



AS-Transfer: sistema inteligente para la optimización energética de los sistemas de aireación por difusión

El consumo eléctrico es una de las partidas más importantes en los costes de explotación de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), dentro de los cuales el consumo de la aireación del proceso biológico es el que presenta mayor porcentaje dentro de la distribución de consumos de la planta. De los distintos sistemas de aireación de los tratamientos biológicos por fangos activados, el sistema de aireación por difusores de burbuja fina es el más extendido en las instalaciones de aguas residuales. Debido al elevado porcentaje que representa la etapa de aireación en el consumo total de una EDAR, es de suma importancia optimizar la etapa de aireación, buscando unas condiciones de trabajo que supongan un mínimo consumo energético y una óptima calidad del efluente. En relación con esto, la medición *off-gas* permite medir la transferencia de oxígeno en los sistemas de aireación por difusión, evaluar la influencia de variables externas y optimizar resultados.

Palabras clave

Aireación del proceso biológico, sistemas de aireación por difusión, medición *off-gas*, medición remota $SOTE_{pw}$ (%), respirometría *on line*, optimización energética.

AS-TRANSFER: INTELLIGENT SYSTEM FOR ENERGY OPTIMIZATION OF DIFFUSION AERATION PROCESS

Electricity consumption is one of the most important items in the operating costs of wastewater treatment plants (WWTP). In relation to this, the consumption of the aeration of biological process is the one with the highest percentage of consumption in a WWTP. Among the different biological aeration systems for activated sludge treatment, the fine bubble diffuser aeration system is the most widely used in wastewater treatment plants. Due to the high percentage that the aeration stage represents in the total consumption of a WWTP, it is extremely important to optimize the aeration stage, looking for working conditions that involve minimum energy consumption and optimum effluent quality. In relation to this, off-gas measurement makes it possible to measure the oxygen transfer in diffusion aeration systems, to evaluate the influence of external variables and in order to optimizing results.

Keywords

Biological process aeration, diffusion aeration systems, off-gas measurement, $SOTE_{pw}$ (%) measurement, on-line respirometry, energy optimization.

Pedro Simón Andreu

director técnico de la de la Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (Esamur)

Carlos Lardín Mifsut

responsable de Explotación Zona II de la Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (Esamur)

Celia del Cacho Sanz

responsable de la Asistencia Técnica para la Vigilancia de Control y Explotación de las Instalaciones de Saneamiento y Depuración del Departamento de Agua de Intecsa

Rafael Garrido Martínez

técnico de Control de EDAR Zona II de Intecsa

Alberto Martín Chuecos

técnico de Mantenimiento y Control de EDAR Zona II de Intecsa



1. INTRODUCCIÓN

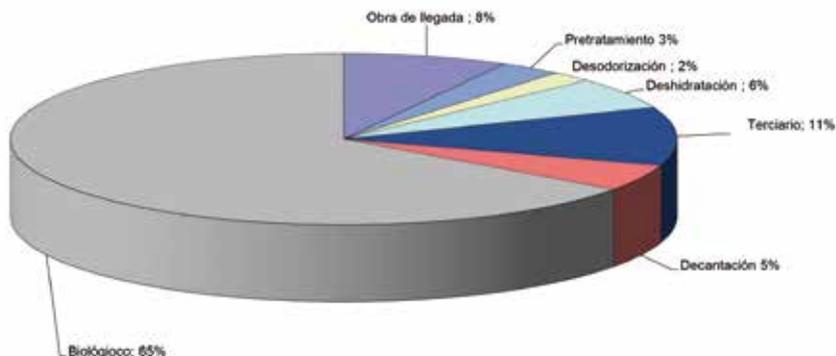
El consumo eléctrico es una de las partidas más importantes en los costes de explotación de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), dentro de los cuales el consumo de la aireación del proceso biológico es el que presenta mayor porcentaje dentro de la distribución de consumos de una EDAR (**Figura 1**). De los distintos sistemas de aireación de los tratamientos biológicos por fangos activados, el sistema de aireación por difusores de burbuja fina es el más extendido en las instalaciones de aguas residuales en la Región de Murcia [1] (**Tabla 1**).

En 2016, Intecsya y Esamur iniciaron el desarrollo de un innovador y avanzado equipo denominado AS-Transfer (*activated sludge transfer*), con el claro objetivo de optimizar de forma efectiva los sistemas de aireación por difusión.

Los sistemas habituales de control de aireación basan su lógica de programación en los valores registrados por instrumentación tradicional (sonda amonio-nitratos, oxígeno, redox...). A diferencia de estos, el equipo AS-Transfer permite, con el registro de numerosas variables externas del sistema de aireación, poder adecuar la aireación al punto óptimo del sistema en su conjunto.

Por tanto, el equipo AS-Transfer permite evaluar *on line* los siguientes parámetros (**Figura 2**):

FIGURA 1. Distribución de consumo en una EDAR tipo.



- Transferencia de oxígeno, $SOTE_{pw}$ (%), medición *off-gas* según norma ASCE 18 - 1996. La medición en continuo de la transferencia de oxígeno en condiciones standard ($SOTE_{pw}$)s permite conocer la eficiencia del proceso de aireación y cuantificar la influencia de las variables externas sobre la transferencia de oxígeno.
- Respirimetría *on line*, SOUR (mg/g.h), siguiendo la metodología de cálculo establecida en referencias externas [10]. La respirometría *on line* permite diagnosticar de forma continuada las demandas energéticas reales de la biomasa heterótrofa (kg O_2 demandados/h). Con el cálculo de este parámetro se puede realizar un balance de aireación entre los kg O_2 transferidos/h *versus* los kg O_2 demandados, lo que permitirá ajustar la aireación en cada momento a las necesida-

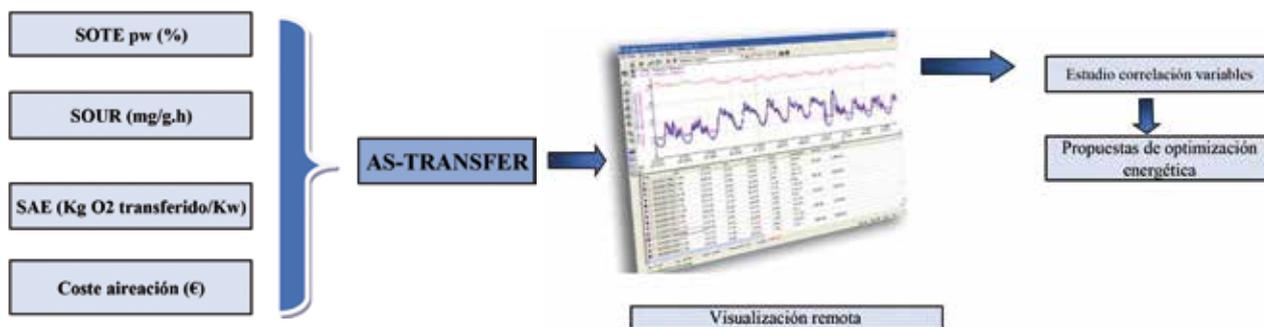
TABLA 1

DISTRIBUCIÓN DE SISTEMAS DE AIREACIÓN EN LA REGIÓN DE MURCIA.

Tipos de aireación biológicos	%
Aireador sumergido	10
Orbal	4
Turbina	6
Difusores	68
Turbina	6
Rotor	4
Biodisco	2
TOTAL	100

des reales, evitando sobreaireaciones innecesarias. Así mismo, su registro continuo permite detectar fluctuaciones asociadas a variaciones en la carga o afecciones en el proceso biológico, ofreciendo una vigilancia continua del estado del proceso biológico.

FIGURA 2. Diagrama de la metodología del equipo AS-Transfer.



- Consumo energía (kWh) y caudal impulsado por el equipo de aireación (Nm³/h). La medición de estas variables en continuo permite determinar el ratio de eficiencia del sistema de aireación (SAE: kg O₂ transferido/kWh), pudiendo determinar el punto de trabajo óptimo en cada momento.
- Coste aireación (€/d). El sistema aporta el coste energético de aireación de forma continua, permitiendo evaluar la estrategia de explotación con menor coste.

El sistema inteligente AS-Transfer evalúa todos los parámetros citados de forma simultánea, lo que le podría permitir determinar en cada momento y forma precisa el punto de aireación óptimo. El carácter multivariable convierte al AS-Transfer en una excelente herramienta proactiva con capacidad para poder conseguir de forma efectiva la optimización energética, a la vez que confiere robustez al sistema biológico por la vigilancia continua del estado del proceso.

2. MEDIOS MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. MEDIOS MATERIALES

El equipo AS-Transfer se conforma de los siguientes elementos (**Figura 3**):

- Campana tipo *off-gas*, que recoge los gases transferidos del seno del fango biológico activo a la atmósfera.
- Medidores de gases O₂ (0-21%) y CO₂ (0-5%) a la salida de la campana *off-gas*.
- Medidor de oxígeno disuelto y temperatura en el licor mezcla.
- Medidor de presión barométrica del aire a la entrada del sistema de aireación.

FIGURA 3. Esquema de AS-Transfer.

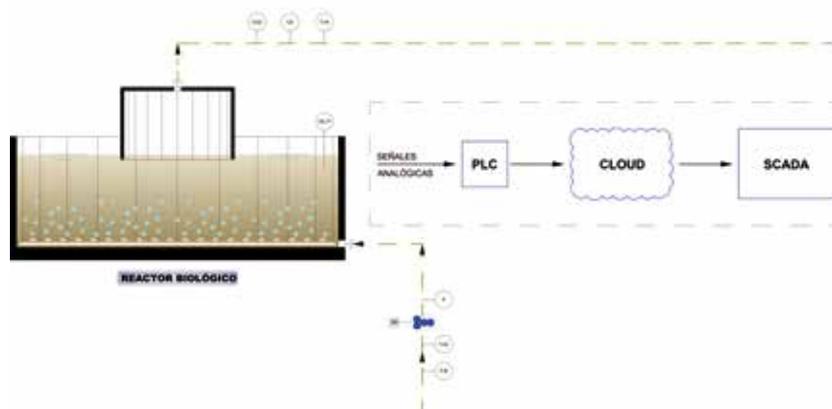


FIGURA 4. Equipo AS-Transfer en una EDAR.



- Medidor de temperatura-humedad relativa del aire a la entrada y salida de la campana *off-gas*.
- Analizador de redes para medir el consumo del equipo de aireación.
- Caudalímetro másico de aire y transmisor de presión en el colector de aireación.
- Autómata central (**Figura 4**) que recibe todas las señales analógicas y permite:
 - La visualización remota en tiempo real de todas las variables (**Figuras 5 y 6**).
 - El cálculo de los siguientes parámetros:
 - Transferencia de oxígeno: OTE_{pw} (%), SOTE_{pw} (%) y kg O₂ transferidos/h.
 - Necesidades reales de aireación: OUR(mg/l.h), SOUR (mg/

g.h) y kg O₂ demandados/h.

- SOTR: kWh, SAE (kg O₂/kWh) y AE (gr O₂/Nm³.m)
- Coste aireación: c€/kW y €/d.

2.2. METODOLOGÍA

Para el cálculo de la transferencia de oxígeno se ha utilizado como guía la norma ASCE 18 - 1996 de la American Society of Civil Engineers (*Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing*). Según esta norma [2], el rendimiento en la transferencia de oxígeno en condiciones reales (OTE_{pw}) se realiza teniendo en cuenta las fracciones molares del oxígeno de entrada y salida respecto a las de nitrógeno e inertes del propio gas. El cálculo es el que recoge la **Ecuación 1**, siendo MR_i y MR_e las fracciones molares de oxígeno res-



FIGURA 5. Visualización de AS-Transfer en SCADA Cloud.

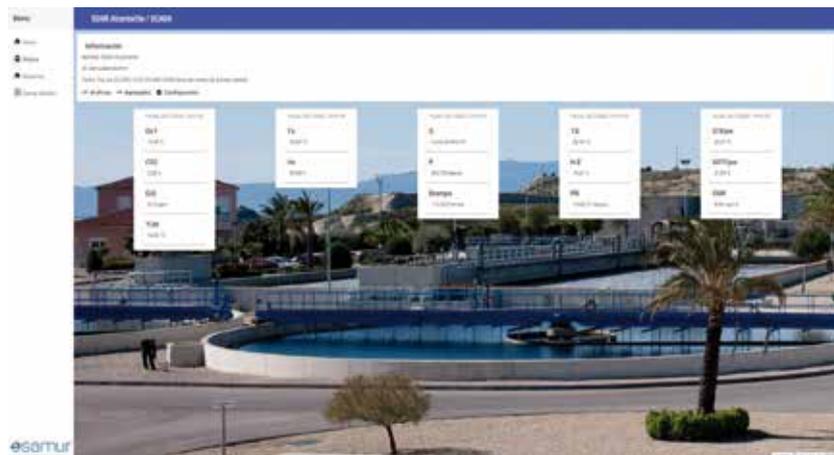
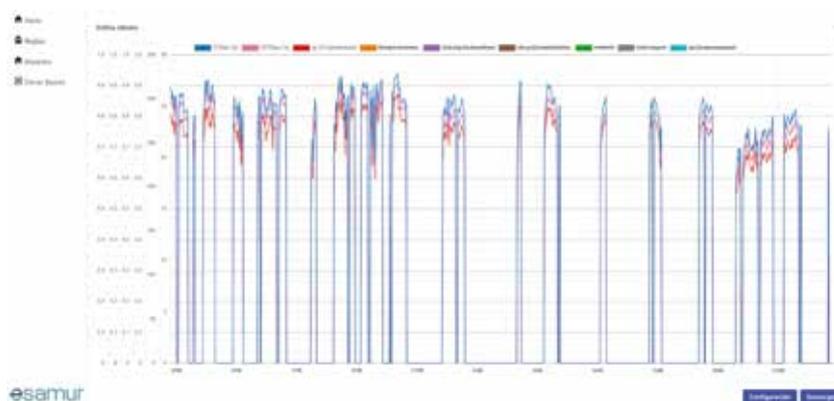


FIGURA 6. Registro de las variaciones del $SOTE_{pw}$.



Ecuación 1

$$OTE_{pw}(\%) = \frac{\text{Masa de } O_2 \text{ entrante} - \text{Masa de } O_2 \text{ saliente}}{\text{Masa de } O_2 \text{ entrante}} \times 100 \quad \Rightarrow \quad OTE = \frac{MR_i - MR_e}{MR_i}$$

$$MR_i = \frac{a_i}{1 - Y_i - Y_{CD_i} - Y_{W_i}}$$

$$MR_e = \frac{Y_e}{1 - Y_e - Y_{CD_e} - Y_{W_e}}$$

Ecuación 2

$$SOTE_{pw} = SOTE_{cw} \cdot \alpha \cdot F = \frac{OTE_{pw}(\%) \cdot C_{\infty 20}^*}{(\tau \cdot \beta \cdot \Omega \cdot C_{\infty 20}^* - C) \cdot \theta^{(T-20)}}$$

pecto a nitrógeno e inertes de entrada y salida; Y_i e Y_e las fracciones molares de O_2 ; Y_{cdi} e Y_{cde} las fracciones molares de CO_2 ; y Y_{wi} e Y_{we} las 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, tal y como recoge la **Ecuación 2**, siendo los factores de corrección β (depende de la salinidad del agua de proceso), Ω (depende de la presión atmosférica ambiental) y τ (depende de la temperatura del proceso).

El estudio se ha llevado a cabo en una EDAR con un proceso biológico de fangos activos tipo carrusel

que dispone de aireación mediante difusores con burbuja fina. El ratio energético de la instalación es $0,86 \text{ kWh/m}^3$, considerándose representativa del ratio energético promedio de las instalaciones de la Región de Murcia (**Figuras 7, 8 y 9**).

Durante el período objeto de estudio (junio 2019-julio 2020), además de valorar todos los parámetros calculados por el sistema AS-Transfer, se evaluó la influencia de variables externas tales como: número de reactores biológicos operativos, equipos de aireación y aceleradores de corriente. En este artículo se evalúa la influencia del número de reactores biológicos en operación durante 45 días, lo que evidencia la importancia de estas variables externas a la hora de realizar una auditoría energética.

Durante el período objeto de estudio se modificaba una variable y el resto permanecían constantes para evitar resultados que dificultaran una interpretación directa. El tiempo de análisis para cada variable objeto de estudio era como mínimo de 20 días para conseguir mayor estabilidad y trazabilidad en los datos registrados. En cada período se recabó información sobre variables externas que influyen en las mediciones de $SOTE_{pw}$ como caudal, carga entrada, viscosidad y biomasa de los reactores (MLSS). Para el cálculo de costes energéticos se ha aplicado la tarifa vigente durante el período objeto de estudio ($0,09 \text{ €/kWh}$).

3. RESULTADOS

3.1. VALORACIÓN DE NÚMERO DE BIOLÓGICOS OPERATIVOS

Durante el estudio se consideró variar el número de reactores biológicos operativos en la instalación para determinar su influencia en la auditoría energética realizada por el sis-

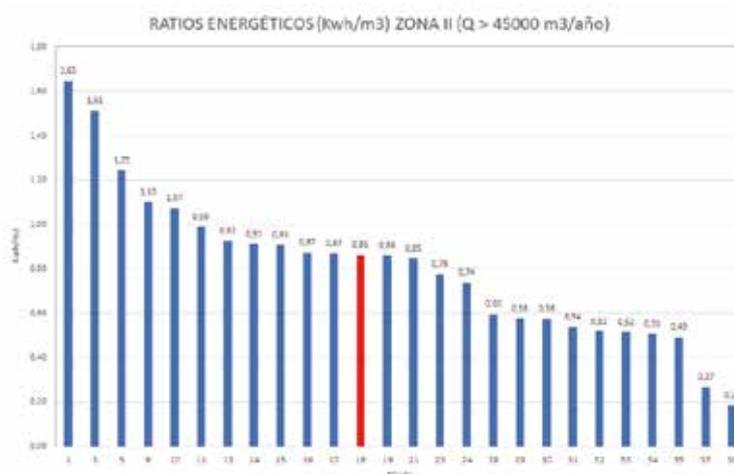
TABLA 2		
DATOS TÉCNICOS DE LOS DIFUSORES RELATIVOS AL ESCENARIO 1.		
Difusores		
Marca	Xylem	
Diámetro	9"	
Nº de difusores por reactor	784	
Caudal trabajo soplante (Nm ³ /h)	1.400-1.240	
Nº reactores	1	2
Número difusores disponibles	784	1.568
Caudal por difusor (Nm ³ /h.dif)	1,8 - 1,6	0,9 - 0,8

tema AS-Transfer (**Tabla 2**). Durante este período se mantuvo invariable la biomasa del proceso, para igualar las condiciones de valoración.

En un primer período, del día 1 al 23, se registraron medidas operando con un reactor biológico, lo que correspondería a disponer de 784 difusores y un caudal por difusor entre 1,8 y 1,6 Nm³/h. En un segundo período, del día 24 al 45, se realizaron medidas con dos reactores biológicos en operación, lo que corresponde a disponer de 1.568 difusores y un caudal por difusor entre 0,9 y 0,8 Nm³/h. Los resultados de las mediciones se adjuntan en las **Figuras 10 y 11**.

Uno de los objetivos del estudio fue realizar un continuo balance de la aireación de la instalación. Para

FIGURA 7. Ratios energéticos en las EDAR.



ello, se comparan los kilogramos de oxígeno transferidos (calculados durante el período de aireación) con los kilogramos de oxígenos demandados (calculados durante el período de la parada de aireación), cuyos resultados se muestran en las **Figuras 12 y 13**. De forma general, en la mayoría de los casos, los kilogramos de oxígenos transferidos son muy superiores a los kilogramos de oxígenos demandados, lo que conlleva sobreairesaciones innecesarias con altas concentraciones de oxígeno disuelto y redox en el licor mezcla.

Para un cálculo más riguroso de los costes reales, el ahorro neto se ha calculado restando los costes, tanto energéticos como de mantenimiento, asociados a trabajar de forma

continuada con un acelerador de corriente en la segunda línea del reactor biológico.

4. DISCUSIÓN

El resumen de datos registrados en ambos periodos de operación (**Figura 14**) permite realizar las siguientes valoraciones:

- Se observa una clara mejoría de todos los indicadores del sistema de aireación al trabajar con dos reactores biológicos. Aunque la carga de entrada fue mayor (+20%) en el período durante el cual se trabajó con dos reactores biológicos, se obtiene un mejor SOTE_{pw} (+33%) y SAE-kg O₂/kWh (+63%), a la misma vez que se registra una disminu-

FIGURA 8. Balance kg O₂ transferidos > kg O₂ demandados.

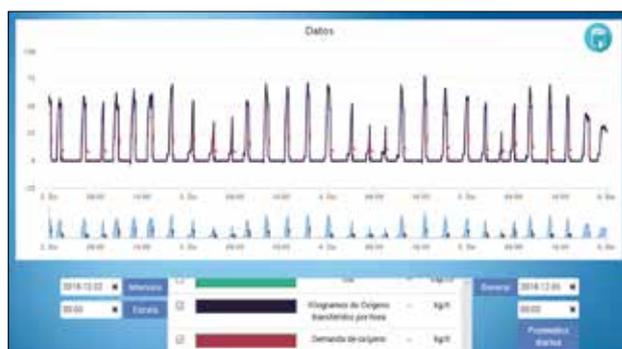


FIGURA 9. Balance kg O₂ transferidos similar a kg O₂ demandados.

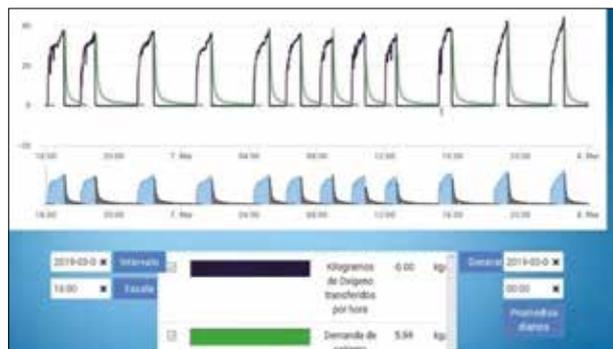




FIGURA 10. Evolución del SOTE al trabajar con 1 o 2 reactores biológicos.



FIGURA 11. Evolución del SOTE y coste de la aireación al trabajar con 1 o 2 reactores biológicos.



FIGURA 12. Evolución del balance de la aireación al trabajar con 1 o 2 reactores biológicos.

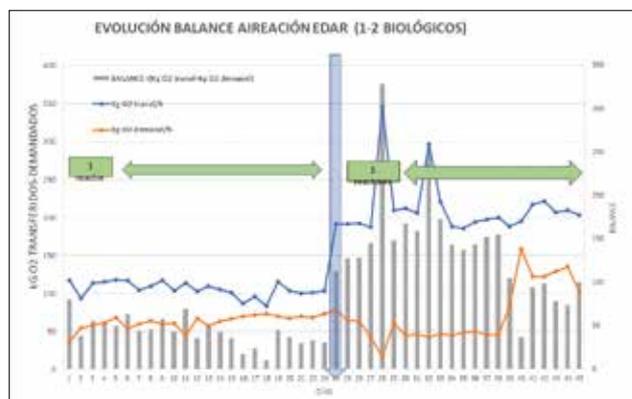


FIGURA 13. Evolución de kg O₂ transferidos/kW al trabajar con 1 o 2 reactores biológicos.



ción de las horas aireación (-31%) y de la presión en el colector aireación (-12%). Trabajar con dos reactores biológicos conllevó, por tanto, una clara mejoría de todos los indicadores energéticos y una reducción de costes de aireación del 52%, lo que supuso un ahorro estimado neto de unos 5.900 €/año (**Figuras 10, 11 y 13**).

- Tal y como muestra el equipo AS-Transfer, en el período de operación con dos reactores biológicos se acentúa el desfase entre los kilogramos de oxígeno transferidos y los demandados por la biomasa activa (**Figura 12**), lo que indica la clara necesidad de ajustar el sistema de aireación para equiparar los kilogramos de oxígeno transferidos a la demanda real, evitando

sobreairesaciones y sobrecostes innecesarios. El sistema AS-Transfer tiene la capacidad de establecer la mejor estrategia de operación, donde se consigue un ratio de transferencia de oxígeno óptimo ajustado a las necesidades reales por el fango activo.

- En la **Figura 12** se registra un período con vertidos industriales, entre el día 39 y el 45, donde se incrementan los kilogramos de oxígeno demandados, lo que conlleva un ajuste de los kilogramos transferidos a las necesidades reales. El registro de variaciones de carga detectado por el AS-Transfer pone en valor el equipo como sistema de vigilancia del proceso biológico, lo que le confiere robustez y fiabilidad.

5. CONCLUSIONES

En una EDAR existen numerosas variables que son objeto de valoración para conseguir mejor eficiencia energética y ahorro de costes. La optimización energética del sistema de aireación debe iniciarse con la evaluación del sistema en su conjunto, no centrándose únicamente en sus componentes individuales (difusores, conducciones y valvulería, equipos de aireación, programación y automatización del sistema, carga de entrada, respirometrías...).

En la EDAR objeto de estudio el escenario de trabajo más idóneo se consigue al trabajar con dos reactores biológicos (**Figuras 14 y 15**). En este caso, se consigue un ahorro neto de unos 6.000 €/año, lo que equivale a una reducción

de emisión de CO₂ de 29.187 kg / año. También se observa una clara relación entre la carga entrada (kg DBO₅/d) y los kilogramos de oxígeno demandados, lo que valida a las

respirometrías en línea como una herramienta clave en la optimización energética y en la vigilancia del proceso biológico. Durante el período objeto de estudio, los ki-

logamos de oxígeno transferidos son muy superiores a los kilogramos de oxígenos demandados (**Figuras 12 y 15**) como consecuencia de consignas de aireación elevadas que conllevan a un sobrecoste innecesario en la explotación. En este sentido, el equipo AS-Transfer tiene la capacidad de evaluar el ajuste de las consignas de aireación a las necesidades reales demandadas, consiguiendo una optimización energética efectiva y fiable.

Finalmente, el equipo AS-Transfer permite, frente a controles de aireación convencionales, realizar cálculos avanzados de forma continua desde perspectivas complementarias tales como la transferencia de oxígeno (SOTE_{pw}), respirometría *on line* (SOUR), consumo de equipo de aireación o coste del sistema aireación. Este carácter multidisciplinar convierte al AS-Transfer en una excelente herramienta proactiva para conseguir de forma efectiva la optimización energética en los sistemas de aireación por difusión.

FIGURA 14. Valoración de ganancia de costes al trabajar con 2 reactores biológicos versus 1 reactor.

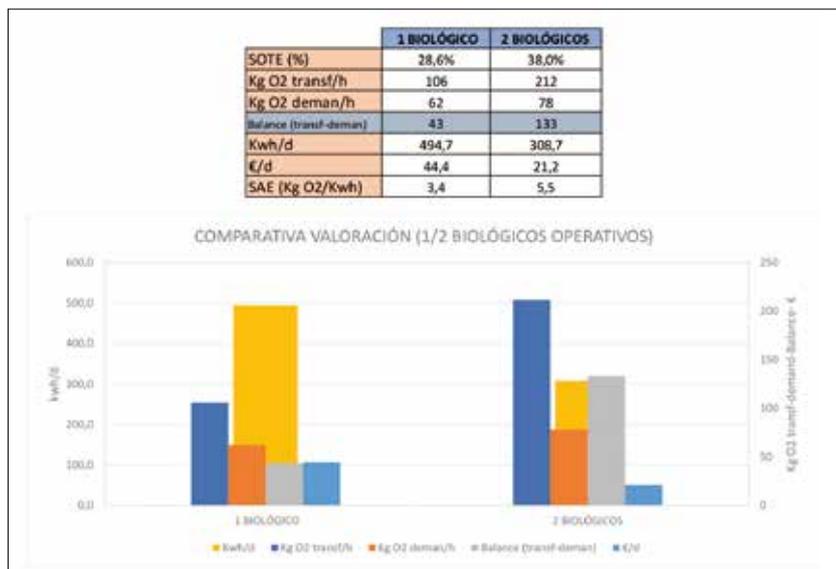
	1 BIOLÓGICO	2 BIOLÓGICOS	2 BIOLÓGICOS GANANCIA (%)
Presión (mbares)	498	438	-12
h/d soplante	14,4	9,9	-31
BALANCE AIREACIÓN			
SOTE (%)	28,6%	38,0%	33
Kg O2 transf/h	106	212	100
Kg O2 deman/h	62	78	26
Balance (transf-demand)	43	133	
RATIOS ENERGÉTICOS- SOTR			
AE (gr O2/Nm3/h)	20,2	32,6	61
SAE (Kg O2/Kwh)	3,35	5,46	63
BALANCE ENERGÉTICO			
Kwh/d	494,7	308,7	-38
€/d	44,4	21,2	-52
PARÁMETROS EXTERNOS			
Q (m3/d)	979	1.094	12
Kg DBO5/d	415	499	20
MLSS (ppm)	2.286	2.062	
Viscosidad	1,80	1,60	

Ahorro energético 2 BIOLÓGICOS (€/año)	8.436
--	-------

P agitador	3
Coste energético agitador (€/año)	1.800
Coste mantenimiento agitador (€/año)	720

Ahorro energético neto (€/año)	5.916
---------------------------------------	--------------

FIGURA 15. Valoración de 1 versus 2 biológicos operativos en una EDAR.



Bibliografía

[1] Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia (2012). Ingeniería Civil, núm. 168.

[2] American Society of Civil Engineers (1996). Standard Guidelines for in-Process Oxygen Transfer Testing. ASCE, 18.

[3] ATV-M 209. Measurement of oxygen transfer under process conditions.

[4] ABS. Manual de aireación ABS-Nopol.

[5] Xylem. Sistemas de aireación de alta eficiencia por burbujas finas de Sanitaire.

[6] Cedex (2014). XXI Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras, Madrid.

[7] Metcalf & Eddy (1998). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición.

[8] Metcalf & Eddy (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Fourth Edition.

[9] Yáñez, F. Transferencia de oxígeno y aireación. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del ambiente.

[10] Surcis (2006). Metodología de ensayos respirométricos en fangos activos.