



ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE SISTEMAS DE REMOCIÓN DE NUTRIENTES EN EFLUENTES INDUSTRIALES

María José del Campo (*),

Autor de la tesis. Ingeniera Química (2001). Trabaja en el Departamento de Control Ambiental de Actividades (DCAA) de DINAMA desde 2005, Jefe del DCAA desde 2016

Elena Castelló

Tutor de la tesis. Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UDELAR

TEMA: 1

CUENCA del río Santa Lucía



(* Regidores 1321, Montevideo, Uruguay- Código Postal 11700 - Cel.096 724 367 - mjdelcampo@gmail.com

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, para los cuáles fueron diseñados estos SLA, y se analizó si los valores/rangos de los parámetros de diseño que se tomaron como referencia se confirmaban luego en la operación. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de los pretratamientos y los SLA implementados y su aptitud para alcanzar los estándares de vertido.

A partir de los resultados obtenidos en 12-24 meses de operación, se concluye que los sistemas de lodos activados implementados logran que el efluente de salida cumpla con las nuevas exigencias de remoción de nutrientes y se verifica en cada una de las configuraciones implementadas, las ventajas operativas que predecía la bibliografía.

Palabras clave: nitrificación/desnitrificación, remoción N y P, SLA para remoción de N y P, tratamiento de efluentes.

INTRODUCCIÓN

En el año 2013 un evento de contaminación en la represa que constituye la reserva para la toma de agua potable de gran parte de la población de Uruguay, tomó gran relevancia pública y desencadenó una serie de acciones. Entre ellas, la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) elaboró, en conjunto con instituciones clave en la materia, 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" (Plan de Acción, 2013). 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 de ciertas 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 < 5 mgP/L, Nitrógeno amoniacal (NH₄) < 5 mgN/L, Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT) <10 mgN/L, Nitrato+Nitrito (NO₃) < 20 mgN/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 en tiempos extremadamente acotados, lo cual se logró mediante el intercambio entre los técnicos del sector industrial, de DINAMA, y el invaluable aporte del Ing. Álvaro Carozzi, consultor contratado por DINAMA, experto en tratamiento de remoción de nutrientes. En términos generales, las industrias finalizaron las obras entre diciembre del 2015 y abril del 2016, y el período de puesta en régimen fue entre abril y diciembre del 2016.

En el presente estudio se realiza un análisis comparativo de 5 industrias durante el tiempo de operación en régimen, que varía dependiendo de 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 planta de tratamiento de efluentes (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 y muy alto en relación con 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.

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 consisten en:

- 1) Evaluar la configuración de cada SLA implementado, y su conveniencia en función de las características del efluente.
- 2) Evaluar la aptitud de los sistemas de pretratamiento, a los efectos de lograr un influente que cumpla con los requerimientos del sistema de remoción de nutrientes al que ingresa posteriormente.
- 3) Evaluar la aptitud de los SLA para cumplir con los estándares de vertido para los cuales fue diseñado en función de los resultados obtenidos.

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 tecnologías consisten en el uso de Sistemas de Lodos Activados que resultan las más económicas y la que se han desarrollado de forma más exitosa para la remoción de nitrógeno de efluentes con cargas moderadas (Metcalf and Eddy, 2003) (US EPA, 1993) (ATV-A 131, 2001) (Hreiz *et al*, 2015) (Lackner *et al.*, 2014). Cabe indicar que si bien no está explícitamente mencionado, queda incluida en esta apreciación 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 (US EPA, 1987). La primera consiste en proveer las condiciones a la biomasa para que asimile mayor cantidad de fósforo que la habitual, para ello se la debe exponer alternadamente a condiciones aeróbicas y anaeróbicas. La precipitación físicoquímica se realiza mediante el



agregado de sales trivalentes de Fe y Al, o de cal. Ambos procesos de remoción de fósforo, pueden utilizarse conjuntamente con la tecnología de SLA o SBR.

El esquema del SLA convencional para la remoción biológica de nitrógeno cuenta con un reactor aireado, un reactor anóxico, una recirculación interna y un sedimentador secundario. El sedimentador secundario cumple dos funciones: proveer un líquido clarificado a la salida y, lograr un espesamiento adecuado del lodo de manera que pueda recircularse al reactor para mantener una concentración adecuada de biomasa.

A partir de la configuración convencional del SLA para BNR se fueron desarrollando e incorporando modificaciones y variaciones, por ejemplo: la incorporación de reactor anaerobio para promover la EPBR, el orden en que se ubican los distintos reactores a lo largo del flujo, o la generación de zonas (aerobia/anaerobia/anóxica) en un mismo reactor (en vez de varios reactores). De esta manera, se tienen sistemas con distintas configuraciones, que dependen de los modelos de flujo (de mezcla completa y pistón), de la alternancia de las zonas anóxicas/aeróbicas/anaeróbicas, desde donde salen y hacia donde se derivan las recirculaciones, tanto la recirculación de los lodos, como distintas recirculaciones internas, y las estrategias de alimentación, de oxigenación, de duración de los ciclos. Cada configuración cuenta con características que la hacen más apta para una situación determinada, así como ventajas y desventajas que deberán evaluarse para cada situación y deben considerarse en el diseño.

Uno de los problemas operativos más importantes en los SLA consiste en la colonización por bacterias filamentosas o bulking (Al-Mutairi, 2008), las condiciones que se requieren para favorecer la nitrificación: bajas cargas de lodos y altos tiempos de residencia de sólidos, son las mismas que favorecen el crecimiento de las filamentosas. Ciertas configuraciones de los SLA proveen condiciones “selectivas”, que favorecen el crecimiento de bacterias formadoras de flocos en detrimento de las filamentosas. Estas condiciones selectivas se establecen en base a la cinética mediante selectores aerobios, o en base al metabolismo utilizando selectores anóxicos o anaerobios (Metcalf and Eddy, 2003).

El pretratamiento es fundamental para adecuar la corriente de influente, los objetivos principales son remover los contaminantes que no son aptos para un SLA posterior, sin remover demasiada carga orgánica fácilmente biodegradable, que luego pueda necesitarse para la desnitrificación. En particular para efluentes procedentes de industrias agro-industriales, maximizar la remoción de aceites y grasas (AyG) y sólidos suspendidos totales (SST) y sulfuro/sulfato que favorecen el crecimiento de bacterias filamentosas (Al-Mutairi, 2008). Además, cuando el efluente contiene alto contenido de materia orgánica, considerando los costos del tratamiento de N/D, es recomendable remover una porción en el pretratamiento respetando la relación Nitrógeno/DBO, por lo que es una combinación óptima el tratamiento anaeróbico con recuperación de biogás de manera de aprovechar el potencial energético (DWA-M 767, 2014) (Lecompte *et al*, 2016) (DWA-M 708, 2011)

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

En primera instancia se evaluó cada uno de los casos de estudio y luego se realizó un análisis en conjunto. Se realizó la siguiente sistemática para cada industria:

- 1) Análisis de los aspectos de diseño del proyecto de ingeniería de la planta de tratamiento.
- 2) Análisis de la operación en régimen.

A partir de los análisis realizados se exponen las conclusiones generales.

En relación con el punto 1 se analizaron: tipo y nivel de actividad, lo cual determina las características del efluente bruto generado y el diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE). La PTE incluye el pretratamiento, la configuración del SLA, y el tratamiento de barros. Los datos utilizados fueron provistos por cada industria como parte del proyecto presentado a DINAMA (denominado proyecto de ingeniería de la SADI), los cuales son información pública. A partir de los datos relevados se realizó un análisis de los parámetros de diseño del SLA para lo cual se definen unos parámetros que llamamos de referencia y, que corresponden a aquellos que caracterizan el proceso de remoción de nutrientes en el SLA. Estos parámetros de referencia se eligieron en base a la guía técnica alemana para el diseño de SLA de efluentes domésticos ATV-A131 (2001).

En relación con el punto 2, se presentan los resultados de los parámetros en el efluente a la salida del SLA (DBO₅, NKT, NH₄, NO₃ y P_{tot}), y se realiza el análisis de la aptitud y eficiencia de la PTE, en cuanto al



cumplimiento de los valores de vertido y el logro de la eficiencia de remoción de contaminantes para la cual fue diseñada. Cabe destacar que si bien no es parte del presente trabajo, en la tesis debió evaluarse todas las condiciones de operación, para asegurar que las condiciones de vertido que se lograron correspondían a una situación representativa de la operación, en cuyo caso consistía, -en forma parcial debido al poco tiempo de operación relevado-, en la validación general de las condiciones de operación previstas en el diseño de cada proyecto. Por tanto se verificó que los niveles de producción y los efluentes brutos que se generaron en dicho período eran representativos de los tomados en el diseño, así como las cargas de ingreso a los SLA. También se realizó el análisis de los parámetros de operación comparándolos con los parámetros que se habían previsto en el diseño. Los principales parámetros que se evaluaron en la operación fueron: sólidos suspendidos totales en el reactor, tiempo de retención de sólidos, carga orgánica de entrada (kg DBO5 de entrada/d), carga de lodos (kg DBO entrada/kg SST.d), índice de sedimentabilidad de lodos y producción de lodos)

Los datos que se relevaron para el análisis de la operación fueron brindados por las industrias en entrevistas o reportados en los informes de seguimiento a DINAMA, los cuales corresponden a información pública. Estos datos fueron: concentración de efluentes brutos, del influente que ingresa al SLA y del efluente de salida; parámetros de operación en el SLA (entre otros: concentración de sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, oxígeno disuelto, pH; relaciones de recirculación, caudales de efluente, caudales de purga). Los datos corresponden a valores reales medidos por cada industria en un período que depende de cada una pero que se encuentra entre 12 y 24 meses de operación. Una limitante de este estudio, es que para el cálculo de los parámetros de operación, se realizó un promedio de cada variable en todo el período, despreciando variaciones, que sin afectar el estado de régimen, pueden ocurrir en pequeños lapsos de la operación.

RESULTADOS

Aspectos de diseño del proyecto de ingeniería

Las 5 industrias que se estudiaron corresponden a rubros industriales típicos del Uruguay, con un nivel de actividad alto y muy alto tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1: Rubro, nivel de actividad y efluente bruto generado, de las industrias en estudio

	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

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



Para cada industria, se analizó el sistema de pretratamiento, y a partir de la eficiencia de las unidades propuestas y datos reales de operación para aquellos pretratamientos que ya se encontraban operando, se calcularon las cargas removidas y con ellas las cargas de contaminantes que contiene el influente al SLA. Un resumen de los pretratamientos fisicoquímicos y biológicos se muestra en la Tabla 2 y las cargas que ingresan al SLA se muestran en la Tabla 3. Los pretratamientos en términos generales resultaron adecuados. Las industrias 1, 2 y 5 implementaron tratamientos anaeróbicos con recuperación de biogás según recomendado por bibliografía para reducir el volumen del reactor de lodos activados cuando las cargas orgánicas son altas, sin embargo industria 5 tuvo problemas en reducción de demasiada materia orgánica que posteriormente era necesaria para la desnitrificación. La industria 4 cuenta con laguna anaeróbica (sin recuperación energética) y tuvo problemas en demasiada remoción de materia orgánica perjudicando la relación C/N requerida para el SLA posterior. Industrias 1, 2, 4 y 5 cuentan con bypass del pretratamiento anaeróbico, para regular la porción de efluente que envían al mismo. Por otra parte, se observó beneficioso, cierta estabilidad en la temperatura del líquido del SLA en industrias 1, 2 y 5 (que tienen reactores anaeróbicos en el pretratamiento).

En relación al contenido de aceites y grasas (AyG) en el influente, las industrias 3 y 4, ambos frigoríficos que cuentan con graseras estáticas, tuvieron cierta inestabilidad. La industria 2, láctea que cuenta con desengrasador mecánico, e industria 5, frigorífico que cuenta con DAF, no presentaron inconvenientes respecto al contenido de grasas; observación que concuerda con recomendaciones de bibliografía respecto al uso de unidades con mayor tecnología para maximizar la remoción de grasas.

En relación a la presencia de una unidad de homogeneización y el volumen de la misma, no se observó inconvenientes en industrias 1, 2, 4 y 5; en cambio en la industria 3 se observó demasiada remoción de materia orgánica que pudiera darse debido al gran volumen del homogeneizador. En relación a los SST no se observaron inconvenientes en los pretratamientos planteados.

Tabla 2: Resumen de los pretratamientos de las industrias en estudio

Ind	Pretratamiento fisicoquímico	Pretratamiento biológico
1	Homogeneizador	UASB con recuperación de biogás
2	Homogeneizador/ desengrasador con barredor/ sedimentador primario	Reactores anaerobios con recuperación de biogás
3	Separación efluentes rojos y verdes. Tamices/ prensas extrusoras/ graseras estáticas/ laguna de acumulación	No tiene
4	Separación efluentes rojos y verdes. Prensa extrusora/ graseras estáticas	Digestor anaerobio/ Laguna anaerobia
5	Separación efluentes rojos y verdes. Tamices/ prensas extrusoras/ sedimentador primario/ homogeneización/ DAF	Reactores anaerobios con recuperación de biogás

Tabla 3: Cargas de ingreso de diseño a los SLA

	Industria 1	Industria 2	Industria 3	Industria 4	Industria 5
Carga DBO (kg/d)	610	2050	2415	380	2300
Carga N (kg/d)	70	355	132	120	300
Carga P (kg/d)	45	74	14	30	46



Posteriormente, como parte del análisis en la etapa de diseño, se evaluó cada uno de los SLA y se calcularon los parámetros que se tomaron para el diseño, tomando como base la metodología de la guía técnica ATV-A 131 (2001). En la Tabla se presentan las distintas configuraciones de SLA utilizadas por las industrias y la sal agregada para remoción fisicoquímica de fósforo. El análisis de los parámetros de diseño no se realiza en el presente trabajo.

Tabla 4: resumen de las configuraciones de los Sistemas de Lodos Activados

	Sistema de Lodos Activados	V _{AT} ^(a) (m ³)	remoción de P ^(b)
1	A2/O Anaerob/anóxico/aireado/desaireador	2134	Al ₂ (SO ₄) ₃
2	A2/O Anaerob/desaireador/anóxico/aireado	8200	Al ₂ (SO ₄) ₃
3	N/D simultánea (o zanja de oxidación con N/D)	11000	Al ₂ (SO ₄) ₃
4	UCT (anaerob/anóxico/aireado; 2nda recirculac interna desde el anóx al anaerob; recirc lodos ingresa al anóx)	3920	FeCl ₃
5	SLA en cascada (Tren 1: anaerob/anóxico/aireado; Tren 2: anóx/ai-reado – caudal entrada a Tren 1: 60%, a Tren 2: 40%)	10720	Al ₂ (SO ₄) ₃

^(a) - Volumen del reactor de lodos activados ^(b) - en todos los casos se agrega sal a la entrada del sedimentador secundario

Los SLA diseñados e implementados presentan variedad de configuraciones. Las industrias 1 y 2 tienen una secuencia A2/O; ambas cuentan con dos trenes idénticos paralelos, lo cual es ventajoso en las actividades de limpieza y mantenimiento ya que permite gran flexibilidad para operar con un tren. Presentan diferencias entre sí, dado que la industria 1 cuenta con un sector de desaireación previo al sedimentador secundario, lo cual favorece la eliminación del nitrógeno gas para que no ocurra burbujeo en el sedimentador; en cambio la industria 2 tiene un sector de desaireación donde ingresan los lodos de recirculación, para disminuir el contenido de oxígeno disuelto previo a su ingreso al anóxico. La industria 4 tiene una configuración UCT, en la cual existe una recirculación de nitratos desde el reactor aireado al anóxico, y una segunda recirculación desde el final del anóxico -donde la concentración de nitratos es mínima- hacia el reactor anaerobio. La industria 5 cuenta con un sistema en cascada que permite tener mayor concentración de lodos en el primer tren, de manera de permitirle mayor holgura al sedimentador.

La industria 3 cuenta con un reactor de N/D simultánea, donde en el mismo reactor se propician zonas anóxicas y aireadas, para lo cual debe generarse un flujo que circula alrededor del reactor siguiendo su geometría, atravesando las zonas anóxicas y aerobias a velocidad tal que permita los tiempos de reacción necesarios. La gran ventaja desde el punto de vista económico, es el ahorro energético de bombeo, ya que esta configuración no cuenta con recirculación externa.

Las industrias 1, 2, 4 y 5 cuentan con reactor anaerobio previendo una doble función, remoción biológica de fósforo y selector anaerobio. Adicionalmente, en todos los casos se agrega sales de Fe o Al para remoción fisicoquímica de fósforo y prevención del desarrollo de bacterias filamentosas.

En relación a la aireación, prevalecen los sistemas de aireación de fondo. Las industrias 1 y 5 cuentan con membranas de platos dispuestos en tuberías rígidas en el fondo del reactor aireado. Las industrias 2 y 3 cuenta con difusores de membranas de platos dispuestos en tuberías que pueden operar y levantarse independientemente, consistiendo en una ventaja operacional importante a los efectos del mantenimiento. La industria 4 cuenta con dos aireadores superficiales donde el licor es succionado por cono de succión en la parte de abajo y expulsado por arriba.

Análisis de los aspectos de operación

Se relevaron para cada industria los datos reales del influente al SLA, las condiciones de operación y los valores del efluente de salida. Tal como se mencionó previamente, los datos se promedian para todo el período en estudio, lo cual consiste en una limitante del trabajo, dado que, si bien se verificó que la PTE operaba en régimen durante todo el período, verificando la estabilidad de las condiciones de entrada, salida y los principales parámetros de operación, en realidad pueden existir pequeñas variaciones, y su influencia solo podría observarse si se toma una base de tiempo menor. En la Tabla 5 se observa las cargas reales de entrada al



SLA en el período de estudio, y en la Tabla 6 se presentan los valores de contaminantes del efluente final a los efectos de evaluar la aptitud de las plantas de tratamiento, en cuanto al cumplimiento de los estándares de vertido para los cuales fueron diseñadas.

Los controles que se realizan de los parámetros de operación del SLA, en general tienen gran automatización. Las industrias 1, 2, 3 y 5 tienen mediciones en línea de caudal de ingreso al SLA, caudales de recirculación interna y de lodo, cuentan con medidores de oxígeno disuelto y pH en línea en los reactores aireados. La industria 4 no tiene medición de caudales en línea, pero tienen medición en línea de oxígeno disuelto en reactor aireado. Además todas las industrias realizan con frecuencia al menos diaria análisis de NH_4 , NO_3 , P_{tot} en varios de los reactores, análisis al menos quincenal de sólidos sedimentables en el reactor aireado; y análisis al menos mensuales de SST y SSV en el reactor aireado. En todos los casos se cuenta además con uno/dos operador/es capacitados con presencia permanente en las instalaciones de la PTE al menos durante dos turnos, con capacidad para tomar decisiones y comprometidos con la operación del sistema.

Tabla 5: Cargas de ingreso de operación a los SLA

	Industria 1	Industria 2	Industria 3	Industria 4	Industria 5- tren 2	Industria 5 -tren 1
Carga DBO (kg/d)	550	1510	1595	303	725	1389
Carga N (kg/d)	45	245	286	101	358	400
Carga P (kg/d)	30	82	21	15	39	66

Tabla 6: Resultados de DBO, N y P del efluente final vertido para las industrias en estudio

Indus- tria	DBO ₅		NKT		NH ₄		NO ₃		P	
	Prom (mg/L)	n ^(a)	Prom (mg/L)	n	Prom (mg/L)	N	Prom (mg/L)	n	Prom (mg/L)	n
1	11	22	2	12	0,4	20	13	20	3	21
2	6	15	5	10	1	15	7	15	1	14
3	11	14	6	14	4	14	12	14	1	14
4 ^(b)	11	15	8	10	4	15	60	15	3	14
5 ^(c)	12	10	Sd	-	44	10	119	10	18	6
5 ^(d)	9	6	sd	-	5	6	84	4	8	5

^a-cantidad de muestras; ^b-las muestras se tomaron luego de una laguna de almacenamiento ubicada posterior al sedimentador ^c-solo tren 2; ^d-solo tren 1: 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.

En relación a los parámetros del efluente vertido, en términos generales se observa un adecuado cumplimiento de los estándares, valores para los que se diseñaron los sistemas (DBO < 60 mg/L, NKT < 10 mg/L, NO₃ < 20 mg/L, NH₄ < 5 mg/L y P_{tot} < 5 mg/L para industrias 3, 4 y 5, y P_{tot} < 2 mg/L para industrias 1 y 2), excepto para la industria 5 y la desnitrificación de industria 4.

La industria 5 tuvo un problema estructural de las membranas que separaban el reactor aireado del anóxico en cada tren, por lo cual durante el período de estudio debió operar primero con un tren y luego el otro, mientras se reparaban las respectivas membranas. Se operó el sistema modificando la configuración; el diseño del sistema permitió versatilidad en los aspectos constructivos (cambios en los flujos de ingreso, recirculación, requerimientos de bombeos, agitación y aireación), el sistema demostró versatilidad y el lodo capacidad de adaptarse al cambio. Si bien en el primer período no se logró la nitrificación, si se logró en el segundo período. En todas las industrias se observa una muy buena remoción de materia orgánica, que se logró el proceso de nitrificación y una adecuada remoción de fósforo. Los valores que se apartan de NH₄ y P_{tot} para el primer período de operación de la industria 5, se ajustó luego mediante aspectos operativos.

En relación a la desnitrificación, esta fue adecuada en las industrias 1, 2, 3. Para las industrias 4 y 5, se observó falta de relación adecuada C/N a la entrada del SLA, constatándose que la carga de materia orgánica



de entrada era menor a la prevista en el diseño, entendiéndose que esta fue la causa principal de no lograr la desnitrificación completa.

Cabe destacar que en ningún caso se constató desarrollo de bacterias filamentosas.

CONCLUSIONES

En función del análisis realizado a los SLA implementados en las industrias en estudio se puede concluir lo siguiente:

Configuraciones implementadas y aptitud de los SLA:

1. Las 5 industrias implementaron distintas configuraciones de los SLA que estuvieron acordes con la bibliografía, potenciando las ventajas en función del rubro productivo y características del influente.
2. Implican un salto radical en la tecnología asociada a las unidades de tratamiento, el equipamiento, el control y el monitoreo, en comparación con los sistemas de tratamiento que existían hasta el año 2013 en Uruguay.
3. Todas las industrias realizan un seguimiento y monitoreo continuo durante la operación. Se verificó imprescindible este control para una correcta operación.
4. Se observó un círculo virtuoso: el requerimiento de un control estricto de la operación y que los operarios deben estar capacitados, lleva a que las personas encargadas se encuentren comprometidas con el seguimiento del tratamiento.
5. Se verificó que en todos los casos es posible alcanzar valores de los estándares de DBO < 15 mg/L; NKT < 10 mg/L; NO₃ < 20 mg/L y P_{tot} < 2-3 mg/L, y eficiencias de remoción en algunos de estos sistemas de: DBO= 99%; N total= 95% ; P_{tot}= 95%
6. En ningún caso se observó desarrollo de bacterias filamentosas durante el período de estudio. Considerando que se previeron las condiciones para minimizar su desarrollo, tanto en los aspectos de diseño como en las condiciones de operación, es de esperar que esta sea la razón por la que no hubiera crecimiento de filamentosas.

Sistemas de pretratamientos implementados:

1. Se identificaron los siguientes aspectos que inciden directamente en la eficiencia y/o robustez del SLA:
 - a. Es fundamental una adecuada remoción de AyG y SST, se observó mejor performance en las industrias que tienen unidades de mayor tecnología en el pretratamiento.
 - b. Es necesaria una homogeneización de las cargas de entrada al SLA, el volumen de homogeneización debe ser el adecuado y no mayor.
 - c. Es fundamental que las unidades previas no remuevan demasiada materia orgánica biodegradable, hubo casos en que afectó la desnitrificación.
 - d. Las industrias que cuentan con reactor anaeróbico en el pretratamiento, tienen una temperatura del reactor de lodos activados estable a lo largo del año, lo cual es beneficioso.

Agradecimientos

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



REFERENCIAS

- Al-Mutairi, N. (2008). Aerobic selectors in slaughterhouse activated sludge systems: A preliminary investigation. *Bioresource Technology*, 100 (1), 50 - 58. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.030>.
- ATV-A 131. (2001). *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen (Diseño de Plantas de Lodos Activados de una sola etapa)*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser.
- DWA-M 708. (2011). *Abwasser bei der Milchverarbeitung (Aguas residuales en el procesamiento de la leche)*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser.
- DWA-M 767. (2014). *Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben (Aguas residuales de mataderos y plantas procesadoras de carne)*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser.
- Hreiz, R., Latifi, M., & Roche, N. (2015). Optimal design and operation of activated sludge processes: State of the Art. *Chemical Engineering Journal*, 900-920.
- 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.
- Lecompte, B., Ciro, F., & Merhvar, M. (2016). Treatment of an actual slaughterhouse wastewater by integration of biological and advanced oxidation processes: Modeling, efectivization and cost-effectiveness analysis. *Journal of Environmental Management*, 651-666.
- Metcalf and Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (Fourth Edition ed.). New York City: Mc Graw Hill.
- Plan de Acción. (2013). *Presentación del plan para la preservación de la potabilización y calidad ambiental de la cuenca del Río Santa Lucía*. Recuperado el noviembre de 2018, de MVOTMA-DINAMA: http://mvotma.gub.uy/images/santa_lucia/Presentaci%C3%B3n%20StaLucia%20220513.pdf
- US EPA. (1987). *Design Manual - Phosphorus Removal*. US Environmental Protection Agency.
- US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington: US Environmental Protection Agency.