

Variantes de la tasa de consumo de oxígeno en procesos de fangos activos con eliminación de nitrógeno



Autor: Emilio Serrano

Surcis, S.L.

Email: eserrano@surcis.com

www.surcis.com

La tasa de consumo de oxígeno, denominada también “tasa de respiración” puede ser una importante herramienta en la evaluación y control del tratamiento biológico de aguas residuales por fangos activos y en la literatura podemos encontrar un amplio número de artículos relacionados con este parámetro que se erige como base principal de la tecnología denominada Respirometría.

La Respirometría que nació ya hace muchos años, ha ido evolucionando y actualmente nos podemos encontrar con una serie de variantes de la demanda de consumo de oxígeno que permiten expandir notablemente el número de aplicaciones con la generación de unos parámetros clave para el control, protección, diseño e investigación de los sistemas de tratamiento biológico por fangos activos en cada uno de sus partes, bien sea por materia orgánica, nitrificación, respiración endógena y desnitrificación.

Otro de los aspectos de estas variantes es la de dar paso a una tasa de consumo de oxígeno que es representativa de un proceso aerobio de forma integral. Con ello se resuelve el inconveniente que presenta una tasa de consumo de oxígeno puntual que normalmente no puede ser representativa de todo el complejo proceso de fangos activos (ver punto 2.10.)

1. Introducción

La tasa de consumo de oxígeno es el oxígeno ($\text{mg O}_2/\text{L}$) consumido por los microorganismos por unidad de tiempo (h), Con ello, las unidades habituales de los valores de este parámetro pasan a ser de mg/L/hora .

En términos generales, la medida de la tasa de consumo de oxígeno clásica se basa en el cálculo de la pendiente del consumo de oxígeno por los microorganismos del fango en relación con el tiempo.

La tecnología relacionada con la tasa de consumo de oxígeno es la Respirometría y a los equipos basados en esta tecnología se les denominan Respirómetros.

En este artículo, los ensayos y procedimientos descritos se llevan a cabo con un sistema de respirometría BM de la empresa Surcis, el cual va provisto de un potente software que permite el cálculo de los parámetros esenciales derivados de tasa de respiración de forma automática.

Figura 1. Sistema de Respirometría BM

1. Control automático del pH
2. Sensor de pH
3. Sensor de oxígeno disuelto
4. Motor de agitación
5. Bomba peristáltica de homogeneización
6. Reactor de doble cámara
7. Sistema de atemperamiento automático
8. Leds para el control de dispositivos
9. Controlador de oxígeno y temperatura
10. Controlador de pH
11. Software PC + BM



Existen varios modelos de sistemas de respirometría BM (ver en www.surcis.com) y, en el presente Artículo, el modelo que hemos seleccionado es el BM-Advance (Figura 1), el cual ofrece resultados fiables y precisos al reunir las siguientes condiciones:

- Agitación uniforme
- Sistema automático de control del pH que permite programarlo un valor equivalente a la del proceso real, y que se mantenga constante durante el ensayo (modelos BM Advance)
- Temperatura programable. que se mantenga constante durante el ensayo.
- Aislamiento de la cámara de medida de la atmosfera para evitar el efecto de absorción de oxígeno del aire por efecto centrífugo de la agitación.
- Detección de la pendiente, con suficiente estabilidad, para dar la medida como válida.
- Posibilidad de medir una tasa de consumo de oxígeno desde un determinado valor de oxígeno disuelto.
- Representación gráfica de parámetros simultáneos (respirogramas)

2. Tasa de consumo de oxígeno

La tasa de consumo de oxígeno en general es la medida de la velocidad con que los microorganismos de un determinado fango activo consumen oxígeno a eliminar un determinado sustrato degradable.

Los tipos de tasa de consumo de oxígeno que vamos a presentar son las siguientes:

1. OUR: Tasa de consumo de oxígeno puntual.
2. SOUR: Tasa de consumo de oxígeno específica relacionada con la concentración de SSVLM.
3. FED y UNFED OUR: Tasas de consumo de oxígeno del inicio y final del proceso.
4. OUR cíclico: Secuencia cíclica de valores OUR y SOUR.
5. OUR_{end}: Tasa de consumo de oxígeno por respiración endógena.
6. OUR_{ex}: Tasa de consumo de oxígeno por respiración exógena.
7. R_s: Tasa de consumo de oxígeno exógena dinámica.
8. R_{sN}: Tasa de consumo de oxígeno exógena dinámica por nitrificación.
9. R_{sT}: Tasa de consumo exógena global del sustrato orgánico.
10. OUR_T: Tasa de consumo de oxígeno global.

La principal diferencia entre el grupo de tasas de consumo de oxígeno que no son exógenas de las tasas de consumo de oxígeno que son exógenas es que las exógenas se refieren a un consumo de oxígeno de un determinado sustrato (materia orgánica, nitrógeno amoniacal...) en donde se excluye la tasa de consumo de oxígeno por respiración endógena que se refiere exclusivamente a la respiración de la biomasa activa (microorganismos) en ausencia de sustrato degradable.

2.1. Tasa de consumo de oxígeno puntual: OUR

Generalmente se refiere a una medida de la tasa de consumo de oxígeno de una licor-mixto colectado desde un punto concreto del reactor biológico.

Este OUR es únicamente representativo del punto de donde proviene el licor mixto.

El ensayo del OUR en un respirómetro de laboratorio BM (Figura 1) consiste en airear un licor-mixto, recogido desde un determinado punto del reactor biológico que se está constantemente agitando, subiendo el oxígeno a un valor de inicio (normalmente por encima de 3 mg/L) para, a continuación, parar la aireación y calcular de forma totalmente automática la pendiente máxima estable con que el oxígeno está descendiendo como consecuencia del consumo de oxígeno de los microorganismos al eliminar el sustrato.

$$OUR = \frac{C_b - C_s}{t} \quad [1]$$

En donde:

OUR: Tasa de respiración (mg O₂/L/h)

C_b: Oxígeno del inicio del periodo de medida (mg/L)

C_s: Oxígeno del final del periodo de medida (mg/L) – OD en respirograma -

t: Tiempo transcurrido entre las medidas C_b y C_s (h)

El OUR total se compone de los siguientes OUR parciales:

$$\text{OUR} = \text{OUR}_{\text{end}} + \text{OUR}_{\text{ex}} \quad [2]$$

En donde:

OUR_{end} : Tasa de consumo de oxígeno por respiración endógena.

OUR_{ex} : Tasa de consumo de oxígeno por respiración exógena.

Principales aplicaciones del OUR puntual

- Tasa de consumo de oxígeno de un punto concreto del reactor biológico,
- Seguimiento histórico de la actividad del fango desde un mismo punto del proceso.
- Detección de síntomas de una posible toxicidad.
- Detección de una posible sobrecarga.

2.2. Tasa de consumo de oxígeno específica: SOUR

Cuando el OUR se relaciona con los sólidos volátiles en suspensión pasa a ser el parámetro SOUR:

$$\text{SOUR} = \frac{\text{OUR}}{\text{MLVSS}} \quad [3]$$

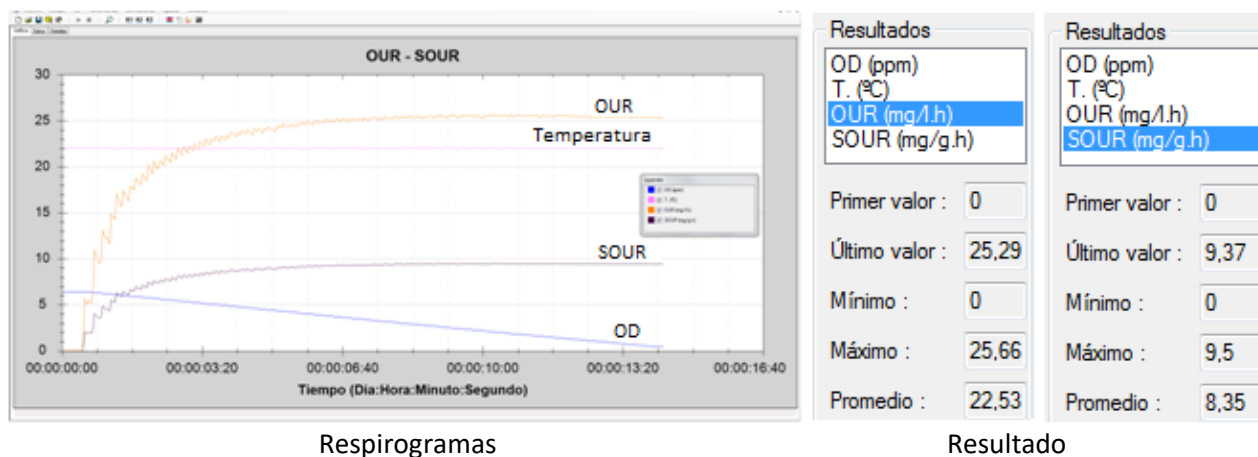
En donde:

SOUR: Tasa de consumo de oxígeno específica (mg/L/g SSV).

SSVLM: Concentración de sólidos volátiles en suspensión (mg/L)

En un respirómetro BM, introduciendo el valor de los SSVLM, el software calcula simultánea y automáticamente el valor del SOUR junto con los valores de las condiciones del ensayo.

Figura 2. Ensayo de respirometría OUR con un respirómetro BM de los respirogramas simultáneos del OUR, SOUR, OD y Temperatura



Aplicaciones del SOUR

- Valoración de la carga másica
- Detección de una pérdida de actividad por unidad de SSVLM.

2.3. FED y UNFED OUR

FED OUR: Es el OUR del licor-mixto representativo colectado desde el inicio del proceso de fangos activos (mg/L/h)

UNFED OUR: Es el OUR del licor-mixto representativo colectado desde el final del proceso de fangos activos (mg/L/h)

La relación entre el FED y el UNFED OUR se le llama factor de carga (FC)

Aplicaciones del FED & UNFED OUR

- Tomar el pulso a estado actual del proceso de depuración biológica por medio de una tabla en donde se compara el factor de carga con una tabla guía con un rango de valores normalizados.

Con el factor de carga (FC) se pueden detectar de forma temprana las siguientes situaciones:

1. Toxicidad.
2. Rendimiento actual.
3. Detección de sobrecarga y baja carga.

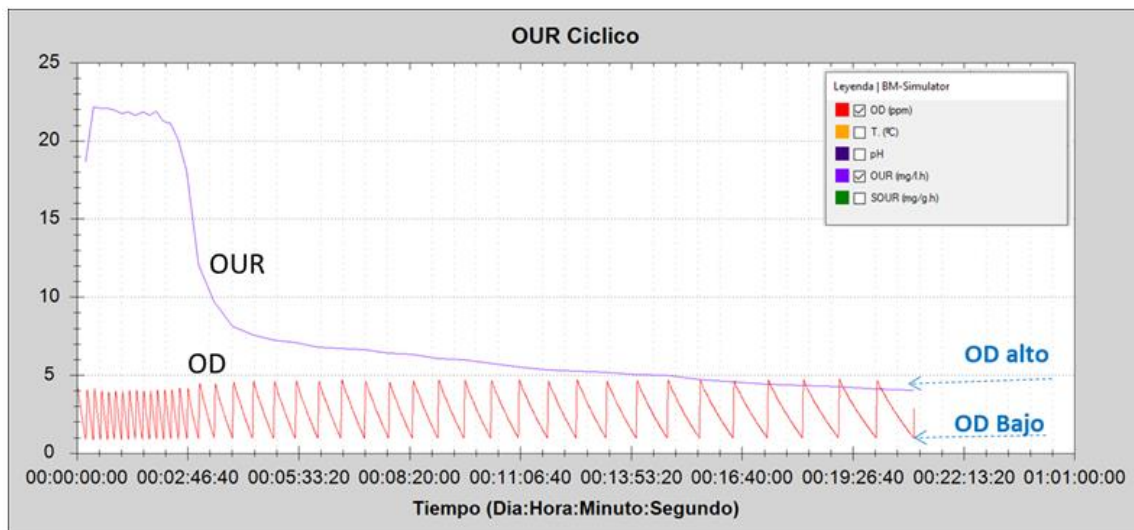
2.4. OUR cíclico

Se trata de un modo de trabajo de la respirometría BM en donde las medidas del OUR & SOUR se realizan de forma secuencial entre una ventana de trabajo del oxígeno disuelto comprendida entre dos puntos de consigna (OD alto y OD bajo) programables.

El OUR cíclico permite realizar ensayos de respirometría con valores de oxígeno disuelto equivalentes a los del proceso real.

En un ensayo de OUR cíclico se puede comprobar perfectamente como la tasa de respiración va disminuyendo a medida que el sustrato degradable se va consumiendo.

Figura 3. Ensayo de respirometría con un respirómetro BM del OUR cíclico con respirogramas simultáneos del oxígeno disuelto y OUR



Aplicaciones del OUR cíclico

- Estimación del TRH necesario para un determinado rendimiento.
- Evolución del proceso de depuración a distintos niveles de oxígeno disuelto (OD)

2.5. Tasa de consumo de oxígeno por respiración endógena: OUR_{end}

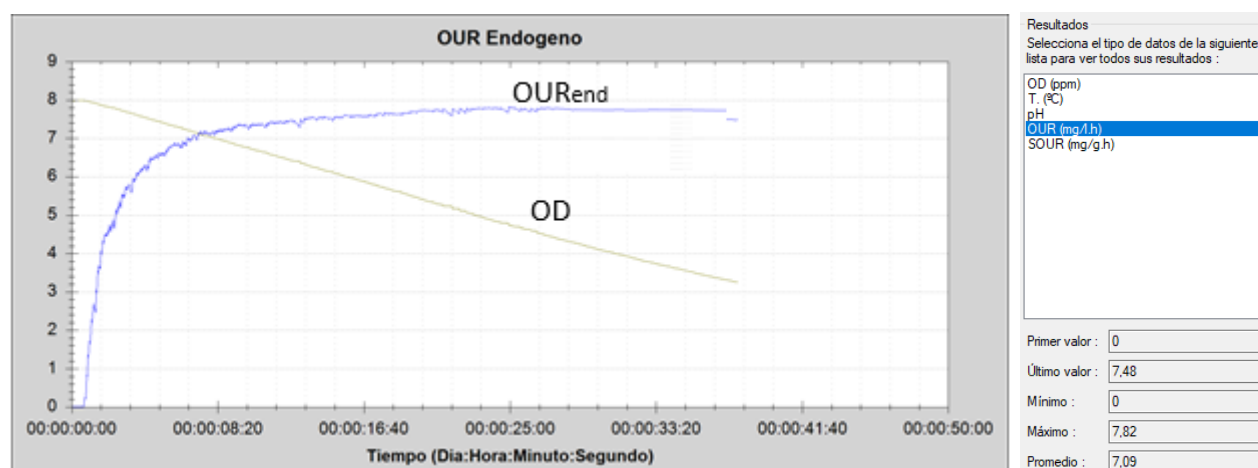
La tasa de consumo de oxígeno en respiración endógena se refiere al valor obtenido en un ensayo OUR con un fango activo efluente (del final del proceso) en fase de respiración endógena (en ausencia de sustrato degradable), el cual se consigue después de que el fango haya sido sometido a una aireación prolongada para eliminar todos los restos de sustrato degradable.

La respiración endógena en un respirómetro BM se reconoce cuando, el valor del oxígeno se mantiene suficientemente estable durante un tiempo representativo, con el fango aireándose a nivel de saturación en el reactor del respirómetro.

Los valores del OUR endógeno normalmente se ajustan a un determinado rango que depende de la concentración de SSVLM. Por lo tanto, el estado del fango activo, se puede valorar por comparación del resultado obtenido con una tabla de referencia.

A efectos de cálculo, al depender exclusivamente de la concentración de microorganismos activos en el fango, se asume que el OUR_{end} es el mismo en cualquiera de los puntos del tanque de aireación.

Figura 3. Ensayo del OUR endógeno



Aplicaciones del OUR endógeno

- Preparación del fango (fango endógeno) para los ensayos tipo R en la respirometría BM, con un oxígeno de partida denominado “línea-base”
- Evaluación de la concentración de biomasa activa,
- Base de partida para el cálculo de la concentración de biomasa activa (X)
- Tasa de decaimiento de la biomasa en respiración endógena (K_d , b)

2.6. Tasa de consumo de oxígeno por respiración exógena: OUR_{ex}

Una vez obtenido los resultados del OUR total y el OUR endógeno, el OUR exógeno referido al exclusivamente a la eliminación del sustrato se obtiene por diferencia entre ambos:

$$OUR_{ex} = OUR - OUR_{end} \quad [4]$$

El OUR_{ex} esta emparentado con la tasa de consumo de oxígeno exógena dinámica (R_s), que es el parámetro en donde recaen la mayor parte de las aplicaciones más importantes de la Respirometría.

Aplicaciones del OUR exógeno

- Actividad biológica de la biomasa frente a un determinado sustrato, excluyendo la actividad endógena en un determinado punto del proceso.
- Cálculo de la concentración de la biomasa activa heterótrofa (añadiendo un inhibidor de la biomasa autótrofa)

2.7. Tasa de consumo de oxígeno exógena dinámica: R_s

A diferencia de las tasas de consumo de oxígeno puntuales explicadas, los sistemas de respirometría BM ofrecen este parámetro por medio de un ensayo, en modo R, realizado con fango en respiración endógena, cuyo nivel de oxígeno actúa como línea base (C_b) al que se le añade una muestra de sustrato para generar una cadena de valores R_s a lo largo del tiempo a medida que el sustrato degradable se va eliminando.

A partir de la serie progresiva de valores R_s , el software calcula de forma automática y simultánea una serie de parámetros esenciales en un proceso de fangos activos:

R_s : Tasa de respiración exógena dinámica (mg/L/h)

R_{sp} : Tasa de respiración exógena dinámica específica (mg/L/gSSV)

OC: Oxígeno consumido (mg/l)

DQOb: DQO biodegradable (mg/L)

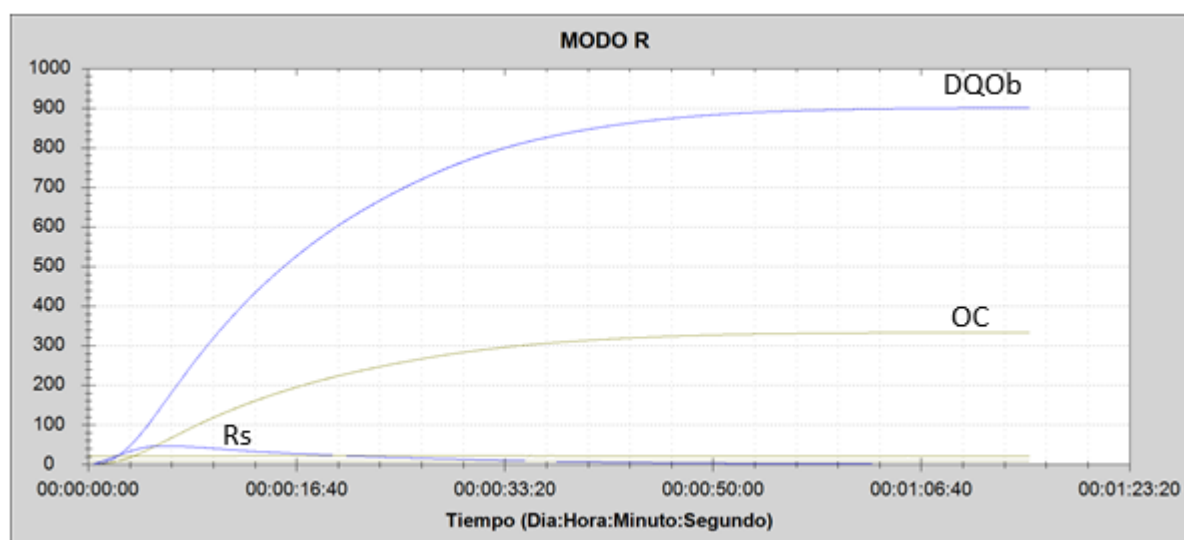
DQOrb: DQO rápidamente biodegradable (mg/L)

U: Tasa de eliminación de la DQO (mg DQO/L/h)

Q: Tasa específica de eliminación de la DQO (mg DQO/mg SSV/d)

Estos parámetros dan paso a un amplio abanico de aplicaciones.

Figura 4. Respirogramas simultáneos de la DQOb y OC en un ensayo de respirometría R



Principales aplicaciones derivadas del R_s

Entre estas aplicaciones podemos destacar las siguientes:

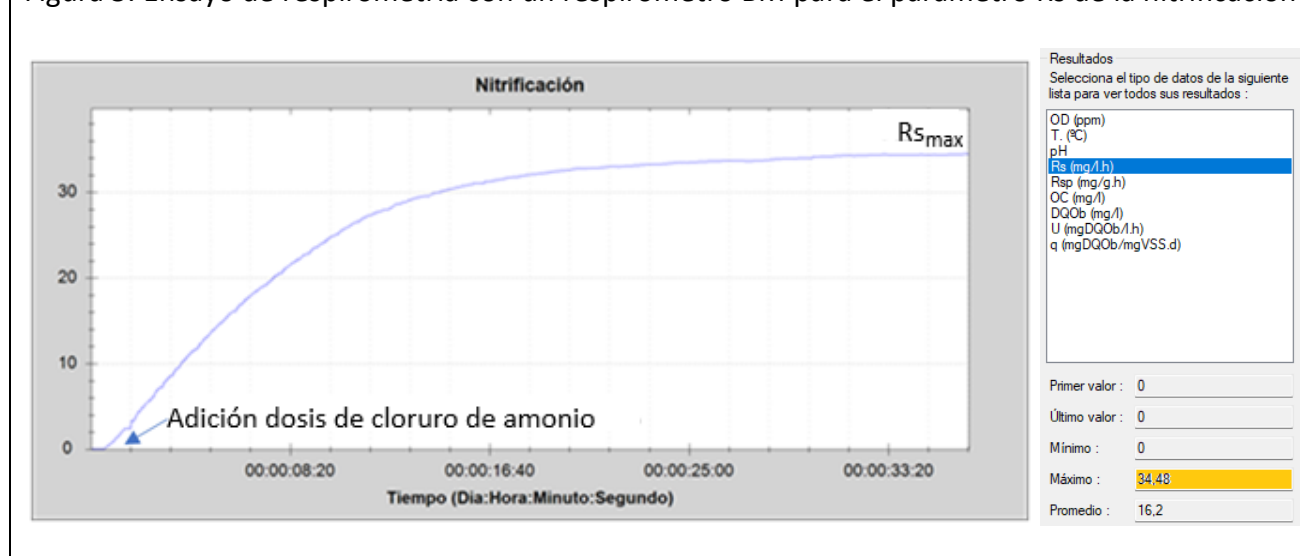
- Fraccionamiento de la DQO.
- Detección y valorización de Toxicidad.
- Parámetros operativos para un determinado rendimiento.

- Parámetros cinéticos.
- Análisis de la relación de nutrientes.
- Determinación de la tasa de consumo de oxígeno global por sustrato: OURs

2.8. Tasa de consumo de oxígeno por nitrificación: Rs_N

Para la determinación de esta tasa de consumo de oxígeno por nitrificación se hace uso de un ensayo dinámico tipo R utilizando fango en respiración endógena al que se le añade una dosis equivalente de cloruro de amonio. Hasta conseguir de forma automática la tasa de respiración máxima.

Figura 5. Ensayo de respirometría con un respirómetro BM para el parámetro Rs de la nitrificación



Al añadir cloruro de amonio como único sustrato al fango endógena, el ensayo de respirometría adquiere la facultad de calcular la demanda de oxígeno sin la interferencia de la demanda de oxígeno por sustrato orgánico.

Debido a la gran influencia que el oxígeno disuelto ejerce sobre la nitrificación, a la tasa de respiración máxima se le debe aplicar por un factor de corrección por este concepto.

$$Rs_N = Rs_{max} * F_N \quad [5]$$

En donde:

Rs_N : Tasa de consumo de oxígeno por eliminación nitrógeno nitrificable (mg/L/h)

Rs_{max} : Tasa de respiración exógena máxima (mg/L/h)

F_N : Factor de corrección por efecto del oxígeno disuelto = $OD / (K_{OA} + OD)$

K_{OA} = 0,5 por defecto. Fuente: ASM3, Henze *et al.* (2000)

La aplicación más importante derivada del Rs_N es la determinación de la tasa de nitrificación (AUR)

Principales aplicaciones de la R_{sN}

- Detección de la actividad nitrificante.
- Cálculo de la tasa de nitrificación (AUR)
- Detección de toxicidad específica a la biomasa autótrofa para la nitrificación.
- Cálculo del requerimiento actual de oxígeno para la nitrificación (AOR_N)

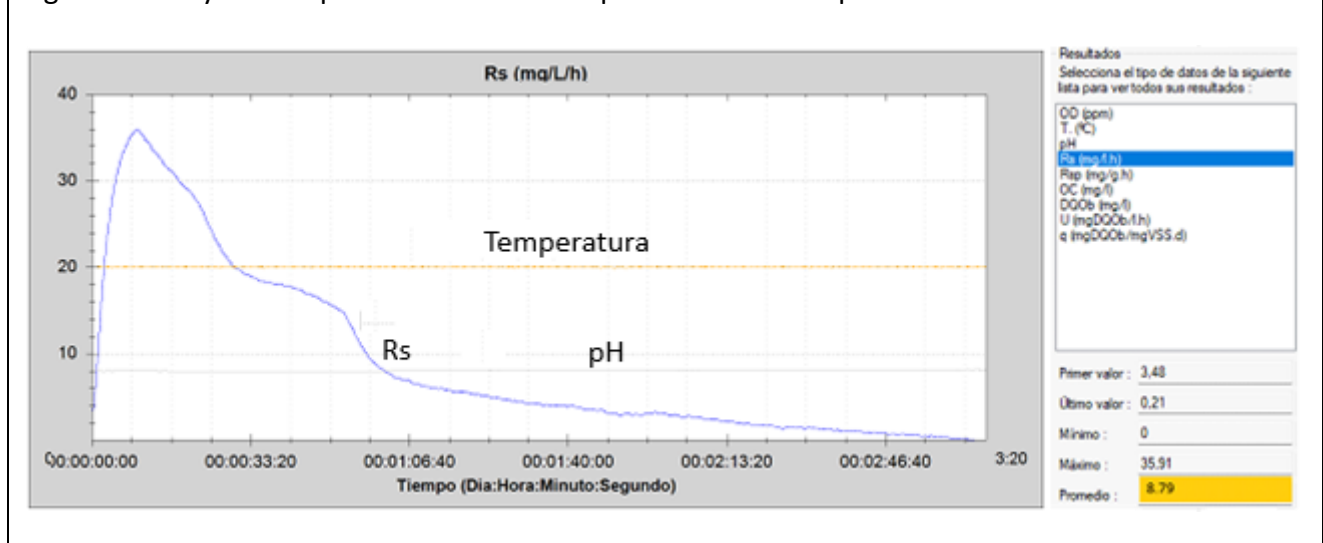
2.9. Tasa de consumo de oxígeno global por eliminación de materia orgánica: R_{sf}

Este parámetro es representativo de la tasa de consumo de oxígeno del proceso completo de eliminación de la materia orgánica y se obtiene a partir de tasa de respiración dinámica exógena por materia orgánica (R_s)

Para ello se requiere un ensayo de respirometría R con fango activo en fase de respiración endógena al que se le añade una dosis de alitliourea (ATU) para inhibir la actividad nitrificante y una muestra de agua residual de entrada.

El R_{sf} representativo coincide con el valor promedio (R_{sm}) que el software BM lo obtiene de forma automática por la división entre el oxígeno consumido (OC) exclusivamente por la muestra de materia orgánica (con factor de dilución: $FC = 1$) y el tiempo invertido en este consumo.

Figura 4. Ensayo de respirometría con un respirómetro BM del parámetro R_s



Con ello, una vez obtenido el R_{sm} , el R_{sf} se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_{sf} = R_{sm} * F_s \quad [6]$$

En donde:

R_{sf} : Tasa de consumo de oxígeno por eliminación de sustrato orgánico (mg O_2 /L/h)

F_s : Factor de corrección por efecto del oxígeno disuelto = $OD / (K_{OD} + OD)$

$K_{OD} = 0,2$ cuando el OD medio es < 2 mg/L. y $K_{OD} = 0$ cuando el OD medio es > 2 mg/L

2.10. Tasa de consumo global de un proceso de fangos activos: OUR_f

Cuando el proceso opera con limitaciones de oxígeno disuelto y con una relación DQ_{Orb}/N relativamente elevada, la simultaneidad de los ciclos de eliminación de materia orgánica y nitrógeno se desequilibran por lo que una sola tasa puntual de consumo de oxígeno solo puede ser representativa del licor-mixto de un punto específico del reactor biológico, pero no puede representar a todo el proceso aerobio de fangos activos. Sin embargo, las variantes que originan la tasa de consumo de oxígeno para los distintos ciclos del proceso, dan paso a un sencillo procedimiento que permite obtener una tasa de consumo de oxígeno global.

A esta tasa de consumo global, al que hemos llamado OUR_f , la podemos considerar como una tasa de respiración representativa del tratamiento biológico aerobio en su concepto integral; es decir, incluyendo la tasa actual de oxígeno por materia orgánica (RS_f), la tasa actual de oxígeno por nitrificación (RS_N) y la tasa de oxígeno por respiración endógena (OUR_{end}). Y su cálculo lógicamente será la suma de cada una de ellas.

$$OUR_f = RS_f + RS_N + OUR_{end} \quad [7]$$

Principales aplicaciones de la OUR_f

- Cálculo del requerimiento actual de oxígeno (AOR)
- Evaluación del sistema de aireación por la relación AOR/SOR con valores de referencia.
- Evaluación del estado actual de los difusores por medido del factor de uso (F)
- Rendimiento de la transferencia de oxígeno en proceso (OTE_f)

3. Conclusión

En este artículo se describen una serie de variantes de la tasa de consumo de oxígeno en el marco de tres grupos que son el de tasa de consumo total, la tasa de consumo endógena y la tasa de consumo exógena.

Estas variantes se traducen a unos parámetros que dan paso a unas importantes aplicaciones para la evaluación y control de los procesos de fangos activos y que, gran parte de ellos, se obtienen de forma automática por medio de un respirómetro BM de la empresa Surcis.

En todo ello, se pone de manifiesto que un OUR puntual normalmente no se puede utilizar como base de cálculo de parámetros que representen a un proceso global. Pero, sin embargo, tiene sus aplicaciones importantes como es la del estado actual del funcionamiento del proceso, cuando el fango se colecta al principio y final del reactor biológico para el cálculo del factor de carga (FC).

Por otro lado, independiente del punto de donde se colecte el fango, también tenemos el OUR endógeno (OUR_{end}) como representativo de la tasa de consumo de oxígeno en ausencia de sustrato.

Este OUR endógeno da paso a la importante aplicación relacionada con la evaluación del estado actual de la biomasa, cálculo de la concentración de la biomasa activa y una detección temprana de que algún tóxico puede estar haciendo mella en la concentración de la biomasa activa.

En lo que respecta al OUR global, se describe un procedimiento basado en la suma de la tasa de respiración exógena dinámica por materia orgánica (R_{sf}), Tasa de respiración endógena (OUR_{end}) y tasa de respiración por nitrificación (R_{sN}) – parámetros que se obtienen a partir de resultados de los ensayos de respirometría, gracias al software incorporado en los sistemas BM -

Con el OUR global, se puede dar paso a la importante aplicación del cálculo del requerimiento actual de oxígeno (AOR) que es la base fundamental para la evaluación del estado actual del sistema de aireación (AOR/SOR), del estado de los difusores (F) y la eficiencia de la transferencia de oxígeno (OTE_f)

Todas estas aplicaciones listadas en este artículo se describen con detalle en la columna de “Artículos - Presentaciones - Manual de Aplicaciones - Casos de Estudio” en la web de la empresa Surcis: www.surcis.com

A todo ello hay que añadir que, La Respirometría BM, se basa en un sistema abierto programable y por tanto capaz de generar un número ilimitado de aplicaciones. Por ello, las aplicaciones listadas no son más que una pequeña parte de un amplio abanico de aplicaciones que la respirometría BM puede ofrecer.

Lógicamente, todo el formulario que se ha expuesto en este artículo, se podrá incorporar a una hoja de cálculo (tipo Excel)

Bibliografía

- [1] Bocken, S.M., Braae, M. and Dold, P.L. (1989).
Dissolved Oxygen Control and Oxygen Utilization Rate Estimation
- [2] Felix García Ochoa, Victiria E. Santos Mazorra, José, C. Merchuk (2010)
Oxygen uptake rate in microbial process: an overview
- [3] M. Goto, J.F. Andrews (1985)
On-line estimation of oxygen uptake rate for the activated sludge process
- [4] Sotomayor OA, Park SW, García C. (2002)
Software sensor for on-line estimation of the microbial activity in activated sludge systems.
- [5] Schuchardt A, Libra JA, Sahlmann C, Handschag J, Wiesmann U, Gnirss R.(2005)
Potential of OUR and OTR measurements for identification of activated sludge removal processes in aerated basins.
- [6] Bilge Alpaslan Kocamemi (2012) – Marmara University
Aeration systems – Air requirement calculations
- [7] Sanitaire - Diffused aeration design guide”
University of Idaho, Civil Engineering
- [8] Simon Bengtsson, 2019.
Sweden Water Research
- [9] Principles of Respirometry in Activated Sludge, 2002
Peter A, Vanrollenghem

“Enseñar es aprender dos veces”