones de 1-4 g.L<sup>-1</sup> y ácido cítrico al 1-3 % en peso durante 1-3 horas. Para realizar esta operación es preciso provocar una compresión en las membranas que no debe superar los 0,1 bar.

En la Tabla 6.14 se describen los principales parámetros de diseño y operación del modelo TMR 140-200D.

En caso de operar con flujos muy estacionales, los trenes que puedan quedar fuera de servicio durante varios meses deben mantenerse sumergidos en agua limpia tras una limpieza de los mismos, añadiendo cantidades suficientes de hipoclorito para evitar así posibles crecimientos microbiológicos.

**Tabla 6.14** Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo TMR 140-200D

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado 3 mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSLM (g.L <sup>-1</sup> ) en tanque membranas	10-15
Caudal de recirculación habitual	2.Qm
Edad de fango mínima (días)	15
Flujo caudal medio (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	29-31
Flujo caudal punta (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	41-43
PTM operación (bar)	0,05-0,1
PTM máxima de permeado (bar)	0,2
PTM máxima de contralavado (bar)	-
Permeabilidad (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	320-680
Tipo de aireación	Burbuja gruesa en continuo
Caudal de aire (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) por módulo/bastidor	0,45/90
Presión del aire suministrado (bar)	0,29
SAD <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,32
SAD <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	10,7
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavado, etc.)	9 minutos filtrado:1 minutos relajación
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	Sin contralavados

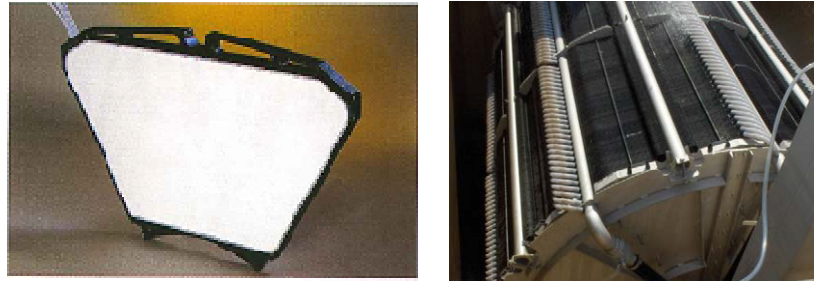
### Sistema comercial Huber

En España, el primer contrato para el suministro de un MBR con tecnología Huber se firmó en 2004, para el proyecto de La Santa (Lanzarote). Desde entonces se han construido 3 plantas más con este sistema de tratamiento de aguas.

La tecnología MBR de Huber se denomina Vacuum Rotation Membrane (VRM), y desde su creación se han desarrollado 2 modelos: VRM 20 y VRM 30, siendo este último una mejora del primero principalmente en cuanto al consumo energético.

### **Características del modelo VRM 30/640**

Cada placa de membranas consta de una base trapezoidal de polipropileno sobre la que va soldada las hojas de la membrana de PES de 0,75 m<sup>2</sup>. Un módulo se compone de cuatro de estos elementos en paralelo unidos mediante un espaciador central, con 6 mm de ancho y otros 6 mm de separación entre placas que se integran en un bastidor en forma de tambor, Figura 6.36. La superficie de membrana de este módulo es por tanto de 6 m<sup>2</sup>.

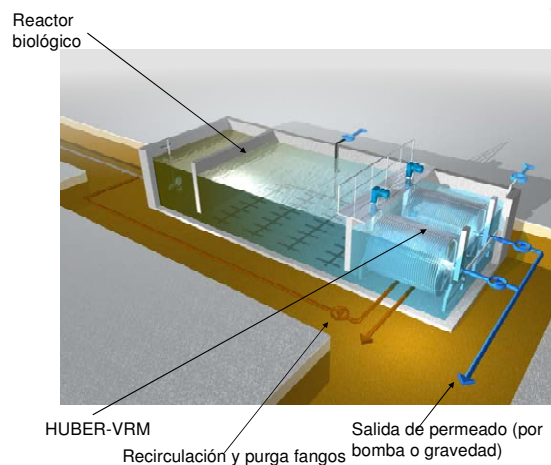


**Figura 6.36** Módulo y bastidor del modelo VRM del sistema Huber

Los módulos de membrana individuales están conectados mediante un tubo flexible a un colector de recogida de permeado.

En el modelo VRM30/640 el bastidor consta de hasta ochenta discos compuestos por ocho módulos, con una superficie de membrana por disco de 48 m<sup>2</sup>.

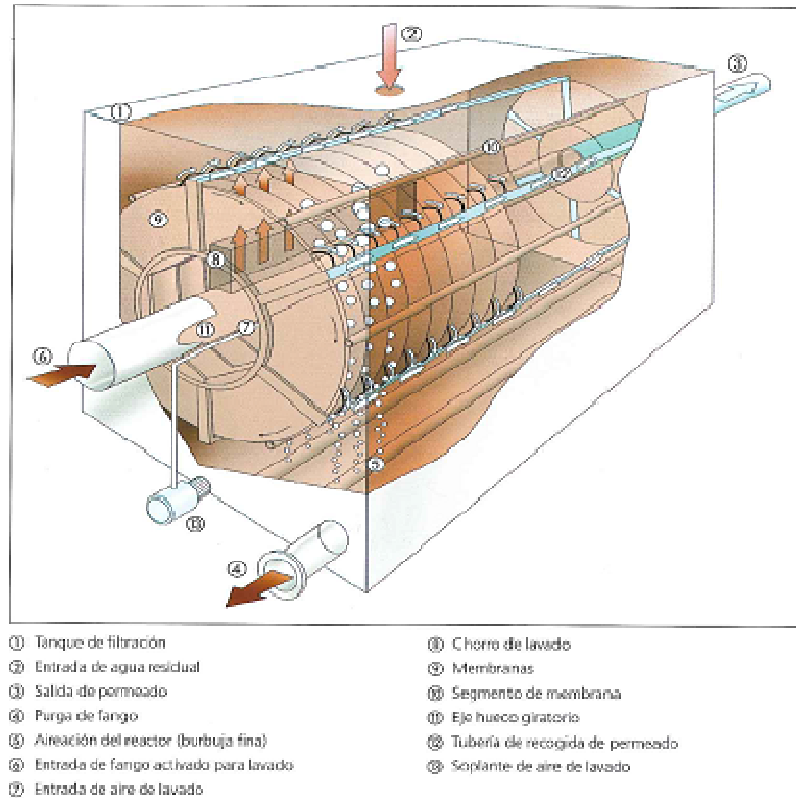
Este sistema tiene la particularidad de ser rotatorio. El bastidor que soporta la unidad de filtración, membranas planas de ultrafiltración, y las partes no móviles de la misma se monta alineado y nivelado en una cámara aparte del reactor biológico, Figura 6.37, para garantizar una correcta posición de trabajo. Adjunto al bastidor está el eje central sobre el que van montadas las líneas de aire de limpieza además de la columna del motor de accionamiento.



**Figura 6.37** Ubicación respecto al reactor biológico del sistema Huber VRM

El agua residual tratada biológicamente se introduce en la cámara de filtración bien por gravedad o por bombeo. La bomba de permeado genera una depresión que fuerza al agua tratada a pasar a través de la membrana. El permeado de cada módulo se descarga en un colector de recogida de permeado. Todos los colectores de permeado descargan en el cojinete de permeado desde donde la bomba de permeado extrae el agua tratada, Figura 6.37.

La limpieza del sistema Huber-VRM® se basa en la turbulencia generada por la aireación junto al efecto cortante que se produce entre la membrana y el licor mezcla debido al movimiento rotatorio durante el funcionamiento de la planta, haciendo innecesario el contralavado.



**Figura 6.38** Esquema del sistema Huber VRM

La aireación se realiza mediante burbuja gruesa por medio de unas tuberías perforadas en toda su longitud, montadas en el espacio central del sistema, Figura 6.38. El caudal de aire inyectado por la soplante y regulado mediante válvulas de bolas escapa a través de estos orificios y se distribuye uniformemente entre los espacios entre cada placa. El aire de limpieza se dirige a un sector en concreto del disco, normalmente lo que ocupa una placa, y al girar el bastidor, se aprovecha ese caudal para limpiar toda la superficie del disco lo que se traduce en una disminución del consumo energético.

Adicionalmente, el sistema permite alimentar las líneas de aire con agua o con productos químicos para su limpieza.

Al trabajar con flujos constantes es recomendable un tanque de laminación y un sistema de arranque adecuado para no tener problemas de roturas por inercia. Es importante hacer un mantenimiento de retenes y rodamientos que suelen tener una duración de unos 5 años.

Los ciclos de trabajo son de 10 minutos, 9 filtrando y 1 de relajación donde se para la filtración y continúa la rotación y la aireación del sistema. Debido a esta forma de operar se podría decir que el sistema de aireación es secuencial por no cubrir la totalidad de las membranas que conforman un disco ni en tiempo ni en espacio.

El sistema gira a 1 r.p.m, lo que significa que cada elemento recibe 0,125 minutos de aireación cada minuto, suficiente para mantener el fango en suspensión y realizar el efecto cortante deseado para la limpieza de las membranas. En principio el sistema no precisa de limpiezas químicas de mantenimiento. En caso de superar una presión transmembrana fijada, normalmente en 0,3 bar, se activa automáticamente el ciclo de limpieza intensiva que consiste en que el equipo gira y el aire de limpieza se mantiene, pero no se permea. Cada uno o dos años, en caso de necesidad, se hace una limpieza de recuperación con hipoclorito y ácido cítrico a una concentración de 500 ppm.

En la Tabla 6.15 se resumen las características principales del modelo VRM 30/640:

**Tabla 6.15** Resumen de las características generales del modelo VRM 30/640

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>HUBER</b>
Modelo	<b>VRM 30/640</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Plana
Tipo de filtración (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión- gravedad
Material de la membrana	PES
Diámetro de poro nominal (micras)	0,04
Tipo de refuerzo	Placa base de PP
Dimensiones del módulo (m x m x m)	L42 mm x D 3.360 mm
Dimensiones del casete o bastidor (m x m x m)	L5.926 mm x D 3.360 mm
Nº de módulos por bastidor	640
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	6
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	3.840
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	73,08
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	73,08
Dirección del flujo	Fuera-dentro perpendicular
Configuración del sistema	Sumergida

Tanto el volumen que ocupan las membranas como el aire que proporciona el sistema de aireación para la limpieza de la membrana se tienen en cuenta en el dimensionamiento del biológico suponiendo un ahorro hasta el 30 % de aireación, según la casa comercial.

En la Tabla 6.16 se describen los principales parámetros de diseño y operación del modelo VRM 30/640.

**Tabla 6.16** Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo VRM 30/640

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado 3 mm chapa perforada
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSLM (g.L <sup>-1</sup> ) tanque de membranas	8-10
Caudal de recirculación habitual	4.Qm
Edad de fango mínima (días)	10
Flujo caudal medio (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	16-18
Flujo caudal punta (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	30
PTM operación (bar)	0,03-0,30
PTM máxima de permeado (bar)	0,3
PTM máxima de contralavado (bar)	-
Permeabilidad (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	80-400
Tipo de aireación	Burbuja gruesa en continuo
Caudal de aire (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) por módulo	1,2
Presión del aire suministrado (bar)	0,25
SAD <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	0,2
SAD <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	12,34
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavado, etc.)	9 minutos filtrado:1 minutos relajación
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	Sin contralavados

## Sistema comercial Microdyn-Nadir/ Ecotec

En España hay en la actualidad 2 MBRs en funcionamiento con sistema de membranas BIO-CEL<sup>®</sup> para el tratamiento de aguas residuales urbanas.

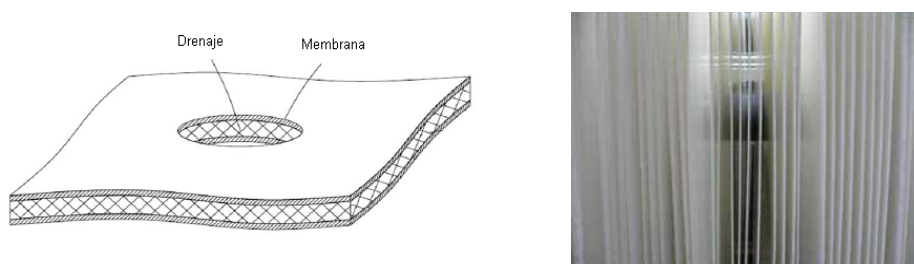
BIO-CEL<sup>®</sup> es el sistema de membranas ofertado por esta empresa, y distribuido y comercializado en España por la empresa Ecología Técnica (ECOTEC), para el diseño de plantas con proceso biológico mediante MBR.

Cuentan con 4 modelos, BC10-10, BC50F-C25-UP150, BC100F-C25-UP150 y BC400F-C100-UP150. Todos ellos llevan integrado el sistema de aireación. El BC 10-10 se utiliza exclusivamente para estudios en planta piloto, los demás modelos, se utilizan a escala real diferenciándose unos de otros principalmente en los metros cuadrados de superficie de membrana y las dimensiones del bastidor.

La selección de uno u otro modelo se hará en función de la capacidad de tratamiento que requiera el diseño de la planta y/o el espacio disponible con el que se cuente para su implantación.

### **Características del modelo BC400F-C100-UP150**

La membrana Nadir<sup>®</sup>-UP150 es de configuración plana laminada, con un tamaño de poro nominal de 0,04  $\mu\text{m}$ , de ultrafiltración e hidrofílica. La membrana, fabricada en polietersulfona (PES) viene laminada con una capa interior de soporte y drenaje de poliéster. El resultado de la fabricación son láminas rígidas de 2 mm, de bajo peso específico, formadas por 2 capas de membrana adheridas a una capa de drenaje interior, Figura 6.39.

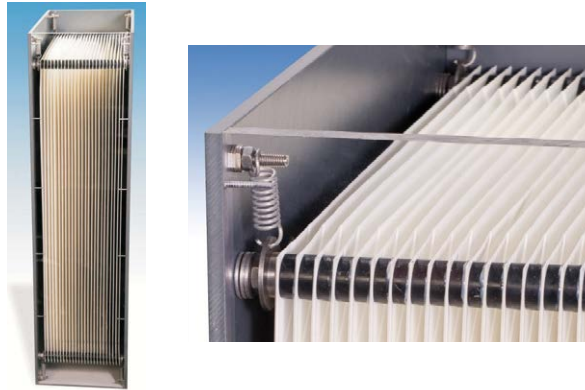


**Figura 6.39** Membranas de placa plana que componen los módulos BIO-CEL<sup>®</sup>

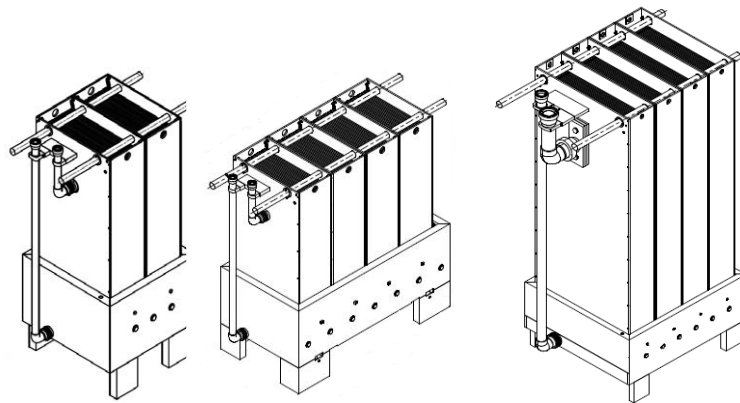
Se selecciona el PES como material de la membrana por ser un polímero de elevado rendimiento y resistencia química y mecánica, que además permite a la casa comercial, durante su proceso de fabricación, obtener superficies de membranas lisas y con buena hidrofiliidad.

Las láminas de membrana se colocan paralelas y a una determinada distancia entre ellas, aproximadamente 8 mm, sin estar rodeadas de ninguna estructura. Únicamente van sujetas mediante unas barras horizontales y unos muelles en los extremos de las mismas que permiten mantener la tensión de las membranas en caso de que se produzcan movimientos por la aireación o modificaciones en las dimensiones del material por cambios en la temperatura.

El módulo de membrana, Figura 6.40 se rodea de placas de PVC y PE y constituyen las mínimas unidades intercambiables en este sistema. Existen dos módulos, C25 y C100, ambos con 25 láminas de membranas. Estos módulos se diferencian en la forma de la tubería de permeado y en las dimensiones de las láminas de membrana, que proporcionan al C25 unos 25 m<sup>2</sup> de superficie de membrana frente a los 100 m<sup>2</sup> del C100. Los módulos de membrana se colocan sobre una base que contiene el sistema de aireación. Esta estructura, junto a las tuberías y demás conexiones, puede definirse como el bastidor de membrana, Figura 6.41.

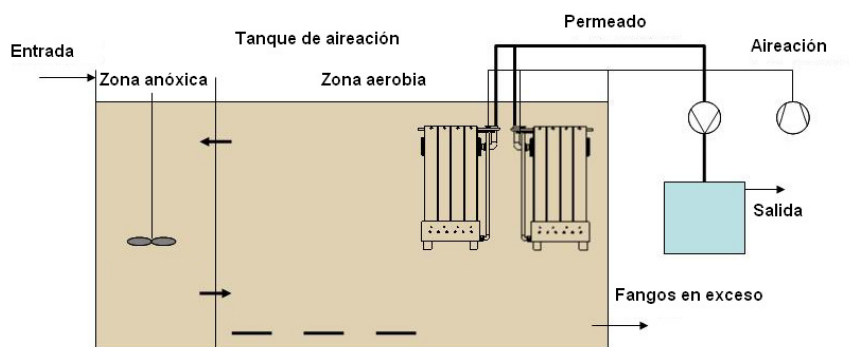


**Figura 6.40** Izquierda: Módulo de membranas C25. Derecha: Detalle de la colocación de las láminas de membrana en el módulo.



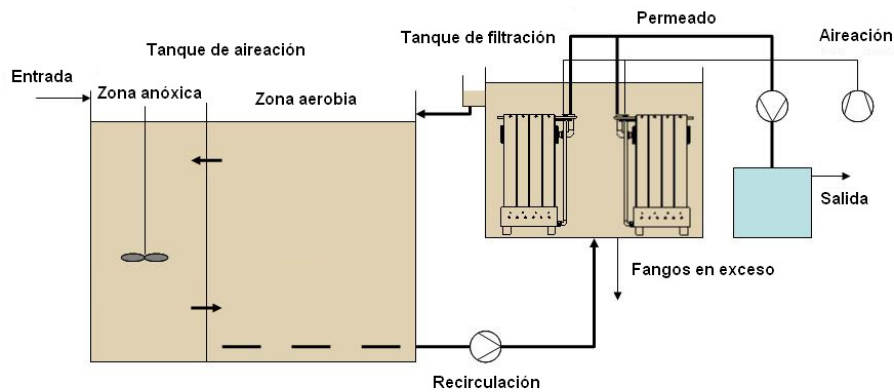
**Figura 6.41** Esquema de bastidores BIO-CEL<sup>®</sup>. De izquierda a derecha: Modelos BC50F-C25-UP150, BC100F-C25-UP150 y BC400F-C100-UP150.

Los bastidores sumergidos pueden ser colocados dentro del reactor biológico (Figura 6.42), o en un tanque de filtración independiente (Figura 6.43) indistintamente.



**Figura 6.42** Esquema de membranas suspendidas en configuración integrada.





**Figura 6.43** Esquema de membranas apoyadas en configuración no integrada.

Respecto a la colocación de los bastidores, éstos pueden instalarse suspendidos o apoyados en suelo del tanque, respetando siempre una distancia mínima de la base del bastidor al fondo de 200 o 400 mm según el modelo utilizado.



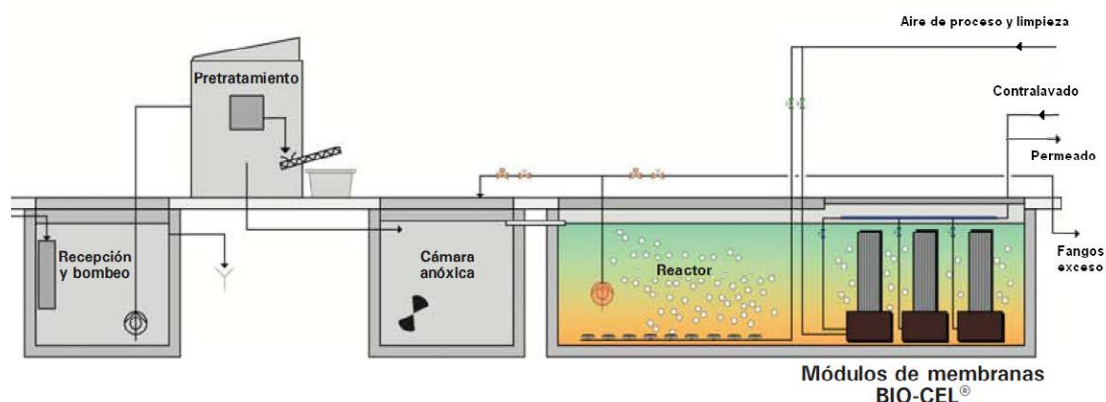
**Figura 6.44** Tanque de membranas con conexiones de permeado y aire de limpieza

En la Tabla 6.17 se resumen las características principales del modelo BIO-CEL<sup>®</sup> BC400F-C100-UP150:

**Tabla 6.17** Resumen de las características generales del modelo BIO-CEL

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>MICRODYN-NADIR / ECOTEC</b>
Modelo	<b>BC400F-C100-UP150</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Placa plana
Fuerza directora (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión
Material de la membrana	PES
Diámetro de poro nominal (micras)	0,04
Tipo de refuerzo	Poliéster
Dimensiones del módulo (m x m x m)	1,040 x 0,294 x 2,310
Dimensiones del bastidor (m x m x m)	1,298 x 1,152 x 2,763
Nº de módulos por bastidor	4
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	100
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	400
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	141,6
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	96,8
Dirección del flujo	De fuera a dentro
Configuración del sistema	Sumergido

En la Figura 6.45 se representa un esquema general del MBR con membranas BIO-CEL<sup>®</sup>.



**Figura 6.45** Esquema del sistema MBR con membranas BIO-CEL<sup>®</sup>

Este sistema tiene la posibilidad de realizar contralavados además de añadir una limpieza mecánica en caso de que precisarse tal y como se describirá más adelante.

### Diseño y operación

La casa recomienda para este sistema un pretratamiento mediante tamiz de tambor con perforaciones circulares de 2 mm de diámetro o mediante tamiz ranurado de 1 mm anchura e instalar decantación primaria en plantas con caudales de tratamiento por encima de los 10.000-15.000 m<sup>3</sup>. d<sup>-1</sup>.

**Tabla 6.18** Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del modelo BIO-CEL

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado 1-2 mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSLM (g.L <sup>-1</sup> ) tanque membrana	12
Caudal de recirculación habitual	3-5.Qm
Edad de fango mínima (días)	15-25
Flujo caudal medio (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	25
Flujo caudal punta (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	43
PTM operación (bar)	0,03-0,4
PTM máxima de permeado (bar)	0,4
PTM máxima de contralavado (bar)	0,15
Permeabilidad (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	50-500
Tipo de aireación	Continua con burbuja fina
Caudal de aire (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) por módulo /bastidor	< 35 / < 140
Presión del aire suministrado (bar)	0,5
SAD <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,35
SAD <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	17,5
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado/ contralavado)	8,5/0,5/0,5
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	Sí. Con agua filtrada.

Las membranas no presentan limitaciones en su comportamiento por trabajar a bajas o altas concentraciones de sólidos suspendidos en el tanque de filtración. Sin embargo, con objeto de optimizar la relación viscosidad del fango-filtrabilidad-consumo energético, la casa comercial

recomienda un valor máximo de diseño del tanque de membranas, un contenido de SSLM menor o igual a  $12 \text{ g.L}^{-1}$ .

En el tanque de aireación se puede trabajar en un rango de concentraciones de SSLM de 4 a  $10 \text{ g.L}^{-1}$ , teniendo en cuenta como parámetro de diseño recomendado una recirculación desde el tanque de membranas de 3 a 5 veces el caudal medio.

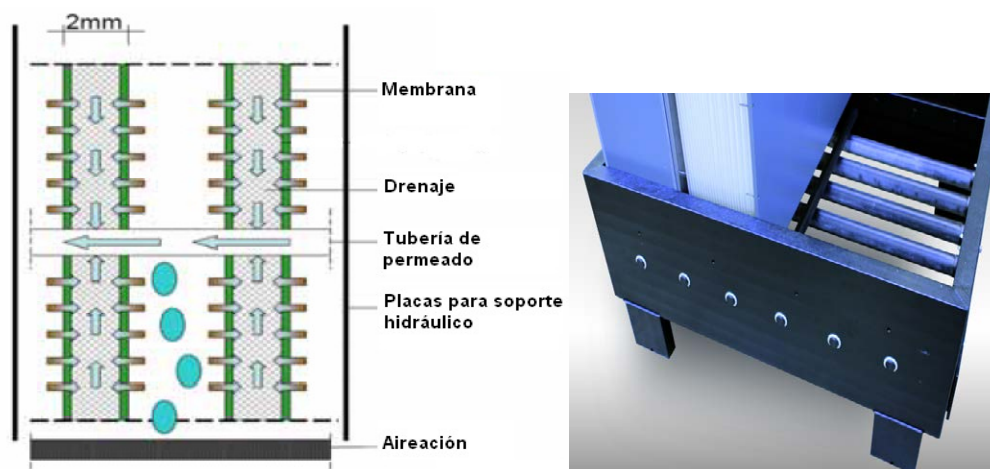
El flujo máximo a caudal medio se estima en  $25 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para áreas geográficas donde la temperatura del agua durante el invierno no sea menor de  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La aireación de las membranas se realiza mediante 6 tubos difusores de burbuja fina situados bajo los módulos de membrana, Figura 6.46.

La alta transferencia de oxígeno de la burbuja fina puede llegar a aportar, en sistemas integrados, un 40-50 % del oxígeno total necesario en el proceso biológico según la casa comercial.

La aireación es continua excepto cuando se ponga alguna línea de filtración en stand-by, o cuando se realice una parada técnica del sistema.

Parte del aire introducido en el sistema puede verse retenido en las tuberías de permeado. Éste aire acumulado debe liberarse para evitar problemas en la operación, para ello, se diseña un tanque de desaireación a la salida de las membranas que cuenta con una válvula de ventilación. Durante el contralavado, el agua permeada se impulsa desde el tanque de permeado al tanque de desaireación, donde se le elimina el aire abriendo la válvula de ventilación, y a continuación se introduce (sin aire) en el tanque de membranas para su limpieza.



**Figura 6.46** Izqa: Esquema del sistema de aireación. Dcha: Tubos difusores, BIO-CEL

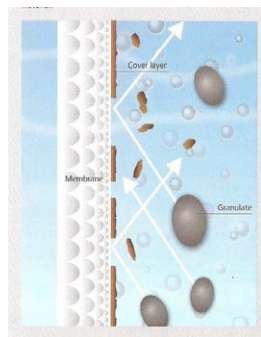
El ciclo de trabajo de los bastidores BIO-CEL<sup>®</sup> alterna periodos de filtración y relajación y puede incluir también etapas de contralavado. Se distinguen 2 opciones habituales de operación; la opción sin contralavado consiste en un reparto del tiempo de trabajo de 8 minutos filtrando y 2 minutos en relajación, mientras que en la opción con contralavado se filtra durante 8,5 minutos, se relaja 1 minuto (en 2 periodos, antes y después del contralavado) y se contralava 0,5 minuto.

Cualquiera de estas operativas junto con el efecto de flujo cruzado de la aireación continua, permite disminuir la velocidad de ensuciamiento de las membranas y retrasar la necesidad de activar los protocolos de limpieza de las membranas.

Dentro de dichos protocolos, esta casa comercial ha desarrollado un sistema de lavado mecánico de las membranas que es opcional, y que se realizaría previo a la puesta en marcha de las limpiezas químicas. Este lavado consiste en retirar por arrastre el fango depositado sobre la membrana mediante unas partículas granulares de polipropileno, de unos 4 mm, que inciden sobre la superficie de la membrana impulsadas por la propia aireación de limpieza, Figura 6.47.

La limpieza mecánica disminuye la necesidad de limpiezas químicas evitando así el progresivo deterioro que producen sobre en las membranas.

Por el momento esta limpieza mecánica solo puede utilizarse en sistemas sumergidos no integrados, aunque la casa comercial está estudiando la forma de incorporarla también a la configuración integrada. Para evitar el escape de partículas debe instalarse antes del bombeo de recirculación una malla de paso de 3 mm. Las partículas de limpieza se mantendrán permanentemente dentro del tanque de filtración y circularán con el flujo ascendente entre las membranas. Los impactos de las partículas sobre las membranas aportan una limpieza continua sin afectar a la integridad de las membranas.



**Figura 6.47** Esquema del funcionamiento de la limpieza mecánica de las membranas, BIO-CEL

Las características del agua bruta y la utilización o no del sistema de limpieza mecánica determinarán la frecuencia de las limpiezas intensivas siguientes.

La limpieza de mantenimiento consiste en realizar un contralavado con productos químicos, sin necesidad de vaciar el tanque de membranas. En primer lugar, se interrumpe la filtración y se airean las membranas durante 5 minutos. A continuación, se realiza un contralavado con NaClO alternando periodos de dosificación de reactivo con otros de parada y contacto en función de la naturaleza del ensuciamiento. Como ejemplo puede tomarse un periodo de bombeo de 20 minutos y seguido por una etapa de parada y contacto de 60 minutos. Se repite el contralavado con NaClO, 5 minutos más seguidos de otros 60 minutos de parada y para finalizar se contralava con permeado. Este procedimiento general puede repetirse varias veces para conseguir una limpieza más intensa.

De manera general se recomienda realizar esta limpieza con frecuencia mensual o trimestral. Llevarla a cabo de manera preventiva alarga los periodos en que la limpieza intensiva será necesaria y su periodicidad será establecida en función de las variaciones reales de la PTM.

La limpieza intensiva o de recuperación consiste en sumergir las membranas en un baño químico durante un tiempo determinado. Este procedimiento puede realizarse in-situ, vaciando del tanque de membranas, o en un tanque de lavado aparte. Si se realiza en el tanque de membranas en primer lugar hay que vaciar el tanque, evacuar los fangos y llenarlo con permeado. Tras una aireación de 30 minutos, se vuelve a vaciar y llenar el tanque con permeado y se dosifica entre 300 y 500 ppm de NaClO. Se mantienen las membranas en esta solución de limpieza como máximo 12 horas y a continuación se vacía y se llena con permeado. Se puede repetir este mismo procedimiento con ácido cítrico si fuese necesario. Para retirar el ensuciamiento inorgánico puede ser necesario una o

varias horas sumergidas las membranas en ácido cítrico al 1% máximo, o alternando con fórmico o acético. La frecuencia orientativa de esta limpieza es de 1 o 2 años sin limpieza mecánica, y de más de 2 años con limpieza mecánica, pero su puesta en marcha se condiciona a tener PTM superiores a 0,3 bar durante varias horas.

#### Sistema comercial Alfa-Laval

En España, Alfa Laval Iberia es la empresa subsidiaria de la matriz multinacional Alfa Laval y actúa como compañía de ventas de sus productos en España y Portugal, por el momento no tiene ninguna planta en funcionamiento.

El sistema de membranas de esta compañía para plantas con proceso biológico MBR se compone de elementos filtrantes a modo de placas planas integradas en forma de sándwich en un bastidor metálico autoportante. Cuenta con 3 modelos estándar de bastidor: MFM100, MFM200 y MFM300. El primero es el bastidor base y los otros son modelos de doble y triple piso. Se diferencian por tanto los distintos modelos en sus dimensiones y en la superficie de membrana disponible (154, 308 y 462 m<sup>2</sup>). También se fabrican bastidores con 25, 50 o 100 m<sup>2</sup> para plantas pequeñas o unidades móviles.

Alfa Laval cuenta con más de 40 referencias entre plantas industriales y municipales en países como Francia, Italia o Dinamarca. En España tiene varias referencias industriales y en la actualidad se está presentando a concursos de construcción de MBR urbanos.

#### **Características del modelo MFM (membrane filtration module)**

Alfa-Laval cuenta con un tipo registrado de membrana denominada Hollow-Sheet®. Se trata de una membrana plana de microfiltración, con tamaño de poro nominal 0,20 µm, compuesta por una capa de polifluoruro de vinilideno (PVDF) y un soporte de polipropileno (PP).

Los módulos consisten en 2 láminas de membranas soldadas a ambos lados de un espaciador corrugado y perforado de polipropileno (PP) donde se recoge el permeado.



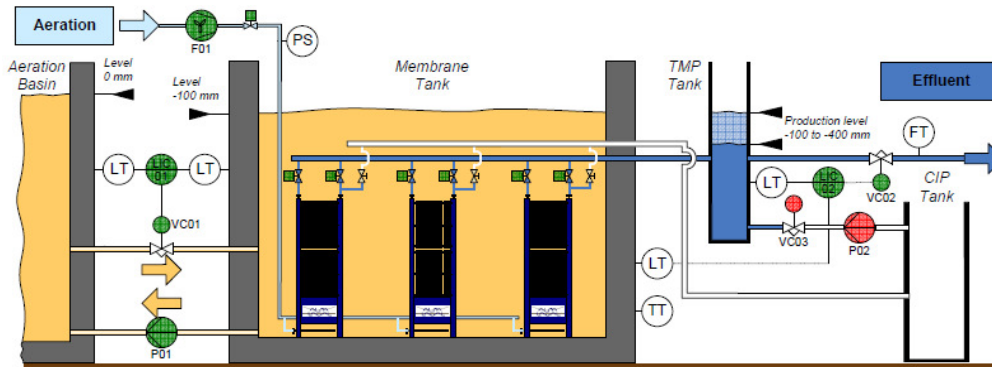
**Figura 6.48** Módulo Hollow-Sheet® y bastidores modelos MFM300, MFM200 y MFM100.

Se selecciona el PVDF como material de la membrana por su alta resistencia química a ácidos, sustancias cáusticas y procesos de oxidación. El soporte de la membrana en PP permite soldar térmicamente la membrana al espaciador, aportando una buena unión de ambas piezas y evitando su separación, con total garantía mecánica y de estanqueidad.

Los bastidores MFM100, MFM200 y MFM300 se componen de los módulos de membrana colocados paralelos y separados aprox. 10 mm, en simple, doble o triple piso respectivamente, un sistema de

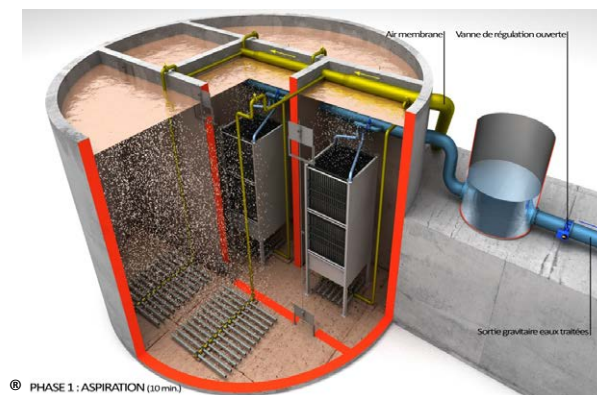
aireación por tuberías situado debajo de los módulos y una estructura de AISI-316 que lo soporta todo y lo cubre por los laterales, la parte superior quedaría abierta, Figura 6.48.

Los bastidores se pueden colocar sumergidos en un tanque de filtración aparte (configuración no integrada, Figura 6.49) o en el mismo reactor biológico (configuración integrada, Figura 6.50).



**Figura 6.49** Esquema funcionamiento configuración no integrada Alfa-Laval

La particularidad de la configuración integrada es que no requiere bombeo de recirculación, sino que dicha recirculación se genera gracias a la turbulencia creada por la propia aireación de los bastidores MFM y a través de las compuertas inferior y superior de las celdas que albergan las membranas, consiguiendo un nivel de recirculación aproximadamente del doble que el necesario con el bombeo para configuraciones en tanque aparte. Por ello, Alfa Laval recomienda para nuevas implantaciones esta configuración por suponer, según sus estudios y experiencia, un ahorro del coste de implantación y de explotación respecto a la configuración no integrada.



**Figura 6.50** Esquema configuración integrada sistema Alfa-Laval

En el modo de gravedad se requiere un equipamiento auxiliar en sustitución del clásico bombeo de permeado. Se trata de un tanque de control (denominado tanque TMP) al que accede el permeado por gravedad. La diferencia de nivel de este tanque se va controlando con un caudalímetro, donde se fija el flujo de permeado a mantener constante, y una válvula que se abre o cierra automáticamente para conseguirlo.

Este sistema de membranas permite filtrar a succión y a gravedad. En ambos casos el licor mezcla se hace circular por el espacio entre módulos y se filtra por toda la superficie de membrana. El efluente se recoge en los espaciadores de cada módulo y se dirige a los laterales para su salida del bastidor a través de unos colectores situados en la parte superior.



**Figura 6.51** Tanque de membranas con conexiones de permeado y aire de limpieza, Alfa-Laval

En la Tabla 6.19 se resumen las características principales del modelo MFM300.

**Tabla 6.19** Resumen de las características generales del modelo MFM300

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>ALFA-LAVAL</b>
Modelo	<b>MFM300</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	MF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Plana
Fuerza directora (succión, presión, gravedad, sifón)	Gravedad/Succión
Material de la membrana	PVDF
Diámetro de poro nominal (micras)	0,20
Tipo de refuerzo	PP
Dimensiones del módulo (m x m x m)	1,087 x 1,022 x 0,012
Dimensiones del bastidor (m x m x m)	1,122 x 1,062 x 3,900
Nº de módulos por bastidor	255
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	1,81
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	462
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	200
Empaquetado del bastidor sin patas (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	117,5
Densidad de membranas (m <sup>2</sup> de membrana/m <sup>2</sup> de superficie)	388
Dirección del flujo	De fuera a dentro
Configuración del sistema	Sumergido

### **Diseño y operación**

Para proteger este sistema de membranas, Alfa Laval considera suficiente la instalación de un pretratamiento mediante tamices con perforaciones de 3 mm de diámetro.

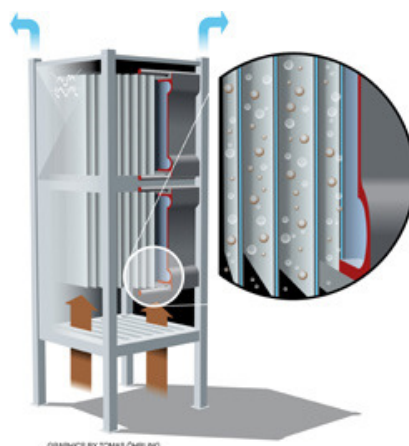
En la configuración no integrada, el tanque de membranas se debe diseñar para trabajar con una concentración de SSLM entre 8 y 12 g.L<sup>-1</sup>. A pesar de esta recomendación, cabe indicar que las membranas podrían diseñarse para trabajar a concentraciones por debajo de 8 g.L<sup>-1</sup>, sin ninguna limitación, y por encima de 12 g.L<sup>-1</sup>, hasta 14 g.L<sup>-1</sup>. Por otra parte, en configuraciones de tanque separado al reactor biológico, se puede trabajar en un rango de concentraciones de SSLM de 6 a 12 g.L<sup>-1</sup>, teniendo en cuenta como parámetro de diseño recomendado una recirculación desde el tanque de membranas de 4 a 5 veces el caudal medio.

En la configuración integrada el sistema de recirculación sin bombeo (con sistema de compuertas y aireación) es capaz de generar caudales entre 8 y 10 veces el caudal medio. De este modo, se genera

una diferencia mucho menor entre las concentraciones de SSLM en las zonas de biológico y la de membranas.

El bastidor tiene integrado un sistema de aireación consistente en tuberías con orificios de 1 mm, que se sitúan debajo de los módulos y se encargan de aportarles el aire necesario en forma de burbujas gruesas para la limpieza de las membranas, Figura 6.52.

Los bastidores MFM funcionan con una PTM por debajo de 0,04 bar, lo que permite al licor mezcla atravesar la membrana sin adherirse a ella, reduciendo así la velocidad de ensuciamiento y por tanto la necesidad de limpiezas químicas.



**Figura 6.52** Detalle de la distribución del aire entre los módulos, Alfa-Laval.

**Tabla 6.20** Resumen de los principales parámetros de diseño y operación del modelo MFM300

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado $\leq 3$ mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSLM ( $\text{g.L}^{-1}$ ) tanque membrana	8-12
Caudal de recirculación habitual	4-5.Qm
Edad de fango mínima (días)	12
Flujo caudal medio ( $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )	20-25
Flujo caudal punta ( $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )	32-40
PTM operación (bar)	0,008-0,04
PTM máxima de permeado (bar)	0,08
PTM máxima de contralavado (bar)	0,020
Permeabilidad ( $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$ )	300-1.000
Tipo de aireación	Continua con burbuja gruesa
Caudal de aire ( $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ ) por módulo / bastidor	0,39/100
Presión del aire suministrado (bar)	0,5
$\text{SAD}_m$ ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )	0,21
$\text{SAD}_p$ ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ )	13,5/9,0
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado/contralavado)	10/2
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	No

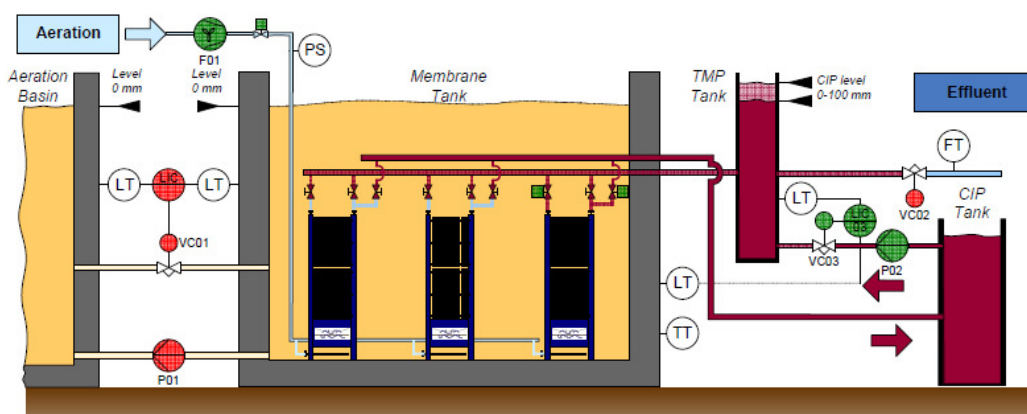


La aireación es continua excepto cuando se ponga alguna línea de filtración en stand-by o cuando se realice una parada técnica del sistema. En caso de parada de la aireación puede entrar licor mezcla en las tuberías de aire que si se acumula y se seca puede llegar a obturarlas. Por ello, antes de cada inicio de la aireación (tras alguna parada técnica) debe realizarse una limpieza de las tuberías de aire con agua a presión para lo cual se dispondrá de una válvula manual o automática.

El ciclo de trabajo de los bastidores MFM alterna periodos de filtración de 10 minutos con periodos de relajación de 2 minutos. Este modo de operar es suficiente para mantener la permeabilidad de las membranas, aunque tiene la posibilidad de contralavar, esta función solo se usa para las limpiezas de mantenimiento de las membranas.

Las limpiezas de mantenimiento son contralavados con productos químicos. El reactivo químico se prepara en un tanque y se bombea al tanque TMP que sube de nivel. Por gravedad la disolución con el reactivo pasa a las membranas y se recircula durante 1 hora para completar la limpieza (Figura 6.53). Se pueden utilizar dos tipos de reactivos químicos en función de que el ensuciamiento sea orgánico o inorgánico: NaClO o ácido cítrico.

La frecuencia orientativa de estos contralavados la define la casa comercial en seis veces al año limpieza con NaClO y dos veces al año limpieza con ácido cítrico, sin embargo, serán los operadores los encargados de determinar la frecuencia real en función del grado ensuciamiento de las membranas, controlando la apertura de la válvula de permeado para conseguir un determinado flujo y la diferencia de nivel del tanque TMP.



**Figura 6.53** Esquema de la limpieza de mantenimiento, Alfa-Laval

Las limpiezas de recuperación consisten en extraer los bastidores y sumergirlos en un tanque externo con una disolución química, primero de ácido cítrico durante 1 hora y después de NaClO durante otra hora. La frecuencia orientativa de estas limpiezas la define la casa comercial, pero suele ser como mínimo una vez al año.

En el caso de diseño integrado, si las líneas de membranas son pequeñas podrían utilizarse para la limpieza química por inmersión evitando tener que desmontar y extraer los bastidores, vaciando y llevando el contenido a cabecera de planta una vez realizada la limpieza.

#### Sistema comercial Pentair X-Flow

En 2011 Pentair compró X-Flow, junto con otras empresas tecnológicas del grupo Norit, pasando a denominarse Pentair X-Flow. En España no tienen ninguna instalación en funcionamiento todavía tratando aguas residuales urbanas.

---

A continuación, se mencionan las características principales de los modelos Airlift y Megablock ya que sus particularidades y diferencias hacen interesante presentar ambos modelos por separado.

### Características del modelo Airlift

El sistema de membranas de UF Airlift Staggered 30 es de tipo externo, estando alimentado con licor mezcla proveniente del reactor biológico por medio de una bomba de recirculación. Esta bomba de recirculación es usada también para mantener un caudal constante de licor mezcla en los módulos de membranas de UF, que están posicionadas verticalmente, por tanto, la forma de operar recomendada para este tipo de membranas es a flujo constante y como consecuencia el rango variable de operación será la PTM.

Los módulos de membranas AirLift contienen en su interior membranas tubulares de PVDF con un diámetro de 5,2 mm, y cuenta cada módulo con 33 m<sup>2</sup> de superficie de membrana, Figura 6.54. El extremo superior está abierto y el inferior queda cubierto con un cabezal de aireación.

Estas membranas tubulares se operan de dentro a fuera, es decir, el licor mezcla se introduce en el interior de los tubos y se extrae el permeado en el exterior de los mismos por la carcasa del módulo.



**Figura 6.54** Módulo de membranas tubulares Airlift

En este caso cada bastidor comprende un número fijo de posiciones, 6, 10, 20 o 30, para la instalación de módulos de membrana, que pueden ocuparse completamente o no, Figura 6.55.

El área de filtración o zona de membranas estará compuesta por un determinado número de bastidores, Figura 6.55, con una bomba de retrolavado común a todos ellos, hasta un máximo de 14 bastidores por bomba de retrolavado.



**Figura 6.55** Instalación MBR con bastidor AirLift staggered 30

El sistema es una modificación del sistema de membranas convencional tipo “cross-flow”, donde los módulos de membrana se posicionan de forma vertical. La orientación en vertical permite la inyección de aire en el cabezal inferior del módulo con el objetivo de mantener un cierto flujo

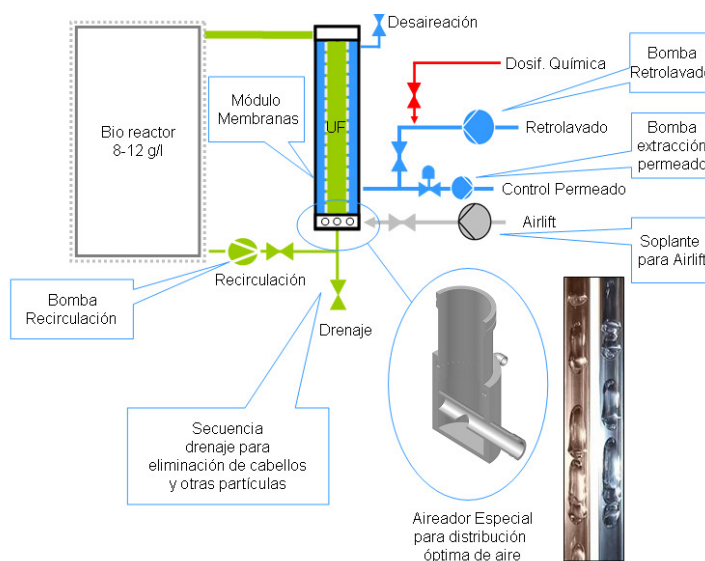
tangencial (cross-flow) en el mismo. El aire inyectado se introduce en las fibras y causa una alta turbulencia en la superficie de la membrana lo que asegura una acción continua de limpieza, permitiendo de esta manera, mantener un flujo de membrana elevado a una PTM relativamente baja. De este modo, el sistema AirLift utiliza las membranas tubulares que tan fiables han resultado en los sistemas tipo cross-flow, pero con unos consumos energéticos menores.

En la Tabla 6.21 se resumen las características principales del modelo Airlift Staggered 30 que se compone de 30 módulos colocados al tresbolillo.

**Tabla 6.21** Resumen de las características generales del modelo Airlift Staggered 30

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>NORIT</b>
Modelo	<b>AIRLIFT STAGGERED 30</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Tubular D 5.2 mm
Tipo de filtración ( succión, presión, gravedad, sifón)	Succión
Material de la membrana	PVDF
Diámetro de poro nominal (micras)	0,03
Tipo de refuerzo	Estructura de soporte de poliéster
Dimensiones del módulo (mxmxm)	3xD0,213
Dimensiones del bastidor (mxmxm)	4,6x6x1,6
Nº de módulos por bastidor	30
Superficie de membrana por módulo ( m <sup>2</sup> )	33
Superficie de membrana por bastidor ( m <sup>2</sup> )	990
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	308
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana /m <sup>3</sup> )	22,41
Dirección del flujo	De dentro a fuera
Configuración del sistema	Externa

En la Figura 6.56 se muestra una representación esquemática del sistema AirLift MBR con el detalle de su sistema de aireación.



**Figura 6.56** Esquema del sistema Norit AirLift

## Diseño y operación del modelo Airlift

Respecto al diseño y operación de este tipo de sistema, para evitar posibles problemas con elementos fibrosos en el módulo, se aconseja un tamizado de 2 mm de paso, sin tener que llegar a pasos más reducidos gracias al modo de operación en drenaje con el que cuenta el sistema.

En la Tabla 6.22 se describen los principales parámetros de diseño y operación del modelo Airlift Staggered 30.

Para un buen funcionamiento, rendimiento energético y mantenimiento de las membranas, la concentración de SSLM tiende a fijarse en  $10 \text{ g.L}^{-1}$  para edades del fango que permitan la nitrificación, unos 15 días, en función de la temperatura, consiguiendo así una viscosidad y permeabilidad del fango buenas para este tipo de membrana.

Este sistema permite flujos de diseño altos, entre 45-65 LMH, y funcionamiento en continuo con presiones de operación entre 0,1 y 0,3 bar.

Una parte del permeado producido se usa para las operaciones de retrolavado y limpieza química de los elementos de membrana del sistema. Por este motivo el sistema está equipado con una bomba de contralavado y bombas de dosificación de reactivos químicos de limpieza.

**Tabla 6.22** Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo Airlift Staggered 30

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado de 2 mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20 °C
SSLM ( $\text{g.L}^{-1}$ ) tanque de membranas	8-12
Caudal de recirculación habitual	15Qm
Edad de fango mínima (días)	15
Flujo caudal medio ( $\text{L.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	50
Flujo caudal punta ( $\text{L.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )	65
PTM operación (bar)	0,1-0,3
PTM máxima de permeado (bar)	0,5
PTM máxima de contralavado (bar)	1
Permeabilidad ( $\text{L.m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$ )	200-500
Tipo de aireación	Burbuja gruesa en continuo
Caudal de aire ( $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ ) por módulo	10
Presión del aire suministrado (bar)	0,45
SADm ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )	0,3
SADp ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	7,1
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavado, etc.)	10 min / 7 segundos contralavado De 4 a 8 horas modo drenaje
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	Con agua filtrada, recirculación y aireación simultaneas.

Para mantener el flujo a PTM de operación hay que retrolavar cada 10 minutos unos 7 segundos complementándolo con drenajes cada cuatro u ocho horas. El drenaje asegura que no exista una acumulación de cierto tipo de sólidos fibrosos en la parte inferior de los módulos de membranas. Durante esta operación se vacía el módulo y con ayuda de agua de contralavado se arrastra todas las sustancias retenidas en la cara interior. El licor mezcla recolectado durante esta etapa es recirculado hasta el tamizado situada a la entrada del reactor biológico. Los drenajes también se realizan antes de una limpieza química o cuando saltan alarmas por posibles obturaciones.

Para mejorar la pérdida del rendimiento debido a la acumulación de sustancias absorbidas en las membranas, el sistema cuenta con un programa de lavados químicos automático que se realiza aproximadamente cada 1 a 3 meses, cuando el valor de la permeabilidad está por debajo de los 100 LMH o la presión en el contralavado supere 1 bar. Se realiza por bastidores individualmente y consecutivamente permitiendo así seguir filtrando con el resto.

Para la limpieza química de recuperación se utilizan 2 reactivos de limpieza, primero NaClO con concentración entre 200 y 400 ppm y trascurrido un determinado tiempo de contacto, ácido cítrico a pH 3.

El acceso de los reactivos de limpieza a los módulos se realiza a través de la línea de contralavado. Una vez que los módulos se encuentran llenos de la primera solución química, se para la bomba de contralavado y comienza el tiempo de contacto entre el reactivo de limpieza y la membrana, que suele durar entre 30 y 120 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, se vacía y se repite la operación con el otro reactivo de limpieza. Finalmente se realiza el drenaje de los módulos de este segundo reactivo y se vuelven a llenar de licor mezcla del tanque biológico para continuar con la filtración.

En periodos en donde el caudal a tratar es bajo, se tiene la posibilidad de parar un cierto número de bastidores con el objetivo de reducir el consumo energético de la planta. A este estado lo denominan de relajación donde un bastidor deja de filtrar, pero se mantiene la circulación de licor mezcla. Cuando un bastidor ha estado en modo de relajación durante un cierto periodo de tiempo (que normalmente es de solo unos pocos minutos) el bastidor será drenado y se llenará con agua de permeado, quedándose en modo de espera hasta que se precise su puesta en marcha por contar con más caudal a tratar.

#### Características del modelo Megablock

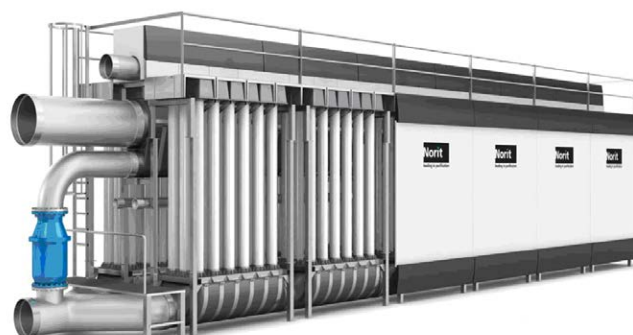
Respecto al segundo modelo de la casa Pentair, Megablock 636, ha sido diseñado para conseguir un mayor empaquetamiento del bastidor y se oferta este modelo cuando los caudales a tratar superan los  $10.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Esta reducción del espacio es debida al tipo de membrana que en este módulo es de fibra hueca de material PES/PVP y tiene un diámetro de poro de 0,03 micras.



**Figura 6.57** Módulo de fibra hueca del modelo Megablock 636

El bastidor está concebido para albergar hasta 6 bloques de 36 módulos cada uno, pudiendo llegar a un total de 216 módulos en el caso del Megablock 636, tal y como se muestra en la Figura 6.58 con una capacidad de tratamiento máxima de  $420 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

En comparación con el modelo Airlift, el empaquetamiento por bastidor es el doble,  $46,54 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  frente a los  $22,41 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  del modelo anterior, aunque mantiene la misma densidad por módulo, unos  $300 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ .



**Figura 6.58** Bastidor Megablock 636

En la Tabla 6.23 se describen las principales características del modelo Megablock 636

**Tabla 6.23** Resumen de las características generales del modelo MEGABLOCK 636

<b>CARACTERISTICAS GENERALES</b>	
Marca (fabricante)	<b>NORIT</b>
Modelo	<b>MEGABLOCK 636</b>
Tipo de proceso (MF, UF)	UF
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)	Fibra hueca D 3 mm
Tipo de filtración (succión, presión, gravedad, sifón)	Succión
Material de la membrana	PES / PVP
Diámetro de poro nominal (micras)	0,03
Tipo de refuerzo	Sin soporte
Dimensiones del módulo (m x m x m)	3 x D 0,213
Dimensiones del bastidor (m x m x m)	Bloque de 6 bastidores 22 x 3,4 x 5,5
Nº de módulos por bastidor	216
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )	32
Superficie de membrana por bastidor (m <sup>2</sup> )	6.912
Empaquetado del módulo (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	299
Empaquetado del bastidor (m <sup>2</sup> membrana/m <sup>3</sup> )	46,54
Dirección del flujo	De dentro a fuera
Configuración del sistema	Externa

### Diseño y operación Megablock

En lo que concierne al diseño y operación, al ser de fibra hueca el pretratamiento exigido es un tamizado de 1 mm de paso para evitar problemas con fibras y pelos.

Este sistema trabaja prácticamente igual al anteriormente presentado Airlift, con un flujo neto de 47 LMH y funcionamiento en continuo con presiones de operación entre 0,1 y 0,3 bar.

Este modelo tiene necesidades de recirculación parecidas al módulo Airlift pero con un  $SAD_m$  menor, 0,21 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.de aire por m<sup>2</sup> de membrana aunque la presión del aire suministrado en este caso es mayor, de 0,6 bar en comparación de los 0,45 bar que precisa el módulo Airlift. Esta diferencia de presión es debida al tamaño de burbuja que debe ajustarse al diámetro de la membrana. Lo interesante de este nuevo módulo es que consigue rebajar el  $SAD_p$  de 7,1 m<sup>3</sup> de aire.por m<sup>3</sup> de permeado del Airlift a 4,45 m<sup>3</sup>.de aire por m<sup>3</sup> de permeado debido al mayor volumen que puede tratar por superficie de membrana con prácticamente los mismos requerimientos de aireación.

En la Tabla 6.24 se describen los principales parámetros de diseño y operación del modelo MEGABLOCK 636.

**Tabla 6.24** Resumen de los parámetros de diseño y operación del modelo MEGABLOCK 636

<b>DISEÑO Y OPERACIÓN</b>	
Tipo de pretratamiento necesario	Tamizado 1 mm
Temperatura a la que están referidos los valores de la tabla	20°C
SSLM (g.L <sup>-1</sup> )	8-15
Caudal de recirculación habitual	5Qm al tanque biológico más 4 Qm recirculación interna del bastidor
Edad de fango mínima (días)	15
Flujo caudal medio (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	50
Flujo caudal punta (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	65
PTM operación (bar)	0,1-0,3
PTM máxima de permeado (bar)	0,5
PTM máxima de contralavado (bar)	1
Permeabilidad (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	190-500
Tipo de aireación	Burbuja gruesa en continuo
Caudal de aire (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) por módulo	6,7
Presión del aire suministrado (bar)	0,6
SADm (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	0,21
SADp (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	4,45
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavado, etc.)	10 minutos filtración, 7 segundos contralavado De 4 a 8 horas modo drenaje
Contralavados (con agua filtrada, con aire, etc.)	Con agua filtrada, recirculación y aireación simultaneas.

### Consideraciones finales

Tras el estudio de los diferentes sistemas de filtración mediante membranas, se observa que la variabilidad de sistemas respecto a los módulos, bastidores y por tanto conexiones y sistemas de aireación hace inviable el intercambio entre ellos una vez instalados en una planta. Este hecho obliga a tener unos criterios de diseño y operación diferentes para cada uno de los modelos que ofrece el mercado. En la Tabla 6.25 se resumen los parámetros de diseño y operación de las casas comerciales descritas anteriormente para evidenciar estas diferencias. Los datos están referidos a temperaturas de 20°C y funcionamiento a caudal medio.

**Tabla 6.25** Parámetros de diseño sistemas filtración según casas comerciales

<b>Casa comercial</b>	<b>Flujo L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup></b>	<b>PTM bar</b>	<b>MLSS g.L<sup>-1</sup></b>	<b>θ<sub>c</sub> días</b>	<b>SADm Nm<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup></b>	<b>SADp Nm<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup></b>	<b>Q<sub>R</sub> nxQm</b>
Zenon	27-29	0,1	< 12	8	0,28-0,38	10,5	3-4
Koch	25-30	0,2-0,3	< 12	16	0,12	6,1	4
Kubota	29	0,05-0,1	8-15	8	0,29	9,9	2-5
Toray	29-31	0,05-0,1	10-15	15	0,32	10,7	2
Huber	16-18	0,03-0,3	8-10	10	0,2	12,34	4
Microdyn	25	0,03-0,4	12	15-25	0,35	17,5	3-5
Alfa-Laval	20-25	0,008-0,4	12	8-12	0,21	9-13,5	4-5
Pentair	50	0,1-0,3	8-12	15	0,3	7,1	15

A nivel europeo se está tratando de estandarización entre módulos al menos de la misma configuración de membranas, MFH y MPP, por ejemplo. Un primer intento de estandarizar MBR no integrado es el documento CWA 15897:2008, sin mucho éxito al considerar las casas comerciales que sus programas de investigación e inversión no están amortizados.

Algunas consideraciones a tener en cuenta una vez analizada la información cedida por las casas comerciales son:

- En general cuando se necesita mayor compacidad del tratamiento para tratar caudales elevados o no disponer de espacio, se opta por sistemas de fibra hueca.
- Las configuraciones suelen ser integradas para MFH y no integradas para MPP.
- Los sistemas de aireación son de burbuja gruesa en casi todos los casos.
- En los diseños no se suele contar con el aire que se aporta para limpieza de las membranas para los procesos biológicos.
- Se aconsejan mínimo 8 días de  $\theta_c$  o al menos nitrificación completa tanto en MFH como en MPP y MT.
- Las MPP precisa una concentración mínima de SSLM para su buen funcionamiento mientras que la MFH no los tiene.
- El SAD es menor en MFH que en MPP. La mayoría de los sistemas MPP tienen aireación continua mientras que los MFH la aireación es discontinua.
- Las MPP precisan de menos pretratamiento que las MFH.
- La MT tiene un coste energético mayor que MFH o MPP por  $Q_R$  elevados, pero los flujos son del orden del doble que las anteriores configuraciones mencionadas.

Como resumen en la Tabla 6.26 se recogen algunos aspectos importantes y su valoración en función de la configuración de membrana utilizada.

**Tabla 6.26** Ventajas e inconvenientes de las distintas configuraciones de membrana

Parámetro	Placa Plana	Fibra hueca
Calidad pretratamiento	+	++
Espacio ocupado	+	+++
Facilidad de limpieza in situ	+	-
Facilidad de limpieza ex situ	-	++
Presión transmembrana (PTM)	++	+
Consumo energético	+	++
Resistencia	++	+
Coste por módulo	+	+++

+ Ventaja - Desventaja

## 6.4 Operación y buenas prácticas en el diseño de los MBRs

### 6.4.1 Operación de los sistemas MBRs

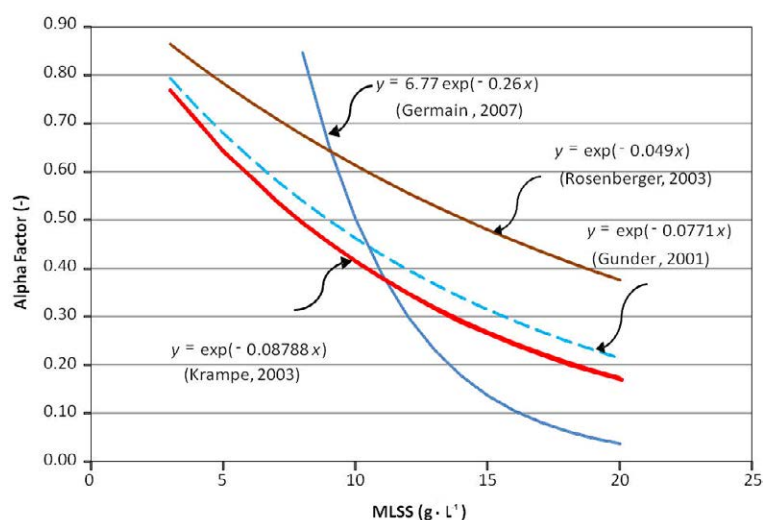
Para definir la estrategia de operación de una planta MBR, se debe elegir la variable que regulará el funcionamiento de la bomba de permeado, determinando el caudal a aspirar y el modo de funcionamiento. Los sistemas que suelen utilizarse son: 1) trabajar a flujo constante, 2) a PTM constante, 3) en función del caudal de llegada a planta y 4) para instalaciones pequeñas, trabajando como si la cuba de filtración fuera un bombeo (Iglesias R., 2012).

La determinación del flujo de trabajo es una decisión clave dentro de la operación de los MBR. Esta elección va a afectar directamente a la vida útil de las membranas, ya que a mayor flujo mayor será



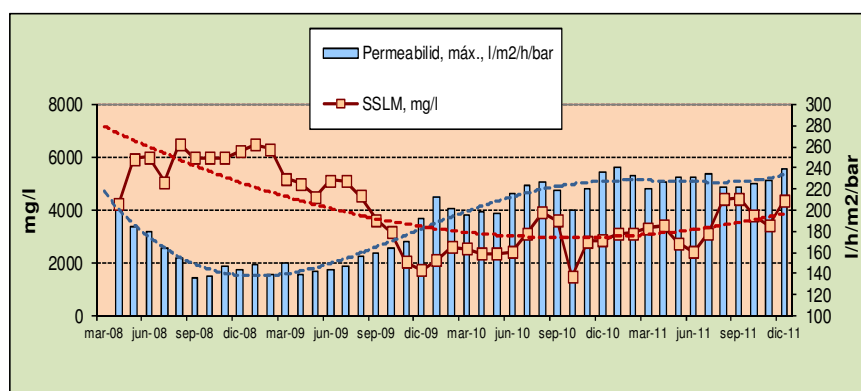
el ensuciamiento, y, por tanto, será necesario aumentar el número de limpiezas químicas y caudales de aireación de la limpieza física con el consiguiente aumento del gasto energético.

Lo recomendable sería trabajar con la mínima superficie de membrana posible y a un flujo próximo al de diseño (habitualmente unos  $25 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Para conseguir este equilibrio entre eficiencia energética del proceso y el ensuciamiento de las membranas, hay que tener una planta que permita el reparto de caudales diarios y estacionales entre las distintas líneas donde se ubican las membranas, ajustando convenientemente la parada y entrada en funcionamiento de las distintas unidades funcionales o bastidores de membranas que componen estas líneas.



**Figura 6.59** Influencia de los MLSS en el factor alfa, ([www.onlinembr.info](http://www.onlinembr.info))

Trabajar con concentraciones de MLSS elevadas en el reactor biológico penaliza significativamente factor alfa ( $\alpha$ ) y por tanto la transferencia de oxígeno lo que se traduce en un aumento del consumo energético. Este factor depende no solo de los MLSS sino de múltiples variables entre ellas: tamaño de burbuja, tipo de sistema de aireación o forma del reactor. Esta tendencia se muestra en la Figura 6.59, donde se recogen los estudios realizados por diferentes autores sobre la influencia de los MLSS en el  $\alpha$ . Es por este motivo, que el rango de concentraciones de MLSS en el reactor biológico se ha situado máximo a  $8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  con recirculaciones desde el tanque de membranas de 2 a 4 veces el caudal medio de entrada para mantener una concentración de  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  en la zona de membranas y evitar así, rápidos ensuciamientos de las mismas tal y como muestra la Figura 6.60. En esta figura se demuestra la disminución de la permeabilidad (F/PTM) a medida que aumentan los MLSS en la zona de membranas.



**Figura 6.60** Influencia de los MLSS en la permeabilidad de las membranas (ESAMUR, 2011)

En general lo recomendado sería trabajar al mínimo de MLSS que el sistema admitiera tanto en el tanque biológico como en la zona de membranas, en función de la carga contaminante de entrada y la edad de fango adoptada para obtener el rendimiento de depuración deseado, con objeto de evitar concentraciones elevadas en el tanque de membranas y de prevenir una disminución de la permeabilidad, a la vez que se intenta mantener una  $Q_R$  lo más baja posible.

Con los actuales rangos de funcionamiento de las plantas españolas, Tabla 6.27, se consiguen efluentes con calidades similares a las indicadas por las casas comerciales (Tabla 6.1), así como producciones de fangos parecidas a un proceso de fangos activos en las mismas condiciones de trabajo. Además, la durabilidad de las membranas está siendo mayor a lo indicado por las casas comerciales, con plantas que superan los 8 y 10 años de funcionamiento sin haber tenido que sustituir las membranas por envejecimiento.

**Tabla 6.27** Parámetros de funcionamiento y diseño de MBR españoles

	Aledo	Mar Menor	San Pedro	Calasparra	Vallvidrera	Riells
<b>Proceso biológico</b>						
Qd/Qt (%)	36	21-37	41	89	77	51
$\theta_c$ (días)	52	40-80	43	38	16	13
MLSS	10000	9000	3250	5429	7298	8900
PF (kg MS.kg DBO <sub>5</sub> <sup>-1</sup> )	0,99	0,49-0,75	0,89	0,60	1,12	0,81
<b>Proceso de filtración</b>						
Configuración	MPP <sup>1</sup>	MPP	MFH <sup>2</sup>	MFH	MFH	MPP
T (°C)	22	24	22	22	18	19,5
Flujo-Qm (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	25	25	14-25	17,5	28	10,5
Flujo-Qp (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	42	49	41	33	30,9	27,2
PTM (bar)	0,065	0,120	0,120	0,155	0,110	0,250
P (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> .bar <sup>-1</sup> )	385	250	206	112	294	42
MLSS (g.L <sup>-1</sup> )	12	11	6	6	7,2	13,5
$Q_R$	4	0,9	3	4	3	1,4
Ciclo aireación (F-C-R; F-C-F-R) (min.)	9-0-1	9-0-1	17-1-1	10-0,5	10-0,5-10-0,5	9-0-1
SADm (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	0,8	0,45	0,26	0,3	0,27	0,51
SADp (Nm <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	45	31	18,3	24,32	19,27	24,18

Abreviaciones: Qd: caudal diseño; Qt: Caudal tratado; PF: producción de fango; P: Permeabilidad; F-C-R: filtración-contralavado-relajación. <sup>1</sup>Corresponde a la casa comercial Kubota <sup>2</sup>Corresponde a la casa comercial Zenon

Como puede observarse, existen diferencias entre lo recomendado por las casas comerciales para el funcionamiento y operación de sus sistemas, Tabla 6.25, y los datos de funcionamiento recopilados en plantas reales, Tabla 6.27, sobre todo respecto concentraciones de SSLM tanto en el tanque biológico como en la zona de membranas, y por tanto, en la cantidad de recirculación necesaria. Esto es posible al trabajar las plantas por debajo del caudal de diseño. De todas maneras, la tendencia en los proyectos revisados para instalaciones MBR es fijar concentraciones más bajas de SSML por eficiencia energética y ensuciamiento de la membrana. Respecto al flujo, tanto en planta como en proyectos, los datos son más conservadores que los dados por las casas comerciales.

Respecto a las necesidades de aire para el mantenimiento de las membranas, hay una clara diferencia entre lo indicado por las casas comerciales y los datos recopilados en plantas, siendo del orden de más del doble lo utilizado en la mayoría de los MBRs estudiados, tanto en MPP como en MFH.

## Ensuciamiento y control del proceso

El ensuciamiento de las membranas se puede definir como la deposición de microorganismos, coloides, precipitados orgánicos (“fouling” orgánico) e inorgánicos (“scaling”) fundamentalmente por carbonato de calcio y sulfato de magnesio.

La primera medida para controlar el ensuciamiento de las membranas es instalar un tamizado previo al MBR de al menos 1 mm de paso para MFH y 2 mm para MPP (Figura 6.61).



**Figura 6.61** Tamiz rotativo de 1mm de paso

En segundo lugar, para evitar que las membranas lleguen a alcanzar un ensuciamiento permanente, se deben seguir unos protocolos de limpieza, marcados por los fabricantes, y mantener caudales adecuados de aireación en función del flujo de operación. Además, dentro del ciclo de filtración las MFH disponen de contralavado y las de MPP de ciclos de relajación donde no se filtra agua, pero se mantiene la aireación. En función de la carga y el caudal a tratar hay plantas trabajando a 10 minutos de filtración y 30 segundos de contralavado, y otras con 16 minutos de filtración y 2 minutos de contralavado. El caudal de contralavado suele oscilar entre el caudal habitual de permeado y hasta un 150% de dicho valor.

En la Figura 6.62 se clasifican los principales puntos de control del proceso de filtración de un MBR.



**Figura 6.62** Puntos de control del proceso de filtración de un MBR (Ferrero et al, 2012)

En general las plantas españolas siguen los protocolos de limpieza química con frecuencias parecidas a las indicadas por los fabricantes, y en los últimos años han conseguido disminuir el caudal de aireación de las membranas de MFH al funcionar con ciclos de aireación en discontinuo y periodos de parada de la aireación cada vez más dilatados en función de la concentración de MLSS que se tenga en el tanque de membranas.

Los sistemas de control existentes en MBR a escala real son muy sencillos y poco flexibles. Existe, sin embargo, un número significativo de patentes de las principales casas comerciales de membranas (Siemens, GE, ITT, Eimco, Polymem, Zenon, Kruger, Degremont), así como artículos de investigación que detallan distintas propuestas de control, principalmente encaminadas a reducir el consumo energético del proceso. Aunque la tendencia de futuro es la de integrar biología y filtración (Monclús, 2011), todavía se controla de un modo independiente ambos procesos.

#### Avances en la eficiencia energética del proceso

El consumo energético de un MBR es 1,5-2 veces superior a un proceso de fangos activos en aireación prolongada lo que supone una de las principales barreras a la hora de implantar este tipo de tecnología.

En la Tabla 6.28 se exponen los consumos de algunos MBR españoles con sistemas MFH y MPP en unas determinadas condiciones de funcionamiento.

La variabilidad de los datos se debe en primer lugar al tipo de membrana utilizada y en segundo lugar a los rangos de funcionamiento respecto a PTM,  $Q_R$ , F, y sobre todo en MLSS tanto en el tanque de membranas como en el reactor biológico de cada una de las EDARs, lo que, sin duda afecta al consumo energético, aparte de estar algunas plantas tratando caudales muy por debajo del de diseño. A estas circunstancias habría que añadir además la carga contaminante que reciben, el diseño de la planta (poca flexibilidad, soplantes sobredimensionadas, diferencias de cotas, etc.) y plantas con una línea en paralelo o parte de las instalaciones compartidas con otra tecnología de proceso.

**Tabla 6.28** Consumos energéticos de MBR españoles, 2011

	MFH			MPP		
	San Pedro	Calasparra	Vallvidrera	Mar Menor	Hacienda Riquelme	Riells i Viabrea
Caudal diseño ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	20.000	2.000	1.100	1.880	1.575	2.160
Caudal real ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	8.500	1.793	850	700	279	1.116
Nº de líneas	4	1	2	2	2	2
MLSS biológico ( $g \cdot L^{-1}$ )	3,25	5,43	7,3	10	9,85	8,8
% Recirculación	300	400	300	90	180	140
Edad fango (días)	43	38	16	40	> 50	13
CONSUMO TOTAL EDAR ( $kWh \cdot kg \text{ DBO eliminado}^{-1}$ )	3,9	1,7	7,05	12,7	16,4	5,9
CONSUMO TOTAL EDAR ( $kWh \cdot m^{-3}$ )	0,75	0,98	1,13	1,27	1,64	0,69

Se observa que el elemento con más influencia energética son las soplantes de aireación de las membranas, que junto a la aireación necesaria para el proceso biológico supone más del 60% de la energía consumida por la totalidad de la EDAR.

En general todas estas plantas han ido reduciendo sus consumos energéticos por medio de alguna de las siguientes estrategias:

- Trabajar con concentraciones de MLSS lo más bajas posibles. Repartir la masa de sólidos necesarios en el sistema en varios reactores biológicos.
- Bajar el caudal de recirculación teniendo precaución de no alcanzar valores límite de concentración máxima de MLSS en el tanque de membranas.
- Trabajar con flujos lo más elevados posibles para poder parar alguno de los bastidores o líneas de filtración, siempre que exista posibilidad de regulación del aporte del aire de

- membrana y de aspiración del permeado. En caso de no existir esta posibilidad reducir el flujo en las líneas en funcionamiento.
- Ajustar los ciclos de aireación de las membranas, bajando el caudal en continuo cuando las cargas y la concentración de MLSS así lo permitan, o incluso haciendo ciclos discontinuos en MFH.
  - Funcionar por gravedad cuando la cota así lo permita. Aprovechar el desnivel entre la lámina de agua en la cuba de filtración y el punto de salida del agua permeada, regulando el caudal filtrado mediante una válvula automatizada. Esta posibilidad es factible, aunque el control es más complicado.
  - Evitar sobrepresiones por acumulación de aire en tuberías de permeado incorporando sistemas de extracción de aire.
  - Aprovechar la sobresaturación de oxígeno del tanque de filtración descargando este caudal al principio de la zona óxica del reactor biológico.

#### Problemas detectados en la operación

Los problemas detectados en los MBR españoles tienen más que ver con fallos mecánicos en bombas, desajustes de válvulas, fallos en el equipamiento de control e instrumentación, falta de duplicidad de equipos básicos, como compresores o bombas de vacío, etc., que con problemas de ensuciamiento de las membranas o de rotura de las mismas.

**Tabla 6.29** Problemas detectados en MBR españoles, consecuencias y posibles soluciones

<b>Problemas</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Posibles soluciones</b>
Acumulación de espumas	- Desbordamiento del tanque - Pérdida de sólidos - Errores en medidas de MLSS	- Instalación de una bomba de extracción de fangos en exceso en la cuba de filtración y a media altura - Variar la edad del fango $\theta_c$ - Uso de antiespumantes sin base de silicona
Contaminación bacteriológica del depósito de permeado	- Incumplimientos con la calidad establecida para el reuso	- Dosificación de hipoclorito en el depósito de permeado
Entrada de oxígeno en la recirculación interna	- Bajos rendimientos en la desnitrificación	- Instalar una doble recirculación: una externa desde tanque membranas a reactor óxico y otra desde éste al reactor anóxico
Rotura de membranas	- Pérdida de capacidad de filtración y calidad del efluente	- Habilitar grúas y espacios acondicionados para una ocasional limpieza manual (Figura 10) - Controlar las presiones durante los contralavados y limpiezas químicas. - Cubiertas para proteger el tanque de membranas y reactor biológico
Fallos en el equipamiento de control	- Parada de la planta por alarma	- Permitir el control manual - Programación accesible para usuario - Flexibilidad en el diseño para poder operar con distintas líneas - Duplicidad del sistema de control
Acortamiento de fibras	- Ensuciamiento de la membrana al reducirse la movilidad necesaria para su limpieza física - Rotura de las fibras	- Control del acortamiento mediante dispositivos que permitan el acercamiento de los cabezales de anclaje cuando sea necesario



**Figura 6.63** Rotura de MFH en bastidores Zenon, (ACA)

En la Tabla 6.29 se resumen algunos problemas específicos encontrados en MBR operados en España, las consecuencias que produjeron y la solución adoptada o que podría realizarse en plantas en circunstancias similares.

#### 6.4.2 Buenas prácticas de diseño en función de la experiencia acumulada

En general el diseño de los MBRs ha venido determinado por las casas comerciales que suministran los sistemas de filtración. Existen algunos manuales de diseño como el elaborado por la Water Environmental Federation (WEF, 2011), los publicados por S. Judd (2006 y 2011) o C. Brepols (2011) que dan los pasos básicos a seguir a la hora de plantearse el diseño de un MBR y que a continuación se exponen de forma resumida:

- Determinación de la configuración elegida para la eliminación simultánea de materias orgánicas y nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Cálculo del balance de materia para la eliminación de nutrientes, las recirculaciones y las fracciones de las zonas anóxicas y anaerobias.
- Determinación de la edad del fango de diseño, del caudal de purga y de la concentración de MLSS.
- Determinación de la máxima concentración de MLSS permitida en el tanque de membranas y del caudal de la recirculación externa.
- Cálculo de la concentración de MLSS en las diferentes zonas del biorreactor.
- Dimensionamiento de los respectivos volúmenes de los tanques.
- Verificación de las condiciones de proceso considerando los volúmenes reales, las capacidades de aireación, alcalinidad, etc.
- Dimensionamiento de la filtración con membranas y de los equipos periféricos (especialmente soplantes y equipos de limpieza).

Al margen de este dimensionamiento básico, que erróneamente muchas veces aún se realiza de un modo independiente entre el proceso biológico y la unidad de filtración, hay una serie de consideraciones generales producto de la experiencia de la operación de esta tecnología que deben tenerse en cuenta en esta fase inicial de diseño. A continuación, se exponen de un modo sintético algunas de estas consideraciones.

#### **Integración del MBR con las otras unidades de la EDAR**

El diseño del MBR se debe llevar a cabo de un modo integrado con otras operaciones unitarias de la EDAR como son el pretratamiento, la decantación primaria, y el tratamiento posterior de lodos.

Los pretratamientos mecánicos necesarios para evitar problemas de ensuciamiento de las membranas por material fibroso tienden a ser cada vez más exigentes siendo en estos momentos lo recomendado una luz de paso de los tamices, entre 0,5 y 1 mm para MFH y de 2 a 3 mm para MPP. Asimismo, se considera muy importante poder disponer de un desarenador-desengrasador eficiente para evitar la posible rotura, la colmatación y el ensuciamiento excesivo de las membranas.

La presencia de decantación primaria tiene un impacto significativo sobre el diseño y la operación de los MBR. Aparte de las ventajas análogas a los sistemas convencionales de lodos activos (disminución de la carga orgánica, reducción de los costes de aireación y del volumen del tanque biológico, optimización de la producción de metano por digestión anaerobia), la decantación primaria evita la colmatación del microtamiz con sólidos en suspensión sedimentables. Como principales contrapartidas debemos considerar el espacio ocupado, la posible generación de olores, sus costes de construcción y la posible falta de materia orgánica para garantizar la posterior desnitrificación. Remarcar que los costes debidos a la aireación y la disminución de la carga repercutiría solamente sobre la aireación de la zona aerobia, ya que el aire requerido para la limpieza mecánica de las membranas seguiría siendo el mismo.



**Figura 6.64** Vista general de la EDAR de San Pedro del Pinatar, (ESAMUR)

La literatura reporta ciertas particularidades de los lodos de un MBR respecto a los de sistemas de lodos activos convencionales, como serían su mayor concentración y viscosidad, la mayor presencia de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) o el menor tamaño medio de sus flóculos, y alerta del posible impacto en las unidades posteriores de tratamiento de lodos. No obstante, la experiencia existente en España no permite identificar impacto significativo alguno en el espesamiento de los mismos, ni en su digestión anaeróbica, ni en el consumo de reactivos para su deshidratación, por lo que el diseño de la línea de fangos de un MBR tendrá que tener las mismas consideraciones que para un FAC.

### **Gestión hidráulica**

Otro aspecto básico a considerar durante la fase de diseño es el de garantizar la gestión óptima del caudal a tratar. Las membranas están diseñadas para trabajar a un flujo determinado de diseño, y alejarse del mismo provoca problemas de ensuciamiento, por ejemplo, cuando se fuerza para absorber picos o periodos de lluvias, o unos costes excesivos cuando la ratio kWh.m<sup>-3</sup> se ve penalizado si la membrana trabaja a flujos menores al de diseño. Para evitar dicho problema el diseño de la EDAR debe permitir una cierta laminación del caudal que facilite el trabajo a flujo constante, bien sea mediante un tanque de laminación (Figura 6.65) o modificando el volumen del tanque biológico, aunque esta segunda opción puede repercutir sobre el rendimiento del sistema de aporte de oxígeno.

Por otro lado, a la hora de gestionar la EDAR es importante poder disponer de una cierta flexibilidad del sistema. Esto se puede lograr mediante la instalación de varias líneas de membranas

diferenciadas, en el que se prevea la aspiración de agua tratada independiente y el dimensionamiento de la necesidad de aire a regular para una sola línea. De esta manera, se podrían parar o poner en marcha en función del caudal a tratar.

Una última tendencia para poder trabajar en el MBR con un flujo constante y cercano al de diseño es el de combinarlo con otras tecnologías que traten el agua en paralelo (FAC, decantación secundaria, IFAS, etc.) y que permitan una mayor flexibilidad del caudal a tratar. De este modo se puede derivar el agua del MBR a la otra línea de en función de las necesidades globales de la EDAR. Este tipo de instalaciones se denominan plantas de configuración dual, y son habituales en el rediseño de plantas de gran capacidad.



**Figura 6.65** Tanque de laminación de La Bisbal, (ACA)

### **Equipos periféricos**

El diseño de los equipos periféricos también presenta algunas particularidades que se deben tener en cuenta. Por ejemplo, configuraciones innovadoras utilizan bombas sumergibles de baja carga con el fin de minimizar los requerimientos energéticos de la recirculación de nutrientes. El permeado puede ser extraído a través de las membranas con bombas o por gravedad. La mejor configuración de cara al ahorro energético es la extracción por gravedad, pero para garantizar un correcto funcionamiento se necesita una concentración de licor mezcla suficientemente elevada para balancear posibles variaciones de caudal o el ensuciamiento biológico de las membranas.

Por otro lado, el diseño de los sistemas de aireación de los MBR es uno de los principales desafíos técnicos. El caudal de aire debe ser uniforme entre boquillas de modo que las membranas por encima de las toberas estén uniformemente aireadas. Por contra, se produce un ensuciamiento localizado de la membrana cuando el aire no es suficiente. Las áreas afectadas por la colmatación van aumentando ya que el flujo en las zonas que no están colmatadas debe aumentar para compensar la pérdida en el área de filtración. Dado que las tasas de ensuciamiento de la membrana son exponencialmente proporcionales al flujo, el ensuciamiento de la membrana se puede propagar rápidamente a toda la superficie de la membrana. Por lo tanto, mantener una aireación uniforme debajo de los módulos de membrana es crucial para la filtración de membrana estable.

Finalmente persisten problemas relacionados con la precisión con la cual se puede predecir la transferencia de oxígeno, para calcular el aire necesario para el proceso, ya que varía notablemente dependiendo de la disposición de los difusores, en base al flujo específico de aire por difusor, a la biología del fango, a la carga orgánica, etc. A su vez, la demanda bioquímica de oxígeno incluye un nivel significativo de incertidumbre. Las ingenierías a menudo intentan obviar este problema combinando su know-how basado en sus experiencias a largo plazo. En casos prácticos, las incertidumbres en el cálculo de la demanda de oxígeno se cubren mediante varios factores de multiplicación y la redundancia de los equipos de aireación.



Con el objetivo buscar la mayor eficiencia energética en la futura planta, es importante flexibilizar y no sobredimensionar, que es una de las prácticas habituales que nos encontramos en las plantas actuales.

#### Otras consideraciones

Resulta de suma importancia la instalación de deflectores (Figura 13) en la entrada a las líneas de membranas para evitar que se dañen los módulos instalados justo delante de la entrada.



**Figura 6.66** Biorreactor con membranas planas (Iglesias R.)

Aunque la tecnología MBR se caracteriza por ocupar un espacio muy reducido, es recomendable disponer de una pequeña zona anexa al MBR para poder realizar pruebas externas o inspecciones visuales de los tanques y/o de los módulos. Otra consideración necesaria a la hora de instalar los tanques de membranas es la de facilitar la extracción de los módulos. Por este motivo se recomienda que el tanque de membranas se pueda destapar fácilmente y permita extraer fácilmente los casetes garantizando la seguridad de los operarios. Asimismo, se aconseja disponer de un puente grúa que permita levantar los bastidores de membranas con facilidad.

Finalmente, el sistema de membranas se debería diseñar con una superficie de membranas suficiente para acomodar el caudal punta diario con una línea de membranas no en uso. Además, el sistema de membranas debería tener un 10% de espacio adicional en cada uno de las líneas para poder instalar membranas en caso de que se necesitara un incremento de la superficie de filtración, aumento de caudal o en episodios de colmatación de las membranas.

#### Observaciones finales

Las estrategias llevadas a cabo para el control del ensuciamiento de las membranas a través de mejores diseños de los sistemas de membranas en cuanto a materiales, disposición de los módulos dentro del bastidor y sobretodo, en el tipo de aireación y frecuencia de la misma, han supuesto alcanzar consumos más competitivos frente a otros sistemas de tratamiento más habituales.

Los principales objetivos a conseguir, a corto o medio plazo, para mejorar la valoración de esta tecnología como alternativa a otros procesos de tratamiento convencionales son:

- Aumentar el grado de fiabilidad de las membranas. Al ser un sistema que basa la separación sólido-líquido en una barrera física (membranas) hay que tener en cuenta el riesgo que existe si esa barrera falla por mala operación, por deterioro, por colapso, etc.
- Disminuir los costes de inversión y operación a través del abaratamiento de las membranas y mejora de la eficiencia energética del proceso.
- Aumentar la flexibilidad de los MBR para adaptarse mejor a los cambios de caudal.

- 
- Diseños integrados donde se tengan en cuenta la influencia del proceso biológico sobre el sistema de membranas.
  - Controles inteligentes que permitan ajustarse en tiempo real a las necesidades de caudal de aireación de las membranas, ajustar los parámetros de funcionamiento en función de la carga o los ciclos de operación (duración fija o en base a otros parámetros de los periodos de filtración, de contralavado y/o relajación).
  - Establecer protocolos más específicos de las limpiezas químicas (periodos, dosis y reactivos) y de la adición de aditivos para la mejora de la filtrabilidad de los lodos y/o la disminución del ensuciamiento.

## 6.5 Costes de implantación y explotación de los MBRs frente a otros tratamientos de regeneración

En este apartado se exponen los costes de implantación y explotación de los MBR de nueva implantación y de los utilizados para ampliaciones de EDAR. La información se ha obtenido por medio de una ficha que recoge los datos de 14 plantas de Cataluña y Murcia durante el año 2013 (ver Anexo IV). En estas fichas se han incluido, además de los costes, otros datos como los caudales nominales y tratados, los habitantes equivalentes servidos, la energía y los reactivos consumidos, que nos han permitido establecer indicadores específicos respecto a los costes de implantación ( $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  o  $\text{€}\cdot\text{h}\cdot\text{e}^{-1}$ ) y de explotación ( $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{€}\cdot\text{kgDBO}_5^{-1}$  o  $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ), entre otros.

Es preciso indicar que los costes estimados son orientativos ya que hay muchos aspectos que condicionan los mismos. En el caso de los costes de implantación no se han tenido en cuenta los costes de adquisición del terreno, pero existen factores como la orografía, característicos del terreno o los costes de adquisición de equipos y de material para la obra civil que repercuten notablemente a la variabilidad de este coste. Del mismo modo, en los costes de explotación hay diferencias significativas entre plantas de capacidades similares cuando su funcionamiento se aleja en las cargas y/o los caudales tratados de los de diseño, por la variabilidad en el coste de la gestión del fango, los residuos y los reactivos según las condiciones locales, o por las condiciones acordadas para la explotación de la planta por terceros, gestión privada o la realizada por la administración pública.

El tratamiento de datos de las plantas MBRs se realizó durante el año 2014 y la explotación de datos de aireaciones prolongadas y tratamientos de regeneración durante el 2015. Se recopila información de más de 30 EDARs en aireación prolongada con nitrificación-desnitrificación con capacidades similares a los MBRs estudiados, para poder realizar el análisis comparativo con los MBRs de nueva implantación. Con este objetivo, se suma al coste de implantación y explotación de las AP-N-D seleccionadas, el correspondiente a los TRC y TRA en tramos similares de capacidad.

Los datos de explotación de las plantas MBRs estudiadas son del año 2011, para poder comparar los costes de implantación de las distintas plantas, se ha actualizado el coste de cada una de ellas a 31 de diciembre de 2011. Lo mismo se ha hecho con los costes de implantación y explotación de las aireaciones prolongadas y tratamientos de regeneración tomados para realizar el análisis comparativo.

### 6.5.1 Costes de implantación de los MBRs

Los costes que se recogen en este capítulo son los correspondientes al presupuesto de liquidación, sin incluir los gastos generales ni el beneficio industrial aplicado. Si se incluye, sin embargo, el presupuesto de las pruebas de funcionamiento y de la puesta en marcha. Los costes se presentan con precios de ejecución material y sin IVA. En general la duración de la puesta en marcha es de 3 a 6 meses.

### MBR de nueva implantación

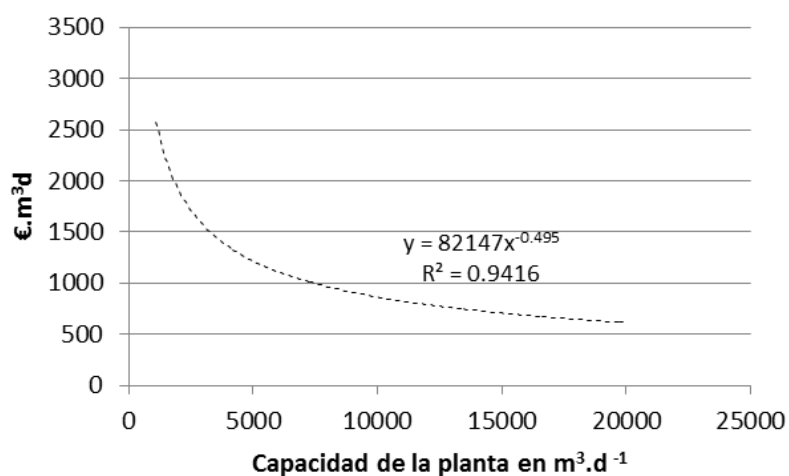
La Tabla 6.30 recoge los costes de implantación en función de los caudales a tratar y de los habitantes equivalentes servidos en distintas plantas de MBR, incluyendo también el tipo de proceso, tipo de membranas y su superficie. Se han seleccionado las plantas más representativas y homogéneas, en cuanto al tratamiento de la línea de agua y de la línea de fangos.

**Tabla 6.30** Costes de implantación MBR construidos del 2007 al 2011

EDAR	Capacidad $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	Capacidad h-e	Tipo proceso <sup>(1)</sup>	Tipo de membranas	Superficie membranas $\text{m}^2$	Coste $\text{€} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$	Coste $\text{€} \cdot \text{h} \cdot \text{e}^{-1}$
Vallvidrera	1.100	5.500	N-D+P	Fibra hueca	2.526	3.277	655
Vacarisses	1.320	6.600	N-D+P	Fibra hueca	3.030	2.130	426
Mar menor	1.880	7.800	AP-N-D	Placa plana	3.200	2.002	482
Riquelme	1.575	5.250	AP-N-D	Placa plana	3.200	2.074	622
El Valle	1.400	4.666	AP-N-D	Placa plana	2.560	1.982	595
San Pedro	20.000	133.333	AP-N-D	Fibra hueca	48.537	625	94

<sup>(1)</sup> N-D+P: proceso convencional con eliminación de nitrógeno vía biológica en una etapa más eliminación de fósforo por precipitación química: AP-N-D: aireación prolongada con eliminación de nitrógeno vía biológica en una etapa.

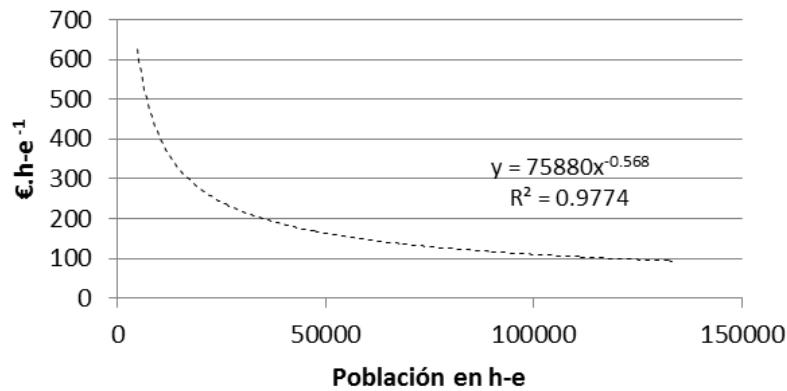
A partir de los datos de la Tabla 6.30, en la Figura 6.67 y la Figura 6.68, se muestra la tendencia de los costes de implantación de un MBR de nueva instalación a medida que crece la capacidad de la planta y la población a tratar, medida en caudal ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) y en habitantes equivalentes (h-e) respectivamente.



**Figura 6.67** Costes de implantación de MBR entre 1.000-20.000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

Solo se dispone de una planta de más de 100.000 h-e y 20.000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  estando la mayoría de ellas en un rango 5.000-10.000 h-e y 1.000-2.000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , aun así, se considera positivo incluir este dato en las curvas de tendencia realizadas ya que amplían notablemente el rango de aplicación de éstas.

El comportamiento de las curvas de costes de plantas MBR en todos sus casos sigue un modelo similar a las curvas de costes de implantación de aireaciones prolongadas.



**Figura 6.68** Costes de implantación de MBR entre 2.000-140.000 h-e

Dados los escasos datos disponibles, las curvas de costes elaboradas sirven exclusivamente para establecer una tendencia y dar un orden de magnitud, no debiendo ser utilizadas para planificar las inversiones de este tipo de instalaciones.

Con los datos disponibles el coste de implantación de una instalación MBR oscila entre 3.200-2.000  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  en capacidades de 1.000 a 2.000  $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ . A medida que la capacidad del MBR se va incrementando, el coste va disminuyendo. En el caso de plantas grandes como San Pedro del Pinatar de unos 20.000  $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  el coste fue de unos 625  $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ .

Respecto a los costes por habitante equivalente, éstos tienen una tendencia similar. Para un rango entre 5.000-20.000 h-e, los costes oscilan entre 650-420  $\text{€}\cdot\text{h}\cdot\text{e}^{-1}$ . En el caso de plantas grandes como San Pedro del Pinatar de unos 130.000 h-e es de unos 94  $\text{€}\cdot\text{h}\cdot\text{e}^{-1}$ .

Observando las líneas de tendencia representadas en la Figura 6.67 y la Figura 6.68 se podría estimar que a partir de una capacidad de unos 8.000  $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  y 25.000 h-e los costes de implantación bajan notablemente, situándose por debajo de los 1.000  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  y los 250  $\text{€}\cdot\text{h}\cdot\text{e}^{-1}$  respectivamente.

#### Ampliaciones de MBR y sistemas duales

Existen bastantes casos en España donde los MBR se han utilizado para ampliar EDAR que con el tiempo se han quedado limitadas en su tratamiento. En muchas ocasiones y por falta de espacio, estas ampliaciones han consistido en la instalación de las membranas y un tamiz para completar el pretratamiento existente. Las membranas se han colocado bien en un tanque aparte o dentro de un decantador secundario que ya no va a ser utilizado, o incluso dentro del tanque biológico ya existente, dejando el resto de la planta prácticamente en las mismas condiciones que antes de la ampliación, lo que implica un coste de implantación evidentemente menor que el de un MBR de nueva implantación.

Dada la casuística tan diversa y el número tan limitado de plantas de las que se disponen de datos, no es posible realizar un rango de costes o curvas predictivas para este tipo de realizaciones. En la Tabla 6.31, se muestran los costes de implantación de plantas españolas que han sido ampliadas.

El proyecto puede plantearse de diferentes maneras, lo que repercute significativamente en los costes. Por ello, y para dar unos ejemplos orientativos de lo que ha supuesto cada tipo de ampliación, a continuación, se indican los aspectos más significativos que están incluidos en el presupuesto de cada planta.

**Tabla 6.31** Costes de implantación de ampliaciones de EDAR con MBR construidos 2003- 2007

EDAR	Capacidad m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	Población h-e	Tipo proceso <sup>(1)</sup>	Membrana tipo <sup>(2)</sup> / m <sup>2</sup>	Tratamiento de fangos <sup>(3)</sup>	Coste €. m <sup>-3</sup> .d	Coste €.h.e <sup>-1</sup>
Bisbal d'Empordà	3.225	15.000	N-D+P	FH/5808	E-D	561	120
Riells	2.116	8.625	C	PP/4410	E-D	692	169
Sabadell	35.000	140.000	N-D+P	PP/61440	DAN	431	107
Calasparra	2.000	23.300	AP-N-D	FH/6058	DA	1.794	154

<sup>(1)</sup> C: proceso convencional; N-D+P: proceso convencional con eliminación de nitrógeno vía biológica una etapa más eliminación de fósforo por precipitación química; AP-N-D: aireación prolongada con eliminación de nitrógeno vía biológica una etapa. <sup>(2)</sup> FH: Fibra hueca; PP: Placa plana <sup>(3)</sup> E-D: espesado más deshidratado con posterior tratamiento según destino final; DAN: digestión anaerobia; DA: digestión aerobia.

En el caso de la ampliación de La Bisbal d'Empordà, el coste de implantación de la ampliación incluye un tanque de laminación, tamizado y el suministro de unidades de filtración en contenedor aparte completamente equipados, así como la ejecución de la obra civil necesaria. El resto de unidades de proceso de la planta, pretratamiento, decantación secundaria y la línea de fangos, se mantienen operativas tal y como estaban antes de la ampliación.

La ampliación de Riells y Viabrea comprende la instalación de un nuevo tamizado, la remodelación del reactor biológico existente, los tanques de membranas y una nueva línea de fangos (bombeo de fangos, espesamiento y deshidratación). Además, se incluyeron los edificios de servicios y de control de la planta.

En Sabadell se instaló un tamizado a continuación de la decantación primaria, se construyeron nuevos reactores biológicos y unidades de filtración por membranas. La actuación en los reactores biológicos incluye las unidades de aireación y los bombeos de agua y fangos. El resto de las unidades de proceso de la planta existente se mantienen operativas: pretratamiento, reactor biológico y decantación secundaria (2ª línea de agua) y la línea de fangos.

En Calasparra el proyecto de ampliación incluye la instalación de bombas para derivar parte de los caudales al MBR, el tamizado, nuevo reactor biológico con zona anóxica con todo su equipamiento de soplantes, difusores, sondas, etc., el edificio que contiene el tanque de membranas, las bombas de recirculación, las bombas de permeado, las unidades de filtración y equipos para limpieza de membranas. Además, se instaló una centrífuga para deshidratación de fangos. En otro edificio se instalaron cuadros eléctricos, soplantes de limpieza de membranas y las ya mencionadas de aireación del nuevo biológico. Es por todo esto que es la planta con el coste más elevado de todas las que se han evaluado.

En general el coste de implantación varía de unas a otras por incluir o no tanque de homogenización, desarrollar una línea en paralelo a la existente totalmente independiente e incluso por aprovechar la ampliación para hacer cambios en la línea de fangos. A la hora de operar, hay ampliaciones que se plantean para dejar de utilizar la antigua línea convencional y otras que utilizan ésta únicamente para derivar caudal del MBR en momento de puntas.

Los MBR se utilizan también para conformar sistemas duales, es decir, plantas que han sido concebidas para trabajar con dos líneas en paralelo, una con MBR y otra con otro tipo de tratamiento. En la Tabla 6.32 se muestran dos ejemplos de plantas duales.

En el caso de Gavà-Viladecans se optó por un sistema dual con un MBR y en paralelo un tratamiento sobre soporte plástico móvil HYBAS (Hybrid biological activated sludge) en el reactor biológico, mediante una configuración que combina zonas anóxicas y aerobias. En el caso de la EDAR Terrassa

se optó por un sistema sobre soporte fijo IFAS (Integrated Fixed Film Activated Sludge) y un MBR como complemento. Los reactores biológicos existentes se transformaron a una configuración Bardenpho con el objetivo de aprovechar al máximo el escaso carbono disponible en las aguas a tratar.

**Tabla 6.32** Costes de implantación MBR duales construidos en el 2011

EDAR	Capacidad m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	Población h-e	Tipo proceso <sup>(1)</sup>	Membrana tipo <sup>(2)</sup> / m <sup>2</sup>	Tratamiento de fangos <sup>(3)</sup>	Coste €.m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	Coste €.h-e <sup>-1</sup>
Terrassa	15.000	66.666	N-D	FH/22752	DAN	1.446	325
Gavá	32.000	195.000	N-D	FH/58400	DAN	573	94

<sup>(1)</sup> N-D: proceso convencional con eliminación de nitrógeno vía biológica una etapa; <sup>(2)</sup> FH: Fibra hueca; <sup>(3)</sup> DAN: digestión anaerobia

### 6.5.2 Costes de explotación de los MBRs

Los costes de explotación pueden clasificarse en fijos y variables. Los costes fijos son aquellos que no dependen de la cantidad de agua tratada, mientras que los variables son proporcionales al caudal depurado.

Los costes de explotación que se van a analizar a continuación están basados en datos reales recogidos en el año 2011, en once plantas de MBR, ocho de nueva implantación (Vallvidrera, Vacarisses, Mar menor, Riquelme, El Valle, Aledo, Los Cañares y San Pedro) y dos ampliaciones que solamente funcionan con la línea de MBR (Riells iViabrea, y Calasparra) dando así unos costes comparables y exclusivos de esta tecnología. En el caso de la Bisbal d'Empordà, cuando el caudal de entrada sobrepasa la capacidad del MBR se deriva la punta a la línea con decantación secundaria. En el 2011 esta planta trató por la línea convencional un 30% del caudal total lo que supone una repercusión limitada respecto el coste que supondría trabajar solo con la línea del MBR.

En la Tabla 6.33 se presentan los aspectos que se incluyen al calcular los costes de explotación fijos, variables y totales de cada planta.

**Tabla 6.33** Información recopilada sobre costes de explotación

<b>A. Costes fijos, €.año<sup>-1</sup></b>
Personal, €.año <sup>-1</sup>
Administración, control y gastos generales, €.año <sup>-1</sup>
Gastos de mantenimiento y conservación, €.año <sup>-1</sup>
Energía eléctrica - Término de potencia, €.año <sup>-1</sup>
Análisis químicos, €.año <sup>-1</sup>
<b>B. Costes variables, €.año<sup>-1</sup></b>
Energía eléctrica consumida, €.año <sup>-1</sup>
Gestión de fangos y residuos, €.año <sup>-1</sup>
Reactivos totales EDAR, €.año <sup>-1</sup>
Reposición de consumibles, €.año <sup>-1</sup>
<b>Costes de explotación (A+B), €.año<sup>-1</sup></b>

En el estudio de coste de explotación no se ha tenido en cuenta la reposición de membranas, coste que habría que incluir dentro de los costes variables. En principio podría considerarse que la duración de las membranas es de 8 a 10 años lo que supone añadir anualmente a los costes de explotación del 12% al 10% del coste inicial de las membranas. El coste de los módulos de membranas sobre proyecto es muy variable lo que no ha permitido obtener un coste exacto de reposición en función del tipo de membrana. Como dato orientativo se puede tomar que la reposición supone del 0,02 al 0,04 €·m<sup>-3</sup> tomando de base el caudal de diseño del MBR.

Para el análisis de los costes de explotación se han seleccionado dos tipos de indicadores, unos de tipo global, en los que se recogen los costes por m<sup>3</sup> de agua tratada, por h-e reales y por kg DBO<sub>5</sub> eliminada en la depuradora y otros de tipo específico referidos a la energía y a los reactivos consumidos.

#### Indicadores globales

En la Tabla 6.34 se recogen los indicadores de costes globales: €·m<sup>-3</sup>, €·h·e<sup>-1</sup> y €·kg DBO<sub>5</sub><sup>-1</sup>. Los resultados son muy variables debido a que la mayoría de las plantas están funcionando lejos de la capacidad y carga de diseño. También están condicionados por la disposición final del fango adoptada en cada planta y el tratamiento posterior necesario para esta disposición.

Los costes de gestión del fango y residuos y su valor, depende de los requerimientos específicos en cada comunidad autónoma y de los costes de gestión que tengan las empresas que allí operan. En la Tabla 6.34 se recoge el destino del fango tratado, para dar una idea de cómo repercute este tratamiento en el coste total dado.

**Tabla 6.34** Costes de explotación de plantas MBR

EDAR	Capacidad m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	Tratado m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	€·m <sup>-3</sup>	€/kg DBO <sub>5</sub> <sup>(1)</sup>	Tratamiento fango <sup>(2)</sup>
Vallvidrera	1.100	849	0,460	2,9	Compostaje
Vacarisses	1.320	683	0,577	4,9	Compostaje
Riells iViabrea	2.116	1.116	0,397	3,2	Compostaje
Bisbal d'Empordà	3.225	4.626 <sup>(3)</sup>	0,215	0,8	Compostaje Secado térmico
Mar menor	1.880	552	0,480	3,8	Aplicación agricultura
Riquelme	1.575	362	0,970	18	Aplicación agricultura
El Valle	1.400	219	1,600	44	Aplicación agricultura
Aledo	288	104	2,590	4,3	Aplicación agricultura
Los Cañares	3.750	161	2,180	17	Aplicación agricultura
San Pedro	20.000	8.247	0,241	1,5	Aplicación agricultura
Calasparra	2.000	1.793	0,330	0,5	Compostaje

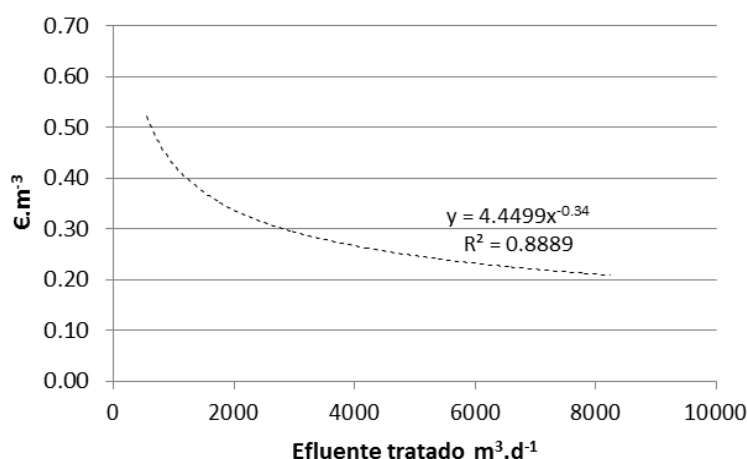
<sup>(1)</sup> Euros por Kg. De DBO<sub>5</sub> eliminado <sup>(2)</sup> En el coste de explotación se incluye el tratamiento especificado como parte de la gestión de fangos y residuos de la planta. <sup>(3)</sup> 1400 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> se trataron por decantación secundaria.

Los costes de gestión de fangos suponen entre el 20% y el 30% de los costes totales de explotación, siendo el coste medio del tratamiento de 15 a 20 euros por tonelada de materia húmeda de fango para la aplicación en agricultura, 30 a 35 euros por tonelada de materia húmeda de fango para el compostaje y de 40 a 60 euros por tonelada de materia húmeda de fango en caso de realizar un tratamiento mediante secado térmico.

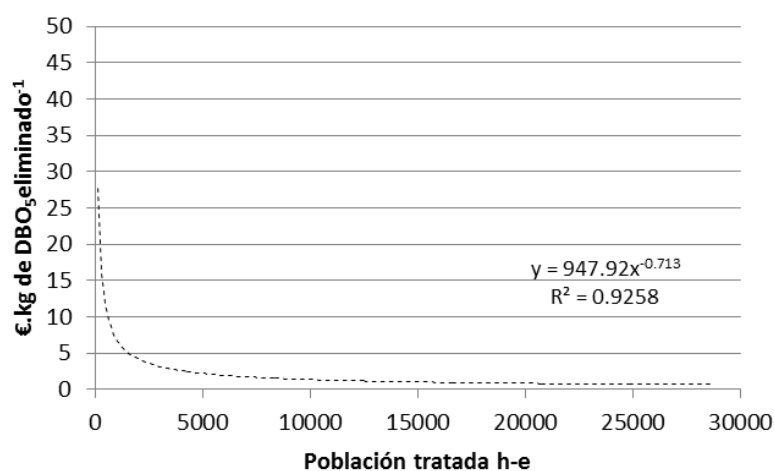
Para poder establecer unos rangos de costes de explotación coherentes, se han seleccionado aquellas plantas de tratamiento cuyos caudales y cargas contaminantes del agua tratada, se acercan más a los valores nominales de diseño.

Con los datos disponibles, los costes de explotación por  $\text{m}^3$  de agua tratada pueden situarse entre 0,2 - 0,5  $\text{€} \cdot \text{m}^{-3}$  para plantas que tratan más del 50% del caudal de diseño y tratan cargas normales de  $\text{DBO}_5$  en plantas con capacidades de diseño por debajo de los  $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Para plantas de mayor capacidad, el factor escala puede mejorar las ratios de coste.

En la Figura 6.69 se representa la tendencia de los costes de explotación de un MBR en función del volumen de agua tratada, medida en  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Como se ha dicho anteriormente, los pocos datos disponibles no permiten establecer un modelo predictivo preciso por lo que la curva establece una tendencia y un orden de magnitud, no debiendo ser utilizada para planificar las inversiones de este tipo de instalaciones.



**Figura 6.69** Costes de explotación en  $\text{€} \cdot \text{m}^{-3}$  en función del caudal tratado



**Figura 6.70** Costes de eliminación de  $\text{DBO}_5$  en función de la carga tratada en h-e



Respecto al coste de explotación en función de la eliminación de materia orgánica en plantas de estas características, Figura 6.70, el rango podría situarse entre 0,5-25,0 €·kg DBO<sub>5</sub><sup>-1</sup> en función de la carga de entrada.

#### Indicadores específicos de energía y reactivos

En la Tabla 6.35 se representan los indicadores específicos de costes de explotación respecto a los consumos energéticos y en la Tabla 6.36, respecto a los reactivos dosificados para un caudal medio tratado.

Los valores de consumo energético (kWh·m<sup>-3</sup>) recogidos en la Tabla 6.35 son muy variables debido a las circunstancias de cada planta, siendo sus causas principales, el bajo caudal tratado con respecto a la capacidad de diseño (caso de El Valle o Cañares), el pequeño tamaño de la planta (Aledo) o la carga contaminante a tratar elevada (Calasparra). No obstante, también hay que señalar que los valores que aparecen en la Tabla 6.35 corresponden al año 2011, y que desde entonces las plantas reciben mayores caudales y se han realizado modificaciones que han optimizado su eficiencia energética.

Con los datos señalados en la Tabla 6.35 se puede decir que en las plantas de MBR en las que el caudal tratado está por encima del 50 o 60 % de los de diseño, con DBO<sub>5</sub> normales, del orden de 250 a 300 mg·L<sup>-1</sup>, y un tamaño superior a los 1000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> de diseño, su ratio energético está comprendido entre 0,6 y 1,2 kWh·m<sup>-3</sup>. Teniendo en cuenta que el coste medio en la zona de estudio es de unos 0,11 €·kWh<sup>-1</sup>, el coste de explotación en relación a la energía se situaría entre los 0,06 y los 0,13 €·m<sup>-3</sup>.

**Tabla 6.35** Costes energéticos de plantas MBR

EDAR	Capacidad m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	Caudal tratado m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	kWh·m <sup>-3</sup> EDAR <sup>(1)</sup>	kWh·m <sup>-3</sup> MBR <sup>(2)</sup>	€·kWh <sup>-1</sup>	€·m <sup>-3</sup> EDAR	%MBR
Vallvidrera	1.100	849	1,097	0,714	0,118	0,129	65,09
Vacarisses	1.320	683	2,00	1,10	0,121	0,241	55,00
Riells	2.116	1.116	0,680	0,460	0,105	0,071	67,65
La Bisbal	3.225	4.626	0,550	0,190	0,115	0,063	34,55
Mar menor	1.880	552	1,27	0,790	0,117	0,111	83,16
Riquelme	1.575	362	1,63	0,900	0,110	0,180	55,21
El Valle	1.400	219	2,60	0,860	0,108	0,420	33,05
Aledo	288	104	3,27	1,710	0,118	0,387	52,29
Cañares	3.750	161	2,51	1,950	0,097	0,340	77,69
San Pedro	20.000	8.247	0,75	0,534	0,104	0,079	69,99
Calasparra	2.000	1.793	0,98	0,898	0,096	0,100	85,85

<sup>(1)</sup> Corresponde a toda la EDAR; <sup>(2)</sup> Corresponde al consumo de soplantes biológico más las de la limpieza de las membranas, las bombas de recirculación, la bomba de permeado y la bomba de fangos en exceso.

En la Tabla 6.35 también se indica el porcentaje que representa el MBR respecto a la totalidad de la energía consumida de la EDAR. Este concepto incluye el consumo de las soplantes del biológico más las soplantes para la limpieza de las membranas, las bombas de recirculación, la bomba de permeado y la bomba de fangos en exceso. Este concepto supera habitualmente el 50% de la energía total consumida por la planta por lo que cualquier mejora en estos elementos repercutirá significativamente en la eficiencia energética del tratamiento.

En general, tratar un agua residual urbana con un MBR de tamaño medio supone un coste energético menor de 1 kWh·m<sup>-3</sup> en condiciones buenas de explotación y diseño, lo que sitúa a esta tecnología en

una posición ventajosa respecto a otras tecnología que dan calidades de agua equivalentes, así como una EDAR en aireación prolongada con eliminación de nutrientes más tratamiento de regeneración con ultrafiltración, que supone 1,2 kWh.m<sup>-3</sup>, o una desalación de agua de mar que consume 3,5 kWh.m<sup>-3</sup> en el mejor de los casos.

En la Tabla 6.36 se muestran los costes respecto a los reactivos consumidos por toda la planta y los que son exclusivos al sistema de membranas para su limpieza.

Se observa que el coste de limpieza de las membranas es bastante moderado ya que representa menos del 4% del total de los costes de reactivos consumidos por la totalidad de la planta.

**Tabla 6.36** Costes de reactivos de plantas MBR

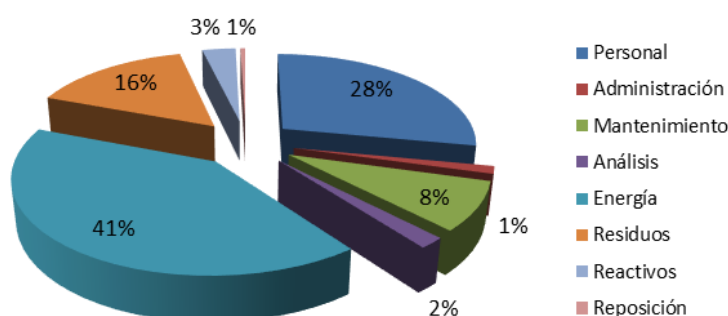
EDAR	Capacidad m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	Caudal tratado m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	€reactivos.m <sup>-3</sup>	% membranas <sup>(1)</sup>
Vallvidrera	1.100	849	0,006	1,28
Vacarisses	1.320	683	0,010	1,73
Riells	2.116	1.116	0,005	1,28
La Bisbal	3.225	4.626	0,009	4,09
Mar menor	1.880	552	0,003	0,63
Riquelme	1.575	362	0,020	2,06
El Valle	1.400	219	0,020	1,25
Aledo	288	104	0,001	0,05
Cañares	3.750	161	0,030	1,38
San Pedro	20.000	8.247	0,007	2,86
Calasparra	2.000	1.793	0,012	3,64

<sup>(1)</sup> Representa el % de consumo de reactivos de limpieza de las membranas respecto al consumo total de reactivos de la planta

Con los datos estudiados se puede concluir que el coste de reactivos de este tipo de instalaciones no supera 0,012 €.m<sup>-3</sup> tratado en condiciones próximas a diseño.

#### Distribución porcentual de los costes de explotación

En la Figura 6.71 se puede observar la distribución general de costes de explotación de los MBR estudiados de capacidad de diseño entre los 2.000 y 20.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>.



**Figura 6.71** Distribución porcentual de los costes de explotación de un MBR

En esta misma Figura se puede ver que el coste energético es el que más repercute dentro de los costes de explotación de un MBR representando el 40% de éstos, frente al personal que es un 28%, o la gestión de residuos que es un 16%.

Hay que tener en cuenta que la reposición de membranas no ha sido contemplada para distribución de costes representada, dado que las pocas reposiciones que ha habido, han sido por mal manejo y no por vida útil de las membranas.

En comparación a un tratamiento de fangos activos convencional donde aproximadamente la energía representa el 35%, el personal 25 % y los residuos un 22%, el coste energético sigue representando una mayor cuantía en los MBR, sin embargo, en un tratamiento de fangos activos en aireación prolongada con eliminación de nitrógeno este porcentaje es similar.

### 6.5.3 Costes de implantación y explotación de los MBRs frente otros tratamientos de regeneración

#### Costes de implantación

En el apartado anterior se han estimado los costes de implantación de MBR estudiados, cuyos valores se recogen en la Tabla 6.37.

**Tabla 6.37** Costes de implantación de MBR

Capacidad de la EDAR	€·m <sup>3</sup> ·d	€·h·e <sup>-1</sup>
Plantas de 2.000 a 20.000 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	1.900 - 625	-
Plantas de 2.000 a 140.000 h-e	-	1.000 - 100

En el caso de tratamientos convencionales de aireación prolongada con eliminación de nitrógeno, seguido de un tratamiento de regeneración convencional (físico-químico + filtración + desinfección), los costes de implantación oscilan entre 850 y 730 €·m<sup>3</sup>·d para plantas de 8.000 a 15.000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>. Para este mismo rango de población los MBRs cuestan entre 960 y 700 €·m<sup>3</sup>·d, valores ligeramente superiores al convencional.

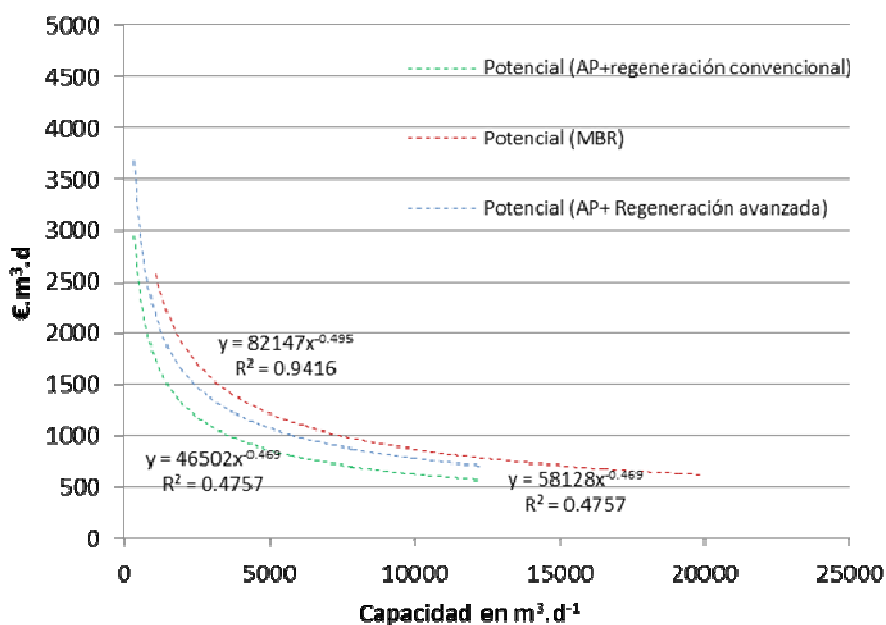
Para obtener un efluente similar al de los MBRs, las EDARs precisan añadir un tratamiento de regeneración avanzado, con un sistema de membranas de ultrafiltración, que encarece los costes de la instalación. En este caso los costes para la planta completa oscilarían entre 1.250 y 1.050 €·m<sup>3</sup>·d para el mismo rango de caudal tratado de 8.000 a 15.000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>.

En la Figura 6.72 se representa las tendencias de los costes de implantación de AP-N-D seguidas de tratamientos de regeneración, tipologías 1 y 2 del capítulo 5.2.2, frente a los MBRs estudiados.

Con los datos disponibles se podría decir que los costes de implantación de un MBR con eliminación de nutrientes y estabilización aerobia de fangos en un tamaño de planta de 2.000 a 20.000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> es alrededor de un 10% mayor que los costes de una aireación prolongada con eliminación de nutrientes y un tratamiento posterior de regeneración avanzado (ultrafiltración) y alrededor de un 30% mayor que los costes de una aireación prolongada, con eliminación de nutrientes y un tratamiento posterior de regeneración convencional.

Tras el análisis de costes se denota, que un MBR se diferencia de un proceso convencional de fangos activos en términos de costes de implantación, en el coste de las membranas y las necesidades de automatización de la planta, aunque hay un ahorro importante en la obra civil debido a la inexistencia de decantadores secundarios y de tratamiento de regeneración. Además, las necesidades de espacio para la implantación de un MBR son menores, lo que se traduce en un ahorro

en el coste de adquisición de los terrenos. Estos elementos hacen del MBR un sistema muy competitivo a partir de cierta capacidad, tal y como muestra la Figura 6.72, en términos de costes de implantación frente tratamientos convencionales que precisan añadir un tratamiento de regeneración.



**Figura 6.72** Costes de implantación en  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  de MBR, AP-TRA y AP-TRC

#### Costes de explotación

En el apartado anterior se han estimado los costes de explotación de aquellos MBR estudiados que pueden situarse entre 0,2 y 0,45  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$  de agua residual tratada. Respecto a la eliminación de materia orgánica para plantas con un agua bruta con concentraciones normales de  $\text{DBO}_5$  y caudales por encima del 50% del de diseño, los valores estarían entre 0,5-4,5  $\text{€}\cdot\text{kg DBO}_5 \text{ eliminada}^{-1}$ . Se toman los costes de explotación de AP-N-D de similares capacidades a los MBRs estudiados y se añade el coste que supondría un tratamiento de regeneración convencional o avanzado, Tabla 6.38 y Figura 6.73.

**Tabla 6.38** Costes de explotación en  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$  de MBR, AP-ND con TRC y TRA

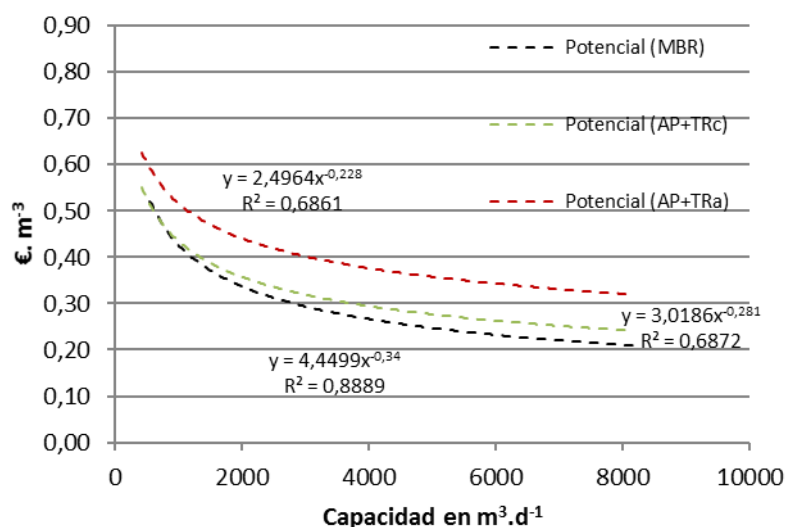
Capacidad ( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	AP+TRC <sup>(1)</sup>	AP+TRA <sup>(2)</sup>	MBR <sup>(3)</sup>
2.000 -10.000	0,35-0,22	0,45-0,30	0,32-0,19

<sup>(1)</sup> Aireación prolongada con eliminación de nutrientes y tratamiento de regeneración convencional <sup>(2)</sup> Aireación prolongada con eliminación de nutrientes y tratamiento de regeneración avanzado <sup>(3)</sup> MBR con eliminación de nutrientes y sin reposición de membranas

En los costes de explotación anteriormente expuestos no se ha tenido en cuenta el coste de reposición de las membranas. Para tener en cuenta dicho coste, se puede suponer una duración de las membranas de 8-10 años, lo que representa 0,04  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ . Este coste es menos del 20% del total de los costes de explotación.

Los costes de las membranas están siendo cada vez más competitivos por los que su reposición está dejando de ser un factor limitante para la implantación de los MBRs.

Respecto a los costes de explotación, el término de energía es el más relevante, siendo en las EDAR el 33% del coste de explotación y en los MBR sobre el 40%.



**Figura 6.73.** Costes de explotación en  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$  de MBR, AP-TRC y AP-TRA

Como puede observarse en la Tabla 6.39, el coste energético de un MBR no difiere mucho de una EDAR en AP a la que se le añade un tratamiento de regeneración convencional, e incluso tiene menos gasto energético que una AP que se le añade un tratamiento de regeneración avanzado.

**Tabla 6.39** Demanda energética de diferentes tipos de EDARs

Tipo de EDAR	Energía ( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Coste Energía <sup>(1)</sup> ( $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ )
MBR	0,8-1,2	0,06-0,11
FAC (AP-N-D)	0,4-0,8	0,04-0,08
FAC (AP-N-D) + TRC	0,6-1,0	0,06-0,1
FAC (AP-N-D) + TRA	1-1,2	0,1-0,12

<sup>(1)</sup> 0,11 € por kWh de media

En las curvas coste-capacidad presentadas, se observa una tendencia más acusada en la disminución de los costes frente al aumento de la capacidad en el caso de los MBRs que en los TRC y TRA tras una AP-N-D, lo que indica que existe un umbral de capacidad donde los MBRs son más competitivos que las otras dos opciones de regeneración dadas.

En la Tabla 6.40, se recoge el coste de inversión de tratamientos de regeneración convencionales de proyectos de ejecución con IVA (21%) y sin beneficio industrial y gastos generales (19%) y actualizados a 2011 con el objetivo de poder comparar con los costes de MBR establecidos anteriormente.

La media del coste de inversión de tratamientos convencionales de regeneración que tienen una capacidad entre 5.000 a 20.000  $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  es de unos 100  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  sin IVA mientras que en la Tabla 5.23 se da un rango de 28 a 48  $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}$  para el Tipo 2 correspondiente al tratamiento valorado en la Tabla 6.40. Esta diferencia de coste de inversión es debido al incremento de los precios (IPC) del año 2009 al 2011, donde uno y otro estudio se realizaron, a los costes de obra de llegada de las conducciones y acondicionamiento del terreno para la implantación del tratamiento de regeneración, que no se tuvieron en cuenta en los datos aportados en el capítulo 5.2.

Con estos datos se puede estimar que el coste de implantación de tratamientos convencionales de regeneración que tienen una capacidad entre 5.000 a 10.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> está sobre los 115 €.m<sup>-3</sup>.d como coste en proyecto de ejecución en 2011 sin incluir los gastos generales ni el beneficio industrial aplicado ni IVA.

Respecto a los costes de implantación de los tratamientos de regeneración avanzados, aquellos que incluyen membranas tipo UF o MF, Tipo 1 de la Tabla 5.23 están entre 185 y 398 €.m<sup>-3</sup>.d, siendo la media de los tratamientos consultados en 2011 de 430 €.m<sup>-3</sup>.d (proyectos de ejecución Canal de Isabel II y ACA sin IVA). En este caso los costes no han subido tanto en relación al trabajo publicado en 2009 debido al abaratamiento de las membranas y el aumento de la oferta de casas comerciales que sirven este tipo de sistemas. Además, los proyectos consultados para los datos aportados en el capítulo 5.2 tenían capacidades menores que los vistos en 2011.

**Tabla 6.40** Costes de implantación de tratamientos de regeneración convencional

Tratamiento	Año de construcción	Capacidad m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	Coste euros	Coste €. m <sup>-3</sup> .d
Lloret de Mar	1994	19992	2187825	109.44
Castell Platja d'Aro	1990	15000	2135657	142.38
Figueres 1	2006	3840	1043199	271.67
Figueres 2	2008	14400	851184	59.11
Blanes	2002	19200	1712675	89.20
Rubí	2002	27000	2751228	101.90
Carles de la Ràpida	2009	19200	1070953	55.78
Cehegín	2008	6987	798975	114.35
Alcantarilla	2008	13000	1216721	93.59
Totana	2009	6000	938191	156.37
Blanca	2009	4992	911360	182.56
Abarán	2009	4700	1246815	265.28
La Unión	2009	4100	977975	238.53
Cieza	2009	10000	1337319	133.73
Lorca	2009	20016	2098800	104.86
Sant Llorenc	2009	1200	213302	177.75

Con estos datos el coste de inversión de tratamientos avanzados de regeneración que tienen una capacidad entre 5.000 a 10.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> está sobre los 430 €.m<sup>-3</sup>.d como coste en proyecto de ejecución en 2011 sin incluir los gastos generales ni el beneficio industrial aplicado ni IVA.

En la Tabla 6.41 se muestra el coste de inversión sin IVA actualizados a 2011 de plantas depuradoras de fangos activos en AP con capacidades comprendidas entre 5.000 a 10.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>. El coste medio de implantación de este tipo de depuradoras es de unos 600 €.m<sup>-3</sup>.d sin incluir los gastos generales ni el beneficio industrial aplicado.

Con los datos aportados anteriormente en la Tabla 6.42 se recogen los costes medios de implantación de instalaciones de AP que se les ha añadido un tratamiento de regeneración convencional o avanzado en el mismo rango de capacidad de tratamiento.

Como puede verse en la Tabla 6.42 los costes de implantación de una AP-TRC son un 25,5 % inferior a un tratamiento MBR. En caso de comparar el MBR con un TRA homólogo en calidad, el coste de implantación le beneficia, en tratamientos con capacidad entre 5.000 y 10.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>.

**Tabla 6.41** Costes de implantación de aireaciones prolongadas

Instalaciones	Capacidad $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	Habitantes equivalentes	Coste inversión	Coste $\text{€} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$
Utrera	9696	48000	6160000	635,31
Ripoll	9000	45000	4992948	554,77
Barbastro	8640	25000	5937250	687,18
Puigcerdà	8300	29742	3380722	407,32
Loja	7524	30096	2177829	289,45
Monzón	7500	27500	5890500	785,40
Tarazona	7440	24000	5297875	712,08
Valls (municipio)	7200	33720	2726560	378,69
Manlleu	7160	44153	4458025	622,63
Caspe	6000	28500	5001700	833,62
Alcañiz	5400	19800	4277625	792,15
Carchuna-Calahonda	5250	21000	4835155	920,98
Baza	5000	25000	3402148	680,43

**Tabla 6.42** Costes de implantación en  $\text{€} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$  de una AP-TRC, AP-TRA y MBR

AP-TRC	AP-TRA	MBR
715	1.030	960

El coste de explotación de un tratamiento de regeneración convencional es 0,08 a 0,12  $\text{€} \cdot \text{m}^{-3}$  según las entidades que explotan este tipo de tratamiento y el de un tratamiento de avanzado 0,18  $\text{€} \cdot \text{m}^{-3}$ , muy parecido a lo dado en capítulo 5.2.

En la Tabla 6.43 se muestran los costes de explotación de aireaciones prolongadas con capacidades entre 5.000 y 10.000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  en 2011, para poder hacer el mismo ejercicio que con los costes de implantación. El coste medio de explotación de este tipo de instalaciones es de 0,22  $\text{€} \cdot \text{m}^{-3}$  incluyendo el manejo y la disposición de residuos y fangos.

En la Tabla 6.44 se muestran los resultados medios obtenidos de sumar a una aireación prolongada de capacidades entre 5.000-10.000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  y un tratamiento de regeneración convencional y avanzado para la totalidad del caudal de la EDAR.

A parte de los costes, en caso de no tener que reutilizar todo el efluente de una EDAR da ventaja a los tratamientos de regeneración convencionales y avanzados frente a un MBR.

A medida que la capacidad aumenta, los costes de depuración bajan más rápidamente que los tratamientos de regeneración, sobre todo los avanzados, ya que las membranas se dimensionan por caudal y los tratamientos de depuración por carga. Esto quiere decir que a más caudal a tratar más módulos de membranas se precisan y el coste incrementa proporcionalmente, sin embargo, en depuración el coste decrece exponencialmente.

En el caso de los MBR se da la paradoja de tener que dimensionar por carga y por caudal al tener unas membranas integradas en el sistema. La tendencia en este caso es que a mayor capacidad del MBR menor es coste por  $\text{m}^3$  tratado y lo hace de forma también exponencial tal como se muestra en las curvas dadas anteriormente.

**Tabla 6.43** Costes de explotación de una aireación prolongada

Instalación	Capacidad $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	Habitantes equivalentes	Tratado $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	€. $\text{año}^{-1}$	€. $\text{m}^{-3}$
Caldes de Malavella	2132	6574	2013,63	163994,7	0,22
Agramunt	2700	18000	1898,85	187796,9	0,27
Sta Maria de Palautordera	3255	15841	1951,78	255974,1	0,36
Balaguer	3750	18750	4769,40	367804,7	0,21
Centelles	5333	35553	3652,23	489243,5	0,37
Manlleu	7160	44153	4923,44	585651,1	0,33
Valls	7200	33720	2904,47	348917,8	0,33
Puigcerdà	8300	29742	8391,25	713745,4	0,23
Berga	8300	41500	4175,40	385566,9	0,25
Ripoll	9000	45000	4029,60	499559,5	0,34
Santomera	4000	27311	2975,31	11702,34	0,25
Lorquí	5000	20036	3214,27	18200,46	0,18
Torrepacheco	5000	16655	3114,71	18923,80	0,16
Beniel	5000	16708	2864,23	14529,33	0,20
Alhama	5400	18384	2724,92	14509,15	0,19
Totana	6000	24434	4616,29	29773,16	0,16
Mula	6000	54507	2414,50	8410,62	0,29
Archena	7500	44282	4780,10	30160,99	0,16
Yecla	8000	40942	4422,87	40041,90	0,11
Caravaca	8000	25977	4182,78	17866,80	0,23
Ceuti	8000	44062	2791,71	12914,41	0,22
Cieza	10000	58989	5118,93	40526,06	0,13

Como puede deducirse de la Tabla 6.44, los costes de explotación de un sistema de regeneración convencional son equiparables a los de un MBR mientras que si comparamos esta tecnología con una EDAR que se le incluye un TRA el coste de explotación es un 20% mayor.

**Tabla 6.44** Costes de explotación en €. $\text{m}^{-3}$  de AP-TRC, AP-TRA y MBR

AP-TRC	AP-TRA	MBR
0,31	0,40	0,32

Este hecho hace pensar que para capacidades por encima de  $10.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  los MBRs son más ventajosos en implantación que una EDAR a la que se le añade un TRA y prácticamente los mismos costes de explotación si se opera con un TRC aunque en este caso los costes de implantación son un 20% mayor.



### **Sobre la reutilización de efluente depurados en España**

1. En España se reutilizan las aguas de origen residual urbano desde que empezaron los primeros planes de saneamiento y depuración, siendo el país de la UE que más caudal reutiliza, con unos 408 hm<sup>3</sup> anuales (796,8 hm<sup>3</sup> concesionados y una capacidad total de regeneración estimada de 1011,8 hm<sup>3</sup>). El 71% del caudal reutilizado se destina al uso agrícola, seguido del uso ambiental con el 17,7 %.
2. Según las estimaciones realizadas, se podrían reutilizar como máximo 1.800 hm<sup>3</sup> anuales lo que cubriría únicamente el 5% de las demandas hídricas totales, sin embargo, existen regiones como canarias donde este recurso supone más del 27% del total de los recursos disponibles, siendo, por tanto, estratégico para el desarrollo de la zona.
3. De las 322 actuaciones inventariadas, 216 tenían tratamientos de regeneración (149 en funcionamiento, más del 30% del caudal total reutilizado sin tratamiento de regeneración), el más extendido es del tipo filtro arena seguido de una desinfección mediante hipoclorito, aunque recientemente este tratamiento se ha sustituido por un físico-químico con decantación lamelar, filtro de arena y radiación ultravioleta, con objeto de cumplir con lo exigido en el RD 1620/2007, quedando el hipoclorito, como tratamiento final de mantenimiento de la red y de la calidad del agua regenerada hasta el punto de uso.
4. La reutilización ha empezado aparecer como parte de los programas de medidas en los planes hidrológicos de cuenca, para paliar presiones como las extracciones de aguas superficiales o subterráneas, o como objetivo medioambiental, por ejemplo, evitando un vertido en zona sensible. Aun así, sigue siendo un recurso de uso puntual, utilizado en el manejo de sequías, dependiendo de la existencia o no de otras fuentes de suministro, lo cual limita su desarrollo y mantenimiento dentro de la planificación hidrológica.
5. El estudio de la situación de la reutilización de efluentes depurados en España muestra que todavía quedan por resolver cuestiones referentes a indicadores de calidad, modelos de gestión, recuperación de costes, contaminantes emergentes, buenas prácticas, eficiencia de los tratamientos o la aceptación pública. La falta de información centralizada y accesible de esta actividad, además de generar desconfianza, podría dificultar la toma de decisiones por parte de las diferentes administraciones a la hora de afrontar, por ejemplo, una futura normativa europea sobre esta actividad.
6. El desarrollo de la reutilización implica a diferentes niveles de administración y usuarios. Unificar metodologías de gestión, control, y planificación en este recurso es de vital importancia para conseguir una concienciación social y una minimización de los riesgos.

### **Sobre el desarrollo normativo de la reutilización de efluente depurados**

1. La reutilización de aguas residuales urbanas ha sido una práctica habitual en zonas con déficit hídrico, lo que generó inicialmente una dispersión de recomendaciones y buenas prácticas. En 2007 se publica el RD 1620/2007, donde se establece el marco jurídico para la reutilización de efluentes depurados con objeto de garantizar la salud pública cubriendo algunos aspectos medioambientales incluso agronómicos.

---

2. Realizando un análisis de las normativas de reutilización a nivel internacional, se podría decir que existen dos tendencias o escenarios, tipo USEPA donde se establecen unos indicadores y valores máximos, donde el tratamiento de regeneración es el responsable de la calidad final necesaria en función del uso y la gestión se realiza como si fuese agua de abastecimiento, y tipo OMS, basada en la gestión del riesgo, donde se establece un nivel de tolerancia ajustado al desarrollo socioeconómico de cada país y las necesidades de cada actuación de reutilización. En este último caso, el tratamiento de regeneración es una posible barrera más dentro de otra serie de medidas de protección y la gestión se dirige a la identificación y análisis de puntos de control (APPCC).

3. El RD es más exigente en calidad que las recomendaciones establecidas por la OMS y menos que lo requerido por la USEPA, en lo que se refiere, por ejemplo, a valores máximos admitidos en indicadores de contaminación fecal. Se ha optado por una reglamentación basada en unos indicadores microbiológicos y físico-químicos, con unos valores máximos admitidos, unas frecuencias de muestreo y unos criterios de conformidad, frente a la tendencia de gestión del riesgo.

4. El RD 1620/2007 no adopta ningún criterio sobre los tratamientos necesarios para asegurar la calidad que se exige según usos, se dan unas recomendaciones en una guía sin validez legal, por tanto, no está regulado el procedimiento para obtener estas calidades pudiendo tener repercusión, por ejemplo, en la generación de subproductos en caso de la desinfección.

5. En el estudio y evaluación del RD se han detectado deficiencias conceptuales, de fondo y jurídicas, dudas de interpretación y problemática de aplicación, cuestiones técnicas de desarrollo, y hasta defectos de redacción. Desde diferentes sectores se realizan sugerencias como cambio respecto a la frecuencia de muestreo para determinados parámetros o la posibilidad de contemplar el uso para abastecimiento bien de forma directa o indirecta. Por tanto, el RD ha sido un hito dentro de la normalización de esta práctica, pero requiere de modificaciones.

## **Sobre los tratamientos de regeneración para el cumplimiento de la normativa y sus costes.**

1. Tras el estudio de cada unidad de tratamiento y el comportamiento que tienen las diferentes ERAs frente al cumplimiento de las calidades establecidas en el RD 1620/2007 se concluye que la tipología compuesta de un físico-químico con decantación lamelar, más filtro de arena seguida de una desinfección mediante radiación ultravioleta y dosificación final de hipoclorito como desinfección residual, es apropiada para todos los usos excepto aquellos que requieren de una turbidez por debajo de 2 UNT, donde se precisaría de un tratamiento que incluya una unidad de membranas, con tendencia a la ultrafiltración. El coste de implantación y explotación medio de la tipología sin ultrafiltración es de 38 €.m<sup>-3</sup>.d y 0,075 €.m<sup>-3</sup> respectivamente, y con membranas, de 291 €.m<sup>-3</sup>.d y 0,17 €.m<sup>-3</sup>.

2. En caso de necesitar bajar el contenido en sales se tiende a utilizar electrodiálisis reversible frente a ósmosis inversa, siendo la línea de tratamiento propuesta la compuesta por físico-químico con decantación lamelar, más doble filtración de arena con lavado en continuo, seguida de una electrodiálisis reversible y una desinfección por radiación ultravioleta más hipoclorito. El coste medio de implantación de la línea de tratamiento con desalación mediante EDR, es de unos 408 €.m<sup>-3</sup>.d, inferior que mediante OI debido a su bajo coeficiente de recuperación, aunque los costes de explotación son similares, de 0,40 €.m<sup>-3</sup> para ambas líneas.

3. El tratamiento de desinfección mediante radiación UV más dosificación de hipoclorito de mantenimiento (total de cloro combinado residual de 0,2 mg.L<sup>-1</sup>) es el que menos repercusión económica tiene dentro del conjunto de unidades de las tipologías de tratamiento adoptadas en lo referente al coste de explotación. Sin embargo, los pretratamientos son fundamentales para realizar una buena desinfección y generar el mínimo de subproductos posibles tras la dosificación de

---

hipoclorito. En caso de la radiación ultravioleta la transmitancia del influente debe estar por encima del 50% y no debería clorarse con SS y DBO<sub>5</sub> por encima de los 10 mg.L<sup>-1</sup>.

4. En el caso de recarga directa de acuíferos se opta por añadir a la tipología con membranas de ultrafiltración una unidad de OI para evitar otro tipo de contaminantes, como los nitratos, y prevenir la presencia de otros posibles contaminantes como los emergentes.

## **Sobre los MBR como tratamiento de regeneración**

1. Los MBRs son una opción en la reutilización de efluentes depurados cuando no se dispone de espacio y se requieren calidades elevadas del efluente, ausencia en E. Coli. El volumen total de aguas regeneradas mediante MBR, es de 89 hm<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, siendo el uso medioambiental el más importante, 43% de lo tratado seguido del uso agrícola con un 31%.

2. En 2014 se inventariaron 55 MBRs de las cuales el 58% son de MFH y el 48% MPP. En general la tendencia es a utilizar MFH en capacidades altas del tratamiento por compactibilidad.

3. Los costes de implantación de un MBR oscilan entre 3.200-2.000 €.m<sup>-3</sup>.d en capacidades de 1.000 a 2.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>, sin embargo, para capacidades por encima de los 8.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> los costes están por debajo de 1.000 €.m<sup>-3</sup>.d . Respecto a los costes de explotación, serían de 0,2 - 0,5 €.m<sup>-3</sup> para plantas que depuran más del 50% del caudal de diseño y tratan cargas normales de DBO<sub>5</sub> en plantas con capacidades de diseño por debajo de los 5.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>. Para plantas de mayor capacidad, el factor escala puede mejorar los ratios de coste.

4. El coste de explotación medio de un tratamiento de regeneración convencional es de 0,10 €.m<sup>-3</sup> y el de uno avanzado sobre los 0,18 €.m<sup>-3</sup>. El coste de implantación y explotación de una EDAR es exponencialmente menor a medida que aumenta la capacidad de la misma, siendo menor de 0,3 €.m<sup>-3</sup> en capacidades por encima de los 10.000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>. Por tanto, se ha estimado que, a partir de esta capacidad, los MBR son más competitivos en coste de implantación y explotación que una EDAR seguida de un tratamiento de regeneración avanzado y un 20 % mayor en implantación que una EDAR con tratamiento de regeneración convencional siendo el coste de explotación muy similar.



---

## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

- ACA, 2003. Agencia Catalana del Agua. Criterios de QUALITY del Agua Depurada según uso.
- AEAS, 2006. Estudio sobre las tecnologías de membranas utilizadas en los tratamientos de regeneración de aguas residuales.
- AEAS, 2011. Manual de Buenas Prácticas de Uso de Aguas Regeneradas. Comisión quinta de tratamiento de aguas residuales.
- Angelakis, M. Marecos do Monte F., Asano T., 1999. The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. Pergamon, vol. 33, No. 10, pp. 2201-2217.
- Aquarec, 2006. Water Reuse System Management Manual. EVK1-CT2002-00130. European Commission.
- ATV, 2000. Dimensioning of single-stage activated sludge plants. German ATV-DVWK rules and standards.
- AWWA, 2008. The Ultraviolet Disinfection Handbook. Bolton J., Cotton, A. American Water Works Association, 150 Páginas.
- Barhi and F. Brissaud, 2002. Guidelines for Municipal Water Reuse in the Mediterranean Countries. WHO Regional Office for Europe, Euro Project Office, MAP, Athens, Greece, p. 62.
- BDR, 2009. Informe sobre los resultados de la Base de Datos de Reutilización de Efluentes depurados en España. R. Iglesias, E. Ortega. CEDEX-MAGRAMA.
- Brepols C., 2011. Operating large scale membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. IWA publishing.
- Brissaud F. et al., 1996. Residence time distribution and disinfection of secondary effluents by infiltration percolation.
- California Code of Regulations, 2001. Excerpts from the Health and Safety Code, Water Code, and Titles 22 and 17 of the. Purple book. California Health Laws Related to Recycled Water.
- Catalinas P., 2002. La reutilización de los efluentes en el marco de una gestión sostenible del agua. Ingeniería Civil nº 128/2002.
- CEDEX, 2011. Guía técnica para la caracterización de medidas a incluir en los planes hidrológicos de cuenca. Informe técnico para el MAGRAMA.
- CEDEX, 2008. XXV curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo III.
- CEDEX, 2009. Estudio sobre la fiabilidad y eficacia de las tecnologías de regeneración y sus costes asociados. Informe técnico para el MAGRAMA.
- CONAMA, 2014. Congreso Nacional de Medioambiente. Incumplimientos de la Directiva 91/271/CEE. Gemma Torres. Dirección General del AGUA. MAGRAMA.
- Collins, H. F., and R. E. Selleck., 1972. Process kinetics of wastewater chlorination. University of California, Berkley, California, Sanitary Engineering Research Laboratory, Report No. 72-5. 91 p.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 1999. Plan Hidrológico de la Cuenca del Guadalquivir.
- Confederación Hidrográfica del Tajo, 1999. Plan Hidrológico de la Cuenca del Tajo.

- 
- Consejería de Sanidad de la Generalitat de Cataluña, 1994. Guía para la prevención del riesgo sanitario derivado de la reutilización de las aguas depuradas y Guía para el diseño y control de sistemas de reutilización.
- Consejería de Sanidad del Gobierno Balear, 1995. Guía para la Reutilización de las Aguas Depuradas.
- Consejería Medio Ambiente de las Islas Baleares, 2000. Plan Hidrológico de Baleares.
- Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria ,1999. Plan Hidrológico de Gran Canaria.
- Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible de Johannesburgo, 2002.
- CWA 15897, 2008. Submerged membrane bioreactor (MBR) technology, CEN.
- DBK, 2007. Informe espacial DBK. “Depuración de Aguas”. Grupo CESCE. Código 1362.
- DHS, 2007. Department of Health Services. Treatment technology report for recycled water. Division of drinking water and environmental management. State of California.
- Directiva 2006/7/CE. Aguas de Baño. Diario Oficial de las Comunidades Europeas núm. L327/1-71.
- Directiva 60/2000/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece un marco europeo de actuación en el ámbito de la política del agua (DMA). Diario Oficial de las Comunidades Europeas núm. L327/1-71.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas núm. L 135 de 30/05/1991 pág. 0040-0052.
- Directiva 98/15/CE por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo en relación con determinados requisitos establecidos en su anexo I. Diario Oficial de las Comunidades Europeas núm. L 67/29.
- Directiva 2008/105/CE de 16 de diciembre de 2008, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, por la que se modifican y derogan ulteriormente las Directivas 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE y 86/280/CEE del Consejo, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE [Diario Oficial L 348 de 24.12.2008].
- ENMSR, 2010. Estrategia Nacional para la Modernización Sostenible de los Regadíos 2010-2015. Promotor Dirección General del Agua. MAGRAMA.
- Entidad de Saneamiento de Aguas ,2004. Segundo Plan de Saneamiento, Depuración y Reutilización de la Comunidad Valenciana.
- ESAMUR, 2012. Sistema general de regeneración y reutilización de las aguas residuales urbanas de la región de Murcia. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Consejería de agricultura y agua.
- ESAMUR, 2011. Estudio sobre influencia de los MLSS en la permeabilidad de la membrana.
- EPSAR, 2014. Memoria de Gestión 2014. Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana.
- EPRS, 2015. Cost of Non-Europe. Parlamento Europeo Think Tank publicaciones.
- European Commission, Membrane Technologies for Water Applications Highlights from a selection of European Research Projects. Publications Office of the European Union, 2010: p. 40.
- FAO, 2013. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?.

- 
- Ferrero G., Rodríguez-Roda I., Comas J. (2012). Automatic control systems for submerged membrane bioreactors: a state-of-the-art review. *Water Research*, 46 (11), 3421–3433.
- Friedrich, H., Mertsch, V., 2003. *Membrane Technology for Waste Water Treatment*, FiW Verlag. Institute of Environmental Engineering, Germany.
- G. Kamizoulis, A. Bahri, F. Brissaud, and A.N. Angelakis, 2001. *Wastewater recycling and reuse practices in Mediterranean region: Recommended Guidelines*.
- Godfrey, S., Howard, G., 2004. *Water Safety Plants for urban piped water supplies in developing countries*. WEDC, Loughborough, UK.
- Havelaar AH, van Olphen M., Drost YC ,1993. RNA bacteriophages are adequate model organism for enteric viruses in fresh water. *Appl. Environ. Microbiol.*56(9)2956-2952.
- Iglesias R., Simón P, Moragas L., Rodríguez-Roda I, Arce, A., 2015. Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science* XXXX.
- Iglesias R. Ortega E., Simón P, Moragas L., Rodríguez-Roda I. et e al. 2014. Guía técnica para la implantación de biorreactores de membrana. *Manuales y recomendaciones CEDEX*.
- Iglesias R. et al, 2012. Avances en el diseño y la operación de los MBR: La experiencia española Aceptado en diciembre de 2012. *Ingeniería Civil* nº 168/2012, pág. 21-30.
- Iglesias R. 2012. Normativa para la reutilización de efluentes depurados. *Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras*. CEDEX.
- Iglesias R. Ortega E Batanero G y Quintas L., 2010. Water reuse in Spain: Data overview and costs estimation of suitable treatment trains *Desalination* 263 (2010) 1–10.
- Iglesias R. y Batanero G., 2009. *Tecnologías específicas para la regeneración de las aguas depuradas*. *Curso de Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de EDAR*. CEDEX.
- Iglesias R., y Batanero G., 2009. *Estudio sobre la fiabilidad y eficacia de las tecnologías de regeneración implantadas en España*. *Líneas de tratamiento válidas para los usos establecidos en RD 1620/2007 y sus costes asociados*. Informe para el MAGRAMA-CEDEX, Madrid, 2009.
- Iglesias R., Ortega E., 2009. Reuse of treated municipal wastewater effluents in Spain: regulations and most common technologies, including extensive treatments, *Desalination and Water Treatment* 4 (2009) 148–160.
- Iglesias R., 2009. Water reuse in Spain: data overview and costs estimation of suitable treatment trains. *INNOVA-MED CONFERENCE “Water Reclamation and Reuse 8 - 9 October 2009*, Girona, España.
- Iglesias R., Ortega E., 2008. Present and future of wastewater reuse in Spain, *Desalination* 218 (2008) 105–119.
- Iglesias R., 2006. *Directrices para el avance de la regeneración y reutilización de aguas en España*. *Jornadas sobre la integración del agua regenerada en la gestión de los recursos*. Consorci de la Costa Brava.
- Iglesias R., Ortega, 2006. *Presente y futuro de la reutilización de las aguas residuales en España*. *AQUAREC “Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater”*
- Iglesias R., Ortega E. y Batanero G., 2005. *La situación de la Reutilización de las Aguas Residuales Depuradas en España*. *Problemas Actuales y Perspectivas Futuras*. *Jornadas organizadas por el MMA sobre la actualización de los criterios de la reutilización de agua residual tratada*, Madrid del 20 al 23 de junio de 2005.
- INE, 2008. *Estadísticas e indicadores del Agua*. ISSN: 1579-2277.

- 
- IPQ, 2005, norma portuguesa sobre reutilização de águas residuais urbanas tratadas na rega  
Creek Common Ministerial Decision, 2011. Measures, limits and procedures for reuse of  
treated wastewater.
- ISTAC-Instituto Canario de Estadística, 2010. Encuesta sobre Suministro y Tratamiento del Agua.
- Italian Legislative decree nº185, 2003. Sobre calidad de las aguas y su tratamiento
- Italian Legislative decree nº152, 2006. Sobre la reutilización de aguas.
- IWA, 2008. Water reuse. An International Survey of current practice issues and needs. Scientific  
and technical report Nº 20. Blanca Jimenez and Takashi Asano.
- Journal Officiel de la République Française, 2010 Arrêté nº 2 relatif à l'utilisation d'eaux issues du  
traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines.
- Judd, S. 2011. The MBR Book, Principles and applications of membrane bioreactors in water and  
wastewater treatment, 2nd Edition, Elsevier, Oxford, UK.
- Judd, S., 2006. The MBR Book, Principles and applications of membrane bioreactors in water and  
wastewater treatment, Elsevier, Oxford, UK.
- Lesjean, B., Huisjes E.H. Survey of European MBR market: trends and perspectives. Desalination,  
231, 2008, pages 71-81.
- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. BOE núm. 161, de 6 de julio de 2001,  
páginas 24228 a 24250.
- Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan  
Hidrológico Nacional BOE 149, páginas 21486 a 21856.
- MAGRAMA, 2015. Plan hidrológico de Cuenca ciclo 2015-2021.
- MAGRAMA, 2014. Nota de prensa sobre la modernización de los regadíos y uso eficiente del agua.
- MAGRAMA, 2010. Guía para la aplicación del Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el  
régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas
- MAGRAMA, 2009. Versión preliminar del Plan Nacional de Reutilización de Aguas.
- MAGRAMA, 2000. Libro Blanco del Agua. Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de  
Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- MED POL. ,2005. Municipal Water Reuse Guidelines for the Mediterranean Region. Organization,  
Geneva.
- Metcalf & Eddy, 2007. Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. McGraw Hill  
professional, 1570 páginas.
- Ministry of Environment and Rural and Marine Affairs, National Plan for Water Quality, Sanitation  
and Purification (NPWQSP), 2007-2015, 2007. Nº. L64/37-51, Brussels, 2006.
- Monclús, H. (2011). Development of a decision support system for the integrated control of  
membrane bioreactors. Tesis doctoral, Universidad de Girona ([www.colmatar.es](http://www.colmatar.es)).
- N. V. Paranychianakis, M. Salgot, S. A. Snyder & A. N. Angelakis (2015) Water Reuse in EU States:  
Necessity for Uniform Criteria to Mitigate Human and Environmental Risks, Critical  
Reviews in Environmental Science and Technology, 45:13, 1409-1468
- Official Journal of the European Communities, Decision n ° 2455/2001/CE. Nº L 331 of  
15/12/2001 p. 0001 – 0005, Brussels, 2001.
- OMS, 2004. Guidelines for Drinking Water Quality 3rd Edition. World Health Organisation,  
Geneva.



- 
- OMS, 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and grey water in agriculture and Aquaculture. Vol 2 Wastewater use in agriculture. World Health Organisation, Geneva.
- Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid BO. Ayuntamiento de Madrid 22/06/2006 num. 5709 pag. 2410-2443.
- PNCA, 2007. Plan Nacional de Calidad de las Aguas. Aprobado por Consejo de Ministros el 8 junio de 2007.
- PNSD, 1995. Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales. Resolución de 28 de abril de 1995, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995.
- Real Decreto 1/2001 de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Boletín Oficial del Estado núm. 176, 24/7/2001 pág. 26791-26817.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas BOE núm.294 de 8 diciembre 2007, pág. 50639
- Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos. BOE núm. 101, de 27 de abril de 2002, páginas 15558 a 15566.
- Real Decreto 509/1996 de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre. Boletín Oficial del Estado 77/1996.
- Real Decreto 606/2003 de 23 de mayo por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VIII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Boletín Oficial del Estado 171/2003 pág. 28055.
- Real Decreto 849/86R Boletín Oficial del Estado 157/1986 pág. 10638, de 11 de abril por el que se establece el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- Real Decreto 907/2007, de 6 de julio por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. Boletín Oficial del Estado 162/ 2007 pág 29361
- Real Decreto núm.294 de 8 diciembre 2007, pág. 50639. RD1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado.
- Real Decreto-ley 11/1995 de 28 de diciembre por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. Boletín Oficial del Estado 312/1995 de 30-12-1995, pág. 37517.
- Real Decreto 60/2011, de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas. BOE 19 /Sec. I pág. 6854-6870.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
- Real Decreto 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.
- Salgot M., Brissaud F., 2005. Orientaciones comunitarias (UE) sobre la calidad de las aguas regeneradas. Jornadas sobre la integración del agua regenerada en la gestión de los recursos. Consorcio de la Costa Brava.
- T. Asano, F. Burton, H. Leverenz, R. Tsuchihaschi, G. Tchobanoglous, Water reuse: Issues, Technologies and applications, Metcalf &Eddy, McCraw-Hill, NY, 2007.

---

Title 22, Division 4, Chapter 3, Water Recycling criteria, Sections 60301 et seq State of California, 2001. Code of Regulation. Environmental Health. Department of Health Services, Berkeley, California.

USEPA ,2004. Guidelines for Water Reuse. EPA/625/R-04/108, September 2004.

USEPA, 2011. Water Treatment Manual: Disinfection.

USEPA, 2012. Guidelines for Water Reuse. EPA/600/R-12/618, September 2012.

WEF, 2001. Membrane Bioreactors Manual of Practice N36. Water Environmental Federation.

#### **WEBGRAFÍA**

- <http://www.alfalaval.com>
- <http://www.huber.de/>
- <http://www.kochmembrane.com/>
- <http://www.kubota-mbr.com/>
- <http://www.microdyn-nadir.de/cms/>
- <http://www.toraywater.com/>
- <http://www.water.siemens.com>
- [www.norit.com](http://www.norit.com)
- [www.zenon.com](http://www.zenon.com)
- [www.onlinembr.info](http://www.onlinembr.info)
- <http://www.magrama.gob.es>
- [www.gobiernodecanarias.org/agricultura/aguas/aguacanarial.html](http://www.gobiernodecanarias.org/agricultura/aguas/aguacanarial.html)
- <http://demoware.eu/e>
- <http://aca-web.gencat.cat>
- [www.canalgestion.es](http://www.canalgestion.es)
- [www.juntadeandalucia.es](http://www.juntadeandalucia.es)
- [www.aquarec.org](http://www.aquarec.org)
- <https://circabc.europa.eu/w/browse/657861df-abc2-4d8a-bb4a-227e12c72dad>
- <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/>
- [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_tc\\_browse.htm?commid=5261836](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=5261836)
- [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/PP\\_2009P006.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/PP_2009P006.aspx)
- [http://www.europarl.europa.eu/thinktank/es/document.html?reference=EPRS\\_STU\(2015\)536369](http://www.europarl.europa.eu/thinktank/es/document.html?reference=EPRS_STU(2015)536369)

## Anexo I. Fichas-cuestionario para la realización de la Base de Datos de Reutilización

### A1 Tabla tratamiento. Campos del formulario:

Tamaños. Todos los campos en los que se pueda introducir texto tienen un tamaño máximo de 200 caracteres, excepto el campo “Sistema de explotación” cuya longitud máxima es de 100 caracteres.

Campos Obligatorios. “Comunidad Autónoma” y “Cuenca Hidrográfica”.

Otros. Para introducir datos en los campos de: “Comunidad Autónoma”, “Municipio” y “Cuenca Hidrográfica” hay que utilizar el botón “buscar” para seleccionar un registro de la lista que muestra. No se puede teclear texto directamente.

### B1 Tabla EDAR. Campos del formulario:

- *Tamaños.* “8) Otros” 200 caracteres, “Nombre de la Edar” y “Donde” 100 caracteres, “Código de la EDAR” y “Empresa o entidad operadora de la EDAR” 50 caracteres. Los campos numéricos 15 caracteres.
- *Campos Obligatorios.* “Nombre de la EDAR”.

### B2 Tabla EDAR. Campos del formulario:

- *Tamaños.* Todos los campos son numéricos con una longitud de 15 caracteres.

**Ficha Cuestionario**

**FICHA CUESTIONARIO DE INSTALACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS**

A 1 | B 1 | B 2 | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6

**B.- DATOS REFERENTES A LA EDAR DE LA QUE PROVIENE EL EFLUENTE A RESUTILIZAR.**

Nombre de la EDAR: CA\_NOMBRE

Código de la EDAR: CA\_CODIGO

Empresa o entidad operadora de la EDAR: CA\_EMPRESA

Sistema de tratamiento de la EDAR:

- 1) Pretratamiento CA\_PRETRATAMIENTO
- 2) Tratamiento Primario CA\_PRIMARIO
- CA\_AIREACION  3) Tratamiento Secundario por aireación prolongada
- CA\_SECUNDARIO  4) Tratamiento Secundario de fangos activados convencional
- CA\_FANGOS  5) Tratamiento Secundario de fangos activados con eliminación de nutrientes
- CA\_CULTIVO  6) Tratamiento Secundario mediante cultivo fijo
- CA\_LAGUNAJE  7) Tratamiento por Lagunaje
- CA\_OTROS  8) Otros CA\_OTROS

Caudal de Diseño (m3/d): CA\_DISENO

Caudal Depurado (Hm3/año): CA\_DEPURADO

Punto de vertido: X CA\_B1X Y CA\_B1Y Donde: CA\_DONDE

Insertar | Modificar | Eliminar | Cerrar

**Ficha Cuestionario**

**FICHA CUESTIONARIO DE INSTALACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS**

A 1 | B 1 | B 2 | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6

Calidad de efluente depurado (valores medios mensuales del último año)

- DBD<sub>5</sub>:

min. CA\_DBO medio CA\_DBO2 máx. CA\_DBO3

- Sólidos en suspensión:

min. CA\_SUSPENSION medio CA\_SUSPENSION2 máx. CA\_SUSPENSION3

- Turbidez:

min. CA\_TURBIDEZ1 medio CA\_TURBIDEZ2 máx. CA\_TURBIDEZ3

- Conductividad eléctrica (mS/cm2):

min. CA\_ELECTRICA1 medio CA\_ELECTRICA2 máx. CA\_ELECTRICA3

Insertar | Modificar | Eliminar | Cerrar

**C1 Tabla Regeneración. Campos del formulario:**

- *Tamaños.* "Observaciones" 200 caracteres. "Código Instalación" y "Donde" 50 caracteres. Los campos numéricos tienen una longitud de 15 caracteres.
- *Restricciones.*

"Estado de desarrollo de la actuación" Cuando está seleccionado "0) No Prevista" no es posible introducir datos en los campos de la solapa "A1" excepto Comunidad Autónoma y Cuenca Hidrográfica (ya éstos son siempre obligatorios). Tampoco se podrán introducir datos en los campos de las solapas "C2", "C3", "C4", "C5" y en los campos "Fecha de la puesta en marcha" y "Capacidad del tratamiento de regeneración" de la solapa "C1"

Cuando está seleccionada la opción “1)” o “2)” se permitirá inserción en los campos de la solapa “C2” y si la opción es “3)” también se permitirá la inserción en los campos de “C3”, “C4” y “C5”.

- *Otros.* “Estado de desarrollo de la actuación” por defecto se activa la primera opción “0) No Prevista” cuando se hace clic sobre el botón “Insertar”.

### C2 Tabla Regeneración. Campos del formulario:

- *Tamaños.* Todos los campos “Otros” tienen una longitud máxima de 100 caracteres. Todos los campos “Nº Líneas” tienen una longitud de 15 caracteres.

### C3 Tabla Regeneración. Campos del formulario:

*Tamaños.* “f) Observaciones de interés” 200 caracteres. El resto de los campos son numéricos con una longitud de 15 caracteres.

### C4 Tabla Regeneración. Campos del formulario:

- *Tamaños.* “Otros Costes de Interés” 200 caracteres. El resto de los campos son numéricos con una longitud de 15 caracteres.

### C5 Tabla Regeneración. Campos del formulario:

- *Tamaños.* Todos los campos situados en la columna “Nombres Reactivos” tienen un tamaño máximo de 200 caracteres, el resto es de 15 caracteres.

### C6 Tabla Tratamiento. Campos del formulario:

- *Tamaños.* Sin limitación de tamaño.

The screenshot shows a software window titled "Ficha Cuestionario" with a subtitle "FICHA CUESTIONARIO DE INSTALACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS". The form is organized into a grid with columns labeled A1 through C6. The main section is titled "C.- DATOS REFERENTES AL TRATAMIENTO DE REGENERACION." and includes the following fields and controls:

- Código Instalación:** Text field labeled "INSTALACION\_ID".
- Ubicación de la instalación:** Two text fields labeled "CA\_UBICACION" and "CA\_UBICACIONY", with "X" and "Y" labels respectively.
- Estado de desarrollo de la actuación:** Radio buttons for "0) No Prevista", "1) En Proyecto", "2) En Construcción", and "3) En Funcionamiento". A label "CA\_DESARROLLO" is positioned to the right.
- Observaciones:** Text field labeled "CA\_OBS".
- Fecha de la puesta en marcha:** Text field labeled "CA\_PUESTA" with a calendar icon.
- Capacidad del tratamiento de regeneración (m3/d):** Text field labeled "CA\_TRATAMIENTO".
- Tipo Caudal Reutilizado:** Radio buttons for "1) Directo" and "2) Mixto". A label "CA\_TIPOCAUDAL" is positioned to the right.
- Caudal Reutilizado (Hm3/año):** Text field labeled "CA\_REUTILIZADO".
- Punto de vertido:** Two text fields labeled "CA\_C1X" and "CA\_C1Y", with "X" and "Y" labels. A label "Donde:" is followed by a text field labeled "CA\_DONDE".
- Temporalidad de la explotación (días/año):** Text field labeled "CA\_TEMPORALIDAD".

At the bottom of the form, there is a toolbar with icons for "Insertar", "Modificar", "Eliminar", and "Cerrar", along with four green arrow icons pointing right.

**Ficha Cuestionario**

**FICHA CUESTIONARIO DE INSTALACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS**

A 1 | B 1 | B 2 | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6

Sistema de Tratamiento de Regeneración:

**1) Físico-Químico.**  
 Nº Líneas:   
 - Con decantación:   
 - Micro florulación sobre filtro:

**2) Filtración.**  
 Nº Líneas:   
 - De arena por gravedad:   
 - De arena a presión:   
 - De lecho pulsante:   
 - Anillas:   
 - Autolimpiables en dos etapas:   
 - De puente móvil:   
 - Otros:

**3) Membranas.**  
 Nº Líneas:   
 - Osmosis Inversa:   
 - Microfiltración:   
 - Ultrafiltración:   
 - Electrodialísis Reversa:   
 - Biorreactor de membranas:   
 - Otros:

**4) Desinfección**  
 Nº Líneas:   
 - Hipoclorito Sódico:   
 - Dióxido de Cloro:   
 - Cloro Gas:   
 - Rayos Ultravioletas:   
 - Ozono:   
 - Otros:

**5) Sistemas naturales**  
 Nº Líneas:   
 - Lagunaje:   
 - Infiltración:   
 - Humedades:   
 - Filtro verde:

**Ficha Cuestionario**

**FICHA CUESTIONARIO DE INSTALACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS**

A 1 | B 1 | B 2 | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6

Calidad de efluente regenerado (Valores medios durante el último año):

a) Huevos de Nematodos (huevo/l): min:  med:  max:

b) Escherichia coli (ufc/100 ml): min:  med:  max:

c) DBO<sub>5</sub>: min:  med:  max:

c) Sólidos en Suspensión (mg/l): min:  med:  max:

d) Turbidez (NTU): min:  med:  max:

e) Conductividad (mS/cm2): min:  med:  max:

f) Observaciones de interés:

Ficha Cuestionario

### FICHA CUESTIONARIO DE INSTALACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS

A 1 | B 1 | B 2 | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6

Costes de Operación (sin IVA):

	(kwh/año)	Euros/kwh	Euros/m3
Energía	CA_ENERGIA1	CA_ENERGIA2	CA_ENERGIA3

	(Euros/año)	Euros/m3
Reposición de equipos	CA_REPOSICION1	CA_REPOSICION2

Coste total (incluye personal, mantenimiento, etc.) Euros/m3: CA\_COSTETOTAL

Otros Costes de Interés: CA\_OTROSCOSTES1

Insertar
 Modificar
 Eliminar
 Cerrar

Ficha Cuestionario

### FICHA CUESTIONARIO DE INSTALACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS

A 1 | B 1 | B 2 | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6

Nombre Reactivos	Kg/año	Euros/kg	Euros/m3
CA_NOMBREREACTIVOS1	CA_REACTIVOS1	CA_REACTIVOS2	CA_REACTIVOS3
CA_NOMBREREACTIVOS2	CA_REACTIVOS4	CA_REACTIVOS5	CA_REACTIVOS6
CA_NOMBREREACTIVOS9	CA_REACTIVOS10	CA_REACTIVOS11	CA_REACTIVOS12
CA_NOMBREREACTIVOS13	CA_REACTIVOS14	CA_REACTIVOS15	CA_REACTIVOS16
CA_NOMBREREACTIVOS17	CA_REACTIVOS18	CA_REACTIVOS19	CA_REACTIVOS20
CA_NOMBREREACTIVOS21	CA_REACTIVOS22	CA_REACTIVOS23	CA_REACTIVOS24
CA_NOMBREREACTIVOS25	CA_REACTIVOS26	CA_REACTIVOS27	CA_REACTIVOS28
CA_NOMBREREACTIVOS29	CA_REACTIVOS30	CA_REACTIVOS31	CA_REACTIVOS32
CA_NOMBREREACTIVOS33	CA_REACTIVOS34	CA_REACTIVOS35	CA_REACTIVOS36

Insertar
 Modificar
 Eliminar
 Cerrar

**Tabla: Concesión. Campos del formulario:**

Tamaños. Los campos de texto “Nº Expediente”, “Otros” y “Observaciones” tienen un tamaño máximo de 200 caracteres. Los campos numéricos “Caudal de la Concesión punta” y “Caudal de la Concesión” tienen una longitud máxima de 15 caracteres.

**Restricciones.**

“Concesión Administrativa” si está seleccionado “1) Sin Concesión” no se permite la introducción de ningún dato excepto en el “Nº de Expediente” y “Observaciones” situados en la solapa “Concesiones”.

“Usos Permitidos” dependiendo del uso seleccionado la aplicación activará los campos relacionados con ese uso situados en las solapas “Usos 1/5”, “Usos 2/5”, “Usos 3/5”, “Usos 4/5” y “Usos 5/5”,

Otros. “Concesión Administrativa” por defecto se activa la primera opción “1) Sin Concesión” cuando se hace clic sobre el botón “Insertar”.



**CONCESIONES ADMINISTRATIVAS**

Concesiones | Usos 1/5 | Usos 2/5 | Usos 3/5 | Usos 4/5 | Usos 5/5

Nº de Expediente:

Concesión Administrativa:
   
 1) Sin Concesión
   
 2) En Trámite
   
 3) Concedida

Fecha de Petición:

Fecha de Concesión:

CA\_CON

- Caudal de la Concesión punta (l/s):

- Caudal de la Concesión (m3/año):

- Usos permitidos

CA\_USOS

- Domiciliarios
- Serv. urbanos incl. parques-jardines y med. carreteras
- Riegos agrícolas
- Riegos de campo de golf
- Uso industrial
- Estanques y masas de aguas circulantes
- Acuicultura
- Recarga de acuíferos
- Otros

CA\_OTROS

Observaciones:

Insertar | Modificar | Eliminar | Cerrar

**CONCESIONES ADMINISTRATIVAS**

Concesiones | Usos 1/5 | Usos 2/5 | Usos 3/5 | Usos 4/5 | Usos 5/5

D.- USO DEL AGUA REGENERADA

Tipo y Características del Uso: 1) Usos Domiciliarios.

Código de identificación:

Caudal (Hm3/año):

Población Conectada (nº hab.):

Ubicación del uso: X:  Y:

Nombre y dirección de los usuarios:

2) Usos y Servicios Urbanos  
(incluye riego de zonas verdes, medianas, fuentes, etc.).

Código de identificación:

Caudal (Hm3/año):

Tipo de Uso:

Ubicación del uso: X:  Y:

Nombre y dirección de los usuarios:

Insertar | Modificar | Eliminar | Cerrar

**Tabla: Concesión. Usos. Campos del formulario:**

- Uso 1/5. Tamaños. “Nombre y dirección de los usuarios” 200 caracteres. “Código de identificación” 50 caracteres. “Caudal”, “Ubicación del uso X - Y” 15 caracteres. “Tipo de uso” 100 caracteres.
- Uso 2/5. Tamaños. “Nombre y dirección de los usuarios” 200 caracteres. “Código de identificación” 50 caracteres. “Caudal”, “Superficie regada”, “Ubicación del uso X - Y” 15 caracteres.

- Uso 3/5. Tamaños. "Nombre y dirección de los usuarios" 200 caracteres. "Código de identificación" 50 caracteres. "Caudal", "Superficie Regada", "Número de Hoyos", "Ubicación del uso X - Y" 15 caracteres. "Tipo de cultivo" 100 caracteres.
- Uso 4/5 Tamaños. "Nombre y dirección de los usuarios" 200 caracteres. "Código de identificación" 50 caracteres. "Caudal", "Ubicación del uso X - Y" 15 caracteres.
- Uso 5/5 Tamaños. "Nombre y dirección de los usuarios" 200 caracteres. "Código de identificación" 50 caracteres. "Caudal", "Ubicación del uso X - Y" 15 caracteres.

**CONCESIONES ADMINISTRATIVAS**

Concesiones | Usos 1/5 | Usos 2/5 | **Usos 3/5** | Usos 4/5 | Usos 5/5

3) Riegos agrícolas.

Código de identificación: CA\_3CODIGO

Caudal (Hm3/año): CA\_3CAUDAL

Superficie regada (Ha): CA\_SUPERFICIE3

Ubicación del uso: X: CA\_3UBICACION Y: CA\_3UBICACIONY

Nombre y dirección de los usuarios: CA\_3NOMBRE

Indicar el que proceda:

CA_INVERNADERO	<input checked="" type="checkbox"/>	- Cultivos de Invernadero
CA_CRUDO	<input checked="" type="checkbox"/>	- Cultivos de consumo en crudo
CA_PASTOS	<input checked="" type="checkbox"/>	- Pastos
CA_CRUDO2	<input checked="" type="checkbox"/>	- Cultivo para no consumo en crudo
CA_INDUSTRIALES	<input checked="" type="checkbox"/>	- Cultivos Industriales / Frutales
CA_FORESTALES	<input checked="" type="checkbox"/>	- Cultivos forestales

Insertar | Modificar | Eliminar | Cerrar

**CONCESIONES ADMINISTRATIVAS**

Concesiones | Usos 1/5 | Usos 2/5 | Usos 3/5 | **Usos 4/5** | Usos 5/5

4) Campos de golf

Código de identificación: CA\_4CODIGO

Caudal (Hm3/año): CA\_4CAUDAL

Superficie regada (Ha): CA\_4SUPERFICIE

Tipo de cultivo (de proceder): CA\_4TIPO

Nº de hoyos: CA\_4HOYOS

Ubicación del uso: X: CA\_4UBICACION Y: CA\_4UBICACIONY

Nombre y dirección de los usuarios: CA\_4NOMBRE

5) Uso Industrial.

Código de identificación: CA\_5CODIGO

Caudal (Hm3/año): CA\_CAUDAL4

Ubicación del uso: X: CA\_5UBICACION Y: CA\_5UBICACIONY

Nombre y dirección de los usuarios: CA\_5NOMBRE

Insertar | Modificar | Eliminar | Cerrar

Concesiones

## CONCESIONES ADMINISTRATIVAS

Concesiones | Usos 1/5 | Usos 2/5 | Usos 3/5 | Usos 4/5 | Usos 5/5

**6) Estanques y masas de agua circulantes**

Código de identificación:

Caudal (Hm3/año):

Ubicación del uso: X:  Y:

Nombre y dirección del usuario:

**7) Acuicultura**

Código de identificación:

Caudal (Hm3/año):

Ubicación del uso: X:  Y:

Nombre y dirección del usuario:





 Insertar
  Modificar
  Eliminar
  Cerrar

Concesiones

## CONCESIONES ADMINISTRATIVAS

Concesiones | Usos 1/5 | Usos 2/5 | Usos 3/5 | Usos 4/5 | Usos 5/5

**8) Recarga de Acuíferos**

Código de identificación:

Caudal (Hm3/año):

Ubicación del uso: X:  Y:

Nombre y dirección del usuario:

**9) Otros usos:**

Código de identificación:

Caudal (Hm3/año):

Ubicación del uso: X:  Y:

Nombre y dirección del usuario:





 Insertar
  Modificar
  Eliminar
  Cerrar



Anexo II. Ejemplos de ficha para conocimiento de las líneas de tratamiento aplicables en función de las calidades establecidas en el R.D 1620/2007

FLOCULACIÓN COAGULACIÓN	
Nombre EDAR	EDAR DEL SURESTE
Localidad	Agüimes, Arinaga
Fecha de puesta en marcha	1999
Coste de implantación (€)*	
Número de líneas existentes y en funcionamiento	1
Caudal de agua de alimentación de diseño y actual (m <sup>3</sup> /día)	335 m <sup>3</sup> /h diseño ---440 m <sup>3</sup> /h actual
Caudal de agua tratada de diseño y actual (m <sup>3</sup> /día)	335 m <sup>3</sup> /h diseño ---440 m <sup>3</sup> /h actual
Porcentaje de pérdidas de caudal de diseño y actual (%)	No hay pérdidas. Se está tratando más caudal
Tiempo de retención en coagulación y floculación, de diseño y actual (segundos y / o minutos)	16 min en diseño. 12 min actual
Número de etapas en floculación	1
Potencia de agitación en cada etapa, tanto en coagulación como floculación, de diseño y actual, (kW)	Floculación 1,1 kW Coagulación 3 kW
Dosis de los productos químicos consumidos (coagulante, floculante, y otros en su caso), valores de diseño y actuales (mg/l) indicando composición y riqueza	Floculación: 0,28 ppm Coagulación: 175 ppm
Productos químicos puros consumidos (coagulante, floculante y otros en su caso) valores de diseño y actuales (kg/día)	
Energía total consumida en el proceso, valores de diseño y actual (kWh/d)	Floculación 26,4 Kw, Coagulación 72 Kw
Costes de explotación totales desglosados (€/m <sup>3</sup> )* (personal, energía, reactivos, mantenimiento y otros especificando)	Reactivos 0,08 €/m <sup>3</sup>
Problemas de funcionamiento:	No presenta problemas de funcionamiento
Valoración del proceso, ventajas e inconveniente	

TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN CON RECIRCULACIÓN DE ARENA EN CONTINUO	
Nombre EDAR	ETER Bco. Seco
Localidad	Las Palmas de Gran Canaria
Fecha de puesta en marcha	noviembre 2002
Coste de implantación (€)*	2 M€ (contrata)
Marca del filtro y número de etapas del mismo	2 Etapas. Marca: Aqua Factory
Número de líneas existentes y en funcionamiento	20 líneas de filtros
Caudal de agua de alimentación de diseño y actual (m <sup>3</sup> /día)	Caudal diseño: 20.000 m <sup>3</sup> /día; Caudal actual: 10.000 m <sup>3</sup> /día
Caudal de agua tratada de diseño y actual (m <sup>3</sup> /día)	Caudal diseño: 20.000 m <sup>3</sup> /día; Caudal actual: 10.000 m <sup>3</sup> /día
Carga hidráulica, de diseño y actual, en cada etapa en su caso ( m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h)	8,15 m <sup>3</sup> /h; TDH: 30 min
Porcentajes de eliminación obtenidos en SS, DBO <sub>5</sub> , P <sub>t</sub> , de diseño y actual (%)	etapa)
Espesor del lecho filtrante, en cada etapa en su caso (m)	6m (1ª etapa); 4m (2ª etapa)
Composición y granulometría del lecho, en cada etapa en su caso (mm de diámetro y coeficiente de uniformidad)	arena silicea: 1,3-1,5 mm
Caudal de recirculación continua de agua-arena para su lavado, de diseño y actual, en cada etapa en su caso(m <sup>3</sup> /día)	-
Pérdidas de agua por lavado (m <sup>3</sup> /día y %), en cada etapa en su caso	5-10 %
Caudal de aire para el accionamiento del airlift para la recirculación en continuo de arena para su lavado, en cada etapa en su caso (Nm <sup>3</sup> /día)	100 l/min por línea
Hipoclorito sódico consumido en el filtro, en cada etapa en su caso (kg/día)	8 ppm
Energía total consumida en el proceso, valores de diseño y actuales (kWh/día)	
Costes de explotación totales desglosados (€/m <sup>3</sup> )* (personal, energía, reactivos, gestión de fangos, analítica, mantenimiento y otros especificando)	0,05 €/m <sup>3</sup>
Problemas de funcionamiento:	Falta de instalación de un tamiz para retirar materias gruesas que producen obstrucción, por ejemplo, plásticos.
Valoración del proceso, ventajas e inconvenientes	Ventajas: buena calidad de agua tratada Inconvenientes: Altos costes

**TRATAMIENTO DE DESINFECCIÓN MEDIANTE NaClO**

Nombre EDAR	ETER Bco. Seco
Localidad	Las Palmas de Gran Canaria
Fecha de puesta en marcha	noviembre 2002
Coste de implantación (€)	-
Riqueza del producto empleado (%) y autonomía de almacenamiento (días)	-
Dosis del producto empleado con la riqueza anteriormente indicada (ppm) y consumo diario (kg/día), en ambos casos de diseño y actual.	4-5 ppm
Punto de dosificación y forma de contacto (tubería o cámara de cloración)	-
Tiempo de contacto de diseño y actual y, en caso de emplear cámara de cloración, volumen de la misma	-
Caudal de agua a desinfectar, de diseño y actual (m <sup>3</sup> /día)	-
Energía total consumida en el proceso, valores de diseño y actuales (kWh/día)	-
Costes de explotación totales desglosados (€/m <sup>3</sup> ) (personal, energía, reactivo, analítica, mantenimiento y otros especificando)	-
Problemas de funcionamiento	-
Valoración del proceso, ventajas e inconvenientes	-

**TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN CON E.D.R.**

Nombre EDAR	JINAMAR
Localidad	TELDE
Fecha de puesta en marcha	Septiembre del 2006
Capacidad de la instalación (m <sup>3</sup> /día)	5000 m <sup>3</sup> /día
Caudal tratado actualmente (m <sup>3</sup> /día)	0 m <sup>3</sup> /día
Coste de implantación (€)*	10.000.0000 (con obra completa)
Tipo de pretratamiento existente (operaciones unitarias: fisicoquímico con filtración, ultra o microfiltración, filtros de cartucho, indicando paso en µm...)	Ultrafiltración en BRMO. Filtro de cartuchos de 10 µm de paso
Marca, modelo y material de las membranas	IONICS
Número de líneas, etapas por líneas y pilas por etapa de diseño y en funcionamiento	5 líneas con 2 etapas por línea
Número de pares de células por pila	600 pares de células
Dimensión efectiva de las membranas (mm x mm)	
Presión de funcionamiento (kpa) ( según proyecto y real)	
Pérdida de presión en cada etapa (kpa) ( según proyecto y real)	
Factor de conversión(%)	85%
Productos químicos de proceso (inhibidores de incrustación, hipoclorito sódico, ácido clorhídrico a salmuera y ácido clorhídrico a electrodos): tipo de reactivo, dosis (mg/l) y riqueza (%) y consumo (kg/día)	Acido clorhídrico a salmuera y ácido clorhídrico a electrodos). Hexametafosfato sódico como desincrustante e hipoclorito sódico para desinfección
Limpiezas químicas: tipos de reactivos, frecuencia de limpiezas (nº/año), dosis(mg/l) y riqueza (%) y consumos (kg/mes)	No está en funcionamiento
Garantía (años).Indicar condiciones	
Reposición de membranas (%anual) y coste (€/m <sup>3</sup> )	
Costes de explotación totales desglosados (€/m <sup>3</sup> )* (personal, energía, reactivos, analítica, mantenimiento, reposición de membranas y otros especificando)	No está en funcionamiento
Problemas de funcionamiento: (limpiezas no previstas en diseño, ensuciamiento o rotura de membranas, avería de equipos...)	
Valoración del proceso, ventajas e inconvenientes	

**TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN CON ÓSMOSIS INVERSA (O.I.)**

Nombre EDAR	ETER Bco. Seco
Localidad	Las Palmas de Gran Canaria
Fecha de puesta en marcha	noviembre 2002
Capacidad de la instalación (m <sup>3</sup> /día)	5.000 m <sup>3</sup> /día
Caudal tratado actualmente (m <sup>3</sup> /día)	5.000 m <sup>3</sup> /día
Coste de implantación (€)*	700.000 € (contrata)
Tipo de pretratamiento existente (operaciones unitarias: fisicoquímico con filtración, ultra o microfiltración...)	microfiltración MEMCOR
Marca, modelo y material de las membranas	Hydraulics / Filmtec
Número de líneas, etapas por líneas y módulos por etapa de diseño y en funcionamiento	3 bastidores; 2 etapas
Superficie filtrante por módulo (m <sup>2</sup> )	-
Flujo específico	Diseño: 23 lmh
Presión de funcionamiento (kpa) ( según proyecto y real)	20 kpa
Factor de conversión(%)	66 % (en agua)
Productos químicos de proceso (inhibidores de incrustación, para reducción de cloro y para control microbiológico): tipo de reactivo, dosis (mg/l) y riqueza (%) y consumo (kg/día)	antiincrustaste 6ppm bisulfito 4ppm
Limpiezas químicas:tipos de reactivos,frecuencia de limpiezas (nº/año), dosis(mg/l) y riqueza (%) y consumos (kg/mes)	sosa y detergente (1%); limpieza ácida con ácido clorhídrico
Garantía (años).Indicar condicioes	-
Reposición de membranas (%anual) y coste ( €/m <sup>3</sup> )	Actual: 0%; Diseño: 10% Reactivos: 0,017 €/m <sup>3</sup> Energía: 0,101 €/m <sup>3</sup> Consumibles: 0,069 €/m <sup>3</sup>
Costes de explotación totales desglosados ( €/m <sup>3</sup> )* (personal, energía, reactivos, analítica, mantenimiento, reposición de membranas y otros especificando)	
Problemas de funcionamiento:(limpiezas no previstas en diseño, ensuciamiento o rotura de membranas, avería de equipos...)	ensuciamiento orgánico
Valoración del proceso, ventajas e inconvenientes	Ventajas: calidad del agua producto Inconveniente:ensuciamiento orgánico

**ANÁLISIS DEL AGUA DE ALIMENTACION Y FRECUENCIA**

Temperatura (°C)	22
pH (ud.)	7,5
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	<10
SS (mg/l)	<5
Turbidez (NTU)	1
SDI	1,5
Conductividad (µS)	1800
Escherichia coli (ufc/100ml)	

**ANÁLISIS DEL AGUA OSMOTIZADA Y FRECUENCIA**

DBO <sub>5</sub> (mg/l)	<5
SS (mg/l)	<5
Turbidez (NTU)	<0,5
SDI	
Conductividad (µS)	195
Escherichia coli (ufc/100ml)	





## Anexo III. Ficha-cuestionario sistemas comerciales de filtración por membrana

<b>CARACTERISTICAS GENERALES DE LA MEMBRANA</b>
Marca (fabricante)
Membrana
Tipo de proceso (MF, UF)
Tipo de configuración (tubular, fibra hueca, plana)
Tipo de filtración ( succión, presión, gravedad, sifón)
Material de la membrana
Propiedades (no- iónica, hidrofílica, etc.)
Diámetro de poro nominal (micras)
Diámetro de poro absoluto (micras)
Espesor de la fibra o tubo (mm)
Tipo de refuerzo
Tipo de flujo (fuera- dentro perpendicular, tangencial, de dentro a fuera, etc.)
Tipo de Garantía
Vida estimada de las membranas (años)
Resistencia al cloro máxima (ppm)
Sustancias que le afectan ( generales y específicos, listado con concentraciones máximas permitidas)
<b>CARACTERISTICAS GENERALES DE MÓDULOS Y BASTIDORES</b>
Modelo seleccionado
Dimensiones del módulo (mxmxm)
Dimensiones del cassette o bastidor (mxmxm)
Nº de elementos membrana por módulo (fibras o tubos)
Nº de módulos por cassette o bastidor
Nº de bastidores por línea (máximo)
Nº Líneas diseñadas (recomendación)
Superficie de membrana por módulo ( m <sup>2</sup> )
Superficie de membrana por cassette o bastidor ( m <sup>2</sup> )
Empaquetamiento cassette o bastidor ( m <sup>2</sup> de membrana/m <sup>3</sup> en bastidor)
Densidad de membranas (m <sup>2</sup> de membrana/m <sup>3</sup> de tanque)
Configuración (sumergida o externa)
Sistema de membranas integrado o en tanque aparte
<b>REFERENCIAS (BRM urbanos)</b>
Referencias: Nombre de la planta, ubicación, año puesta en marcha, Q diseño, Q operación y contacto
<b>PARAMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN</b>
Parámetros de diseño (T, Ef, Cm, Qrecirculación, flujo, PTM, MLSS, tipo de proceso, etc.)
Tipo de pretratamiento necesario
Temperatura a la que se refieren los parámetros de esta tabla (°C)
MLSS en tanque de membranas (g/l) (mín. máx. y óptimo)
MLSS en tanque biológico (g/l) (óptimo)
Caudal de recirculación habitual
Punto de incorporación de recirculación

Edad de fango mínima (días)
Características del fango a filtrar
Caudal bruto / Caudal neto
Flujo bruto de diseño (l/m <sup>2</sup> h) o
PTM máxima (bar)
Rango de temperatura de operación
Rango pH operación
Flujo neto operación (l/m <sup>2</sup> h)
Rango de PTM operación (bar)
Rango permeabilidad (l/m <sup>2</sup> .h. bar)
SADm (m <sup>3</sup> aire/m <sup>2</sup> membrana.h)
SADp (m <sup>3</sup> aire/m <sup>3</sup> permeado)
Ciclos de trabajo (minutos filtrado/relajado, contralavando, etc)
¿Se tiene en cuenta el volumen que ocupa membranas para diseño volumen reactor biológico?
SED (demanda de energía específica), Kwh/m <sup>3</sup>
Filtración
Aireación membranas
Aireación biológico
Recirculación
Total
<b>COSTES</b>
Del bastidor en implantación (sin IVA)
Del módulo en implantación (sin IVA)
<b>CALIDADES GARANTIZADAS DEL EFLUENTE</b>
SS, mg/l
Turbidez, UNT
Virus (u.log eliminadas)
E. Coli, ufc/100 ml
SDI
<b>CONTROL DE ENSUCIAMIENTO Y PROTOCOLOS DE LIMPIEZA</b>
<b>ESTRATEGIA DE CONTROL DE ENSUCIAMIENTO</b>
Explicar el sistema de control asociado a las limpiezas y aireación de las membranas, explicando el funcionamiento del contralavados, periodos de relajación en su caso, limpiezas de mantenimiento y recuperación. Se indicará los parámetros utilizados para el control detallando el valor límite a partir del cual se ponen en marcha una u otra actuación.
<b>PROTOCOLOS DE LIMPIEZA Y AIREACIÓN DE LAS MEMBRANAS</b>
<b>LIMPIEZA FÍSICA</b>
<b>Contralavado</b> ( en caso de incluir químicos indicar producto y concentración)
Flujo (l/m <sup>2</sup> h)
Caudal por módulo (l/h)
TMP( bar)
Duración (min.)
Frecuencia (min.)
<b>Relajación</b>
<b>De tenerla:</b>
Duración (min.)
Frecuencia (min.)

<b>LIMPIEZA QUÍMICA</b>	
<b>De mantenimiento</b>	Descripción
	Parámetro indicador (PTM,F, otros)
	Producto
	Concentración (ppm)
	Etapas
	Duración (min.)
	Frecuencia habitual (min.)
	pH
<b>De recuperación</b>	Descripción
	Parámetro indicador
	Producto
	Concentración (ppm)
	Etapas
	Duración (min.)
	Frecuencia habitual (días)
	pH
<b>AIREACIÓN DE MEMBRANAS</b>	
Tipo de aireación (intermitente o continua)	
Tipo de burbuja (fina, media, gruesa)	
Caudal de aire(m <sup>3</sup> /h)/bastidor	
Presión del aire suministrado (bar)	
Duración (min.)	
Frecuencia (min.)	
¿Se tiene en cuenta para el cálculo de la aireación del proceso?	
<b>ESTRATEGIA DE PARADA DE LAS MEMBRANAS</b>	
Explicar las operaciones de stand-by o parada técnica. Formas de operación y protocolos de mantenimiento de las membranas para evitar su deterioro.	
<b>CONTROL DE LA INTEGRIDAD DE LA MEMBRANA</b>	
¿Cómo se detecta?	
¿Cómo se solucionan las roturas?	
¿Aconseja test de integridad?	
SI ( )	NO ( )
<b>INSTRUMENTACIÓN NECESARIA</b>	
Necesaria para el funcionamiento del sistema de membranas	



## Anexo IV. Ficha para el análisis de los costes de implantación y explotación de MBRs de nueva implantación

### FICHA DE COSTES DE IMPLANTACIÓN

Instrucciones para rellenar la ficha	
1)	Hay que rellenar, siempre que sea posible, las celdas marcadas en amarillo
2)	Estas celdas se pueden calcular con la información de las celdas marcadas en amarillo. En caso de no disponer de estos desgloses, rellenar las celdas con el coste total correspondiente.
3)	Todos los datos solicitados se referirán a la línea de MBR en caso de plantas híbridas

Información general	
Nombre de la EDAR:	
Tipo de planta (MBR o híbrida <sup>16</sup> )	
Localidad:	
Entidad gestora:	
Superficie total de la planta, m <sup>2</sup>	
Superficie total de la planta ajustada <sup>17</sup> , m <sup>2</sup>	
Superficie del MBR <sup>18</sup> , m <sup>2</sup>	

Datos básicos de las membranas	
Tipo de MBR: En tanque aparte o sistema integrado	
Marca de membranas:	
Modelo de membranas:	
Superficie total de membrana:	
Nº de bastidores:	
Coste de membranas/Coste total proyecto, %	

Datos básicos de diseño	
Tipo de proceso biológico (convencional o aireación prolongada, con o sin eliminación de nutrientes)	
Tipo de estabilización de fangos (digestión anaerobia, digestión aerobia, cal, etc.)	
Capacidad nominal, h-eq:	
Capacidad nominal, m <sup>3</sup> /d:	
Temperatura mínima, °C	

<sup>16</sup> En caso de que se trate de una planta con varias líneas (híbrida) se indicarán las líneas con las que cuenta, el tipo de tratamiento y el caudal tratado en cada línea. Ejemplo: IFAS (10.000m<sup>3</sup>/d) + MBR (5.000m<sup>3</sup>/d).

<sup>17</sup> Se pretende conocer el espacio real ocupado por la planta, teniendo en cuenta la superficie de las instalaciones y una superficie extra para viales y zonas de paso ajustada a las necesidades de circulación y maniobra de camiones. Por ello, en plantas que dispongan de más parcela de la necesaria, se pide ajustar su superficie con los criterios establecidos.

<sup>18</sup> Reactor biológico y tanque de membranas.

Contaminación	Entrada	Salida	Rto.
1) Concentración de DQO, ppm (entrada y salida)			
2) Concentración de DBO <sub>5</sub> , ppm (entrada y salida)			
3) Concentración de SS, ppm (entrada y salida)			
4) Concentración de N <sub>T</sub> , ppm (entrada y salida)			
5) Concentración de P <sub>T</sub> , ppm (entrada y salida)			
Carga de DBO <sub>5</sub> , kg DBO <sub>5</sub> /d			
Edad de fango, días			
MLSS biológico, g/L			
MLSS membranas, g/L			

Coste de implantación	
Proyecto consultado <sup>19</sup>	
Fecha del proyecto de liquidación: Mes/Año	
Moneda (pesetas o €)	
Costes de implantación estimativo <u>sin</u> presupuesto de pruebas de funcionamiento y puesta en marcha <sup>20</sup> ,	
Costes de implantación estimativo <u>con</u> presupuesto de pruebas de funcionamiento y puesta en marcha <sup>21</sup> ,	
Duración de las pruebas de funcionamiento y puesta en marcha, meses	
Gastos Generales y Beneficio Industrial aplicado, %	

NOTA: Se piden los costes de implantación con y sin presupuesto de pruebas de funcionamiento y puesta en marcha, para valorar si encubren periodos de explotación largos, que en su caso no deberían incluirse en dichos costes.

## FICHA DE COSTES DE EXPLOTACIÓN

Instrucciones para rellenar la ficha
1) Hay que rellenar, siempre que sea posible, las celdas marcadas en amarillo
2) Estas celdas se pueden calcular con la información de las celdas marcadas en amarillo. En caso de no disponer de estos desgloses, rellenar las celdas con el coste total correspondiente.
3) Todos los datos solicitados se referirán a la línea de MBR en caso de plantas híbridas

Información general	
Nombre de la EDAR:	
Tipo de planta (MBR o híbrida <sup>22</sup> )	
Localidad:	
Empresa explotadora:	

<sup>19</sup> Lo ideal es contar con la información del presupuesto de liquidación (obra acabada). Si no fuese posible contar con éste indicar el proyecto del que se han obtenido los datos.

<sup>20</sup> Sin gastos generales y beneficio industrial, con revisión de precios (en su caso) y sin IVA

<sup>21</sup> Sin gastos generales y beneficio industrial, con revisión de precios (en su caso) y sin IVA

<sup>22</sup> En caso de que se trate de una planta con varias líneas (híbrida) se indicarán las líneas con las que cuenta, el tipo de tratamiento y el caudal tratado en cada línea. Ejemplo: IFAS (10.000m<sup>3</sup>/d) + MBR (5.000m<sup>3</sup>/d).

Datos básicos de operación <sup>23</sup>			
PERIODO DE REFERENCIA	2011		
Caudal total tratado, m <sup>3</sup>			
Caudal medio diario, m <sup>3</sup> /d			
Temperatura media, °C			
Contaminación	Entrada	Salida	Rto.
1) Concentración de DQO, ppm (entrada y salida)			
2) Concentración de DBO <sub>5</sub> , ppm (entrada y salida)			
3) Concentración de SS, ppm (entrada y salida)			
4) Concentración de N <sub>T</sub> , ppm (entrada y salida)			
5) Concentración de P <sub>T</sub> , ppm (entrada y salida)			
Carga de DBO <sub>5</sub> , kg DBO <sub>5</sub> /d			
Edad de fango, días			
MLSS biológico, g/L			
MLSS membranas, g/L			

Coste de explotación, €/año	
PERIODO DE REFERENCIA	2011
<b>A. Costes fijos, €/año (1+2+3+4+5)</b>	
<b>1) Personal, €/año</b>	
<b>2) Administración, control y gastos generales, €/año</b>	
<b>3) Gastos de mantenimiento y conservación, €/año</b>	
<b>4) Energía eléctrica - Término de potencia, €/año</b>	
Potencia total contratada, kW	
Potencia instalada en el MBR <sup>24</sup> , kW	
Tarifa de potencia <sup>25</sup> , €/kW	
<b>5) Análisis, €/año</b>	
<b>B. Costes variables, €/año (1+2+3+4)</b>	
<b>1) Energía eléctrica, €/año</b>	
1.1) Término de energía, €/año	
Energía total consumida, kWh/año (suma de facturas mensuales)	
Energía consumida en el MBR <sup>26</sup> , kWh/año	
Tarifa energética <sup>27</sup> , €/kWh	
1.2) Impuesto sobre la electricidad, %	

<sup>23</sup> Datos medios anuales

<sup>24</sup> Estimación de la potencia instalada utilizada en el conjunto del reactor biológico y del tanque de filtración.

<sup>25</sup> Sin impuestos. Se solita la tarifa de potencia aplicada en cada caso. Posteriormente se analizarán y se seleccionará un valor estándar que se aplicará a todas las plantas, para evitar desigualdad en cuanto a precios por ubicación del MBR.

<sup>26</sup> Estimación del consumo energético conjunto del reactor biológico y del tanque de filtración.

<sup>27</sup> Sin impuestos. Se solita la tarifa energética aplicada en cada caso. Posteriormente se analizarán y se seleccionará un valor estándar que se aplicará a todas las plantas, para evitar desigualdad en cuanto a precios por ubicación del MBR.

<b>2) Gestión de fangos y residuos, €/año</b>	
Destino principal del fango <sup>28</sup>	
Producción anual de fangos, Tn/año	
2.1) Coste de transporte, €/Tn	
2.2) Coste de disposición, €/Tn	
Tarifa de gestión del fango <sup>29</sup> (2.1+2.2)	
Coste gestión de residuos (basuras, arenas, grasas, etc.), €/año	
<b>3) Reactivos totales EDAR, €/año</b>	
<b>Para limpieza de membranas (3.1 + 3.2 + etc.)</b>	
3.1) Reactivo 1: indicar cuál	
Consumo anual, kg o m <sup>3</sup> /año	
Precio, €/kg o m <sup>3</sup>	
3.2) Reactivo 2: indicar cuál	
Consumo anual, kg o m <sup>3</sup> /año	
Precio, €/kg o m <sup>3</sup>	
<b>Para otros usos en la EDAR (3.3 + 3.4 + etc.)</b>	
3.3) Reactivo 3: indicar cuál y su uso	
Consumo anual, kg o m <sup>3</sup> /año	
Precio, €/kg o m <sup>3</sup>	
3.4) Reactivo 4: indicar cuál y su uso	
Consumo anual, kg o m <sup>3</sup> /año	
Precio, €/kg o m <sup>3</sup>	
<b>4) Reposición de consumibles, €/año</b>	
4.1) Membranas, €/año	
4.2) Otros, €/año	
<b>Costes de explotación<sup>30</sup>, €/año (A+B)</b>	
<b>Gastos Generales y Beneficio Industrial aplicado, %</b>	

## INDICADORES RELATIVOS

Se propone utilizar indicadores relativos de los costes para conocer el coste de los MBR respecto al caudal y la contaminación, comparar dichos costes entre distintos MBR (con tecnologías diferentes) y con plantas fangos activos convencionales con eliminación de nutrientes, con o sin estabilización de fangos y con sistemas de regeneración que den una calidad de efluente equivalente.

A continuación, se realizan algunas propuestas de posibles indicadores relativos de costes:

Indicadores de costes de implantación	
Indicador 1 - €/m <sup>3</sup> /d	
Indicador 2 - €/h-eq o €/kg DBO <sub>5</sub> eliminada	
Indicador 3 - €/kg N <sub>T</sub> eliminado	

<sup>28</sup> Vertedero, compostaje, agricultura, etc.

<sup>29</sup> Debe incluir el beneficio del gestor.

<sup>30</sup> Sin gastos generales y beneficio industrial y sin IVA



<b>Indicadores de costes de explotación</b>	
<b>Indicadores globales</b>	
Indicador 1 - €/ m <sup>3</sup>	
Indicador 2 - €/ kg DBO <sub>5</sub> eliminada	
Indicador 3 - €/ kg N <sub>T</sub> eliminado	
<b>Indicadores específicos</b>	
Indicador 4 - € <sub>energía eléctrica</sub> <sup>31</sup> /m <sup>3</sup> o kg DBO <sub>5</sub> eliminada	
Indicador 5 - € <sub>reactivos totales EDAR</sub> /m <sup>3</sup> o kg DBO <sub>5</sub> eliminada	
Indicador 6 - € <sub>reactivos limpieza membranas</sub> /m <sup>3</sup> o kg DBO <sub>5</sub> eliminada	

Aprovechando la información solicitada en esta ficha, se presentan algunos otros indicadores, no relacionados con costes, pero que son de interés para la Guía, en concreto para el Capítulo VII “Criterios de implantación”:

<b>Indicadores energéticos</b>	
Indicador 1 - kWh <sub>total EDAR</sub> /m <sup>3</sup> o h-eq	
Indicador 2 – kWh <sub>MBR</sub> /m <sup>3</sup> o h-eq	

<b>Indicadores de superficie</b>	
Indicador 1 - Superficie <sub>total EDAR</sub> /m <sup>3</sup> o h-eq	
Indicador 2 – Superficie <sub>MBR</sub> /m <sup>3</sup> o h-eq	

<sup>31</sup> Incluye coste del término de potencia y del término de energía.



### Publicaciones

- Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors. Iglesias R., Simón P, Moragas L., Rodríguez-Roda I, Arce, A., Water Research XXXX 2015 (enviado).
- Guía técnica para la implantación de biorreactores de membrana. Manuales y recomendaciones. Iglesias R. Simón P, Moragas L., Rodríguez-Roda I. et al., CEDEX 2014. Número de páginas 269.
- Avances en el diseño y la operación de los MBR: La experiencia española. Iglesias, R., et al. Ingeniería Civil nº 168/2012, pág. 21-30.
- Membrane Bioreactor as Alternative Treatment for Water Reclamation in Spain: Comparative Report of Design and Operation Data. Iglesias, R. 8th IWA International Conference on Water Reclamation and reuse. 26-29 septiembre 2011, Barcelona.
- Water reuse in Spain: Data overview and cost estimation of suitable treatment trains. Iglesias, R., et al. Desalination 263 (2010) 1–10.
- Reuse of treated municipal wastewater effluents in Spain: Regulations and most common technologies, including extensive treatments. Iglesias, R. Ortega, E. Desalination and water Treatment. Aceptado en junio 2008. Elsevier. 4(2009) 148-160.
- Present and future of wastewater reuse in Spain. Iglesias, R. Ortega, E. Desalination. Elsevier. 218 (2008) 105-119.

### Contribuciones a congresos, jornadas y cursos

- Normativa para la reutilización de aguas depuradas: Líneas de tratamiento en función de las calidades establecidas en el RD 1620/2007". Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. CEDEX. Edición XXXII. Noviembre 2015, Madrid
- Biorreactores de membranas como tratamiento de regeneración. Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. CEDEX. Edición XXXII. Noviembre 2015, Madrid
- Tecnologías de regeneración a aplicar en función de los usos establecidos en el RD 1620/2007 sobre reutilización de aguas depuradas y sus costes asociados. XII Congreso Español de Salud Ambiental. Desarrollo tecnológico, legislación europea sobre disruptores endocrinos. Desarrollo y aplicación de la normativa. Tecnologías de Tratamiento. 12-13 junio 2013, Granada.
- Tecnologías específicas para la regeneración de efluentes depurados. Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. CEDEX. 2012, Madrid.
- Membrane Bioreactor as Alternative Treatment for Water Reclamation in Spain: Comparative Report of Design and Operation Data. Póster presentado en el 8º Congreso internacional de la IWA sobre reutilización de aguas. Septiembre 2011, Barcelona.

- 
- Tratamientos de regeneración con MBR en España. Jornada de singularidades en la reutilización de las aguas residuales. Instituto de investigación del Agua. Universidad de Barcelona. Octubre 2011, Barcelona.
  - Reutilización de efluentes depurados para el uso agrícola: Tecnología y costes. Curso de ingeniería de regadíos, módulo recursos hídricos para el riego del CEH-CEDEX. Septiembre 2011, Madrid.
  - Estudio sobre la fiabilidad y eficacia de las tecnologías de regeneración y sus costes asociados. XXI Jornadas de SMAGUA. Marzo 2010, Zaragoza.
  - Aguas reutilizadas en España: situación, tecnologías y usos. Máster en gestión fluvial sostenible y gestión integrada de aguas. Universidad de Zaragoza. Noviembre, 2009, Madrid.
  - Water reuse in Spain: data overview and cost estimation of suitable treatment trains. Innova-Med conference: Innovative processes and practices for wastewater treatment and re-use in the Mediterranean regions. Octubre 2009, Girona.



