

Efecto de la respiración endógena en el requerimiento de oxígeno de un proceso de fangos activos con nitrificación

Autor: Emilio Serrano - SURCIS, S.L. Email: eserrano@surcis.com www.surcis.com

Palabras Clave: Edad del fango (TRC), Nitrificación, Respiración endógena, Tasa de nitrificación, Requerimiento actual de oxígeno, SSVLM, Oxígeno disuelto, Respirometría

Key words: Sludge age (SRT), Nitrification, Endogenous respiration, Nitrification rate, Actual oxygen requirement, MLVSS, Dissolved oxygen Respirometry

Resumen

Es bien conocido que, cuando el tratamiento biológico de aguas residuales incluye la nitrificación, los parámetros operativos deben dirigirse hacia este proceso en el marco de la mejor optimización energética para un determinado rendimiento.

Los principales pilares en los que se fundamenta el proceso de la nitrificación son la edad del fango, oxígeno disuelto y Temperatura. De ellos, los parámetros de control son la edad de fango (TRC) y el oxígeno disuelto y, por lo tanto, la determinación de la influencia de estos parámetros en el funcionamiento del proceso de la nitrificación pasa a ser fundamental.

La pauta general es tratar de optimizar el ahorro energético tratando de operar con el menor oxígeno posible conservando el rendimiento asignado para el proceso. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la manipulación del oxígeno debe ir acompañada de un cambio en la edad del fango (TRC); y, puesto que el TRC es proporcional a la concentración de los sólidos volátiles suspendidos en licor mixto (SSVLM), la respiración endógena de su biomasa activa (OUR_{end}) pasa también a ser un parámetro clave para el seguimiento y evaluación de la optimización energética del proceso.

Abstract

It is well known that when biological wastewater treatment includes nitrification, the operating parameters must be directed towards this process within the framework of the best energy optimization for a given performance.

The main pillars on which the nitrification process is based are the sludge age, dissolved oxygen and temperature. Of these, the control parameters are sludge age and dissolved oxygen and, therefore, the determination of the influence of these parameters on the operation of the nitrification process becomes essential.

The general guideline is to try to optimize energy savings by trying to operate with as little oxygen as possible while maintaining the performance assigned to the process. However, it must be taken into account that the manipulation of oxygen in turn means a change in the sludge age (SRT); and, since the TRC is proportional to the concentration of SSVLM, the endogenous respiration of the active biomass contained in the SSVLM also becomes a key parameter for monitoring the energy optimization of the process.

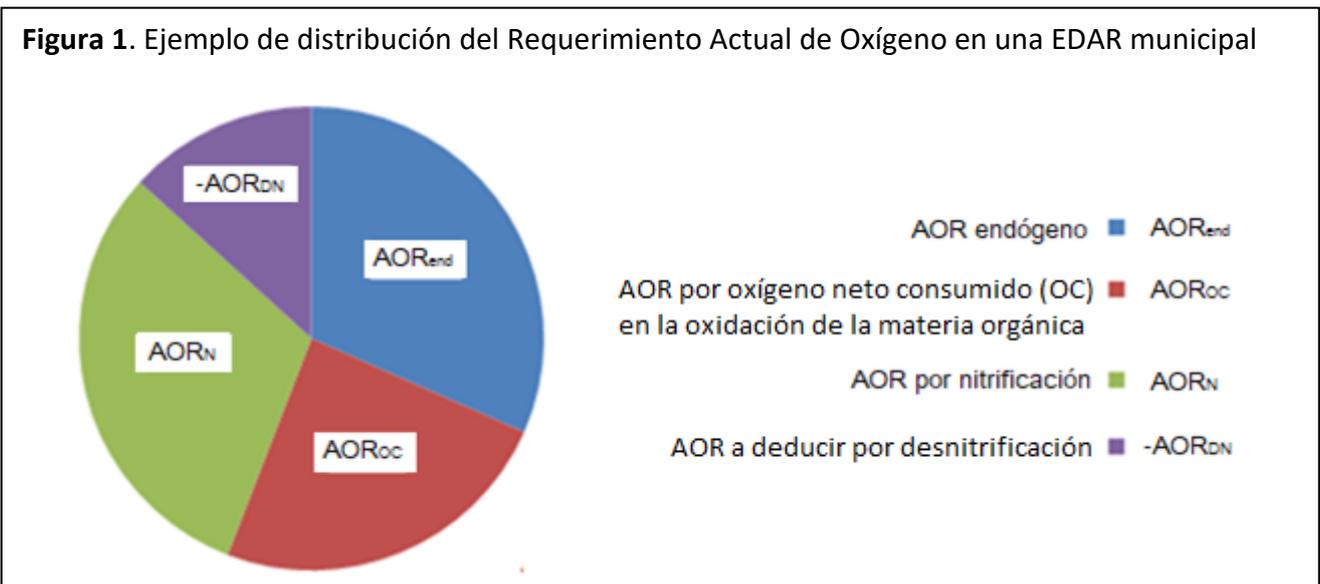
1. Introducción

Las bacterias nitrificantes crecen lentamente y, además, son sensibles a los cambios ambientales (pH, temperatura, compuestos tóxicos e inhibidores, etc.). Por lo tanto, el TRC de una planta con tratamiento biológica para la eliminación del de nitrógeno debe ser lo suficientemente largo como para asegurar el proceso de nitrificación y para la reproducción de biomasa.

Aquí es importante tener en cuenta que el TRC afecta igualmente a las bacterias heterótrofas y sólidos inertes, lo que puede causar un aumento crítico en la cantidad de los SSVLM.

El nivel medio del rendimiento asignado a la nitrificación está ligado a la tasa de a la nitrificación (AUR) la cual depende depende de la temperatura, oxígeno disuelto y concentración de biomasa activa nitrificante en los SSVLM del fango. Con ello, asumiendo un valor de temperatura media, para conservar el AUR asignado a un determinado rendimiento, a la posible bajada del punto de consigna del oxígeno debe seguir una subida del TRC y por lo tanto de los SSVLM, lo cual va a provocar un incremento de su correspondiente OUR endógeno (OUR_{end}).

Esta respiración endógena da lugar a un requerimiento de oxígeno (AOR_{end}) que puede llegar al 40% del requerimiento total de oxígeno en el proceso global (Figura 1). Por todo lo cual, el balance entre el OD, SSVLM y el TRC correspondiente pasa a ser fundamental (ver “Caso de Estudio para la Evaluación de la Aireación en la EDAR de Cieza”)

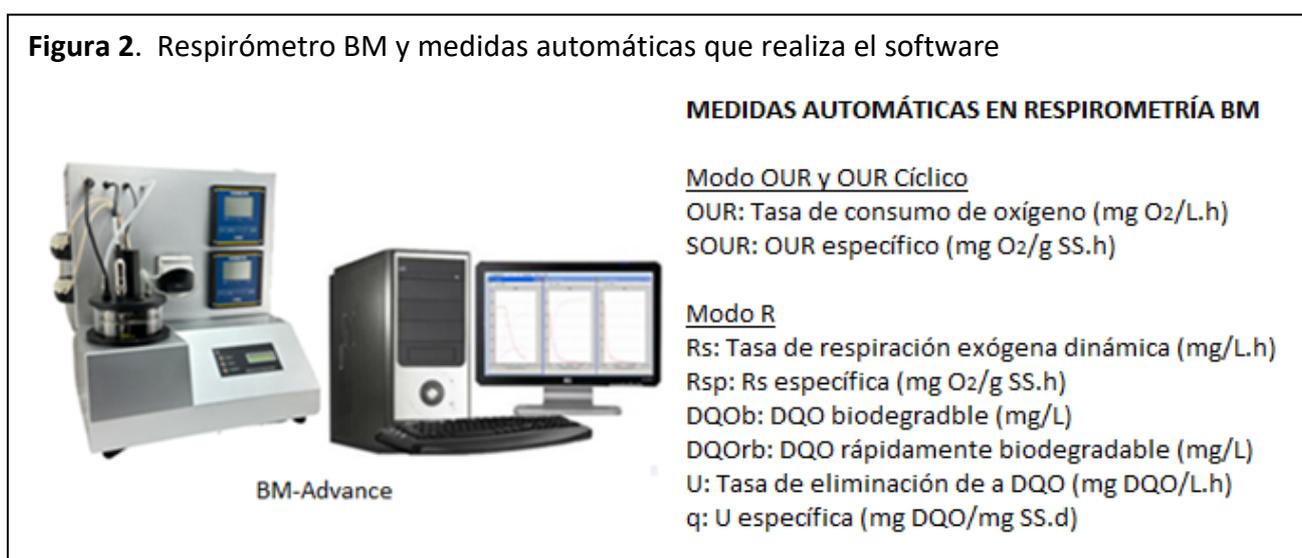


Todo ello pasa a generar la necesidad de un procedimiento para el análisis de este balance entre el OD y el TRC que requiere la determinación de una serie de parámetros que en gran parte se obtienen por medio de ensayos de respirometría y que es precisamente el que aquí se va describir.

2. Respirómetro BM

El respirómetro más adecuado puede ser cualquiera de los modelos de sistemas de respirometría multifunción BM de la empresa Surcis (Figura 2.); ya que La tecnología de los sistemas de respirometría BM permiten que se pueda 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 los 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.



3. Procedimiento

El procedimiento que se va describir en este artículo tiene por objetivo el análisis del requerimiento de oxígeno (AOR) que supone el descenso del oxígeno disuelto medio (OD) desde el nivel actual a otro nivel inferior conservando un mismo rendimiento asignado (E_N). Con ello, para que se cumpla esa condición, la edad del fango y los SSVLM deben sufrir un aumento; lo cual supone, así mismo, un incremento de la respiración endógena y por lo tanto del requerimiento de oxígeno por este concepto.

Los resultados y análisis de los requerimiento de oxígeno por respiración endógena nos dará una valoración comparativa de ambos casos (el estado actual y el supuesto por descenso del oxígeno) en el marco de la optimización energética.

3.1. Condiciones

El procedimiento que se va a describir va a poder funcionar en cualquier caso, pero lógicamente va a ser más representativo cuando la nitrificación se lleve a cabo dentro de las condiciones normales para el desarrollo de este proceso (Tabla 1.)

Tabla 1. Condiciones básicas para el desarrollo normal de un proceso de nitrificación

Parámetro	Valor
Temperatura	> 15 a 30 °C
pH	7 a 8
OD	1 a 3
DQOe/NTKe	>5
Sin inhibidores ni compuestos tóxicos y con suficiente TRH para el proceso	

3.2. Parámetros

Se trata de un grupo de parámetros que se necesitan para el desarrollo del procedimiento que incluyen datos del proceso actual, parámetros obtenidos por respirometría y datos teóricos calculados para un proceso supuesto en donde el oxígeno disuelto es inferior al actual (Tabla 2.)

Tabla 2. Parámetros clave utilizados

Datos del proceso con un OD actual	
V (m ³)	Volumen del reactor biológico aerobio
Q (m ³ /d)	Caudal de entrada
OD (mg/L)	Oxígeno disuelto
SSVLM (mg/L)	Sólidos volátiles en suspensión del licor-mezcla s
TRC (d)	Edad del fango
R _{SN} (mg O ₂ /L.h)	Tasa de respiración por nitrificación actual
AUR _{max} (mg N-NH ₄ /L.h)	Tasa de nitrificación máxima
AUR (mg N-NH ₄ /L.h)	Tasa de nitrificación
OUR _{end} (mg O ₂ /L/h)	Tasa de respiración endógena
AOR _{OD,end}	Requerimiento de oxígeno por OD y OUR _{end}
Datos del proceso con un OD supuesto, inferior al actual	
SSVLM' (mg/L)	Sólidos volátiles en suspensión del licor-mezcla
TRC' (d)	Edad del fango
OD' (mg/L)	Oxígeno disuelto
AUR' (mg N-NH ₄ /L.h)	Tasa de nitrificación
OUR' _{end} (mg O ₂ /L/h)	Tasa de respiración endógena
AOR' _{OD,end}	Requerimiento de oxígeno por OD' y OUR' _{end}

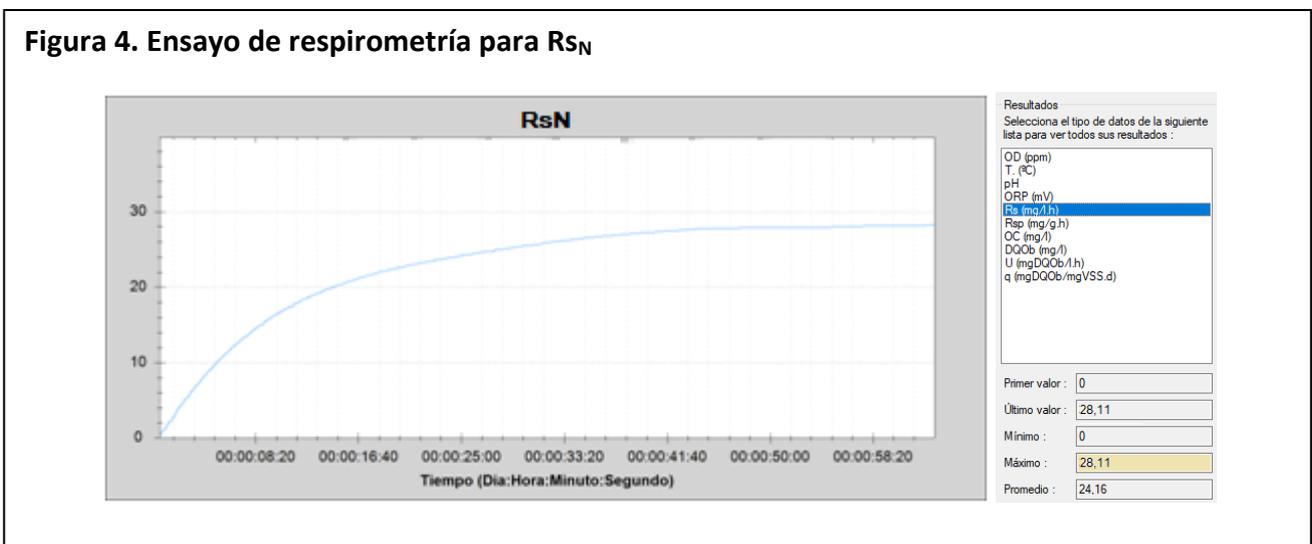
3.4. Desarrollo del procedimiento

Para ello seguimos cada una de las partes especificadas en el esquema (Figura 3.), en su mismo orden, en donde se determinan parámetros del proceso actual con un determinado oxígeno disuelto (OD) y los de un proceso supuesto en donde el oxígeno disuelto es inferior al actual (OD')

3.4.1. Determinación de la respiración endógena en el proceso supuesto

Tasa de respiración por nitrificación : Rs_N

Esta tasa de respiración exógena se obtiene con un ensayo de respirometría (modo R) añadiendo al fango activo, en condición de respiración endógena, una dosis de cloruro de amonio con una concentración de nitrógeno amoniacal equivalente a la del proceso real.



Tasa de respiración por nitrificación ($\text{mg O}_2/\text{L/h}$): $Rs_N = \text{Resultado Rs. max}$

Tasa de nitrificación: AUR

La tasa de nitrificación significa la velocidad con que el fango activo elimina el nitrógeno amoniacal para pasarlo a nitrato en las condiciones actuales.

Tasa de nitrificación máxima ($\text{mg N-NH}_4/\text{L/h}$): $AUR_{\text{max}} = Rs_N / 4,57$

Tasa de nitrificación actual ($\text{mg N-NH}_4/\text{L/h}$): $AUR = AUR_{\text{max}} * F_{OD}$

En donde:

4,57 : mg de oxígeno que necesita cada miligramo de nitrógeno amoniacal para pasar a nitrato.

OD : Oxígeno disuelto medio actual ($\text{mg O}_2/\text{L}$)

F_{OD} : Factor de corrección por el OD del proceso = $OD / (K_{OD} + OD)$

K_{OD} : Constante de semisaturación por oxígeno $\approx 0,5$ (Valor por defecto comunmente aceptado)

Tasa de nitrificación del proceso supuesto: AUR'

Tasa de nitrificación (mg N-NH₄/L/h): $AUR' = AUR_{max} * F'_{OD}$

En donde :

F_{OD} : Factor de corrección por el OD' del proceso supuesto = $OD' / (K_{OA} + OD')$

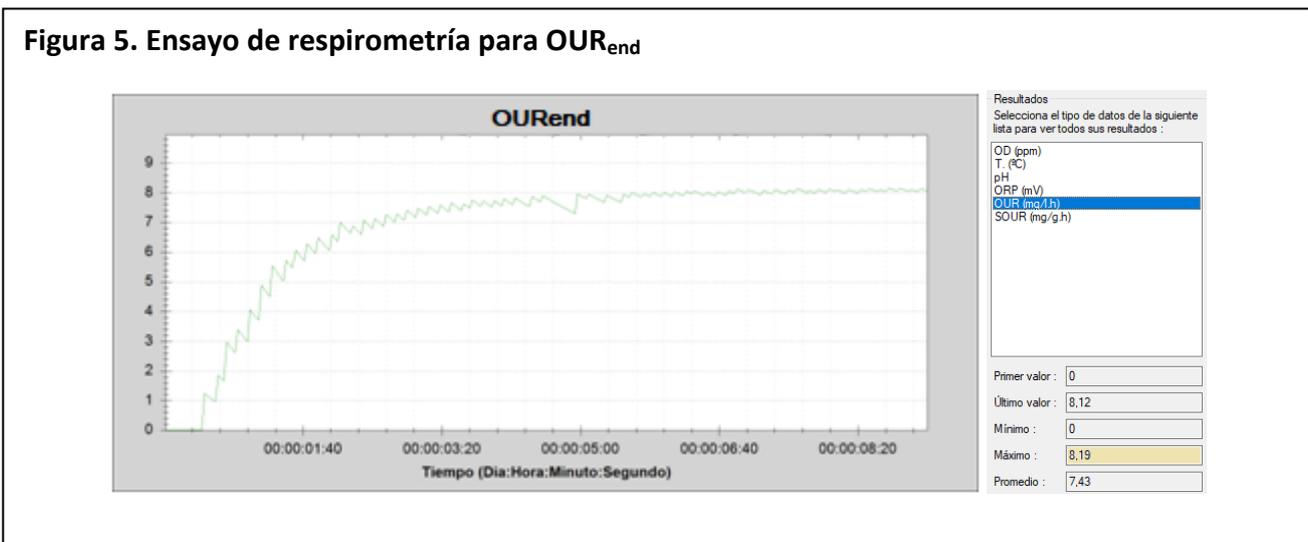
SSVLM del proceso supuesto : SSVLM'

Los sólidos volátiles de fango activo guardan una proporción directa con la tasa de nitrificación.
Por lo tanto :

$SSVLM' \text{ (mg/L)} = (AUR/AUR') * SSVLM$

Tasa de respiración endógena del proceso actual: OUR_{end}

Es la tasa de respiración del fango activo en ausencia de cualquier sustrato degradable.
Por lo tanto, el consumo de oxígeno en el tiempo se debe única y exclusivamente a los propios microorganismos contenidos en el fango.



$OUR_{end} \text{ (kg O}_2\text{/m}^3\text{/d)} = (24/1000) * \text{Resultado max. del ensayo de respirometría}$

Tasa de respiración endógena del proceso supuesto: OUR'_{end}

La tasa de respiración endógena es directamente proporcional a los SSVLM y a las tasa de nitrificación. Por esta razón, cuando la tasa de nitrificación pasa a ser AUR', la tasa de respiración endógena al igual que la edad del fango variará de forma proporcional.

$OUR'_{end} \text{ (kg O}_2\text{/m}^3\text{/d)} = (AUR/AUR') * OUR_{end}$

3.4.2. Requerimiento de oxígeno por oxígeno disuelto y respiración endógena en el proceso actual

Requerimiento de oxígeno OD (kg O₂/d) : $AOR_{OD} = Q * OD / 1000$

Requerimiento de oxígeno respiración endógena (kg O₂/d): $AOR_{end.} = V * OUR_{end}$

$AOR_{OD,end} \text{ (kg O}_2\text{/d)} = AOR_{OD} + AOR_{end}$

3.4.3. Requerimiento de oxígeno por oxígeno disuelto y respiración endógena en el proceso supuesto

Requerimiento de oxígeno OD (kg O₂/d) : $AOR'_{OD} = Q * OD' / 1000$

Requerimiento de oxígeno respiración endógena (kg O₂/d): $AOR'_{end.} = V * OUR'_{end}$

$AOR'_{OD,end} \text{ (kg O}_2\text{/d)} = AOR'_{OD} + AOR'_{end}$

3.4.4. Comparación en valoración de los AOR por oxígeno disuelto y reapiación endógena entre el proceso actual y el supuesto para un mismo rendimiento de la nitrificación

Comparación: $AOR_{OD,end} \leq \geq AOR'_{OD,end}$

Para esta valoración se pueden fat estos tres casos:

$AOR_{OD,end} = AOR'_{OD,end}$ → Se consume la misma energía en la aireación en ambos casos.

$AOR_{OD,end} > AOR'_{OD,end}$ → Se consume más energía con OD & SSLM que con OD' & SSLM'

$AOR_{OD,end} < AOR'_{OD,end}$ → Se consume más energía con OD' & SSLM' que con OD & SSLM

4. Ejemplo de lo que representaría la bajada del OD del valor actual de 2,2 mg/L a un valor medio de 1 mg/L en una planta real

La estrategia va a consistir en comparar el proceso actual, que está actuando con un OD de 2,2 mg/L y MLSSV de 3720 mg/L con un proceso supuesto que está operando con OD de 1 mg/L para obtener un un mismo rendimiento en la nitrificación en ambos casos.

4.1. Proceso actual

Datos actuales del proceso de depuración [Cortesía de la empresa DAM]

Tipo de proceso: Aireación prolongada

Temperatura: 21 °C

Oxígeno disuelto: OD = 2,2 mg/L

Sólidos volátiles del licor-mixto: SSVLM = 3720 mg/L

Edad del fango: TRC = 15,3 d

Carga másica: Cm = 0,07

Rendimiento de la nitrificación: E_N = 97 %

Tasa de nitrificación

Desde el ensayo de respirometría se obtienen los siguientes resultados:

$$R_{sN} = 28 \text{ mg/L/h}$$

$$AUR_{\max} = R_{sN}/4,57 = 28 / 4,57 = 6,12$$

$$AUR = AUR_{\max} * K_{OD} = 6,12 * 0,81 = 4,96 \text{ mg N-NH}_4\text{/L/h}$$

$$\text{Factor de corrección por OD: } K_{OD} = OD / (0,5 + OD) = 2,2 / (2,2 + 0,5) = 0,81$$

Tasa de respiración endógena

Desde el ensayo de respirometría se obtienen el siguiente resultado:

$$OUR_{\text{end}} = 8 \text{ mg/L.h} = 0,19 \text{ kg O}_2\text{/m}^3\text{.d}$$

4.2. Proceso supuesto con OD inferior al OD actual

Oxígeno disuelto

Es el dato de partida para todo el cálculo del resto de parámetros

$$OD' = 1 \text{ mg/L}$$

Tasa de nitrificación

$$\text{Tasa de nitrificación: } AUR' = (28/4,57) * K'_{OD} = 6,12 * 0,67 = 4,1 \text{ mg N-NH}_4\text{/L/h}$$

$$K'_{OD} = OD / (0,5 + OD) = 1 / (1 + 0,5) \approx 0,67$$

SSVLM'

Para mantener el rendimiento actual ($E_N = 97\%$) se debe conservar el valor del AUR actual de 4,96 mg N-NH₄/L.h. Para ello, tenemos en cuenta de que el valor del AUR es proporcional a los SSVLM; por lo que para conseguir al valor de 4,96 se subirá la concentración de sólidos volátiles a un valor que se obtiene aplicando el factor de proporcionalidad correspondiente:

$$SSVLM' = (AUR / AUR') * SSV = (4,96 / 4,1) * 3720 = 4500 \text{ mg/L}$$

Carga másica

La carga másica es inversamente proporcional a la concentración de los SSV. Por lo tanto:

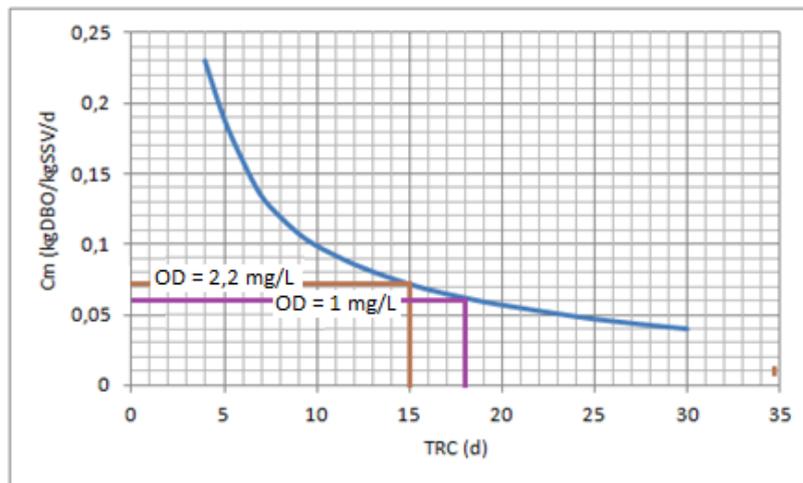
$$Cm' = (SSVLM / SSVLM') * Cm = (3720/4500) * 0,07 \approx 0,06 \text{ kg DBO/kg SSV/d}$$

Edad del fango

El TRC a la que e proceso debe ajustarse, se puede estimar desde la gráfica de la Figura 2

Con ello, $TRC' \approx 18 \text{ d}$

Figura 6. Carga másica vs TRC



Fuente: FUNDAMENTOS DE LOS FANGOS ACTIVADOS - E. Ronzano y J.L. Dapena

OUR endógeno

El OUR_{end} subirá en la misma proporción que la de los SSVLM':

$$OUR'_{end} = (AUR/AUR') * OUR_{end} = (4,96/4,1) * 8 \text{ mg/L.h} = 9,67 \text{ mg/L.h} = 0,23 \text{ kg O}_2/\text{m}^3/\text{d}$$

Resumen de los resultados de las condiciones supuestas por bajada de oxígeno

Oxígeno disuelto $OD' = 1 \text{ mg/L}$

Sólidos volátiles en suspensión del licor mixto: $SSVLM' = 4367 \text{ mg/L}$

Carga másica: $Cm' = 0,06 \text{ kg DBO/kg SSV/d}$

Edad del fango: $TRC' = 18 \text{ d}$

Tasa de nitrificación: $AUR' = 4,1 \text{ mg N-NH}_4/\text{L.h}$

Tasa de respiración endógena: $OUR'_{end} = 0,23 \text{ kg O}_2/\text{m}^3/\text{d}$

4.3. Requerimiento de oxígeno (AOR) que supondría la bajada del oxígeno de 2,2 a 1 mg/L

Requerimiento de oxígeno por OD y OUR_{end} en condiciones actuales

Requerimiento de oxígeno OD: $AOR_{OD} = Q * OD / 1000 = 5500 * 2,2 / 1000 = 12 \text{ kg O}_2/\text{d}$

Requerimiento de oxígeno respiración endógena: $AOR_{end} = V * OUR_{end} = 8900 * 0,19 = 1691 \text{ kg O}_2/\text{d}$

$AOR_{OD,end} = AOR_{OD} + AOR_{end} = 12 + 1691 = 1703 \text{ kg O}_2/\text{d}$

Requerimiento de oxígeno (AOR') por OD' y OUR'_{end} en condiciones supuestas

Requerimiento de oxígeno OD': $AOR'_{OD} = Q * OD' / 1000 = 5500 * 1 / 1000 = 5,5 \text{ kg O}_2/\text{d}$

Requerimiento de oxígeno respiración endógena: $AOR'_{end} = V * OUR'_{end} = 8900 * 0,23 = 2047 \text{ kg O}_2/\text{d}$

$AOR'_{OD,end} = AOR'_{OD} + AOR'_{end} = 5,5 + 2047 = 2052 \text{ kg O}_2/\text{d}$

$AOR'_{OD,end} > AOR_{OD,end}$

Diferencia = $AOR'_{OD,end} - AOR_{OD,end} = 2052 - 1703 = - 349 \text{ kg O}_2/\text{d}$

4.4. Conclusiones

Ajustando las condiciones para un rendimiento asignado a la nitrificación (97%), en este artículo se demuestra que se consume más energía operando con un OD de 1 mg/L que operando con OD de 2,2 mg/L.

La razón de ello está en que, con 1 mg/L, para obtener una tasa de nitrificación y rendimiento equivalente a la que se consigue con el oxígeno de 2,2, hay que subir los SSVLM. De este modo, se da paso a una mayor tasa de respiración endógena y a un mayor requerimiento de oxígeno por este concepto.

Con todo ello, para conseguir un determinado rendimiento asignado a la nitrificación, siempre que el sistema de aireación lo permita, puede ser preferible la variación del oxígeno antes que la variación de la edad del fango.

Un beneficio adicional de operar con el oxígeno de 2,2 mg/L en lugar de 1 mg/L, es el de ofrecer una mayor estabilidad y homogeneización del licor-mezcla y una mejor prevención a los posibles picos de carga.

7. Seguimiento

El seguimiento es fundamental para obtener un determinado rendimiento de la nitrificación en el marco de una optimización energética.

El parámetro base fundamental para iniciar este seguimiento es la tasa de nitrificación que se necesita para obtener el rendimiento asignado (E_N) y fijar esta tasa de nitrificación como referencia (AUR_{ref}).

Siempre que las condiciones de la nitrificación y el sistema de aireación lo permitan, la posible estrategia se puede basar en los siguientes puntos:

1)

En términos prácticos, tenemos en cuenta que el AUR es proporcional al rendimiento de la nitrificación. Por lo tanto se puede calcular el AUR de referencia (AUR_{ref}) desde el valor del AUR actual (AUR), del rendimiento actual (E_N) y el que se ha asignado para la nitrificación ($E_{N.ref}$):

$$AUR_{ref} = AUR / (E_N / E_{N.ref})$$

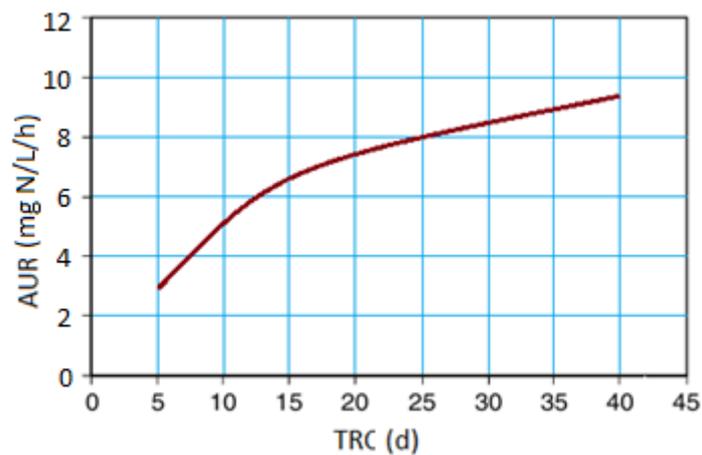
E_N (%): Rendimiento actual de la nitrificación

$E_{N.ref}$ (%): Rendimiento de referencia asignado a la nitrificación.

2)

Fijar el TRC que corresponda al AUR_{ref} (Figura 7)

Figura 7. Gráfica de valores AUR vs TRC



American Society of Civil Engineers - 2014

3)

Reajustar el valor por medio de la subida o bajada del OD, en su rango de normalidad, al incluirlo en el coeficiente de corrección sobre el AUR_{max} actual.

$$AUR_{ref} = AUR_{max} * (OD \uparrow / 0,5 + OD \downarrow)$$

Todo ello, se podría llevar a cabo con un hoja de cálculo tipo Excel, y de este modo generar las gráficas correspondiente que facilitarán el desarrollo de la operación.

9. Referencias

Liu and Jianmin Wang (2014)- Role of Solids Retention Time on Complete Nitrification: Mechanistic Understanding and Modeling.

Module2 - Long Island Sound Nitrogen Removal Training Program

Rumana Riffat - FUNDAMENTALS OF WASTEWATER TREATMENT AND ENGINEERING (2013) – IWA.

M. R. Henzen - THEORY, DESIGN AND OPERATION OF NUTRIENT REMOVAL ACTIVATED SLUDGE PROCESS (2000)

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

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

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4^o edition.

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