

**Resumen**

El consumo energético en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es una de las principales partidas presupuestarias de su explotación, por lo que la optimización energética de las instalaciones debe ser un proceso activo y constante. Teniendo en cuenta que el sistema de aireación representa un 64% del consumo energético total, en este trabajo se compara el funcionamiento de una soplante de émbolos rotativos convencional con un equipo turbocompresor de alta velocidad con sistema de levitación magnética, controlando el consumo energético, la contaminación acústica y el mantenimiento. Se concluye que el consumo eléctrico es menor en el turbocompresor, así como su nivel de ruido y los costes de mantenimiento. Este último representa un ahorro del 42%.

**Palabras clave:**

EDAR, eficiencia energética, costes de mantenimiento, contaminación acústica, soplante de émbolos rotativos, turbocompresor con sistema de levitación magnética.

**Abstract**

*Energetic optimization of WWTP aeration system. Comparative analysis of two technologies*

Due to the high cost of the electric power, this study compares the functioning of a conventional blower with rotary pistons and a high speed turbocompressor with magnetic levitation bearings. The parameters studied are: energetic consumption, acoustic pollution and maintenance. It can be observed that the ratio of average consumption of the magnetic levitation turbocompressor in the aeration system is minor than that of the rotary piston blower, which supposes energy savings on having used the first equipment of aeration. In addition, the magnetic levitation turbocompressor issues much less noise than the rotary piston blowers and its maintenance costs supposes a saving of 42% with regard to the cost of the conventional blower.

**Keywords:**

WWTP, energetic efficiency, maintenance costs, acoustic pollution, rotary pistons blower, magnetic levitation turbocompressor.

# Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR. Análisis comparativo de dos tecnologías

Por: David Castell<sup>1</sup>; Mairena García Ventoso<sup>1</sup>; Isabel Tormos Fibla<sup>1</sup>; Carlos Ferrer<sup>1</sup>; José Juan Morenilla<sup>2</sup>; Ignacio Bernacer<sup>2</sup>; Antonio Basiero<sup>2</sup>

**<sup>1</sup> Facsa**

C/ Mayor 82-84 - 12001 Castellón  
Tel.: 964 221 008 - Fax: 964 226 449  
E-mail: info@facsa.com - www.facsa.com

**<sup>2</sup> Entidad de Saneamiento de Aguas de la Comunidad Valenciana (EPSAR)**

C/ Álvaro Bazán, 10, Entlo. - 46010 Valencia  
Tel.: 963 604 555 - Fax: 963 603 469  
<http://epsar.cop.gva.es>

**1. Introducción**

Durante los últimos años, los gestores del sector del agua han visto cómo los costes energéticos han adquirido mayor importancia en la estructura de costes de su actividad. Tanto es así que la constante tendencia al alza del precio de la energía eléctrica y la mayor concienciación social en materia medioambiental obliga, cada vez más, a las empresas a seguir estrategias de ahorro energético.

La importancia presupuestaria de la energía también queda claramente reflejada en la explotación de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR), donde el coste del consumo energético se cifra entre el 15 y el 30% del total de la explotación, siendo el mayor gasto de la planta (Tabla 1).

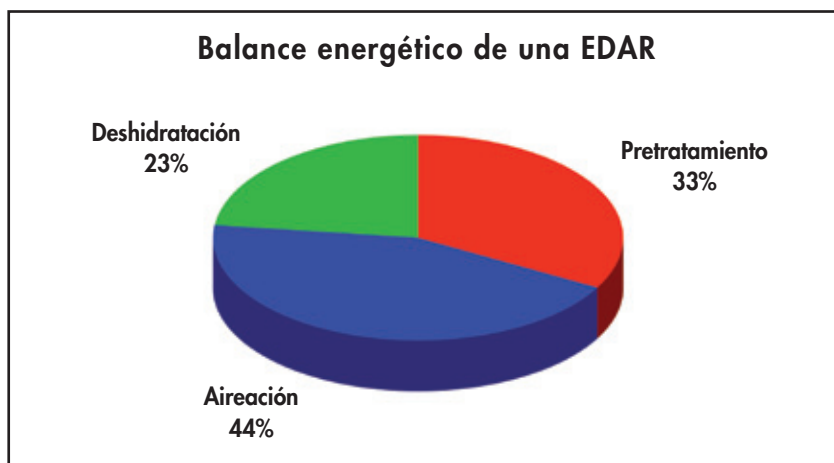
La importancia de este aspecto es de tal magnitud que se han desarrollado normas específicas en la industria para adoptar metodologías de

**Tabla 1**

Tipo de coste	Partida presupuestaria	% presupuesto ejecución material
Gastos fijos anuales	Mano de obra	4 - 15
	Gastos de administración	0,3 - 0,8
	Mantenimiento obra civil	0,1 - 0,9
	Conservación obra civil	0,1 - 0,25
	Mantenimiento equipos	0,5 - 2,5
	Conservación equipos	0,3 - 0,5
Gastos variables anuales	Consumo energético	5 - 20
	Consumo de reactivos	0 - 4
	Eliminación de residuos	0,2 - 0,8

**Tabla 1.** Costes de una EDAR.

*Cuanto mayor es una EDAR, menores son los ratios energéticos para un mismo tratamiento, por lo que existe una economía de escala*



**Figura 1.** Diagrama del balance energético en una EDAR.

trabajo orientadas a la mejora continua en materia de eficiencia energética, como la UNE 216301 sobre sistema de gestión de la eficiencia energética, que la compañía Facsa tiene implantada tanto en las EDAR como en los abastecimientos de agua potable que gestiona. Además, debe tenerse en cuenta que la demanda energética depende del tipo de tratamiento y del tamaño de la instalación. Así, cuanto mayor es la EDAR, menores son los ratios energéticos para un mismo tratamiento, por lo que se puede afirmar que existe una economía en escala. Por tanto, el consumo energético varía de una instalación a otra, dependiendo de factores como el tamaño de la instalación, el tipo de procesos, las etapas de tratamiento y la carga influente (Morenilla, 2007).

El tipo de energía requerido en una EDAR es casi exclusivamente eléctrica, que se aplica para accionar motores (bombas para el transporte de líquidos y lodos, equipos de aireación, equipos de deshidratación y equipos varios). Los equipos de aireación (aireadores superficiales o sumergidos, soplantes y turbocompresores), por su potencia y uso, representan el mayor consumo de la instalación. Les siguen el accionamiento de motores de equipos de deshidratación mecánica, compitiendo también con los equipos de bombeo. Por último, los equipos asociados a la desodorización y

desinfección (en las plantas dotadas con ellos) también pueden tener un consumo significativo de energía eléctrica.

El análisis energético individualizado de los diferentes procesos de una EDAR permite determinar cómo contribuye cada uno de ellos al consumo global de la instalación. Al mismo tiempo, este examen permite definir su patrón de consumo y las variables vinculadas a este (caudal, concentración de oxígeno disuelto, etc.). De este modo, si se realiza un balance energético de todo el proceso en una EDAR, se puede establecer que gasta un 44% de la

energía en aireación, un 23% en deshidratación y un 33% en el pretratamiento (**Figura 1**).

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción de la EDAR

El estudio que se presenta se ha llevado a cabo en la EDAR de Castellón (**Figura 2**). Diseñada para tratar hasta 45.000 m<sup>3</sup>/día, tiene una potencia total instalada de 1.370 kW. El caudal medio tratado es de 42.035 m<sup>3</sup>/día, dando servicio aproximadamente a 233.218 habitantes equivalentes y depurando en total un caudal de 15,3 hm<sup>3</sup>/año.



**Figura 2.** Vista aérea de la EDAR de Castellón.

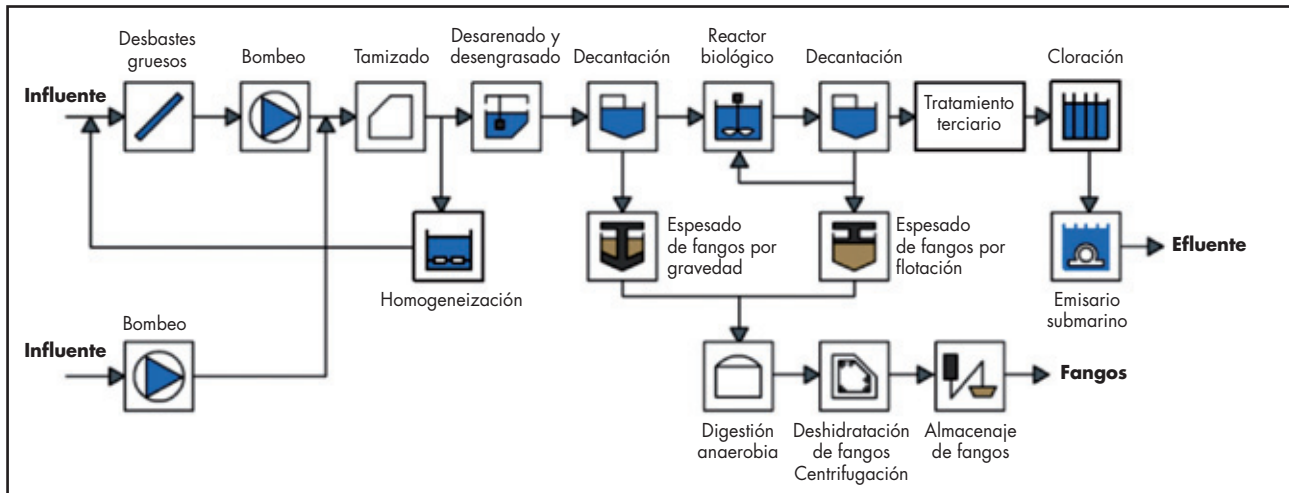


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de la EDAR de Castellón de la Plana. Fuente: Epsar.

La EDAR, construida en el año 1980, fue ampliada por la EPSAR en el año 2000, que la dotó de tratamiento terciario y desinfección por radiación ultravioleta. Así, la instalación dispone de dos líneas de depuración paralelas e independientes, que constan de las siguientes unidades de proceso:

- Línea de agua: pretratamiento, decantación primaria, tratamiento biológico y tratamiento terciario (con desinfección mediante UV).
- Línea de fango: espesado, digestión anaerobia y deshidratación.

El proceso de depuración de aguas se representa en la Figura 3.

## 2.2. Tratamiento biológico: sistema de aireación

El tratamiento biológico consta de dos líneas, una de 4.428 m<sup>3</sup> y otra de 5.125 m<sup>3</sup>. El aire es inyectado por medio de cinco equipos soplantes a través de difusores de burbuja fina: dos soplantes para cada línea y otra que comparten (equipo de reserva), la cual puede ser utilizada para el aporte de oxígeno en ambas líneas. Estas soplantes son de émbolos rotativos con una potencia de 160 kW y un caudal nominal de 11.238 Nm<sup>3</sup>/h para la línea 1, y de 160 kW y 7326 Nm<sup>3</sup>/h de aire para la línea 2.

Las soplantes de émbolos rotativos consisten en unos émbolos alineados paralelamente y centrados respecto a una carcasa, los cuales se

hacen girar a gran velocidad a través de un sistema de correas y transmisiones, desplazando un fluido desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión). Los anillos de sincronismo aseguran que los émbolos, que descansan sobre rodamientos a bolas, roten sin hacer contacto. Para lograr la máxima eficiencia, los émbolos se encuentran en la mínima separación, que se basa en las condiciones de presión diferencial y carga térmica esperada en condiciones operativas (Figura 4).

Para la realización del estudio de comparación de soplantes de émbolos rotativos y turbocompresores de alta velocidad con sistema de levitación magnética



Figura 4. Soplantes de émbolos rotativos.



Figura 5. Turbocompresor con sistema de levitación magnético.

tación magnética debía utilizarse un turbocompresor con capacidad similar al de los equipos instalados (Figura 5). Las condiciones y especificaciones de operación del equipo seleccionado fueron:

- Caudal de diseño: entre 2.475 y 7.462 Nm<sup>3</sup>/h.
- Elevación de la EDAR: 0 m.
- Temperaturas: 0-35 °C.
- Humedad relativa: 50-80%.
- Incremento de presión: 53 kPa (presión de entrada: 101,325 kPa; presión de salida: 154,325 kPa).

La principal característica de este turbocompresor es que funciona mediante levitación magnética. Los cojinetes de inducción generan un

campo magnético que hace levitar el único elemento móvil de la máquina. Dicho elemento consiste en un eje con la turbina de impulsión, el rotor del motor eléctrico y el ventilador de refrigeración de la máquina.

El caudal se regula mediante un variador de frecuencia incluido en el equipo que, al variar la velocidad, controla el volumen o la presión y, además, consigue un ahorro sustancial a bajas velocidades, ya que disminuye la potencia. Otro beneficio de usar un variador de frecuencia es que se ahorra energía porque el motor trabaja a la velocidad nominal para el volumen circulado. Este ahorro es de 26-40 Wh/m<sup>3</sup> (Iberdrola). La especial configuración del turbocompresor le posibilita girar a altas velocidades (hasta 40.000 rpm), permitiéndole trabajar en un amplio rango de caudal y de presiones (hasta 16.000 Nm<sup>3</sup>/h a 8,5 m.c.a).

### 2.3. Diseño experimental

#### 2.3.1. Análisis del consumo energético

Son diversas las variables que pueden influir en el consumo eléctrico de un equipo de aireación, aunque destacan entre otras, la presión ejercida por la lámina de agua (unos 10 kPa por m.c.a) o las pérdidas de carga de la red de difusores (30-50 cm de columna de agua), si se presta especial atención al estado de la misma (difusores rotos, ensuciamiento, etc.). Así mismo, las necesidades de oxígeno del cultivo en suspensión variarán principalmente, en función de la concentración de la biomasa, la edad del fango, la cantidad de materia orgánica a eliminar y la temperatura.

El estudio en paralelo de ambos equipos, para minimizar el error, requeriría de dos líneas de tratamiento exactamente iguales. Por ello, se decidió trabajar de forma alternada en la misma línea (se evitan variables constructivas) y comparar el ratio kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminada, trabajando a la misma concentración de SSLM, con el fin de normalizar las medidas

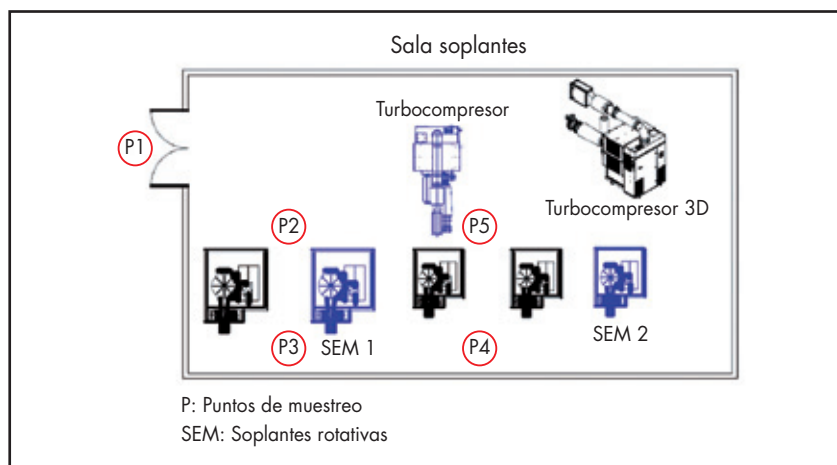


Figura 6. Esquema del edificio de las soplantes.

entre los ensayos con uno y otro equipo. El consumo energético de ambos equipos se comparó mediante la instalación de un analizador, que se parametrizó para la adquisición de datos cada cuarto de hora.

*Son diversas las variables que pueden influir en el consumo eléctrico de un equipo de aireación, destacando la presión o las pérdidas de carga*

#### 2.3.2. Análisis de la contaminación acústica

Para determinar la contaminación acústica generada por cada equipo, se realizó un mapa sonoro de la sala de soplantes e inmediaciones. Todas las mediciones se realizaron con un sonómetro de la marca Koban modelo KS6701 y con todos los equipos de la sala parados, de forma que las medidas cuantificasen únicamente el ruido generado por el equipo. Las mediciones sobre las soplantes de

ébólos rotativos se realizaron con la cabina de insonorización instalada, tal y como funciona en condiciones normales. Las medidas de contaminación acústica fueron tomadas con las soplantes SEM 2 y SEM 4 en marcha, tanto funcionando a la vez como individualmente. Con el turbocompresor de levitación magnética, los puntos en los cuales se tomaron medidas acústicas fueron los mismos que para las soplantes rotativas (Figura 6).

#### 2.3.3. Análisis de los costes de mantenimiento

El análisis de los costes de mantenimiento de ambos equipos se efectuó de manera teórica, comparando las tareas de mantenimiento preventivo de cada uno de ellos. Si bien de la soplante de ébólos rotativos se dispone de un completo historial del mantenimiento realizado, del turbocompresor de levitación magnética no se tiene, al ser reciente su instalación en esta EDAR. No obstante, destacar que desde la puesta en marcha de este turbocompresor en septiembre de 2009 no se ha realizado ninguna tarea preventiva o correctiva que no estuviera prevista en su manual de mantenimiento. Además, se dispone de un número limitado de referencias en las que estos equipos están funcionando desde hace varios años sin haber sufrido ningún tipo de imprevisto.

### 3. Resultados

#### 3.1. Consumo energético

Como ya se ha mencionado anteriormente, el estudio se ha llevado a cabo alternando ambos tipos de equipos de aireación. Mediante la instalación de un gestor de consumo eléctrico, se pudieron registrar los consumos cuartohorarios de cada uno de los equipos. Las Figuras 7 y 8 muestran un ejemplo de los resultados obtenidos durante dos días en el que las condiciones del sistema eran prácticamente idénticas.

Como puede observarse, el consumo de la soplante rotativa es mayor que el del turbocompresor. También se presenta a modo de resumen, en las Tablas 2 y 3, los consumos y características de los equipos implicados. Además, se analiza la varianza entre medias para determinar la representatividad estadística de la diferencia entre estas. El cálculo de los  $\square$ /día se realizó considerando el precio de 0,098 €/kWh. A su vez, en la Tabla 4 se representan los Anova realizados para los dos compresores y en las Figuras 9 y 10, este mismo parámetro en forma gráfica.

Tanto en la comparación del ratio kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminada como en la de  $\square$ /día, se obtuvieron unos resultados significativos ( $p < 0,05$ ). En la Figura 9 se observa que la media de kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminada del turbocompresor de levitación electromagnética (0,78 kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminada) está muy por debajo de la media de la soplante (1,10 kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminada). El consumo es 0,32 kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminada menor para la soplante de levitación mag-

Tabla 2				
Soplante de émbolos rotativos				
Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
kWh/kg DBO <sub>5</sub>	1,1	0,63	1,57	0,306
€/día	258,08	210,14	298,08	24,183

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la soplante de émbolos rotativos.

Tabla 3				
Turbocompresor de levitación magnética				
Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
kWh/kg DBO <sub>5</sub>	0,78	0,43	1,47	0,193
€/día	233,6	187,01	290,59	24,067

Tabla 3. Estadísticos descriptivos del turbocompresor de levitación magnética.

Tabla 4					
Efecto	Anova				
	SS	gdl	MS	F	P
Turbocompresor	0,54105	1	0,54105	12,8434	0,000695
Error	2,44333	58	0,04213		

Tabla 4. Anova.

nética. Dado que la relación kWh/€, para simplificar, se asume como constante, en la representación de la Figura 10 se observa cómo la media en  $\square$ /día para la soplante de émbolos rotativos es mayor (258  $\square$ /día) que el coste de funcionamiento del turbocompresor de levitación magnética (233  $\square$ /día).

#### 3.2. Costes de mantenimiento

Dada la naturaleza de los turbocompresores de levitación magnética, la necesidad de actuaciones preventivas y correctivas de los elementos mecánicos es prácticamente nula, siempre y cuando se

garanticen las correctas condiciones de operación. Requiere especial atención el control de la pureza del aire de admisión. Por esto, se proponen dos programas de actuación, dependiendo de la posibilidad de asegurar una mayor limpieza del aire admitido (salas de máquinas bien aisladas) o de la existencia de un ambiente mas agresivo (alto contenido de polvo).

El programa de inspección de los turbocompresores de levitación magnética consiste en la ejecución en campo de las siguientes actuaciones:

- Verificación de filtros (a cambiar una o dos veces al año, según las

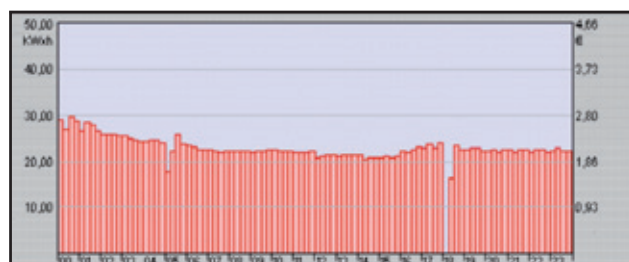


Figura 7. Gasto cuartohorario del turbocompresor con levitación magnética.



Figura 8. Gasto cuartohorario de la soplante rotativa.

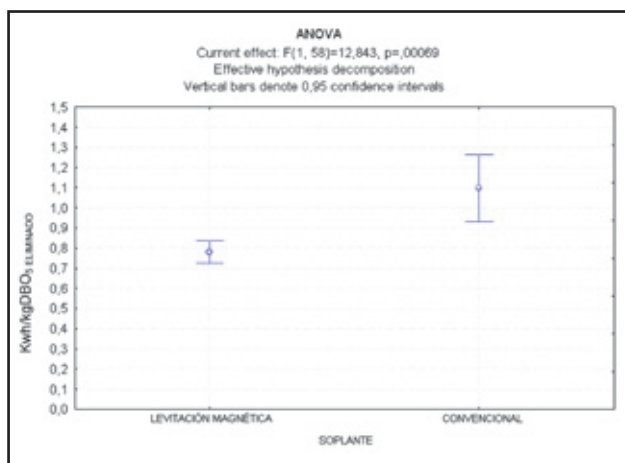


Figura 9. Representación del Anova de los kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminados.

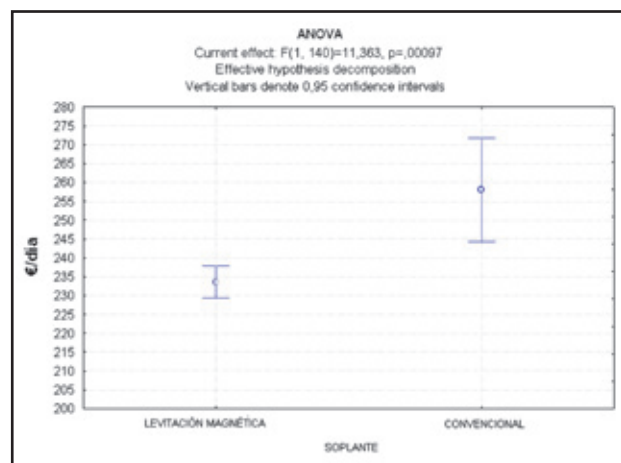


Figura 10. Representación del Anova de los €/día.

condiciones de limpieza de la sala de máquinas) y comprobación de los valores del dispositivo medidor de presión (PDS).

- Forzar el sistema PDS para verificar que actúa correctamente.
- Monitorización de valores del panel del compresor y de los últimos fallos del equipo.
- Comprobación de la válvula de escape, del sistema de ventilación del motor y sistemas de tuberías y del funcionamiento de baterías (a cambiar cada 3 años).
- Comprobación del MBC (controlador del rodamiento magnético) y realización del *Basic Check* y *Clearance Check* con los programas específicos.
- Comprobación de los sistemas de ventilación (ventiladores a cambiar cada 5 años).
- Verificación de las protecciones.

En cuanto al programa de mantenimiento de la soplante de émbolos rotativos, este se basa en una serie de operaciones básicas para la conservación de los equipos:

- Control visual de los elementos componentes.
- Verificación del filtro de aspiración.
- Nivel de aceite lubricante de los rodamientos y engranajes de sincronismo (debe ser sustituido entre las 150-175 primeras horas de marcha y, posteriormente, cada 1.800-2.100 horas de servicio en condiciones normales).

- Control del sistema de transmisión, de las válvulas de seguridad y de la válvula de alivio.
- Comprobación de la estanqueidad de los compartimentos de aceite y conductos de fluido.
- Verificación de la presión de servicio.

Uno de los factores importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar un equipo soplante es la realización de revisiones de mantenimiento, así como el coste de las actuaciones que ello supone. Teniendo en cuenta las actuaciones mencionadas, el coste de mantenimiento teórico a 5 años del turbocompresor, considerando las peores condiciones de la sala de máquinas, es de 15.771 €/5 años.

Por lo que respecta a las soplantes de émbolos rotativos, estas requieren un exhaustivo control de los niveles de aceite de los rodamientos y engranajes de sincronismo. Para la valoración económica del mantenimiento, se ha realizado una estimación según el coste de materiales y la dedicación del personal de explotación. A esto hay que sumarle una revisión del servicio técnico oficial en sus instalaciones a las 20.000 horas de funcionamiento (2,5 años, aproximadamente) de servicio, lo que conlleva: transporte, desmontaje de la máquina, sustitución de rodamientos y elementos rodantes, así como de piezas que hayan sufrido desgaste. Esta

reparación asciende a 8.150 €. Así pues, los costes de mantenimiento para un período de 5 años son de 27.468 €.

Destacar que las dimensiones y peso de uno y otro equipo son muy distintas. Mientras que el transporte en planta del turbocompresor de levitación magnética puede realizarse con un transpaleta, para mover los equipos rotativos es necesario instalar polipastos o puentes grúa en la sala de soplantes.

### 3.3. Contaminación acústica

Los resultados obtenidos para cada punto de medida que se representa en la Figura 6 se recogen en la Tabla 5. Se puede establecer que las soplantes de levitación magnética generan menor contaminación acústica debido a que estos equipos no presentan ni rozamientos ni vibraciones, ya que no poseen engranajes, rodamientos y elementos de transmisión, lo que hace que la generación de ruido sea mucho menor.

### 3.4. Obra civil

Tal y como puede observarse en la Figura 11, las dimensiones de un turbocompresor con sistema de levitación magnética (izquierda) son bastante inferiores a las de un equipo de émbolos rotativos con la misma capacidad de aireación.

Esto supone un importante ahorro en la instalación de estos equipos en

**Tabla 5**

Equipos en marcha	Punto de medida (dB) <sup>o</sup>				
	P1	P2	P3	P4	P5
Soplantes émbolos 1 y 2	70	92	94	93	96
Soplante émbolos 1	68	88	89	85	84
Soplante émbolos 2	66	84	83	87	90
Turbocompresor	61	77	75	79	82

**Tabla 5.** Medidas de contaminación acústica.

plantas de nueva construcción, ya que las dimensiones de las salas que albergan los equipos de aireación pueden reducirse en gran medida. También la significada reducción de peso de los turbocompresores, en comparación a los equipos de émbolos rotativos, facilita en gran medida las labores de implantación, como también su posterior reparación y sustitución.

#### 4. Conclusiones

De los datos obtenidos durante el período de estudio, ha podido comprobarse que los costes de funcionamiento del turbocompresor de levitación magnética son menores que los de la soplante de émbolos rotativos.

La mayor eficiencia energética es debida a que el mayor rango de presión de trabajo del turbocompre-

sor implica que pequeñas variaciones de presión, como las producidas por aperturas y cierres de válvulas motorizadas, no conlleven un aumento de consumo energético tan importante como en las soplantes rotativas. A su vez, la ausencia de rozamientos, gracias al sistema de rodamientos magnéticos y a la ausencia de pérdidas energéticas por correas de transmisión (5%), influye positivamente en una mayor eficiencia.

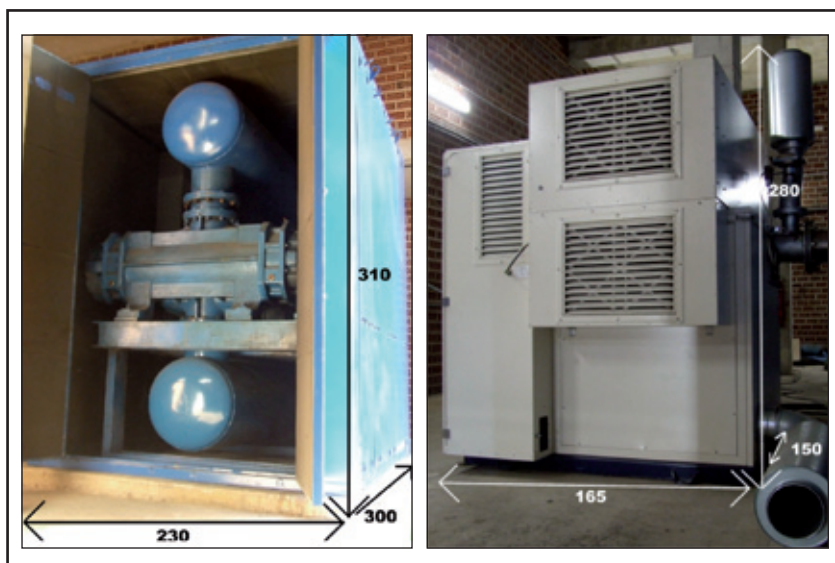
Si se tienen en cuenta las medias de kWh/kg DBO<sub>5</sub> eliminada de cada soplante y que la carga contaminante media anual es de 2.400 kg DBO<sub>5</sub> eliminada/día, se obtiene un ahorro energético anual de 27.471 €/año. Además, si el mantenimiento de la soplante rotatoria asciende a 27.468 €/5 años y la de levitación magnética a 15.771 €/5 años, en este pe-

riodo, el uso de esta última supone un ahorro de 11.697 €. Otra ventaja adicional es que el turbocompresor con sistema de levitación magnética emite una contaminación acústica menor que las soplantes rotativas.

Finalmente, para la obra nueva se produce también un ahorro en la obra civil, puesto que el turbocompresor es de menores dimensiones y también menor peso que la soplante.

#### 5. Bibliografía

- [1] Acuña, J. (2010). 'Solución de emergencia con soplantes para la aireación en una EDAR'. Tecnología del Agua, núm. 310, págs. 58-59.
- [2] Manual del turbocompresor de levitación magnética ABS HST. ABS Tecnologías del Agua, S.A.
- [3] Iberdrola (2008). 'Fomento del ahorro y eficiencia energética'. VII Jornadas Técnicas sobre Áreas Residuales: Eficiencia energética y depuración.
- [4] Morenilla, J.J. (2007). 'Sistemas de control y optimización del consumo energético en EDAR'. En: XXV Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo III, pág. 34. Cedex, Madrid.
- [5] Ferrer, C.; Bécares, E.; Sangüesa, I.; Alonso, S.; Basiero, A.; Bernacer, I.; Morenilla, J.J. (2007). 'Caracterización del agua residual y análisis del funcionamiento de EDAR de pequeñas poblaciones de la provincia de Castellón'. Retema, septiembre-octubre, págs. 60-68.
- [6] Sanz Fernández, I. (2004). 'El agua es vida (Tales de Mileto 624-548 a.C)'. ABS Tecnologías del Agua, en: Anales de mecánica y electricidad, vol. 81, fasc. 5, págs. 45-46.
- [7] Richard W. Greene (1989). 'Compresores. Selección, uso y mantenimientos'. Ed. Mc. Graw-Hill.



**Figura 11.** Dimensiones de una soplante de émbolos rotativos con cabina de insonorización azul (izquierda) y un turbocompresor con sistema de levitación magnética (derecha).