Estimación del potencial de ahorro en los sistemas de aireación de las EDAR mediante la medición de la transferencia de oxígeno

SergioBeltrán Calaff investigador del Área de Ingeniería Ambiental del Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT-IK4)
Izaro Lizarralde Aguirrezabal estudiante de doctorado del Área de Ingeniería Ambiental del Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT-IK4)
Eduardo Ayesa Iturrate director del Área de Ingeniería Ambiental del Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT-IK4)
Jon Gorriti Cabrejas responsable de procesos de la EDAR de Galindo, Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB)
Fernando Ortega Conde jefe de planta de la EDAR de Galindo, Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB)
Alejandro de la Sota subdirector de Laboratorio de Saneamiento, Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB)
José María Villanueva del Casal subdirector de Explotación de Saneamiento, Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB)

La aireación en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) juega un papel crucial en la estabilidad, rendimiento y costes operacionales del proceso, suponiendo hasta un 75% de la demanda energética total de la planta. Con el fin de optimizar los altos costes operacionales, es conveniente conocer la eficiencia de la transferencia de oxígeno del sistema de aireación en condiciones de campo. Este artículo presenta la aplicación sistemática a gran escala de una metodología precisa, versátil y sencilla que permite conocer el estado general de los difusores de aire, detectar zonas de baja eficiencia o cuantificar el período de amortización de la reparación de fugas de aire. La metodología permite comparar, además, diferentes estrategias de operación de la planta en lo que a la eficiencia en la transferencia de oxígeno de los difusores se refiere. En el marco de un proyecto global que el Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia (CABB) ha llevado a cabo en colaboración con el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT-IK4) para optimizar energéticamente el sistema de aireación de la EDAR de Galindo-Bilbao (1,5 millones de habitantes equivalentes), se ha demostrado en la planta el potencial de la metodología para ayudar en la toma de decisiones en lo que se refiere a optimizar el consumo energético de su sistema de aireación.

Palabras clave
Aireación, eficiencia energética, energía, EDAR, método *off-gas*.

Estimating the savings potential in WWTP aeration systems through the measurement of oxygen transfer

Aeration in wastewater treatment plants (WWTP) plays a crucial role in the stability, performance and operational costs of the process, and it accounts for up to 75% of a plant's total energy demand. In order to reduce these high operational costs, it is necessary to determine the efficiency of the aeration system under field conditions. This article presents the systematic application at full scale of an accurate, versatile and simple methodology that allows plant managers to know the general state of the air diffusers, detect low efficiency zones or quantify the amortisation period of air leaks. Moreover, the methodology permits different plant operating strategies to be compared with respect to the oxygen transfer efficiency of the air diffusers. In the framework of a global project that Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia (CABB) has carried out in collaboration with Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT-IK4) to energetically optimise the aeration system of the Galindo-Bilbao WWTP (1.5 MPE), the potential of the methodology has been shown in the plant as an aid in making decisions regarding the optimisation of the aeration system's energy consumption.

Keywords
Aeration, energetic efficiency, energy, WWTP, off-gas method.

1. Introducción

La aireación en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) juega un papel crucial en la estabilidad, rendimiento y costes operacionales del proceso, suponiendo hasta un 75% de la demanda energética total de la planta. Tal es su importancia que la regulación automática de la aireación fue uno de los primeros controles que fueron instalados en las plantas (Olsson, 1974). Los avances en el control han llegado hasta nuestros días con el desarrollo e implantación de controles más avanzados tanto de alto nivel, en el que la variable controlada es el nitrógeno amoniacal del efluente, como de bajo nivel, siendo el control de la presión de impulsión un claro ejemplo. De hecho, son múltiples las referencias que tienen como objetivo dar a conocer una alternativa más al control de la aireación (Åmand *et al.*, 2013) o a explicar sus implicaciones a escala real (Irizar *et al.*, 2014).

Sin embargo, si bien los avances en el control del sistema de aireación han sido evidentes para reducir los costes de operación, la monitorización de la propia eficiencia en la transferencia de oxígeno del sistema de aireación no es, por lo general, tenida en cuenta. En el caso concreto de utilizar difusores de aire, estos tienden a deteriorarse y colmatarse, incrementándose así el consumo energético por pérdida de eficiencia y aumento de pérdida de carga. Evidentemente, la pérdida de eficiencia se traduce en un incremento del caudal de aire necesario para llegar a la misma concentración de oxígeno disuelto y, por tanto, supone un incremento de coste energético, sin contar con la posible puesta en servicio de los grupos de reserva activa. De igual manera, un incremento de la pérdida de carga supone en última instancia un aumento de la presión de servicio, lo que irremediablemente implica un aumento del gasto energético. De esta forma, es común encontrarse consumos energéticos entre un 10% y un 35% superiores a los que debería haber si los difusores estuvieran en óptimas condiciones (Metcalf y Eddy *et al.*, 2013). Este aspecto es fundamental sobre todo en grandes plantas, en las que el coste energético tiene una especial relevancia.

Así mismo, la eficiencia de los difusores de aire está claramente influenciada por la operación de la planta. Por ejemplo, el uso de selectores anóxicos y zonas de desnitrificación previas a la zona aerobia implica que esta última tenga una mejor eficiencia en la transferencia de oxígeno. La causa principal es la oxidación previa de la mayor parte de la materia orgánica rápidamente biodegradable, la cual supondría un obstáculo a la transferencia de oxígeno en las zonas aerobias, especialmente en el caso de existir surfactantes (Rosso y Strenstrom, 2006). También, una mayor concentración de sólidos suspendidos en el licor mezcla provoca un incremento de su viscosidad y del riesgo de coalescencia de las burbujas, los cuales conllevan a una disminución de la eficiencia (Henkel *et al.*, 2011).

Actualmente, la gestión de la eficiencia del difusor se basa casi exclusivamente en actuaciones periódicas de sustitución o reparación según plazos preestablecidos, lo cual dista mucho de ser óptimo dadas las implicaciones que tiene la aireación en el proceso. Una correcta monitorización permite cuantificar la repercusión energética que tiene el estado físico de los difusores, con el consiguiente establecimiento de una frecuencia óptima para las operaciones de limpieza o sustitución. Permite, también, la detección de fugas o zonas de baja aireación, así como el análisis de la eficiencia de la transferencia de oxígeno para diferentes estrategias de operación. Además, conocer *in situ* la distribución espacial y temporal de la eficiencia a lo largo de la zona aerobia y en las condiciones reales de funcionamiento resulta fundamental para planificar una futura renovación, modificación o ampliación del sistema de aireación.

Este artículo presenta la aplicación sistemática a gran escala de una metodología precisa, versátil y sencilla que permite estimar el potencial de ahorro en los sistemas de aireación de las EDAR mediante la medición de la transferencia de oxígeno en condiciones de campo. El estudio se ha llevado a cabo en el marco de un proyecto global que el Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia (CABB) ha realizado en colaboración con el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT-IK4) para optimizar los costes energéticos del sistema de aireación de la EDAR de Galindo-Bilbao (1,5 millones de habitantes equivalentes -he-).

Tras la implantación del controlador avanzado Art-ICA, el cual consiguió reducir el consumo energético del sistema de aireación en un 15% (Ayesa *et al.*, 2006), el CABB decidió posteriormente abordar un estudio por simulación numérica para reducir más los costes operacionales (CABB y CEIT-IK4, 2012). La herramienta de simulación dinámica, que fue especialmente diseñada para la planta, permitió proponer diferentes mejoras en su operación y control, entre las que se encuentra la variación de la presión de impulsión de las soplantes, la resintonización del controlador de oxígeno disuelto y el incremento de la consigna de nitrógeno amoniacal vertido desde 1,0 g N/m^3 a 2,0 g N/m^3. El ahorro estimado con estas mejoras fue de un 13% adicional (de la Sota *et al.*, 2013).

Tabla 1. Resumen estadístico de la composición del agua residual de la EDAR de Galindo-Bilbao para el año 2013: valor medio ± desviación típica [valor mínimo - valor máximo] (número de datos).

Componente	Agua bruta (220)	Agua decantada (244)	Agua tratada (245)
DQO_T (gDQO m^{-3})	541 ± 188 [90 -1.000]	283 ± 92 [67 - 670]	37 ± 11 [13 - 81]
SST (gSS m^{-3})	273 ± 107 [45 - 740]	76 ± 21 [32 - 190]	5 ± 3 [< 0,6 - 21]
SSV (gSS m^{-3})	240 ± 94 [33 - 650]	69 ± 19 [19 - 150]	5 ± 3 [< 0,6 - 18]
$N\text{-}NH_X$ (gN m^{-3})	27,6 ± 9,4 [4,6 - 43,0]	23,6 ± 7,8 [4,3 - 34,0]	0,52 ± 0,45 [< 0,50 - 3,00]
$N\text{-}NO_3$ (gN m^{-3})	-	-	9,0 ± 2,5 [3,2 - 18,0]

Con el fin de abarcar todos los posibles puntos de mejora, el estudio global contempló en último lugar la realización de un análisis de la eficiencia de los difusores de aire. El objetivo del análisis era conocer el estado general de los difusores y detectar zonas de baja aireación y fugas de aire. Los objetivos también incluían la comparación cuantitativa de los diferentes modos de operación de la planta desde el punto de vista de la eficiencia de la transferencia de oxígeno.

2. Descripción de la EDAR de Galindo-Bilbao

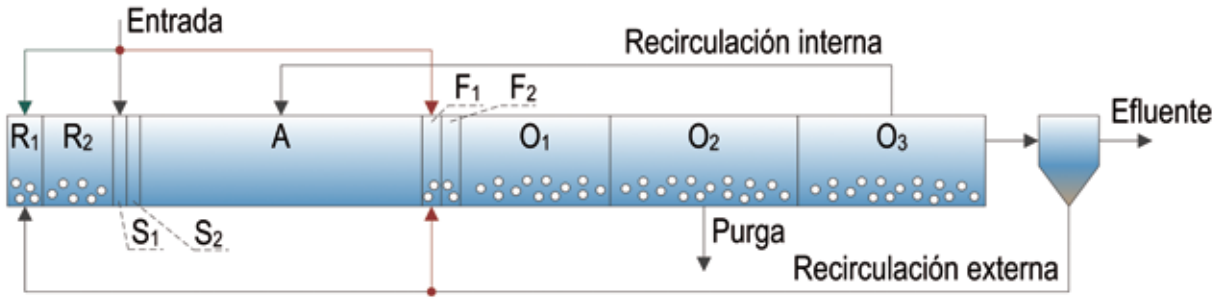
La planta trata el agua urbana de veinte municipios del área metropolitana de Bilbao (345.600 m^3 d^{-1}), lo que supone el 41% del volumen tratado en el País Vasco y el 2,2% del nacional (INE, 2014). El agua residual que recibe la planta tiene una concentración media en términos de materia orgánica, sólidos en suspensión y nitrógeno amoniacal, con influencias de escorrentías urbanas e infiltraciones de agua de mar (**Tabla 1**).

El tratamiento secundario consta de seis líneas paralelas e independientes entre sí que se componen a su vez de diez reactores biológicos y tres decantadores secundarios. Cada línea puede operar en tres modos de operación diferentes: regeneración-desnitrificación-nitrificación (RDN) para la prevención por selección cinética de *bulking* filamentoso; desnitrificación-regeneración-desnitrificación-nitrificación (DRDN) para altas cargas; o en modo de eliminación de solo materia orgánica (MO). La **Figura 1** muestra una representación gráfica de los tres modos de operación, siendo R los reactores de regeneración, S los selectores anóxicos, A el reactor anóxico, F los reactores facultativos y O los reactores óxicos.

2.1. Sistema de aireación

La regulación del caudal de aire suministrado a cada reactor se realiza mediante una válvula de admisión de aire que es manipulada para obtener una determinada concentración de oxígeno disuelto en aquel. El aire se introduce mediante cua-

Figura 1. Configuración RDN (negro), DRDN (en verde y negro) y MO (marrón) de cada una de las seis líneas biológicas de la EDAR de Galindo-Bilbao.



	R_1	R_2	S_1	S_2	A	F_1	F_2	O_1	O_2	O_3
Volumen (m^3)	1250	2500	482	482	10,000	665	665	5330	6660	6660
Área (m^2)	140	281	54	54	1124	75	75	599	748	748
Nº Difusores	388	833	---	---	---	261	261	1584	1728	1512

Ecuación 1. $$OTE = \frac{\text{Flujo másico de } O_2 \text{ transferido}}{\text{Flujo másico de } O_2 \text{ de entrada}} = \frac{\text{Flujo másico de } O_2 \text{ de entrada} - \text{Flujo másico de } O_2 \text{ de salida}}{\text{Flujo másico de } O_2 \text{ de entrada}}$$

Ecuación 2. $$OTE = \frac{\left(\frac{Y_{O_2}}{1-Y_{O_2}-Y_{CO_2}-Y_{H_2O}}\right)_e - \left(\frac{Y_{O_2}}{1-Y_{O_2}-Y_{CO_2}-Y_{H_2O}}\right)_s}{\left(\frac{Y_{O_2}}{1-Y_{O_2}-Y_{CO_2}-Y_{H_2O}}\right)_e}$$

Ecuación 3. $$OTE = 1 - \frac{\left(\frac{Y_{O_2}}{1-Y_{O_2}-Y_{CO_2}}\right)_s}{\left(\frac{Y_{O_2}}{1-Y_{O_2}-Y_{CO_2}}\right)_e}$$

Ecuación 4. $$SOTE_{pw} = \frac{\delta \cdot C^*_{O_2}}{\tau \cdot \Omega \cdot \beta \cdot \delta \cdot C^*_{O_2} - C_{O_2}} \cdot \theta^{20-T} \cdot OTE$$

Ecuación 5. $$\overline{SOTE}_{pw} = \frac{\sum_{i=1}^{m} (Q_i \cdot SOTE_{pw,i})}{\sum_{i=1}^{m} Q_i}$$

Ecuación 6. $$\alpha F = \frac{\overline{SOTE}_{pw}}{SOTE_{cw}}$$

tro turbosoplantes de una potencia nominal de 1,3 MW (1.020 mbar y 41.850 $m^3_N\ h^{-1}$) que operan con una presión de impulsión constante de valor 970 mbar (la altura de la lámina de agua en los reactores es de 8,9 m). Los reactores de regeneración y facultativos disponen de difusores de membrana perforada (Refractron Technologies Corp., modelo DA-178/AF-90); y los reactores óxicos disponen de difusores cerámicos (Aercor Sanitaire, modelo D-230). El sistema de aireación de la planta consumió 8.949 MWh en el año 2013, lo que supuso un coste económico de 805 k€.

Dadas las implicaciones que el sistema de aireación tiene en los costes operacionales del proceso, además de en su estabilidad y rendimiento, resulta imprescindible conocer la eficiencia en la transferencia de oxígeno que tienen los difusores de aire para las condiciones reales de operación. Una correcta monitorización permitirá cuantificar la repercusión energética que supone limpiar o sustituir los difusores, reparar las fugas de aire o eliminar las zonas de baja aireación, así como comparar la eficiencia de la transferencia de oxígeno para diferentes estrategias de operación.

3. Metodología

3.1. Métodos

El método utilizado para conocer la eficiencia en condiciones de campo de los difusores de aire en la EDAR de Galindo-Bilbao se denomina método *off-gas*, y está detallado en la norma ASCE-18-96 (1997). Esta técnica, que ofrece la mayor precisión, versatilidad y sencillez frente a otros métodos (ASCE 1997), ha sido utilizada en los últimos 20 años en América (Rosso *et al.*, 2005) y Europa (Schuchardt *et al.*, 2007).

El principio fundamental se basa en calcular la eficiencia de la transferencia de oxígeno mediante un balance de masa de oxígeno entre el gas que sale a través de la lámina de agua del reactor (*off-gas*) respecto al del gas que se suministra a través de los difusores, en este caso aire. De esta forma, la eficiencia en la transferencia de oxígeno se define mediante la variable *OTE* (*Oxygen Transfer Efficiency*) como el flujo másico de oxígeno que se transfiere al medio líquido respecto al que se suministra (**Ecuación 1**).

Bajo la hipótesis de que todos los gases menos O_2, CO_2 y vapor de agua se conservan en la burbuja a lo largo de su ascensión por la columna de agua del reactor, se puede calcular la eficiencia *OTE* mediante la **Ecuación 2**, siendo Y la fracción molar del gas correspondiente a O_2, CO_2 o vapor de agua; y los subíndices *e* y *s* los que indican que el gas es de entrada y salida, respectivamente.

Si se elimina el vapor de agua del gas, la eficiencia en la transferencia de oxígeno que tiene lugar en un reactor se puede calcular simplemente midiendo las fracciones molares de O_2 y CO_2 del aire suministrado al reactor (subíndice *e*) y del *off-gas* (subíndice *s*), como señala la **Ecuación 3**.

La eficiencia *OTE* está definida para las condiciones en las que se tomó la medida. Con el fin de poder comparar la eficiencia de diferentes zonas independientemente de las condiciones de operación en las que se tomó la medida, se calcula la eficiencia para condiciones estándar (20 ºC, 101.325 Pa y 0 g O_2 m^{-3}). Se define así la eficiencia $SOTE_{pw}$ (*Standard Oxygen Transfer Efficiency in process water*) según la **Ecuación 4** (Beltrán *et al.*, 2013), donde:

- θ (1,024, ASCE 1997) es el factor de corrección asociado a la temperatura del líquido *T* (°C), la cual influ-

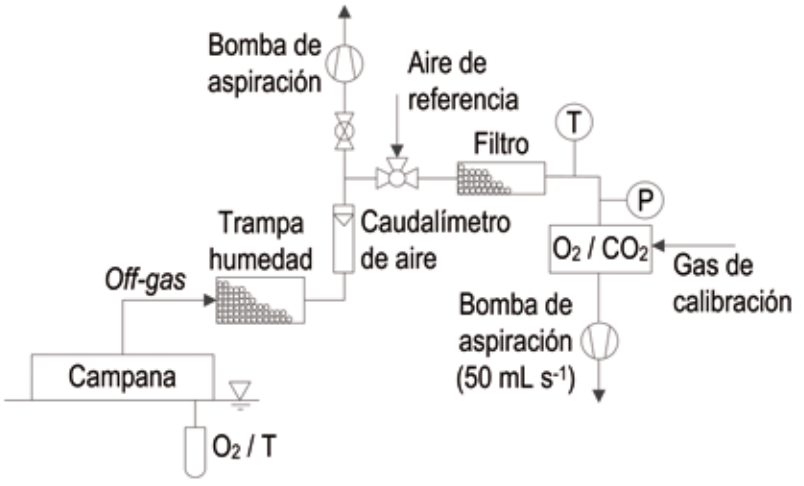
ye en la transferencia de oxígeno a través de su efecto en el coeficiente de difusión molecular del oxígeno, la viscosidad y la tensión superficial del líquido.

- Co_2 (g O_2 m^{-3}) es la concentración de oxígeno disuelto en el reactor en el momento de la medición.
- C^*o_2 (g O_2 m^{-3}) es la concentración de saturación de oxígeno disuelto en condiciones estándar (9,092 g O_2 m^{-3}, Standard Methods, 2005).
- T, Ω, β y δ son los factores que corrigen el valor C^*o_2 según la temperatura del líquido, las condiciones atmosféricas, las características intrínsecas del líquido (como por ejemplo la concentración de sólidos disueltos) y la presión hidrostática que ejerce la columna de agua sobre el sensor de oxígeno disuelto, respectivamente.

Una vez que la eficiencia $SOTE_{pw}$ es obtenida para cada punto *i* del área de un reactor, se calcula un promedio de la eficiencia $\overline{SOTE}_{pw}$ en función del caudal de aire *Q* (m^3N h^{-1}) del *off-gas* extraído. De esta forma, para la totalidad de los m puntos medidos en el reactor, la eficiencia es la señalada en la **Ecuación 5**.

Finalmente, el rendimiento que cuantifica en un reactor la disminución de la eficiencia en la transferencia de oxígeno causada tanto por las características intrínsecas del fango activado (influenciadas por las condiciones de operación de la planta), como por el estado físico de sus difusores, se expresa con el factor αF, y se puede calcular según la **Ecuación 6**, donde $SOTE_{cw}$ (*Standard Oxygen Transfer Efficiency in clean water*) es la eficiencia estándar en la transferencia de oxígeno para agua limpia y difusores nuevos. Esta eficiencia se puede tomar de las hojas de características de los difusores que son proporcionadas por el fabricante, teniendo en cuenta la profundidad, densidad de difusores instalada en cada reactor y el caudal de aire suministrado por difusor. Es importante señalar que, para un mismo nivel de oxigenación, el rendimiento αF es inversamente proporcional al caudal de aire suministrado y, por tanto, al consumo energético de las soplantes. Por este motivo, resulta primordial medir el rendimiento αF si se quieren conocer las posibilidades de mejora energética.

Figura 2. Esquema descriptivo del equipo de medición utilizado en la EDAR de Galindo-Bilbao.



3.2. Materiales

Con el fin de llevar a cabo la metodología descrita, se hace necesaria la utilización de material específico que mida en continuo las siguientes variables: la fracción molar de O_2 y CO_2 del aire ambiental y del *off-gas*, la temperatura y concentración de oxígeno disuelto del fango activado, y la temperatura, presión y caudal del gas extraído. La **Figura 2** muestra un esquema ilustrativo de los componentes principales del equipo de medición utilizado en la experimentación.

Para ello, una plataforma flotante de poliestireno expandido actúa como campana extractora del *off-gas*. Dos filtros antihumedad rellenos de gel de sílice con indicador de humedad tipo cloruro de cobalto extraen el vapor de agua del gas antes de que se analice su composición. El caudalímetro de gas empleado es el modelo Proline t-mass 65F de Endress+Hauser. La temperatura del gas es medida por un sensor tipo Pt100 conectado a un convertidor de medida PM-311 de Desin Instruments. El sensor de la concentración de oxígeno disuelto y la temperatura del líquido es el modelo LDO Dissolved Oxygen Sensor de Hach Lange. El analizador de gas que mide la fracción molar de O_2 y CO_2 es el modelo PA 7.0 O_2-CO_2 de Witt. Un sistema SCADA instalado en un PC portátil guarda los datos recibidos a través de dos tarjetas de adquisición de datos tipo NI USB-6008 de National Instruments Corporation. La **Figura 3** muestra una fotografía de la disposición en campo del material utilizado en el estudio (izquierda) y un detalle del equipo de medición (derecha).

3.3. Campañas experimentales

Se realizaron ocho campañas experimentales en la EDAR de Galindo-Bilbao con el objetivo de comparar la eficiencia en la transferencia de

Figura 3. Fotografía de la disposición en campo del material utilizado en el estudio (izquierda) y detalle del equipo de medición (derecha).

oxígeno de las seis líneas biológicas y las tres configuraciones biológicas (o modos) de planta. También se contempló cuantificar la repercusión que tuvo en la eficiencia la reparación de una fuga de aire en uno de los reactores.

Cada campaña experimental tuvo una semana de duración y consistió en la medición de la eficiencia de los reactores aireados de una línea biológica (los reactores de regeneración R_1 y R_2; y los reactores óxicos O_1, O_2 y O_3). Los reactores facultativos (F_1 y F_2) no fueron contemplados en el estudio al estar operados siempre de forma anóxica. El área medida en cada línea fue aproximadamente 2,9% (73 m^2), siendo por tanto mayor al 2% que establece la norma (ASCE, 1997).

4. Resultados y discusiones

4.1. Evaluación del estado de los difusores de aire y cuantificación del ahorro esperado en su limpieza o sustitución

A modo general, la eficiencia en la transferencia de oxígeno obtenida en la EDAR de Galindo-Bilbao se encuentra en el rango de los valores hallados normalmente en EDAR urbanas (el factor *aF* obtenido está comprendido entre 0,4 y 0,6). De este hecho se puede deducir que los difusores de aire de la planta no están, por lo general, colmatados ni han perdido sus características.

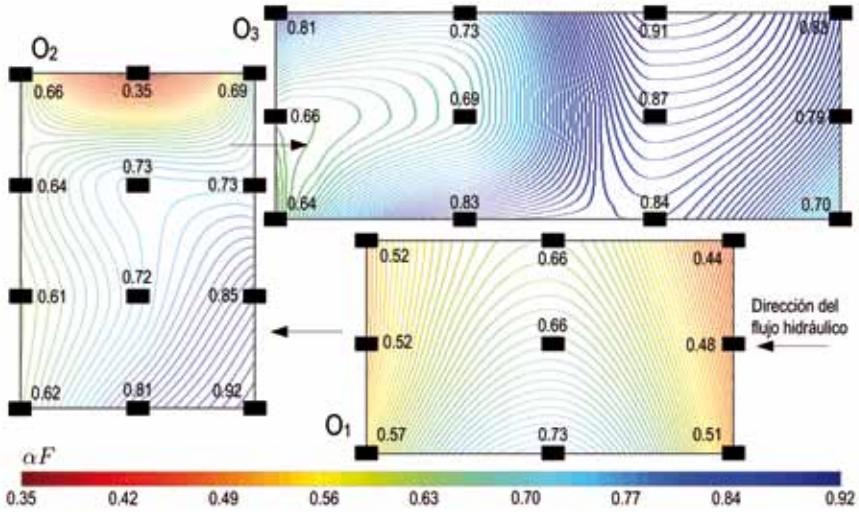
Sin embargo, una comparativa entre las seis líneas independientes con las que cuenta la planta permite cuantificar la reducción mínima en el consumo energético esperable tras la limpieza o sustitución de los difusores. En lo que respecta al reactor O_1, fue en la línea nº 6 en la que se obtuvo la mejor eficiencia en la transferencia de oxígeno. Para el reactor O_2, O_3 y R_1 fue en la línea nº 4 y para el reactor R_2 fue en la línea nº 5 donde se hallaron las eficiencias más altas. La **Tabla 2** presenta la estimación del potencial de ahorro en cada reactor aireado de las seis líneas en el caso de que los difusores de aire de cada reactor estuvieran en el mismo estado que los del reactor en el que se halló la eficiencia máxima, tomado este como referencia.

Es destacable el ahorro que supondría limpiar o sustituir los difusores del reactor O_1 de la línea nº

Tabla 2. Estimación del potencial de ahorro en cada reactor aireado de las seis líneas de la EDAR de Galindo.

Reactor	Referencia	Línea nº 1	Línea nº 2	Línea nº 3	Línea nº 4	Línea nº 5	Línea nº 6
Óxico 1	Línea nº 6	4,5 k€	4,4 k€	26 k€	4,8 k€	16 k€	-
Óxico 2	Línea nº 4	1,3 k€	16 k€	16 k€	-	6,8 k€	2,7 k€
Óxico 3	Línea nº 4	2,7 k€	5,7 k€	4,8 k€	-	2,9 k€	1,7 k€
Regeneración 1	Línea nº 4	0,7 k€	3,6 k€	No operativo	-	No operativo	No operativo
Regeneración 2	Línea nº 5	5,2 k€	6,7 k€	10,2 k€	8,8 k€	-	No operativo

Figura 4. Vista en planta de la eficiencia en el reactor O_1, O_2 y O_3 de la balsa nº 4.

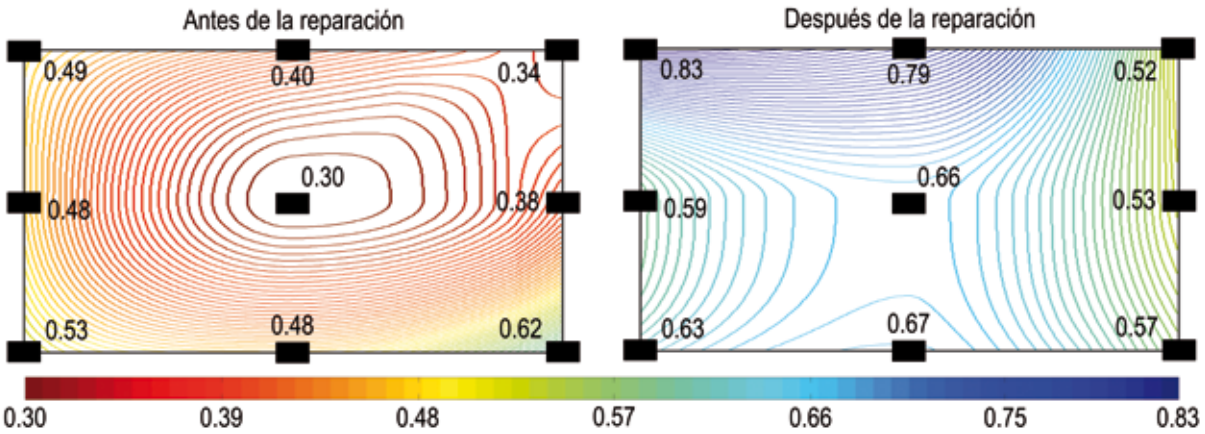


3 (26 k€) y nº 5 (16 k€), y los del reactor O_2 de la línea nº 2 (16 k€) y nº 3 (16 k€). Estos ahorros están influenciados por el hecho de que los primeros reactores de una zona de nitrificación son los que necesitan la mayor cantidad de aire para alcanzar la concentración deseada de oxígeno disuelto.

Respecto a la zona de regeneración, se han hallado eficiencias menores que en la zona DN (0,3 de media para el reactor R_1 y 0,4 para el reactor R_2). Este hecho se debe principalmente a que, a causa de que el caudal de recirculación externa es el mismo que el de entrada, la concentración de sólidos suspendidos es normalmente el doble en regeneración que en la zona DN, obstaculizándose así la transferencia de oxígeno. El caudal de aire suministrado a la zona de regeneración es comparativamente menor a la zona nitrificante debido a que la respiración bacteriana en aquella es fundamentalmente endógena. Por este motivo, el ahorro medio esperable en la mejora la limpieza de los difusores de esta zona es menor, del orden de 6 k€.

Además de conocer el estado general de los difusores de aire, la metodología también permite identificar zonas de baja eficiencia. A modo de ejemplo, la **Figura 4** muestra la vista en planta del reactor O_1, O_2 y O_3 de la balsa nº 4. Las líneas coloreadas muestran la distribución de la eficiencia αF obtenida en cada reactor, siendo las tonalidades rojas indicadoras de bajas eficiencias y las azuladas de altas eficiencias. La posición que tomó la plataforma extractora del *off-gas* durante cada medida se muestra con un rectángulo negro. Tal y como puede observarse, la eficiencia en la transferencia de oxígeno aumenta de forma general a medida que el agua residual transcurre por la zona aerobia. Este hecho está causado por el obstáculo que supone a la transferencia de oxígeno la materia orgánica procedente del agua residual, la cual es mayor en cabeza y se va oxidando a medida que la zona aerobia avanza. Al final del reactor O_2 se detectó una zona de baja eficiencia, probablemente debida al taponamiento parcial o rotura de algunos de sus difusores.

Figura 5. Vista en planta de la eficiencia del reactor O_1 de la balsa nº 6, antes (izquierda) y después (derecha) de la reparación de una fuga de aire.



4.2. Cuantificación del impacto de la reparación de una fuga de aire

Habiéndose detectado una fuga de aire en las parrillas de difusores del primer reactor óxico (O_1) de la balsa nº 6, se abordaron dos campañas experimentales para cuantificar el período de amortización que supone reparar una fuga de similares características en la EDAR de Galindo-Bilbao.

La primera campaña experimental se realizó antes de la reparación y la segunda después de la misma. La **Figura 5** muestra una vista en planta del reactor con las isocurvas de nivel de la eficiencia *αF* medida antes de la reparación (izquierda) y después de la misma (derecha). Tal y como puede observarse en la figura de la izquierda, el valor mínimo de la eficiencia *αF* (0,30) estaba ocasionado por una fuga de aire en el centro del reactor (ver fotografía de la **Figura 6**). Una vez arreglada la fuga, la eficiencia del reactor aumentó un 40% (el factor *αF* ascendió desde 0,45 a 0,62 de media). Este aumento de la eficiencia supone un ahorro del 40% en el consumo energético debido a la aireación de este reactor; o lo que es lo mismo, un ahorro aproximado de 23 k€ al año en la aireación de este reactor. Considerando que el coste de la reparación ascendió a 20 k€, se puede concluir que la reparación se amortizó en menos de un año, consiguiendo además mejorar la controlabilidad del sistema y aumentar la capacidad máxima de transferir oxígeno al medio.

Figura 6. Fotografía del borboteo producido por una fuga de aire en el reactor O_1 de la línea nº 6.

4.3. Evaluación de la eficiencia de las configuraciones de planta RDN, MO y DRDN

La configuración biológica RDN es la que habitualmente se utiliza en planta para la eliminación de nitrógeno debido a las características que tiene para inhibir cinéticamente la formación de microorganismos filamentosos. En esta configuración, el agua residual de entrada se vierte directamente en el primer selector anóxico (S_1, ver **Figura 1**) y el fango decantado se recircula al primer reactor de regeneración (R_1). Con el fin de realizar un mantenimiento a los reactores de regeneración y anóxicos, en ocasiones se hace uso de la configuración MO. En esta configuración, el agua residual de entrada y los fangos decantados se vierten directamente en el primer reactor óxico (O_1), quedando inoperativas las zonas de regeneración y anóxicas. Debido a que en la configuración MO la materia orgánica rápidamente biodegradable del agua de entrada, la cual puede suponer un obstáculo para la transferencia de oxígeno entre la burbuja y el medio líquido, se vierte directamente en los reactores óxicos, en principio la eficiencia en la transferencia de oxígeno será menor que la del modo RDN.

Con el objetivo de cuantificar la disminución de la eficiencia en la configuración MO, se realizaron dos campañas experimentales. La primera campaña experimental se realizó en modo RDN y la segunda se realizó la siguiente semana en modo MO en la misma línea.

Según los resultados obtenidos, el cambio de la configuración RDN a la configuración MO supuso una disminución de la eficiencia de un 27% de media. En otras palabras, si se operase durante un año en modo MO en vez de en modo RDN, esta disminución de la eficiencia supondría un coste en la aireación de 29 k€ al año por línea. A este coste sería necesario repercutirle el consumo adicional de oxígeno por biodegradación de la materia orgánica en condiciones óxicas, ya que en modo RDN una buena parte se biodegrada anteriormente en condiciones anóxicas.

Así mismo, la configuración DRDN tiene como objetivo eliminar una mayor cantidad de nitrógeno amoniacal del agua residual, frac-

cionando para ello parte del caudal de entrada al primer reactor de regeneración. El cambio de la configuración RDN a la configuración DRDN (con un fraccionamiento del caudal de entrada del 30%) supone un incremento de la eficiencia del reactor R_2 en un 35% de media. Este hecho se debe a que la concentración de sólidos suspendidos en el reactor R_2 es menor que en el modo RDN, incrementándose así su eficiencia. No se observaron cambios en la eficiencia de los reactores óxicos en ambas configuraciones.

5. Conclusiones

Este artículo presenta la aplicación sistemática a gran escala de una metodología precisa, versátil y sencilla que permite estimar el potencial de ahorro en los sistemas de aireación de las EDAR mediante la medición de la transferencia de oxígeno en condiciones de campo. La metodología se basa en calcular la eficiencia mediante un simple balance de masa de oxígeno, utilizándose para ello una instrumentación sencilla y de ámbito general.

La metodología ha sido aplicada satisfactoriamente en la EDAR de Galindo-Bilbao, donde demuestra su potencial para ayudar en la toma de decisiones en lo que se refiere a optimizar el consumo energético de su sistema de aireación. En concreto, la metodología ha permitido:

- Conocer el estado general de los difusores de aire e identificar las zonas de baja eficiencia. En el caso concreto de la EDAR de Galindo-Bilbao, se ha estimado un potencial de ahorro de 26 k€ en la limpieza o sustitución de los difusores del reactor O_1 de la línea nº 3, 16 k€ para el de la línea nº 5, 16 k€ para el reactor O_2 de la línea nº 2 y 16 k€ para el de la línea nº 3.

La medición de transferencia de oxígeno en la EDAR de Galindo-Bilbao ha permitido conocer la distribución espacial y temporal de la eficiencia de la planta a lo largo de las zonas aerobias y en las condiciones reales de funcionamiento, con la consecuente optimización del consumo energético del sistema de aireación y sus ahorros económicos

- Conocer el período de amortización de la reparación de una fuga de aire. En el caso particular contemplado en la EDAR de Galindo-Bilbao, el período de amortización ha sido estimado en un año.

- Cuantificar la eficiencia en la transferencia de oxígeno en función del modo de operación de la planta. Para la EDAR de Galindo-Bilbao, operar en modo MO supone un gasto adicional del 27% de media respecto al modo RDN, lo que supondría 29 k€ al año por línea. La eficiencia del reactor R_2 en modo DRDN ha sido estimada en un 35% mayor al del modo RDN.

Finalmente, la metodología ha permitido conocer *in situ* la distribución espacial y temporal de la eficiencia a lo largo de las zonas aerobias de la EDAR de Galindo-Bilbao y en las condiciones reales de funcionamiento. Todos estos datos van a servir de base para priorizar y planificar adecuadamente las futuras tareas de renovación y modificación del sistema de aireación de la planta.

Bibliografía

[1] Åmand, L.; Olsson, G.; Carlsson, B. (2013). Aeration control - a review. Water Science & Technology, núm. 67(11), págs. 2.374-2.398.

[2] ASCE (American Society of Civil Engineers) (1997). Standard guidelines for in-process oxygen transfer testing (18-96). Standards ASCE 19-96, American Society of Civil Engineers, USA.

[3] Ayesa, E.; de la Sota, A.; Grau, P.; Sagarna, J. M.; Salterain, A.; Suescun, J. (2006). Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: the long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation. Water Science & Technology, núm. 53(4-5), págs. 193-201.

[4] Beltrán, S.; Irizar, I.; de la Sota, A.; Villanueva, J.M.; Ayesa, E. (2013). Model-based optimization of aeration systems in WWTP. 11th IWA conference on instrumentation control and automation (ICA2013), 18-20 September, Narbonne, France.

[5] CABB y CEIT-IK4 (2012). Estudio por simulación de las estrategias óptimas de operación para la EDAR de Galindo. Informe final de proyecto.

[6] De la Sota, A.; Beltrán, S.; Ayesa, E. (2013). Optimización por simulación de estrategias de operación para la EDAR de Galindo. XXXII Jornadas Técnicas AEAS, 12-14 junio, Donostia-San Sebastián, España.

[7] Henkel, J; Cornel, P.; Wagner, M. (2011). Oxygen transfer in activated sludge - new insights and potentials for cost saving. Water Science & Technology, núm. 63(12), págs. 3.034-3.038.

[8] Instituto Nacional de Estadística (INE) (2014). Encuesta sobre el suministro y saneamiento del agua. Año 2011. Recogida y tratamiento de las aguas residuales por comunidades y ciudades autónomas. www.ine.es.

[9] Irizar, I.; Beltrán, S.; Urchegui, G.; Izko, G.; Fernández, O.; Maiza, M. (2014). Lessons learnt from the application of advanced controllers in the Mekolalde WWTP: good simulation practices in control. Water Science & Technology (In press).

[10] Li, N.N. (2008). Advanced membrane technology and applications. Wiley-Blackwell, Oxford, UK.

[11] Metcalf & Eddy, Inc.; Tchobanoglous, G.; David Stensel, H.; Tsuchihashi, R.; Burton, F. (2013). Wastewater Engineering: Treatment and resource recovery. McGraw-Hill Higher Education.

[12] Olsson, G. (1974). Measurement and control in chemical and environmental engineering. International Scandinavian Congress on Chemical Engineering (Kem-Tek 3), 28-30 January, Copenhagen, Denmark.

[13] Picard, A.; Davis, R.S.; Glaeser, M.; Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrologia, núm. 45(2), págs. 149-155.

[14] Rosso, D.; Stenstrom, M.K. (2006). Surfactant effects on α-factors in aeration systems. Water Research, núm. 40, págs. 1.397-1.404.

[15] Rosso, D.; Iranpour, R.; Stenstrom, M. (2005). Fifteen years of offgas transfer efficiency measurements on fine-pore aerators: key role of sludge age and normalized air flux. Water Environment Research, núm. 77(3), págs. 266-273.

[16] Schuchardt, A.; Libra, J.A.; Sahlmann, C.; Wiesmann, U.; Gnirss, R. (2007). Evaluation of oxygen transfer efficiency under process conditions using the dynamic off-gas method. Environmental Technology, núm. 28(5), págs. 479-489.