

# Nuevo procedimiento práctico para la evaluación y seguimiento de sistemas de aireación por difusores en procesos de fangos activos



**Autor:** Emilio Serrano - SURCIS, S.L.

Email: [eserrano@surcis.com](mailto:eserrano@surcis.com)

[www.surcis.com](http://www.surcis.com)

**Palabras Clave:** Respirimetría BM, Consumo de oxígeno de la DQO biodegradable, Nitrificación, Desnitrificación, Requerimiento actual de oxígeno actual, Requerimiento estándar de oxígeno, Caudal de oxígeno.

**Key words:** BM Respirometry, Consumed oxygen in the biodegradable COD, Nitrificación, Denitrification, Actual oxygen requirement, Standar oxygen reqyirement, Oxygen flow.

## RESUMEN

El seguimiento de una valoración coherente de la aireación es un factor fundamental para detectar la posible deficiencia del sistema de aireación por falta de limpieza de los difuores, cambio de membranas o rediseño del proceso.

En bibliografía, se pueden encontrar varios procedimientos que, además de poder necesitar una infraestructura de dispositivos, pueden incluir un formulario matemático más o menos complejo.

Por todo ello, se ha considerado la necesidad de recurrir a un procedimiento práctico y relativamente rápido que pueda conducir a una evaluación cualitativa del sistema de aireación y con ello contemplar la posibilidad de la necesidad de un mantenimiento y optimización energética.

El presente artículo da a conocer un modelo matemático con el que se confecciona un procedimiento, dirigido a los sistemas de aireación por difusores en donde, de forma relativamente sencilla y efectiva, se obtienen unos parámetros de evaluación y seguimiento en el marco de un sistema de cálculo que permite resolver este tipo de necesidades. Este procedimiento no pretende ser científicamente preciso, pero sí lo suficiente efectivo como para obtener una valoración del sistema.

## ABSTRACT

The monitoring of a consistent assessment of aeration is a fundamental factor to detect the possible deficiency of the aeration system due to lack of cleanliness of the diffusers, change of membranes or system redesign.

In the literature, you can find several procedures that, in addition to needing an infrastructure of devices, may include a more or less complex mathematical form.

For all these reasons, it has been considered the need to resort to a practical and relatively fast procedure that can lead to a qualitative valorization of the aeration system and thus contemplate the possibility of the need for maintenance and energy optimization.

This article presents a mathematical model for a procedure especially aimed at diffuser aeration systems where, in a relatively simple and effective way, assessment and monitoring parameters are obtained within the framework of a calculation system that allows solving this type of needs. This procedure is not intended to be scientifically accurate but effective enough to obtain an assessment of the system.

## 1. INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que una forma coherente de llevar a cabo la evaluación de un sistema de aireación es la de relacionar el requerimiento actual de oxígeno medio (AOR) con el requerimiento de oxígeno en condiciones estándar (SOR)

En su cálculo, el SOR incluye el caudal de oxígeno medio del sistema ( $Q_{O_2}$ ) y que es precisamente el que se está suministrando para satisfacer el tratamiento de la carga de entrada.

Con ello, el parámetro fundamental para la valoración rápida de un sistema de aireación se basa en la relación AOR/SOR.

En todo ello, merece especial importancia la fiabilidad de cálculo del requerimiento actual de oxígeno (AOR), ya que el resultado o estimación incorrecta de este parámetro puede conducir a una valoración errónea. En este sentido, en el presente artículo se introduce la novedad del cálculo del AOR correspondiente a la materia orgánica ( $AOR_C$ ) utilizando directamente el oxígeno real consumido (OC) en la oxidación del sustrato orgánico sin ningún tipo de corrección adicional, ni estimación alguna.

Este parámetro OC se obtiene por medio de un único ensayo de Respirimetría BM (así denominada por la empresa Surcis) del agua de entrada al proceso. mediante la integración en el tiempo de la serie de tasas exógenas de consumo de oxígeno ( $R_s$ ) relacionadas exclusivamente con la eliminación del sustrato orgánico.

De este modo, la intervención del OC no solo simplifica notablemente el cálculo del  $AOR_C$  sino que además lo hace con una mayor precisión si se compara con otros métodos más complejos descritos en bibliografía.

## 2. RESPIRÓMETRO BM

[La Respirimetría BM](#), tal y como hemos comentado, juega un papel fundamental en el cálculo del requerimiento de oxígeno de la materia orgánica. Por ello, aquí se describe un breve resumen de los principales parámetros que se pueden realizar y sus características..

Este tipo de Respirimetría se basa en un sistema único, basado en la respirimetría tipo LFS + LSS modificada, desarrollado por la empresa Surcis S.L. que se incluye en una serie de distintos modelos de respirómetros BM.

**Figura 1.** Respirómetro BM y medidas automáticas que realiza el software

1. Sistema de control automático del pH
2. Sensor de pH
3. Sensor de oxígeno disuelto
4. Agitador
5. Bomba de homogeneización
6. Reactor
7. Sistema automático de atemperación
8. Leds de control de dispositivos
9. Controlador del oxígeno y temperatura
10. Controlador de pH
11. PC + software



Sistema de Respirometría BM-Advance (nuevo modelo)

Modelo BM	Medidas automáticas	Descripción	Programación
Todos los modelos	OD (mg O <sub>2</sub> /L)	Oxígeno disuelto	Programable en modo cíclico
Todos los modelos	Temperatura (°C)	Temperatura	Programable
Advance. Advance Pro	pH	pH	Programable
Advance Pro	ORP (mV)	Potencial Redox	-

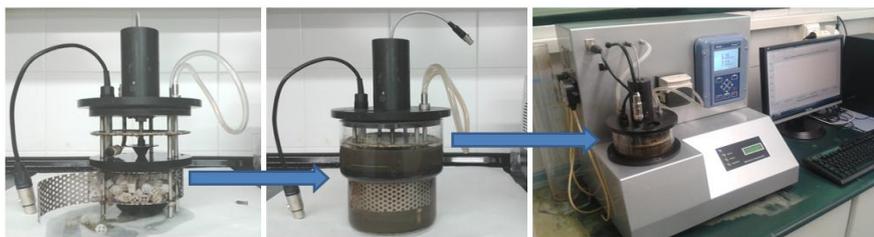
Modelo BM	Parámetro	Descripción
Todos los modelos	OUR (mg O <sub>2</sub> /L.h)	Tasa de consumo de oxígeno
	SOUR (mg O <sub>2</sub> /g SSV.h)	Tasa de consumo de oxígeno específica = OUR / SSVLM
	Rs (mg O <sub>2</sub> /L.h)	Tasa de consumo de oxígeno exógena de un sustrato
	OC (mg O <sub>2</sub> /L)	Oxígeno consumido
	DQOb (mg O <sub>2</sub> /L) DQOrb (mg O <sub>2</sub> /L)	DQO biodegradable DQO rápidamente biodegradable (soluble)
	U (mg DQO/L.h)	Tasa de eliminación de la DQO
	q (mg DQO/mg SSV.d)	Tasa específica de eliminación DQO = U / SSVLM

Esta tecnología permite que, en la programación previa del ensayo, e incluso durante la ejecución del mismo, lo podamos adaptar a distintas condiciones de pH, temperatura, oxígeno y relación muestra / fango. También permite la posibilidad de introducción de determinados datos que pueden participar en los cálculos automáticos de parámetros fundamentales en procesos de depuración.

Las aplicaciones más habituales que se realizan con la Respirometría BM son las siguientes: Tomar el pulso al proceso para una rápida valoración, fracciones de la DQO, Biodegradabilidad al fango, Toxicidad, Tasa de nitrificación (AUR), Tasa de desnitrificación (NUR), Valoración y seguimiento del sistema de aireación, entre muchas otras.

Opcionalmente, mediante un reactor especial (bio-carrier), los respirómetros BM pueden llevar a cabo ensayos de respirometría con lechos bacterianos para procesos tipo MBBR y de biomasa granular.

**Figura 2.** Reactor Bio-carrier para MBBR y biomasa granular



### 3. PARÁMETROS

Los parámetros utilizados en el procedimiento aquí descrito están orientados a sistemas de aireación por difusores de burbuja fina o burbuja gruesa. No obstante, muchos de ellos, también se pueden también utilizar en otros sistemas de aireación.

Se trata de un grupo de parámetros derivados de los resultados de un solo de ensayo de respirometría BM; y otros parámetros que se obtiene por medio de sencillas ecuaciones en donde intervienen parámetros del primer grupo, datos del proceso actual, del sistema de aireación y valores de referencia.

**Tabla 1.** Parámetros esenciales utilizados en el procedimiento para en la valoración y seguimiento del sistema de aireación.

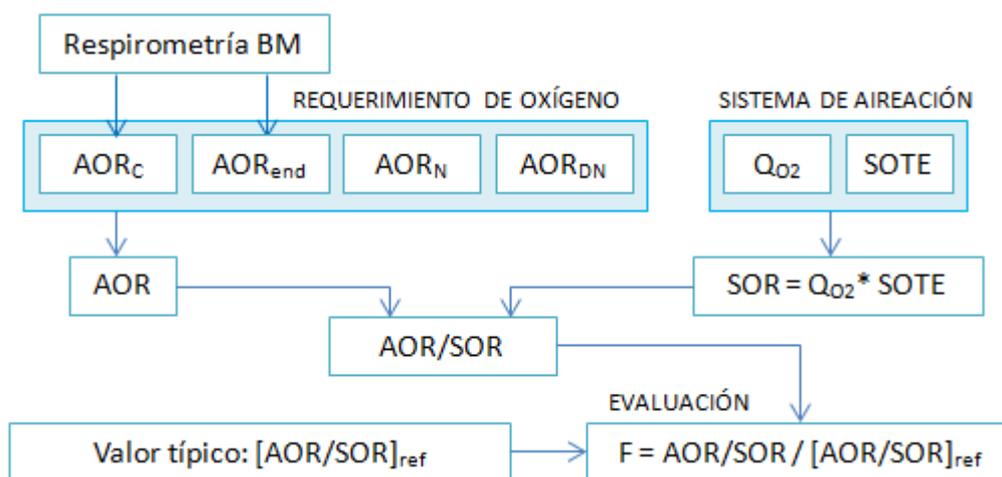
AOR (kg O <sub>2</sub> /d)	Requerimiento actual de oxígeno = $AOR_C + AOR_{end} + AOR_N - AOR_{DN}$
AOR <sub>C</sub>	Requerimiento actual de oxígeno de la materia orgánica
AOR <sub>end</sub>	Requerimiento actual de oxígeno por respiración endógena
AOR <sub>N</sub>	Requerimiento actual de oxígeno por nitrificación
AOR <sub>DN</sub>	Requerimiento actual de oxígeno por desnitrificación
AOR/SOR	Relación entre el AOR y el SOR actual
[AOR/SOR] <sub>ref</sub>	Valor de referencia de la relación entre el requerimiento actual de oxígeno (AOR) y el requerimiento en condiciones estándar (SOR)
Q <sub>O<sub>2</sub></sub> (kg O <sub>2</sub> /d)	Caudal de oxígeno medio proporcionado por el sistema de aireación
SOTE (%)	Eficiencia transferencia de oxígeno en agua limpia en condiciones estándar
SOR (kg O <sub>2</sub> /d)	Requerimiento de oxígeno en condiciones estándar
F (%)	Evaluación - Factor de uso

El procedimiento consiste simplemente en determinar el AOR y SOR actuales, calcular la relación AOR/SOR actual, y valorar el estado del sistema de aireación contrastando esta relación con el rango de normalidad del AOR/SOR de referencia y/o haciendo un seguimiento de su evolución en el tiempo.

Para ello se asume que se obtiene un rendimiento admisible y que los valores de oxígeno disuelto en el reactor se ajustan a la realidad del proceso de depuración y condiciones.

La ventaja de este procedimiento es que prácticamente solo depende de la carga y del caudal de oxígeno.

**Figura 3.** Esquema del procedimiento.



## 5. Descripción de los parámetros que intervienen en los cálculos del procedimiento

A continuación se pasa a describir los parámetros que intervienen en el procedimiento de evaluación del sistema de aireación, en donde distinguimos los que provienen de ensayos de respirometría realizados con un sistema de Respirometría BM y los que se calculan a partir de los valores obtenidos, datos del sistema de aireación y del proceso actual.

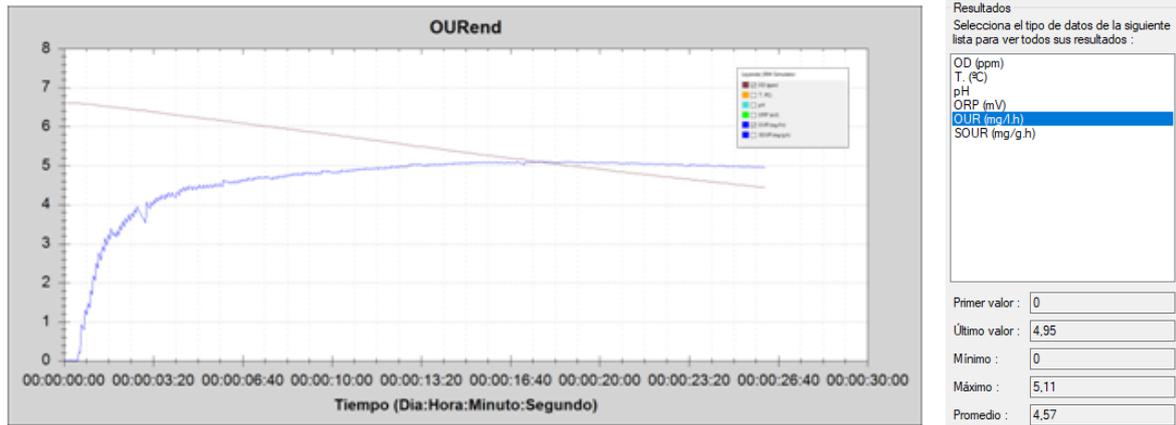
### 5.1. Parámetros derivados de ensayos de respirometría

Se refiere a los parámetros que se obtienen directamente de los resultados de los ensayos de respirometría con un Respirómetro tipo BM.

#### 5.1.1. Tasa de consumo de oxígeno en fase endógena: $OUR_{end}$ (mg/L.h)

Se refiere al resultado de un ensayo OUR para la tasa de consumo de oxígeno en fase endógena (en donde solo cuenta el consumo de oxígeno de los microorganismos del fango en ausencia de sustrato biodegradable,

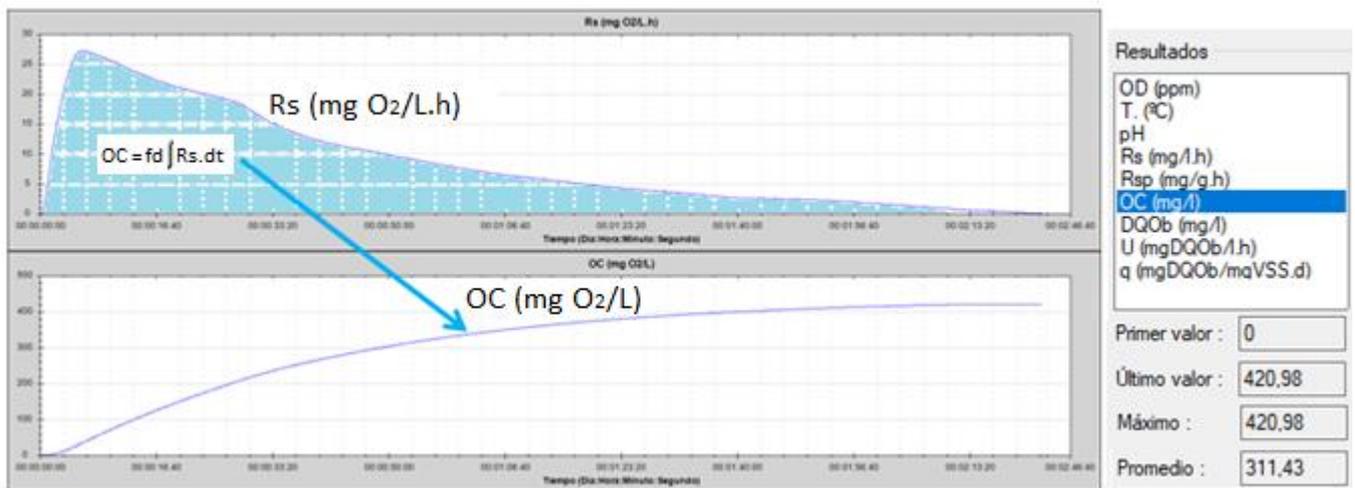
**Figura 4.** Respirograma y resultado del OORend en un ensayo de respirometría BM (Surcis)



### 5.1.2. OC: Oxígeno consumido en la oxidación de la materia orgánica (mg O<sub>2</sub>/L)

Se refiere exclusivamente al oxígeno neto que se consume en la oxidación del sustrato orgánico eliminado. Con ello, el porcentaje correspondiente a la producción de fango queda excluido..

**Figura 5.** Respirogramas Rs & OC, y resultado en un ensayo de respirometría BM (Surcis)



Este consumo de oxígeno se calcula de forma automática por medio del software de un respirómetro BM de Surcis mediante la integración en el tiempo de la cadena de las tasas de respiración exógena relacionadas con el sustrato orgánico en un ensayo tipo R de respirometría.

## 5.2. Parámetros calculados

Son los parámetros que se calculan a partir de los datos del proceso de depuración, del sistema de aireación y valores de referencia.

### 5.2.1. AOR: Requerimiento actual de oxígeno (kg O<sub>2</sub>/d)

Es la demanda de oxígeno requerida en el proceso de depuración biológica.

Se compone de varios requerimiento parciales :

- Requerimiento por materia orgánica:  $AOR_C = Q * OC / 1000$  (\*)
- Requerimiento por respiración endógena:  $AOR_{end} = Vr * OUR_{end} * 24 / 1000$
- Requirimiento por mantenimiento del oxígeno disuelto medio en el reactor aerobio:  $Q * OD / 1000$
- Requerimiento por nitrificación:  $AOR_N = 4,57 * Q * Nn / 1000$
- Requerimiemiento por desnitrificación:  $AOR_{DN} = 2,28 * Q * N-NO_3 / 1000$

En donde:

OC: Oxígeno consumido neto de la materia orgánica eliminada en el proceso (mg O<sub>2</sub>/L)

Q : Caudal de entrada al proceso (m<sup>3</sup>/d)

OUR<sub>end</sub> : Tasa de consumo de oxígeno del fango activo en fase endógena (mg O<sub>2</sub>/Lh)

Vr : Volumen del reactor biológico aerobio (m<sup>3</sup>)

Nn : Nitrógeno nitrificable (mg N/L) ≈ NTK eliminado

N-NO<sub>3</sub>: Nitrato a desnitrificar (mg N-NO<sub>3</sub>/L)

El requerimiento por desnitrificación, llevándose a cabo en condiciones anóxicas, se presenta como crédito en el oxígeno global requerido.

$$AOR = AOR_C + AOR_{end} + AOR_N - AOR_{DN} \quad (1)$$

(\*) En el caso de que no se disponga de un respirómetro BM para obtener el AOR<sub>C</sub> desde el OC, siempre se puede recurrir a cualquiera de los métodos publicados en bibliografía a partir de la DBO, DQO, DQO biodegradable en donde puede intervenir la producción de fango en exceso (P<sub>x</sub>)

### 5.2.2. Caudal actual de oxígeno : Q<sub>O<sub>2</sub></sub> (kg O<sub>2</sub>/d)

El caudal medio actual de oxígeno en kg O<sub>2</sub>/d, suministrado por el sistema de aireación, se obtiene mediante la aplicación de un factor de conversión al caudal de aire Q<sub>aire</sub> (Nm<sup>3</sup>/h)

1 m<sup>3</sup> aire pesa 1,23 kg

% gravimétrico de oxígeno en aire = 23,2%

Kg O<sub>2</sub> en 1 m<sup>3</sup> de aire = 0,232 \* 1,23 = 0,285 kg O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>

Luego 1 m<sup>3</sup> tiene 0,285 kg O<sub>2</sub>

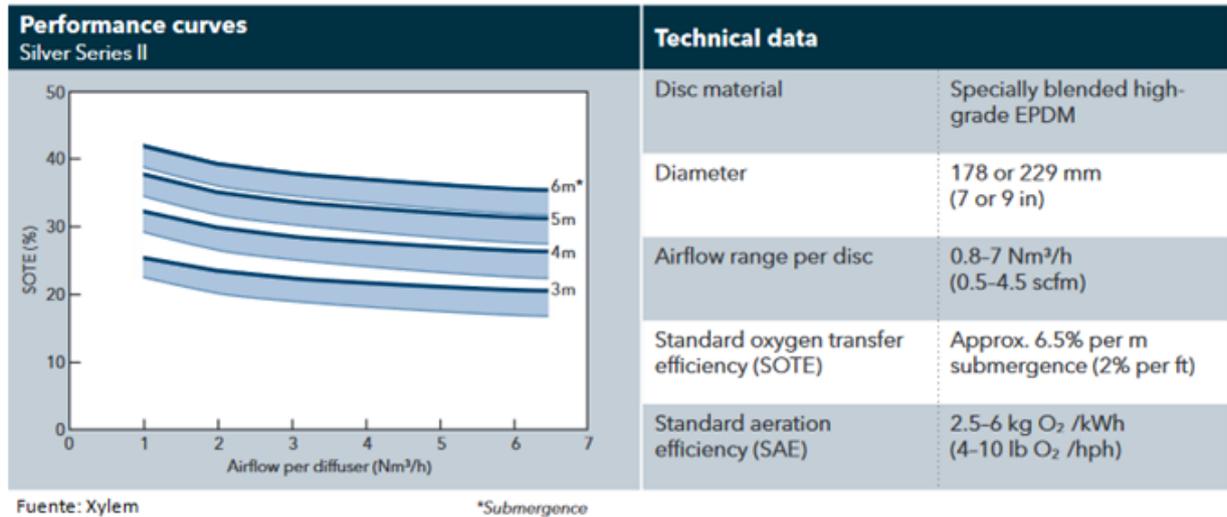
$$Q_{O_2} \text{ (kg O}_2\text{/d)} = 24 * 0,285 * Q_{aire} \text{ (Nm}^3\text{/h)} \quad (2)$$

### 5.2.3. Eficiencia de la tranferencia de oxígeno en condiciones estándar: SOTE (%)

SOTE, es la eficiencia en la transferencia de oxígeno al proceso en condiciones estándar (20 °C, 1 atmósfera y 0 mg/L de oxígeno) en agua limpia.

El fabricante normalmente proporciona una gráfica del valor del SOTE a partir del caudal medio por difusor y profundidad de los difusores en el reactor biológico (Figura 6) El valor, así obtenido, proporciona una base de cálculo para obtener parámetros de referencia.

**Figura 6.** Curvas SOTE



En cualquier caso, el SOTE, a efectos prácticos, se puede estimar con el siguiente criterio de cálculo:

- Para difusores de burbuja fina : 6.5% por m de profundidad de los difusores.
- Para difusores de burbuja gruesa : 2.46% por m de profundidad de los difusores.

(Harlan H. Bengtson, 2017)

#### 5.2.4. AOR/SOR de referencia; [AOR/SOR]<sub>ref</sub>

Se trata del parámetro clave que va a constituir la base de referencia para la evaluación y seguimiento del sistema de aireación actual cuando se contrasta con el AOR/SOR actual

El rango de normalidad del AOR/SOR de referencia está entre 0,3 y 0,6.

Para los sistemas de aireación de burbuja fina, el valor típico es de 0,33 (rango 0,3 a 0,4) Mientras que en los sistemas de burbuja gruesa la relación AOR/SOR es de 0,5 (rango 0,4 a 0,6) (Harlan H. Bengtson, 2017 - Sanitaire, University of Idaho, Environmental Engineering, 2021)

#### 5.2.5. Transferencia de oxígeno actual en condiciones estándar: SOR (kg O<sub>2</sub>/d)

El SOR es el requerimiento de oxígeno en condiciones estándar en agua limpia (20°C, 1 atm, 0 mg/l) El SOR está relacionado con el parámetro SOTR que es la tasa de transferencia de oxígeno en condiciones estándar, en donde se puede definir como la tasa a la cual el SOR es transferido.

Con ello, en un sistema en funcionamiento el SOR = SOTR

(Water Environment Federation Fact Sheet, 2017 - Simon Bengtsson, Bengt Carlsson, 2019)

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$SOR = Q_{O_2} * SOTE \quad (3)$$

( Simon Bengtsson, Bengt Carlsson, David Gustavsson, 2019 - Sweden Water Research; James A. Mueller, William C. Boyle, H. Johannes Pöpel « Aeration Principles and Practices », 2002)

### 5.2.6. AOR/SOR actual: AOR/SOR

Una vez calculados AOR y SOR, se accede al parámetro AOR/SOR por división entre ambos:

$$\text{AOR/SOR} = \frac{\text{AOR}}{\text{SOR}} \quad (4)$$

Combinando la ecuación (3) con la (4) se da paso a la ecuación (5)

$$\text{AOR/SOR} = \frac{\text{AOR}}{Q_{O_2} * \text{SOTE}} \quad (5)$$

## 6. Evaluación y seguimiento del sistema de aireación

Manteniendo un determinado rendimiento en el proceso, el criterio general a asegurar para una evaluación y seguimiento se basaría en la relación del AOR/SOR actual con el valor típico de referencia  $[\text{AOR/SOR}]_{\text{ref}}$

$$F = \frac{\text{AOR/SOR}}{[\text{AOR/SOR}]_{\text{ref}}} \quad (6)$$

En general, cualquier valor del AOR/SOR actual que quedara por debajo del rango de referencia, indicaría una deficiencia del sistema de aireación.

A esta relación la podemos denominar F (factor de uso) al tener una equivalencia con la transferencia de oxígeno entre difusores usados y difusores en estado normal.

En general, para un sistema de aireación por difusores podemos tomar el rango F de 0,7 a 0,9 como moderado / normal. (EPA Design Manual Fine Pore Aeration Systems) y de 0,9 a 1 como óptimo.

## 7. Cálculo opcional - Caudal de referencia: $Q_{O_2\text{ref}}$

Se trata del caudal normal de referencia que teóricamente debería tener el proceso para satisfacer la carga AOR cuando el sistema de aireación se encuentra en condiciones normales.

$$Q_{O_2\text{ref}} \approx \frac{\text{AOR}/[\text{AOR/SOR}]_{\text{ref}}}{\text{SOTE}} \quad (7)$$

## 6. Conclusión

Aquí se ha presentado un procedimiento compuesto por un reducido grupo de sencillas ecuaciones con el claro objetivo de seguir el principio básico de relacionar el requerimiento de oxígeno medio de la carga de entrada con el oxígeno que se está suministrando. A esta relación se la vincula con una referencia contrastada con el fin de obtener una valoración de los parámetros obtenidos. De este modo, este procedimiento permite valorar y hacer un seguimiento periódico del sistema de aireación por difusores y tomar las decisiones oportunas.

En todo ello, es importante comprender que la simple relación AOR/SOR contrastada con los valores de referencia es suficiente para dar una evaluación del sistema de aireación, sin tener que ir más lejos.

A todo ello hay que añadir que, los valores de referencia del AOR/SOR, como es lógico, no solamente se puede utilizar para evaluar el sistema de aireación sino además como herramienta de diseño, principalmente para calcular el caudal de oxígeno necesario para un determinado requerimiento de oxígeno.

El procedimiento no pretende ser científicamente preciso, pero para la mayor parte de las EDAR puede ser suficiente para tener perfectamente claro la suficiencia del sistema de aireación y para obtener un parámetro que nos indique la conveniencia de una posible limpieza o cambio de membranas que se puede traducir en una optimización energética.

El conjunto de las sencillas ecuaciones presentadas aquí son de fácil acomodación a cualquier hoja de cálculo. Pero en cualquier caso existe la posibilidad de desarrollar un programa en el que, con la simple introducción de datos, sería capaz de generar automáticamente los parámetros de evaluación y seguimiento del sistema de aireación.

## REFERENCIAS

Sanitaire, University of Idaho, Environmental Engineering, CVE – 2021

James A. Mueller, William C. Boyle, H. Johannes Pöpel, « Aeration Principles and Practices », 2002)

Engineering, Harlan H. Bengtson – 2017

Simon Bengtsson, Dan Fujii, Magnus Arnell, Sofia Andersson, Bengt Carlsson, Henrik Held, David Gustavsson (2019). Design, operation, maintenance and procurement of aeration equipment for municipal wastewater treatment plants - WEF, SVU Rapport-2019 -23.

Harlan H. Bengtsson (2017) – Civil Engineering Southern Illinois University Edwardsville - Biological Wastewater Treatment Process Design Calculations.

EPA – Design Manual Fine Pore Aeration System

Catarina Silva ; Maria João Rosa (2022)- Urban Water Division, Hydraulics and Environment Department, National Civil Engineering Laboratory. A Comprehensive Derivation and Application of Reference Values for Benchmarking the Energy Performance of Activated Sludge Wastewater Treatment.

American Society of Civil Engineers – ASCE (1984, 1991, 2007). Measurement of Oxygen Transfer. American Society of Civil Engineers, New York, ASCE 2 – 91.

5b Sutari-Activated Sludge - SWIM-H2020 – Oxygen Requirements.

METCALF y EDDY. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4° edition.

Lee E. Ferrell, P.E., BCEE, CEM, - LEED Green Assoc (2019) - Aeration Efficiency and Optimization.