



# Transferencia de oxígeno: evaluación rápida de la eficiencia de los sistemas de aireación

**Pedro Simón Andreu** ingeniero industrial, Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (Esamur)  
**Carlos Lardín Mifsut** licenciado en Ciencias Biológicas, Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (Esamur)  
**Celia del Cacho Sanz** licenciada en Ciencias Químicas, Departamento de Agua de Intecsa-Inarsa  
**Mercedes García Yuste** licenciada en Ciencias Biológicas, Departamento de Agua de Intecsa-Inarsa

La aireación de los procesos biológicos es una de las etapas con mayor porcentaje de consumo energético del total de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR). Por lo tanto, es de suma importancia optimizar la etapa de aireación. Para ello, la transferencia de oxígeno se presenta como una muy buena alternativa para la evaluación rápida de la eficiencia de los sistemas de aireación de forma continuada.

#### Palabras clave

EDAR, aireación del proceso biológico, transferencia de oxígeno (%), limpieza fórmica, presión colector aireación, sustitución difusores, medición *on line*.

#### *Oxygen transfer: quick assessment of the efficiency of aeration systems*

*The aeration of biological processes is one of the stages with the highest percentage of the total energy consumption in a waste water treatment plant (WWTP). Therefore it is very important to optimize the aeration step, and for this purpose, oxygen transfer is presented as a very good alternative as rapid assessment of the efficiency of aeration systems continuously.*

#### **Keywords**

*WWTP, biological aeration process, oxygen transfer (%), formic cleaning, aeration's manifold pressure, diffusers replacement, on line measurement.*



## 1. Introducción

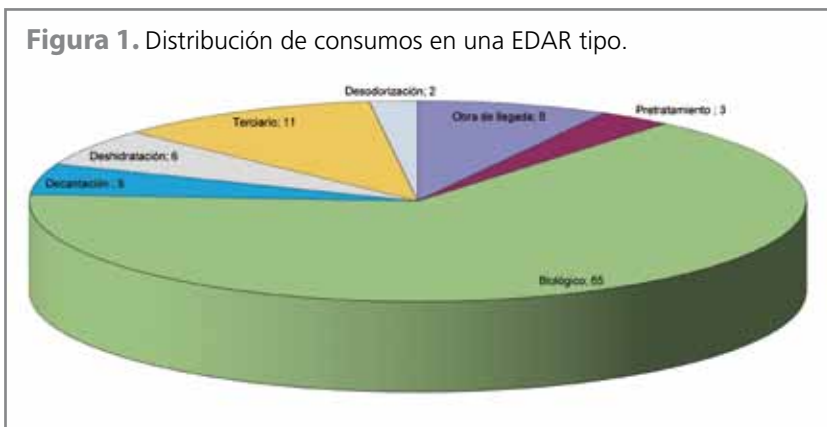
El consumo energético es una de las partidas más importantes en los costes de explotación de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), siendo el consumo correspondiente a la etapa de aireación del proceso biológico el que presenta mayor porcentaje dentro de la distribución de consumos de una planta. Por ello, es muy importante conocer los ratios de distribución de consumo energéticos, así como gestionarlos de forma óptima, buscando siempre un punto de trabajo que suponga un mínimo consumo energético y una óptima calidad del efluente. En la **Figura 1** y **Tabla 1** se muestra una distribución tipo de los porcentajes de consumo energético según la etapa.

En los biológicos de fangos activos de la región de Murcia hay una variedad de tipos de aireación, cada uno con sus características en cuanto a consumo eléctrico y rendimiento. La distribución en porcentaje de presencia de cada tipo de aireación se muestra en la **Tabla 2**.

El objetivo fundamental de todo sistema de aireación es transferir oxígeno al licor mezcla y que este oxígeno disuelto pueda ser utilizado por los distintos microorganismos. Existen numerosas variables del sistema de aireación que afectan a los rendimientos en esta transferencia de oxígeno (**Figura 2**), tales como:

- Rango de caudales por difusores con los que se trabaja ( $Nm^3/ud.h$ ).
- Tipología de difusores (tubulares, disco, planos), antigüedad y estado de colmatación.
- Equipo de aireación (soplante lobular, turbo-soplante, soplante levitación magnética...).

En el estudio realizado, se llevaron a cabo mediciones de transferencia

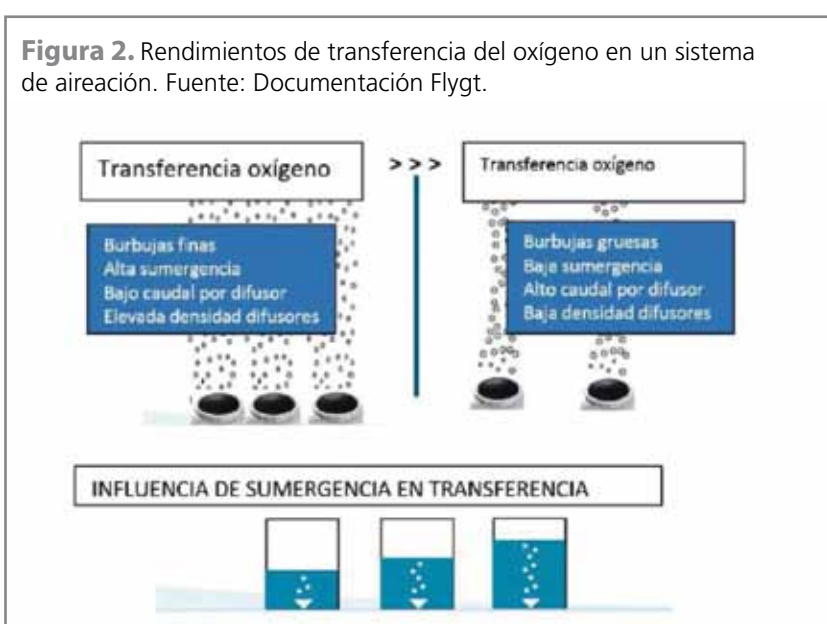


**Tabla 1.** Distribución de consumos en una EDAR tipo.

Etapas	% consumo
Obra de llegada	8
Pretratamiento	3
Biológico	65
Decantación	5
Deshidratación	6
Terciario	11
Desodorización	2
<b>Total</b>	<b>100</b>

**Tabla 2.** Distribución de sistemas de aireación en la Región de Murcia.

Tipos de aireación biológica	%
Aireador sumergido	10
Orbal	4
Turbina	6
Difusores	68
Turbina	6
Rotor	4
Biodisco	2
<b>Total</b>	<b>100</b>



de oxígeno desde 2013 hasta 2015 en aquellos sistemas de aireación de la región de Murcia con difusores de

burbuja fina según la problemática planteada en cada caso, estableciendo los siguientes objetivos:

- Evaluar la ganancia en la transferencia de oxígeno ante cambios de distinta índole en los sistemas de aireación, como son: aireación a distintos caudales-equipos; sustitución de difusores; y limpieza química de difusores.

- Establecer un cuadro comparativo de las transferencias de oxígeno en todas las EDAR estudiadas, determinando cuál es la configuración más idónea.

Estas mediciones servirán como base de datos que permitirán consolidar y evaluar los resultados del tipo de aireación de cada instalación.

Los ratios de control de transferencia de oxígeno que se han establecido durante el presente estudio se recogen en la **Tabla 3**.

## 2. Materiales y descripción de la metodología

### 2.1. Materiales

Se dispone de una campana flotante que recoge el aire que no se ha transferido en el licor mezcla de los reactores biológicos y dos medidores de oxígeno con sistema de almacenamiento de datos (**Figura 3**).

Uno de los medidores de oxígeno está insertado en la campana. Con este medidor se almacenan los distintos valores de concentración de oxígeno que no han sido transferidos a la biomasa del reactor biológico y sale a la atmósfera. A partir de estos datos, se calcula el porcentaje de oxígeno transferido al reactor biológico (**Figura 4**). Una segunda sonda se instala en el licor mezcla para conocer el nivel de concentración de oxígeno en el mismo.

### 2.2. Metodología

El principio fundamental de esta metodología se basa en obtener la variación de oxígeno en el aire que sale

**Tabla 3.** Ratios de control de transferencia. Nota: mca = metros de columna de agua del reactor biológico.

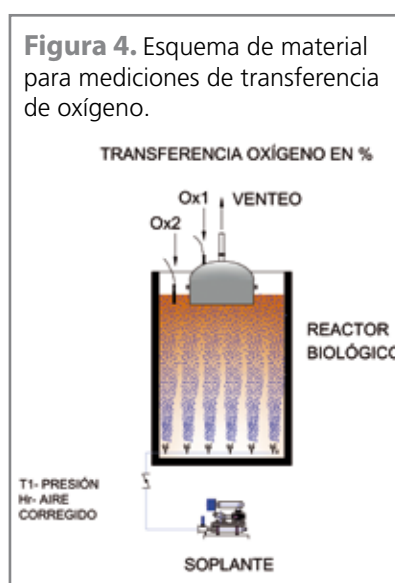
Transferencia	Parámetro medido	Valor de referencia bibliográfica	Objetivo medición
Transferencia de oxígeno	Transferencia de oxígeno (%)	-	Difusores
	Transferencia de oxígeno/mca	4-6	Difusores
Transferencia de oxígeno vs. consumo energético	kg O <sub>2</sub> /kW	1,8	Difusores-equipos de aireación
		ATV-M 209	
		ATV-M 209	



del reactor biológico con respecto al aire que se suministra al mismo por el equipo mecánico correspondiente. Con las mediciones del oxígeno saliente de la campana y los valores de saturación de oxígeno en el aire, según temperatura, humedad y presión atmosférica, se obtiene el porcentaje de transferencia de oxígeno en el licor mezcla (**Ecuación 1**).

Las mediciones se han realizado siempre en el mismo punto de muestreo (sobre la parrilla de aireación), obteniéndose así valores en las mismas condiciones para su comparación. Se realizan varias mediciones a distintas frecuencias de velocidad del equipo mecánico de aireación dentro del intervalo habitual de trabajo de la explotación.

En el estudio se muestran siempre los valores promedios de los distintos resultados obtenidos. En cada medición se realizan las pertinentes



correcciones de temperatura, presión y humedad para el cálculo de la densidad y caudal del aire.

Según la norma ASCE 18-1996, el rendimiento en la transferencia de oxígeno en condiciones reales (OTE<sub>pw</sub>) se realiza teniendo en cuen-



$$\text{Transferencia de oxígeno} = \frac{(\text{cc oxígeno saturación} - \text{cc oxígeno medida})}{\text{cc oxígeno saturación}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{OTE}_{pw} (\%) = \frac{\text{Masa de O}_2 \text{ entrante} - \text{Masa de O}_2 \text{ saliente}}{\text{Masa de O}_2 \text{ entrante}} \times 100 \quad \Rightarrow \quad \text{OTE} = \frac{MR_i - MR_e}{MR_i} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$MR_i = \frac{Y_i}{1 - Y_i - Y_{CDi} - Y_{Wi}} \quad \text{Ecuación 3} \qquad MR_e = \frac{Y_e}{1 - Y_e - Y_{CDe} - Y_{We}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\text{SOTE}_{pw} = \text{SOTE}_{cw} \cdot \alpha \cdot F = \frac{\text{OTE}_{pw} (\%) \cdot C_{\infty 20}^*}{(\tau \cdot \beta \cdot \Omega \cdot C_{\infty 20}^* - C) \cdot \theta^{(T-20)}} \quad \text{Ecuación 5}$$

ta las fracciones molares del oxígeno de entrada y salida respecto a las de nitrógeno e inertes del propio gas.

El cálculo es la **Ecuación 2**, siendo  $MR_i$  y  $MR_e$  las fracciones molares de oxígeno respecto a nitrógeno e inertes de entrada y salida (**Ecuaciones 3 y 4**), y donde:

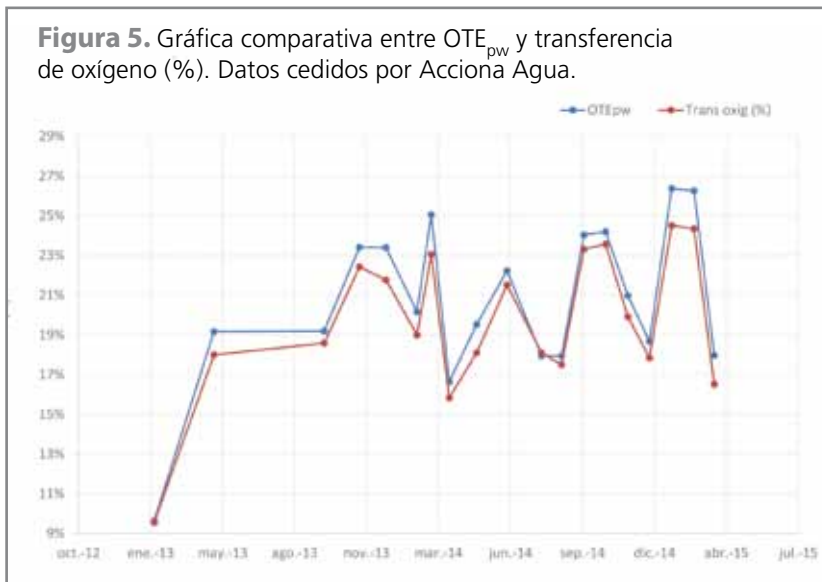
- $Y_i$  y  $Y_e$  = fracciones molares de  $O_2$ .
- $Y_{CDi}$  y  $Y_{CDe}$  = fracciones molares de  $CO_2$ .
- $Y_{Wi}$  y  $Y_{We}$  = fracciones molares de vapor de agua.

El rendimiento de la transferencia de oxígeno en condiciones estándar se abrevia como  $SOTE_{pw}$  donde se tienen en cuenta los valores de factores de corrección que afectan al licor mezcla y presión ambiental (**Ecuación 5**), siendo los factores de corrección:

- $\beta$  = es en función de la salinidad del agua de proceso.
- $\Omega$  = es en función de la presión atmosférica ambiental.
- $\tau$  = es en función de la temperatura del proceso.

### 2.3. Diferencia entre $OTE_{pw}$ y transferencia de oxígeno

Aunque la metodología basada en la normativa ASCE 18-1996 de la American Society of Civil Engineers, requiere de mediciones en continuo de  $CO_2$  para el cálculo de las fracciones molares de los distintos componentes gaseosos del aire, los ensayos realizados en este estudio no han tenido en cuenta las mediciones de  $CO_2$  ya que, tras comparar los valores de transferencia de oxígeno frente a los valores de  $OTE_{pw}$  extraídos de otros estudios, se observa una reducida desviación de 4,9% entre ambos parámetros, considerando la metodología del cálculo de transferencia de oxígeno como válida para la evaluación rápida de la eficiencia del sistema de aireación (**Figura 5 y Tabla 4**).



**Tabla 4.** Diferencia entre  $OTE_{pw}$  y transferencia oxígeno (%).

Cálculo	Valores promedios
$OTE_{pw}$	20,67
Transferencia de oxígeno (%)	19,65
Diferencia (%)	4,93

### 3. Medidas de transferencia de oxígeno con distinto caudal-equipos

En todas las EDAR de la Región de Murcia los equipos de aireación disponen de variador de frecuencia que permiten airear en el intervalo de 30 a 50 Hz según las características de la carga orgánica del influente. De igual forma, en algunas de las instalaciones se disponen de varios equipos de aireación de mayor o menor potencia o de alta eficiencia energética (soplante levitación magnética), que permiten modular la aireación según las necesidades de la instalación.

En cada EDAR objeto de este estudio se realizaron mediciones a distintos caudales y con diferentes equipos de aireación para determinar cuál era el punto óptimo de aireación en cada caso.

#### 3.1. Medidas de transferencia de oxígeno a diferentes caudales

Las medidas se recogen en la **Tabla 5**.

#### 3.2. Medidas de transferencia de oxígeno con distintos equipos-caudal óptimo

Estas medidas se recogen en la **Tabla 6**. Observando esta tabla de mediciones a distintos caudales se concluye que, tal y como recoge la bibliografía, a menor caudal se produce una mayor transferencia de oxígeno (+23%) acorde con el mayor tiempo de residencia de la burbuja en el seno del licor mezcla, lo que redundaría en un importante ahorro energético. De igual forma, trabajando con el equipo de aireación-caudal apropiado en cada caso, en las EDAR objeto de este estudio, se registra un incremento del 32% en la transferencia de oxígeno, lo que de igual forma se traduce en un ahorro energético.

#### 4. Medidas de transferencia de oxígeno por limpieza química de los difusores

En algunas EDAR de la Región de Murcia se realiza el seguimiento pe-

riódico de los valores de presión del colector de aire, como control para conocer el ensuciamiento de los difusores por incrustaciones calcáreas, lo que se traduce, a priori, en un aumento paulatino de la presión del colector de aireación, por impedimento de la salida del gas a través de los poros de todos los difusores. Ello conlleva un aumento en las horas de funcionamiento de los equipos de aireación y, por consiguiente, un incremento energético.

En el caso de la Región de Murcia, al presentar el agua una elevada dureza, se producen en su mayoría incrustaciones de cal, en tuberías y difusores (**Figura 6**). Por ello, la limpieza con ácido fórmico se presenta como una alternativa para eliminar las citadas incrustaciones calcáreas, sin recurrir a vaciados de reactores que consumen recursos y tiempo del personal de la explotación. Teniendo como referencia los manuales de ABS, se recomienda una limpieza química cuando la presión de traba-

**Tabla 5.** Mediciones de transferencia de oxígeno en EDAR a distinto caudal de aireación. Nota: ox/mca = transferencia de oxígeno (%)/metros de columna de agua.

EDAR	Equipo de aireación y potencia	Transferencia de oxígeno (%)		ox/mca (%)		Incremento transferencia máx-mín caudal (%)
		Caudal máximo	Caudal mínimo	Caudal máximo	Caudal mínimo	
EDAR 1	Émbolos - 200 kW	22,03	34,03	4,0	6,2	54,5
EDAR 2	Émbolos - 95 kW	18,77	20,01	3,6	3,8	6,6
EDAR 3	Émbolos - 140 kW	18,94	23,14	3,8	4,6	22,2
EDAR 3	Magnética - 140 kW	24,61	34,71	4,9	6,9	41,0
EDAR 4	Émbolos - 55 kW	16,28	20,00	4,1	5,0	22,9
EDAR 4	Émbolos - 45 kW	21,25	25,13	5,3	6,3	18,3
EDAR 5	Turbosoplante - 435 kW	34,00	37,00	6,7	7,3	8,8
EDAR 6	Émbolos - 132 kW	18,84	21,14	3,8	4,2	12,2
EDAR 9	Émbolos - 55 kW	24,12	27,52	5,4	6,1	14,1
EDAR 11	Émbolos - 40 kW	15,49	17,80	3,1	3,6	14,9
<b>Promedio</b>						<b>21,5</b>



**Tabla 6.** Mediciones de transferencia de oxígeno en EDAR con distintos equipos-caudal óptimo.

EDAR	Equipo de aireación y potencia	Transferencia de oxígeno (%)
EDAR 4	Émbolos - 55 kW	20,00
	Émbolos - 45 kW	25,13
Variación (%)		25,7
EDAR 3	Émbolos - 140 kW	23,14
	Magnética - 140 kW	34,71
Variación (%)		50,00
EDAR 9	Émbolos - 110 kW	22,61
	Émbolos - 55 kW	27,52
Variación (%)		21,7
<b>Promedio</b>		<b>32,5</b>

**Figura 6.** Depositiones calcáreas en la membrana (imagen izquierda) y rotura de la membrana por incrustaciones (derecha).



**Tabla 7.** Recomendaciones de limpieza química. Nota: \* = medición realizada al inicio de un vaciado, con difusores limpios. Fuente: ABS.

Incremento de la presión por encima del valor original*	Método de limpieza
< 20 mbares	Golpes de aire
20-50 mbar	Equipo de limpieza Nopon Clean
>50 mbar	Limpieza química/mecánica

**Tabla 8.** Mediciones de estudio en tres EDAR.

EDAR	Años con difusores	Observaciones
EDAR 1	6	EDAR con buenos valores de transferencia, limpieza periódica de difusores con fórmico
EDAR 2	10	
EDAR 3	0,5	Fuertes incrustaciones que provocan cortes en membranas. Sustitución parcial de difusores (73 vs. 2.130 difusores)

jo supera los 20-50 mbar la presión establecida como referencia cero (tras un vaciado por mantenimiento) (Tabla 7).

Es muy recomendable disponer de un transductor de presión en el colector de aireación y realizar un seguimiento en continuo de los valores registrados, para la detección preventiva de problemas en el sistema de difusión.

Las mediciones del estudio se realizaron en 3 EDAR antes, tras y un mes después de la limpieza química de los difusores (Tabla 8).

#### 4.1. Aumento de transferencia por limpieza química

Los valores promedios de las mediciones obtenidas se presentan en la Tabla 9, y de forma resumida en la Tabla 10, y la Figura 7.

El mayor incremento en la transferencia de oxígeno tras la limpieza química de los difusores se produce en la EDAR 3, porque se solapan la limpieza química y el cambio parcial de difusores (73 vs. 2.130 difusores) por importante afección por cal. Por este motivo, se descartan estos valores del cálculo del promedio por incremento de transferencia por limpieza química.

El menor incremento en la transferencia de oxígeno tras la limpieza química de los difusores se produce en EDAR 2 por antigüedad de difusores (10 años aproximadamente), por lo que se le presupone cierta pérdida de las propiedades físicas de los mismos.

El incremento en la transferencia de oxígeno tras la limpieza química de los difusores es: EDAR 3 > EDAR 1 > EDAR 2. Se puede afirmar que la ganancia en la transferencia está relacionada, en parte, con los años del difusor.

Además, y como conclusiones, para las instalaciones estudiadas se

**Tabla 9.** Variaciones de transferencia de oxígeno por limpieza química de los difusores.

EDAR	Limpieza química	Oxígeno transferido(%)
EDAR 1	Antes limpieza química	29,8
	Después limpieza química	37,6
	Variación antes-después limpieza (%)	26,1
EDAR 2	Antes limpieza química	19,4
	Después limpieza química	24,7
	Variación antes-después limpieza (%)	27,2
EDAR 3	Antes limpieza química (difusores nuevos con borbotones)	19,8
	Después limpieza química (sin borbotones, sustitución parcial difusores)	34,7
	Variación antes-después limpieza (%)	75,6

**Tabla 10.** Incremento de la transferencia de oxígeno por limpieza química.

EDAR	Incremento (%) de la transferencia de oxígeno por limpieza química
EDAR 1	26,1
EDAR 2	27,2
EDAR 3	75,6
Valores promedio descartando la EDAR 3 (por sustitución parcial difusores)	26,6

estima un incremento en la transferencia de oxígeno del 26% tras la limpieza química de los difusores.

Así mismo, el seguimiento del ensuciamiento de los difusores gracias a la medición conjunta de la trans-

ferencia de oxígeno y presión de la línea, puede suponer notables ahorros energéticos y de mantenimiento de las instalaciones.

### 5. Medidas de transferencia de oxígeno por sustitución de difusores

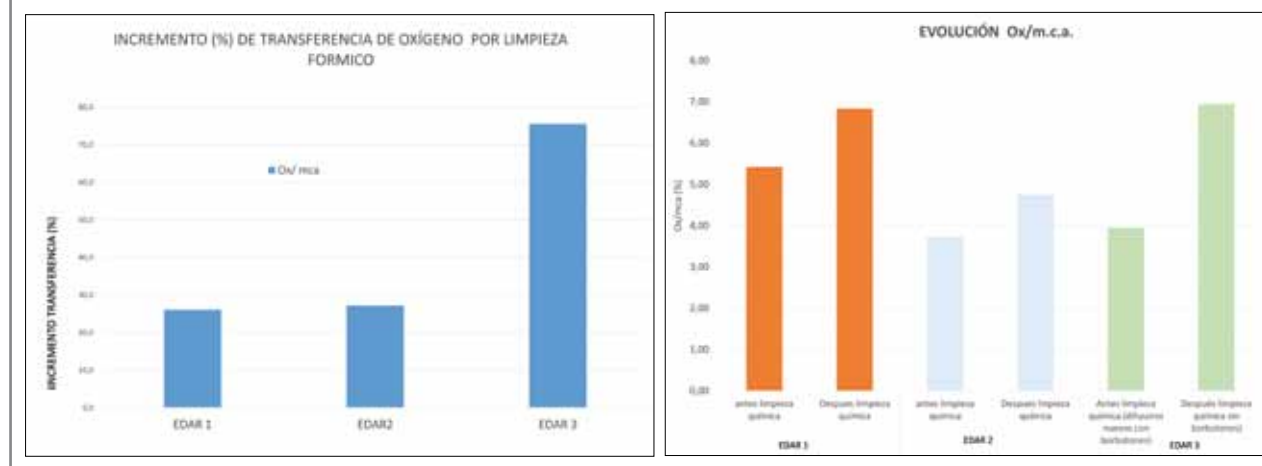
Como se observa en la **Tabla 11**, se realizan ensayos en aquellas EDAR en las que en el periodo 2013-2015 se cambiaron los difusores en el sistema de aireación. La **Figura 8** muestra el antes y después de la EDAR tras la sustitución de los difusores.

#### 5.1. Aumento de la transferencia por sustitución de difusores

Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 12**. De forma resumida, las ganancias por cambio de difusores son las que se presentan en la **Tabla 13**. Las gráficas más representativas al respecto se representan en la **Figura 9**.

De todo ello se observa, en la EDAR 4, una mayor ganancia de transferencia de oxígeno por el deficitario estado en el que se encontraban los difusores tubulares iniciales. Se calcula un ahorro anual estimado de unos 24.000 €/año.

**Figura 7.** Incremento de la transferencia de oxígeno por limpieza química de los difusores (imagen de la izquierda) y evolución de ox/mca (imagen de la derecha).



**Tabla 11.** EDAR con cambios de difusores en el sistema de aireación.

EDAR	Años de difusores	Difusores sustituidos por biológico	Nm <sup>3</sup> /h difusor	Observaciones
EDAR 4	9	784	Se pasa de 4,3 a 2,2	Difusores iniciales con continuas roturas. Se amplían de 486 a 786 , disminuyendo el caudal por difusor
EDAR 5	10	6.216	1,0	Roturas esporádicas
EDAR 7	11	1.065	1,6	Roturas esporádicas

## 5.2. Valoración económica del ahorro tras la sustitución de los difusores

Tras realizar la relación entre la inversión económica realizada y el ahorro energético obtenido tras la sustitución de los difusores, se obtiene el periodo de amortización (**Tabla 14**).

Como se puede observar, el periodo de amortización es considerablemente bajo, siendo la sustitución de los difusores una alternativa muy recomendable en sistemas de aireación con periódicas detecciones de borbotones. Gracias a la medición en continuo de la transferencia de oxígeno es posible determinar el momento óptimo a partir del cual es rentable la sustitución de los difusores de una instalación.

## 6. Comparativa de transferencia en todas las EDAR

Comparando de forma global las medidas realizadas en campo en todas las instalaciones con los valores referenciados en bibliografía, se puede establecer una clasificación y determinar qué instalación presenta mejor transferencia de oxígeno (ox/mca)-energética (kg O<sub>2</sub>/kW), conocer y deducir el motivo de estos valores óptimos y poderlos aplicar en aquellas instalaciones con peores ratios (**Figura 10**).

Si de forma conjunta, se comparan todas las EDAR según las clasificaciones planteadas (Ox/mca, kg O<sub>2</sub>/kW), se obtiene la clasificación de la **Figura 11**.

**Figura 8.** EDAR 4, antes y después de la sustitución de los difusores.**Tabla 12.** Incremento de la transferencia de oxígeno por cambio de difusores.

EDAR	Difusores	Oxígeno transferido(%)
EDAR 5	Difusores viejos	23,9
	Difusores nuevos	32,6
	Variación difusores viejos-nuevos (%)	26,9
EDAR 4	Difusores viejos	11,0
	Difusores nuevos	18,1
	Variación difusores viejos-nuevos (%)	39,3
EDAR 7	Difusores viejos	16,4
	Difusores nuevos	21,0
	Variación difusores viejos-nuevos (%)	28,0
<b>Promedio</b>		<b>31,4</b>

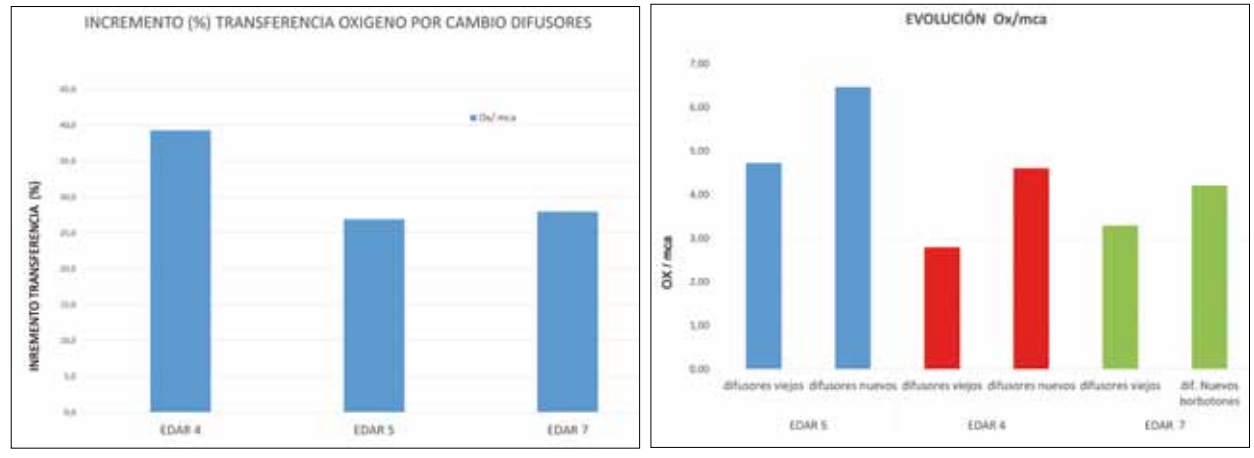
Las instalaciones más óptimas, tanto desde el punto de vista de transferencia (ox/mca) como del equipo de aireación más eficiente (kg O<sub>2</sub>/kW), son las EDAR 5 y 1. La EDAR 5 dispone de un equipo de aireación turbo-soplante. Y la EDAR 1, aunque dispone de una soplante de émbolos rotativos, los excelentes valores de transferencia de oxígeno (debido, en parte, a la sistemática establecida por la explotación de

**Tabla 13.** Ganancias por cambio de difusores.

EDAR	Incremento (%) de la transferencia de oxígeno por cambio de difusores
EDAR 4	39,3
EDAR 5	26,9
EDAR 7	28,0
<b>Promedio</b>	<b>31,4</b>



**Figura 9.** Incremento de la transferencia de oxígeno por sustitución difusores (imagen de la izquierda) y evolución de ox/mca (imagen de la derecha).



**Tabla 14. Amortización.**

EDAR	Amortización en años
EDAR 5	4
EDAR 4	2
EDAR 7	2

limpieza química de los difusores) confieren a esta instalación como una de las más idóneas.

La EDAR 3 dispone de un equipo de alta eficiencia (kg O<sub>2</sub>/kW), soplante levitación magnética, con unos muy buenos valores de ratio energético. Sin embargo, las mediciones de transferencia de oxígeno (ox/mca) no son muy elevadas por presentar problemas de incrustacio-

nes calcáreas en los difusores, lo que le produce una reducción considerable en la transferencia de oxígeno. Se recomienda establecer, dentro de la rutina de mantenimiento, la limpieza química de los difusores para mejorar de forma continuada la transferencia de oxígeno.

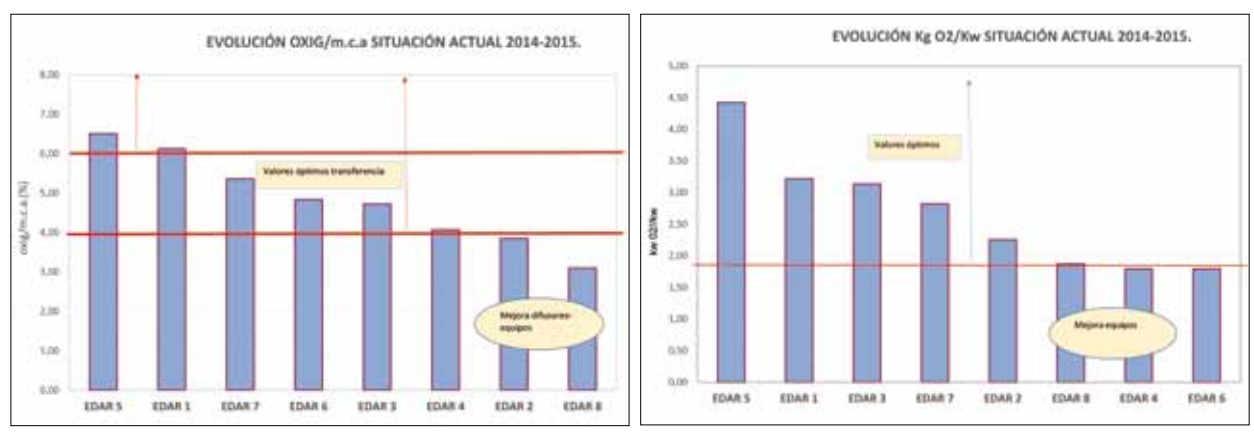
Las EDAR 6 y 4 son las que tienen peor ratio de transferencia energética (kg O<sub>2</sub>/kW). La EDAR 6 se trata de una planta con una aceptable transferencia de oxígeno (Ox/mca), pero con ratio energético del equipo de aireación (Kg O<sub>2</sub>/kW) por debajo del establecido como idóneo por la bibliografía. La soplante de émbolos trabaja de forma continuada sobrepresionada, al superar la presión de

trabajo la presión máxima admisible por el equipo, lo que ha ocasionado numerosas averías, conllevando además una clara deficiencia energética. En la actualidad, para paliar esta situación se va a instalar una soplante de levitación magnética cuya presión máxima admisible es superior a la de trabajo, lo que redundará en una mejor transferencia energética.

Para el caso de la EDAR 4, sería conveniente estudiar la instalación de una soplante de menor capacidad que ofrezca un mejor ratio energético que el actual.

Una de las EDAR con situación más desfavorable, tanto desde el punto de vista de transferencia de oxígeno como energética (kg O<sub>2</sub>/

**Figura 10.** Ranking de las EDAR de la Región de Murcia según ox/mca y kg O<sub>2</sub>/kW.





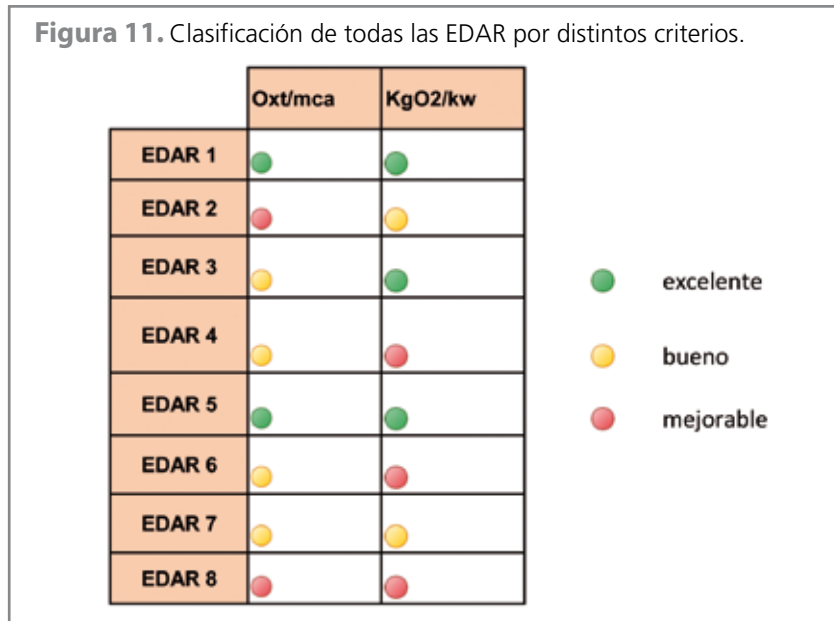
kW), es la EDAR 8. Se trata de una soplante sobredimensionada y que presenta un cortacircuito hidráulico en el reactor biológico, lo que da lugar a una baja transferencia de oxígeno. En este caso, se recomienda instalar una soplante adecuada a la carga actual de la EDAR, así como trasladar los aceleradores de corriente a la parte del carrusel sin difusores para evitar cortacircuitos hidráulicos.

La EDAR 2 se trata de una instalación con buenos ratios de equipos de aireación ( $\text{kg O}_2/\text{kW}$ ), dotada de soplantes de émbolos de mediana capacidad que trabajan de forma escalonada. Sin embargo, los valores de transferencia de oxígeno ( $\text{Ox}/\text{mca}$ ) están al límite de los establecido por la bibliografía. En este caso, debido a la antigüedad de los difusores actuales (10 años), se recomendaría estudiar la opción del reemplazo de las membranas de aireación. Así mismo, se recomendaría establecer como rutina de mantenimiento la limpieza química de los difusores para mejorar de forma continuada la transferencia de oxígeno.

## 7. Conclusiones

Las conclusiones generales son:

- Se considera la medida de la transferencia de oxígeno como un método fiable, fácil y de evaluación rápida de la eficiencia del sistema de aireación, a través del cual se puede detectar en continuo problemas en el sistema de difusión y se determina



el caudal de aire más favorable en cada situación.

- El aumento en la transferencia de oxígeno, tras una limpieza química difusores, cambio difusores y/o operación a caudal óptimo, se resume en la **Tabla 15**.

- Es de gran importancia optimizar el binomio del sistema de aireación difusores + soplante para operar en el ratio energético ( $\text{kg O}_2/\text{kW}$ )-transferencia de oxígeno más óptimo ( $\text{ox}/\text{mca}$ ), lo que reinvertirá en un consecuente ahorro energético.

- Con un seguimiento continuado y periódico de la evolución de los valores de transferencia de oxígeno en el reactor biológico, se puede establecer el punto crítico a partir del cual es amortizable la sustitución de los difusores por su envejecimiento.

- El seguimiento del ensuciamien-

to de los difusores, gracias a la medición conjunta de la transferencia de oxígeno y presión de la línea, se puede utilizar como metodología preventiva para minimizar los costes energéticos y de mantenimiento.

- Se considera la medición en continuo de la transferencia de oxígeno como una muy buena alternativa en la automatización de la aireación, pudiendo optimizar los ratios energéticos de la explotación de forma continuada.

## 8. Agradecimientos

Agradecimientos a todas las explotaciones por su colaboración en la ejecución de este estudio.

### Bibliografía

- [1] American Society of Civil Engineers (1996). Standard guidelines for in-process oxygen transfer testing. ASCE 18-1996.
- [2] ATV-M 209. Measurement of oxygen transfer under process conditions.
- [3] ABS. Manual de aireación ABS-Nopol.
- [4] Xylem. Sistemas de aireación de alta eficiencia por burbujas finas de Sanitaire.
- [5] Cedex (2014). XXI Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras, Madrid.
- [6] Metcalf & Eddy (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3ª edición.
- [7] Metcalf & Eddy (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. 4ª edición.
- [8] Yáñez, F. Transferencia de oxígeno y aireación. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente, Perú.

**Tabla 15.** Resumen de aumento de transferencia de oxígeno por limpieza difusores, cambio equipo-difusores.

Actuación	Incremento de la transferencia de oxígeno (%)
Limpieza de difusores	26,6
Cambio de difusores	31,4
Trabajar con caudal óptimo	21,5
Trabajar con equipo-caudal óptimo	32,5