



Parámetros de diseño de sistemas de remoción de nutrientes en efluentes industriales

María José del Campo ^a, Elena Castelló^b

^a Autor de la tesis, UDELAR, Uruguay, mjdelcampo@gmail.com

^b Tutor, UDELAR, Uruguay, elenacas@fing.edu.uy

RESUMEN:

El trabajo que se presenta es parte del realizado para la tesis de maestría en Ingeniería Ambiental de la UdelaR. En el trabajo de tesis se realizó un exhaustivo relevamiento de los Sistemas de Lodos Activados (SLA) implementados por 5 industrias que se encuentran en la cuenca del río Santa Lucía. Se evaluó la aptitud para alcanzar los estándares exigidos por la normativa y se analizó si los valores/rangos de los parámetros de diseño que se tomaron como referencia se confirmaban luego en la operación. Para el cálculo de los parámetros de diseño y de operación, se adaptaron algoritmos basados en la metodología de la guía técnica ATV-A 131. En este trabajo se presenta la justificación del uso de esta metodología, su aplicación a cada proyecto, la comparación entre las condiciones de diseño y las de operación de cada sistema, y los resultados de los parámetros según dicha metodología.

Los resultados obtenidos en 12-24 meses de operación, no permiten un análisis estadístico, pero de manera general se concluye que la metodología de la guía ATV-A 131 puede emplearse; y se evaluó para los parámetros más relevantes, si los valores de operación confirmaban los propuestos en el diseño.

PALABRAS CLAVE: diseño sistemas remoción N y P; SLA para remoción de nutrientes; nitrificación/desnitrificación, parámetros diseño sistemas remoción nutrientes, guía ATV-A131.

1 INTRODUCCIÓN

En el año 2013 un evento de contaminación en la represa de toma de agua potable para gran parte de la población de Uruguay, desencadenó una serie de acciones. Entre ellas la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), con participación de instituciones relevantes en la materia, elaboró un plan de acción denominado “Plan de Acción para la Protección de la Calidad Ambiental y la Disponibilidad de las Fuentes de Agua Potable en la Cuenca del Río Santa Lucía”. Una de las medidas que estableció el plan, está dirigida a reducir la contaminación de los vertidos industriales, y exigió a determinadas industrias, que el vertido de sus efluentes cumpliera estándares adicionales para las especies de nitrógeno y fósforo, lo que las obligó a incluir sistemas de remoción de nutrientes en el tratamiento de sus efluentes. Los estándares a cumplir en el efluente vertido para las industrias mencionadas son: Fósforo total < 5mg/L, Nitrógeno amoniacal < 5mg/L, Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT) < 10 mg/L, (Nitrato+Nitrito) < 20mg/L.

A partir de la promulgación del plan, comenzó un proceso de diseño, construcción y puesta en marcha de los nuevos sistemas de tratamiento, con tiempos muy limitados. Cada una de estas etapas presentaba dificultades e incertidumbres, dado que hasta dicho momento había poca experiencia en Uruguay sobre la remoción de nutrientes de efluentes industriales, en lo que refiere a las tecnologías asociadas, los parámetros de referencia a tomar en el diseño, las condiciones de

operación y de control. Este proceso se dio de en tiempos extremadamente acotados, lo cual se logró mediante el intercambio entre los técnicos del sector industrial, los técnicos de DINAMA, y el invaluable aporte del Ing. Álvaro Carozzi, consultor contratado por DINAMA. En términos generales, los sistemas de tratamiento entraron en régimen en el segundo semestre de 2016.

En el presente estudio se realiza un análisis comparativo de 5 industrias durante el tiempo de operación en régimen, que varía dependiendo la industria entre 12 a 24 meses. Por lo tanto, el tiempo de operación transcurrido, es muy pequeño como para evaluar el comportamiento del sistema frente a diversas situaciones como, variaciones de la producción, cambios de temperatura estacionales, desperfectos en la PTE que obliguen a una operación transitoria distinta, o paradas de mantenimiento que impliquen la operación en condiciones distintas a las de diseño.

Se dio en Uruguay una situación muy favorable para realizar un relevamiento, dado que ocurrió un proceso de características difícilmente replicables: más de 10 industrias de alto porte debieron implementar de manera simultánea los respectivos proyectos de ingeniería para remoción de nutrientes. La elección de las 5 industrias en estudio se realizó teniendo en cuenta los siguientes factores: que abarcaran distintos rubros industriales típicos en el país, que tuvieran un nivel de actividad alto o muy alto en relación a otras industrias del país; que implicaran mayor tecnología en cuanto a instalaciones y equipamiento, y que implicaran mayores cambios tecnológicos de operación y/o control, respecto a lo que anteriormente contaba la propia industria. Se eligieron: 3 frigoríficos, 1 maltería y 1 industria láctea.

2 OBJETIVOS

El objetivo general consiste en capitalizar la experiencia del país, en el proceso de implementación de sistemas de remoción de N y P en efluentes industriales. Los objetivos específicos son:

- 1) Evaluar la validez de la aplicación de la metodología de diseño propuesta por la guía ATV A-131(1) para las condiciones de Uruguay; así como la validez de los valores y rangos de los parámetros de diseño que ésta propone como referencia, que incluye las referencias a parámetros específicos por rubro cuando corresponde (1)(2)(3)(4).
- 2) Evaluar los valores de los parámetros de diseño de cada industria en la etapa de proyecto, y si estos valores son adecuados en función de los parámetros de operación. Es decir, evaluar los parámetros tomados para el diseño del proyecto, a la luz de los resultados obtenidos luego, en la operación de dichos proyectos.

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

Las tecnologías más difundidas para la remoción de nitrógeno de efluentes, se desarrollaron a partir de los procesos de nitrificación y desnitrificación heterótrofa (BNR por sus siglas en inglés). Estas consisten en el uso de Sistemas de Lodos Activados, que resultan las tecnologías más económicas y la que se han desarrollado de forma más exitosa para la remoción de nitrógeno para efluentes con cargas moderadas (1)(5)(6)(7)(8). Cabe indicar que si bien no está explícitamente mencionado, queda incluida en esta categoría la tecnología de Sequencing Batch Reactor (SBR) cuando se dan las condiciones de anoxia, aireación y sedimentación.

Las tecnologías para remoción de fósforo de efluentes pueden ser a partir de remoción biológica (EPBR por sus siglas en inglés) o físicoquímica. La primera consiste en proveer las condiciones a la biomasa para que asimile mayor cantidad de fósforo que la habitual, para ello debe exponerse a la biomasa alternadamente a condiciones aeróbicas y anaeróbicas. La



precipitación fisicoquímica se realiza mediante el agregado de sales trivalentes de Fe y Al, o de cal. Ambos procesos de remoción de fósforo, pueden incorporarse a la tecnología de SLA o SBR.

4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El análisis de los parámetros de diseño implica comparar los valores que se utilizaron en la etapa de proyecto, con los valores reales que se obtienen de los parámetros en la etapa de operación.

Si bien cada industria presentó su proyecto mediante una metodología de diseño propia, para analizar y comparar los parámetros de diseño debe utilizarse la misma base de cálculo. Por tal motivo el primer paso consistió en elegir una metodología para el diseño y evaluar su aplicabilidad a las condiciones en que se utiliza. Se optó por la metodología de cálculo que propone la guía técnica alemana para el diseño de Sistemas de Lodos Activados de efluentes domésticos ATV-A 131 y se identificó los parámetros de referencia, que son aquellos que caracterizan los procesos biológicos y fisicoquímicos de remoción de nutrientes en el SLA. Asimismo, se identificaron los valores y rangos que deberían tomar dichos parámetros para prever una adecuada operación, en este caso a partir de lo que propone la bibliografía, dado que no había experiencia ni estudios previos en Uruguay. Los parámetros de referencia son: concentración de sólidos en el reactor de lodos activados (MLSST), tiempo de retención de sólidos (SRT), índice de sedimentabilidad de lodos (ISL), producción específica de lodos, producción total de lodos, recirculación de lodos, recirculación de nitratos, capacidad de desnitrificación, producción de lodos de fósforo y requerimientos de oxígeno.

Posteriormente se relevó el proyecto de cada industria e identificaron o calcularon las variables requeridas; seguidamente se aplicó el algoritmo -adaptado de la guía mencionada- para determinar los valores de los parámetros de diseño y se los comparó con los valores/rangos que propone la bibliografía. Es necesario señalar que éste consistió en un proceso de verificación de los parámetros en base a una metodología de cálculo, pero no de diseño estrictamente, ya que tomó como punto de partida las condiciones impuestas y los resultados obtenidos en el diseño (entre otros los volúmenes y dimensiones de las unidades de tratamiento), información que fue brindada en el proyecto de cada industria.

Análogamente, se relevó la información del período de operación de cada industria, y se calcularon los parámetros de operación, también con un algoritmo basado en la guía ATV-A 131. Cabe indicar que ambos algoritmos son distintos, dado que en el primero se calculan los parámetros de diseño en base a supuestos, y en el segundo se determinan los parámetros de operación en base a mediciones.

La información requerida para calcular los parámetros de diseño se obtuvo de los proyectos presentados por las industrias a DINAMA. Los datos para calcular los parámetros de operación: concentración de efluentes brutos, del influente que ingresa al SLA y del efluente de salida; condiciones de operación (en el SLA: concentración de SST, Sólidos Sedimentables, Oxígeno disuelto, pH; proporciones de recirculación, caudales de efluente, caudales de purga, etc), corresponden en todos los casos a datos reales medidos por cada empresa, en un período que depende de cada industria, pero se encuentra entre 12 y 24 meses de operación. Una limitante de este estudio consiste en el hecho que se utilizan datos promedio para todo el período. Cabe indicar que los datos fueron provistos por las industrias, que no tienen como objetivo la evaluación de estos parámetros, y en el control operacional del SLA no es necesaria su medición con la frecuencia que se requiere para la presente investigación.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Análisis de la metodología utilizada en el diseño en base a la guía ATV-A 131

El modelo que presenta esta guía es estático, para condiciones de régimen, en rangos de temperatura de líquido entre 15 y 30 °C y sobretodo, se desarrolló para el diseño de plantas de tratamiento para efluentes domésticos. Algunas de las razones por las que se eligió esta metodología son:

- Utiliza pocos coeficientes de diseño, los cuales han sido ampliamente validados mediante su aplicación real (para plantas de saneamiento), nos referimos entre otros a: FT: factor de temperatura para respiración endógena; fC: factor de pico para respiración carbonosa; fN: factor de pico para oxidación de amonio; SF: factor de seguridad para nitrificación; Y_H : coeficiente de rendimiento heterótrofo; Y_{dH} : coeficiente de decaimiento; b: coeficiente de restos celulares; a: coeficiente de sólidos inertes y sólidos minerales.
- El algoritmo que utiliza es sencillo, sirve para el diseño de los parámetros básicos, y el mismo algoritmo engloba las distintas configuraciones de los SLA.
- Propone parámetros de referencia y valores o rangos de valores, que deben tomar dichos parámetros.
- La cantidad y tipo de los parámetros que se requiere conocer son razonables. En este sentido, cabe mencionar que el diseño es en base de la DBO y de los SST.

Sin perjuicio de las ventajas mencionadas, y si bien se utiliza ampliamente y ha sido verificada su aptitud en la práctica durante décadas (9), la interrogante fundamental es si se puede extrapolar a las condiciones de Uruguay y en particular a sistemas de tratamientos de efluentes de tipo industrial. Como puntos a favor, se destacan, que las condiciones climáticas pueden asimilarse y que los ramos industriales en nuestro país corresponden a ramos agroindustriales, cuyos efluentes son de características muy similares a las de efluentes domésticos, siempre y cuando se los someta a un pretratamiento adecuado.

5.2 Presentación de las industrias en estudio

En la Tabla 1 se presentan las industrias a las que se aplicó el algoritmo de diseño, corresponden a sectores industriales típicos del Uruguay, con un nivel de actividad alto y muy alto, lo cual implica que el caudal y las cargas del efluente bruto también sean altas. Además, se indican las cargas de DBO, N y P del influente del SLA, calculadas a partir de las cargas del efluente bruto, y la eficiencia de las unidades de pretratamiento. En la Tabla 2 se resumen las distintas configuraciones de los SLA implementados, y los valores promedio de DBO, N y P en el efluente vertido, verificándose que dichos sistemas alcanzan los estándares de vertido para los que fueron diseñados, primera premisa a verificar, para poder realizar una comparación entre los parámetros de diseño y de operación.

Tabla 1: Rubro, nivel de actividad, efluente bruto generado y cargas del influente al SLA, de las industrias

	Industria 1	Industria 2	Industria 3	Industria 4	Industria 5
Rubro industrial	Maltería	Láctea	frigorífico	frigorífico	Frigorífico
Nivel de actividad	390 (tons/d) ^a	760 (tons/d) ^b	550 (res/d) ^c	600 (res/d)	1000 (res/d)
Caudal de efluente bruto (m ³ /d)	1050	6000	1100	1000	2300
DBO ₅ del efluente bruto, (kg/d)	1520	6510	2840	2450	6670
Carga DBO del influente al SLA (kg/d)	610	2050	2415	380	2300
Carga N del influente al SLA (kg/d)	70	355	132	120	300
Carga P del influente al SLA (kg/d)	45	74	14	30	46

^a-tons cebada malteada /d; ^b-tons productos lácteos/d, (lecheUHT, queso, suero desmineralizado); ^c-vacuno faenada/d



Tabla 2. Resumen de las configuraciones de los SLA y valores promedio del efluente vertido

Industria	configuración del SLA	VAT ^a (m ³)	remoción química de P	punto dosificac.	valores promedio alcanzados				
					DBO ₅ (mg/L)	NKT (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	P (mg/L)
1	A2/O	2134	Al ₂ (SO ₄) ₃	ent. sedim. ^b	11	2	0,4	2	3
2	A2/O	8200	Al ₂ (SO ₄) ₃	ent. sedim.	6	5	1	7	1
3	N/D simultánea	11000	Al ₂ (SO ₄) ₃	ent. sedim.	11	6	4	12	1
4	UCT	3920	FeCl ₃	ent. sedim.	11	8	4	60	3
5 ^c	SLA en cascada, tren 2	4290	Al ₂ (SO ₄) ₃	ent. sedim.	12	sd	44	119	18
5 ^d	SLA en cascada, tren 1	6430	Al ₂ (SO ₄) ₃	ent. sedim.	9	sd	5	84	8

^a-volumen del reactor de lodos activados; ^b-entrada del sedimentador secundario; ^c-solo tren 2 (V_{AT}= 4290 m³); ^d-solo tren 1 (V_{AT}= 6430 m³); la industria 5 tuvo problemas estructurales y mientras los reparaba operó el SLA parcialmente, primero con un tren y luego con el otro, contando con capacidad parcial de N/D.

5.2 Análisis de los parámetros de diseño y de operación

En la Tabla 3 se presenta una comparación de los principales parámetros que definen el proceso biológico de los SLA. Se puede observar los siguientes aspectos:

1. La MLSST en operación es bastante mayor que la de diseño (excepto para la industria 4). Esto se debe principalmente a que las industrias se enfrentaron a dificultades operativas que llevó a que utilizaran el reactor biológico como pulmón hasta solucionar los inconvenientes: industrias 2 y 3 no contaban con capacidad suficiente para la gestión final de los lodos, industria 5 tuvo problemas operativos en una unidad de tratamiento de lodos; e industria 1 dificultad en alcanzar las condiciones de operación en régimen de la unidad de deshidratación.
2. Los SRT de operación son altos para todos los casos, correspondiendo a condiciones de estabilización de lodos o más aún envejecimiento. En parte esto es beneficioso dado que se reduce la cantidad de lodos, pero por otra parte requiere mayor aireación (lo cual implica mayor costo), y control de que no se dé demasiada inertización de los barros, disminuyendo su capacidad biológica. La razón de los valores de SRT de operación mayor a los de diseño, difieren para cada industria, dado que intervienen varias variables: producción de lodos, volumen del reactor biológico y MLSST, que tuvieron comportamiento distinto en cada caso.
3. La carga de lodos durante la operación tomó en todos los casos valores significativamente menores, debido al gran volumen del reactor de lodos (V_{AT}) de diseño y alta MLSST.
4. El Índice de Sedimentabilidad de Lodos en operación, es para todos los casos menores que el supuesto en el diseño. En ningún sistema se observó desarrollo de bacterias filamentosas durante el período de estudio. Considerando que los diseños de los SLA y las condiciones de operación fueron previstas para minimizar su desarrollo, sería de esperar que estos aspectos fueran la razón de que no hubiera crecimiento de filamentosas.

Tabla 3. Comparación entre condiciones de operación y condiciones de diseño

Industria	rubro	MLSST (kg SST/m ³)		SRT d		Carga de lodos (kg DBO/kgSST.m ³)		Masa sólidos en purga (kg SST/m ³)		ISL (mL/g)	
		dis ^a	operac ^b	dis	operac	dis	operac	dis	operac	dis	oper
1	maltería	3,5	9	26	21	0,08	0,03	440	950	150	75
2	láctea	3	12	19	32	0,08	0,02	695	2915	120	73
3	frigorífico	3	6	19	54	0,07	0,02	1740	1180	110	75
4	frigorífico	2,1	3,1	23	31	0,06	0,03	400	290	130	110
5	frigorífico	3 - 4	7,7	21-40	23	0,07*0,04	0,02	1570*1125	1010	120	45
5	frigorífico	3 - 4	7,1	21-40	81	0,07*0,04	0,02	1570-1125	1010	120	50

^a - parámetro de diseño; ^b-parámetro de operación

6 CONCLUSIONES

El análisis de los valores de los parámetros de diseño, abarcó 5 casos de efluentes de 3 ramos industriales y distintas configuraciones de SLA. Sin embargo, los datos que se obtienen en este análisis son preliminares, calculados en base a promedios de períodos relativamente extensos, y en los cuales si bien en términos generales operó en régimen, en realidad hubo variaciones dentro del período, y los pocos datos no permiten evaluar la sensibilidad del sistema a estas variaciones. Realizada la aclaración que los datos no tienen validez estadística, por otra parte se puede concluir lo siguiente:

1. No se encontró inconsistencias en la metodología aplicada (basada en la guía ATV-A 131), en su aplicación ni en los valores/rangos de los parámetros propuestos por la guía y los de diseño y operación, de las industrias en estudio; más aún se observó concordancia en los valores obtenidos para los parámetros de diseño. Se entiende que los puntos débiles de aplicar la metodología para estas situaciones y de los que debe profundizarse en futuras investigaciones mediante análisis estadístico, son los siguientes:
 - a. Carga de lodos: se debe evaluar si los rangos de referencia propuestos en la guía son adaptables a los casos de estudio; los valores obtenidos en la operación son menores que los sugeridos en la referencia, y se tienen pocos datos para poder concluir sobre la aptitud de los valores obtenidos.
 - b. Producción de lodos carbonosos: se debe verificar la aptitud de los coeficientes que se utilizan en la guía ATV-A131, si son aplicables a las condiciones de estudio.
2. En el análisis de las condiciones de operación y diseño para cada industria, si bien los valores de varios parámetros durante la operación, se apartaron a los previstos en el diseño, los sistemas de tratamiento funcionaron con eficiencia adecuada. Se observa que es posible distintas condiciones de operación de los SLA, en las cuáles se llega a distintos estados de régimen. En futuras investigaciones debe evaluarse cuál/es de estos estados corresponden a un régimen estable y hacen la operación más robusta y sostenible en el tiempo, y cuáles son los estados de régimen, que hacen a la operación del SLA menos costosa desde el punto de vista económico.

7 AGRADECIMIENTOS

- Al Dipl. Ing. Álvaro Carozzi, por sus enseñanzas previas a la tesis, y sus consejos durante la realización de la misma
- A los técnicos y operarios de las industrias en estudio, y a los profesionales competentes que las asesoran, por sus intercambios técnicos y recomendaciones.

8 REFERENCIAS

- 1) ATV-A 131. (2001). Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen (Diseño de Plantas de Lodos Activados de una sola etapa). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser.
- 2) ATV - M767. (1988). *Wastewater from Slaughterhouses and meat processing plants*
- 3) DWA-M 708. (2011). *Abwasser bei der Milchverarbeitung (Aguas residuales en el procesamiento de la leche)*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser.
- 4) DWA-M 732. (2017). *Abwasser aus Brauereien (Aguas residuales en cervecerías)*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser.



- 5) Metcalf and Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (Fourth Edition ed.). New York City: Mc Graw Hill.
- 6) US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington: US Environmental Protection Agency.
- 7) Hreiz Rainier, L. M. (2015). Optimal design and operation of activated sludge processes: State of the Art. *Chemical Engineering Journal*, 900-920.
- 8) Lackner, S., Gilbert, E., Vlaemick, S., Joss, A., Horn, H., & Van Loodsdrecht, M. (2014). Full-scale partial nitrification/anammox experiences- An application survey. *Water Research*, 292-303.
- 9) Walder, C., Lindtner, S., Poresl, A., Kleggraf, F., & Vasantha. (2011). Adaptation of WWTP design parameters to warm climates using mass balancing of a full scale plant.