



Optimización de la precipitación química de fósforo con KemConnect P

La presencia de niveles elevados de fósforo y nitrógeno en aguas de vertido a áreas especialmente sensibles puede conducir al desarrollo de procesos de eutrofización con consecuencias fatales sobre la fauna marina y la calidad del agua en la zona. Es por este motivo que la legislación vigente establece limitaciones en la calidad del vertido de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). En las EDAR, la eliminación de fósforo hasta valores inferiores a 1 mg PT/L debe realizarse a través de precipitación química mediante coagulantes dado su elevado rendimiento. Sin embargo, estos procesos presentan una fuerte dependencia de la calidad del agua a tratar y del punto de dosificación de los coagulantes. Kemira ha desarrollado la aplicación KemConnect P, basada en un novedoso algoritmo de control para la determinación de las dosis óptimas de coagulante. La aplicación de esta tecnología en la EDAR de Vic (Cataluña) ha permitido incrementar en un 15% la eficacia de la eliminación de fósforo y reducir el consumo global de coagulante en un 8% respecto el mismo período de tiempo un año atrás, manteniendo en todo momento una calidad consistente y constante del efluente.

Palabras clave

EDAR, eutrofización, fósforo, aguas residuales, directiva, digitalización, KemConnect, control de proceso.

OPTIMIZING CHEMICAL PHOSPHOROUS PRECIPITATION WITH KEMCONNECT P

High phosphorous and nitrogen levels at wastewater treatment plant's discharge, specially on high sensitive areas, may lead to eutrophication phenomena development with fatal consequences to marine life and water quality. That is why current Urban Wastewater Treatment Directive (Council Directive 91/271/EEC) establishes a limitation on phosphorous concentration at the effluent of a wastewater treatment plant according to its treatment capacity. In wastewater treatment plants (WWTP), phosphorous removal to meet values at discharge under 1 mg PT/L needs to be addressed through chemical precipitation strategies with coagulant dosing given the high removal rate provided. However, chemical precipitation is extremely dependent on water quality, coagulant dosing point, mixing properties and coagulant side reactions with other chemical species. Kemira has developed KemConnect P application. In this document, its implementation in Vic's WWTP (Catalonia, Spain) to control phosphorous precipitation process is presented. The application, through an outstanding control algorithm, has helped increasing 15% treatment efficiency and decreasing 8% coagulant consumption compared to same period one year before while maintaining a constant and consistent effluent quality at discharge.

Keywords

WWTP, eutrophication, phosphorous, waste water, directive, digitalization, KemConnect, process control strategy.

Jordi Batlle

sales manager I&W España & Portugal de Kemira Ibérica

Aleix Barrufet

senior sales representative I&W España de Kemira Ibérica

Roger Castellnou

responsable de Sostenibilidad y Proyectos de Depuradores d'Osona

Marc Freixa

jefe de planta en EDAR de Vic de Depuradores d'Osona

Joan Montoro

responsable de Automatización e Instrumentación de Depuradores d'Osona

Jordi Ruiz

digitalización y control de procesos de Kemira Ibérica



1. INTRODUCCIÓN

1.1. LA EUTROFIZACIÓN

Es conocido que niveles elevados de nutrientes (nitrógeno y fósforo en particular) en los efluentes a la salida de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) pueden conducir al desarrollo de procesos en cadena en las masas de agua receptoras de dichas corrientes; ríos, embalses o lagos. Estos procesos reciben el nombre de eutrofización y se caracterizan principalmente por un empeoramiento de la calidad del agua del cuerpo receptor con efectos críticos en la flora y fauna habitante [1-3].

El incremento en la disponibilidad de nutrientes limitantes en los cuerpos receptores de las descargas de las estaciones depuradoras supone un aumento de los procesos fotosintéticos que llevan a la formación de capas o mantas de algas que generan cambios en el pH del agua, hacen disminuir su transparencia y, por lo tanto, la posibilidad de penetración de la luz solar. Cuando la población de algas entra en fase de muerte celular, éstas ocasionan un elevado consumo de oxígeno en los procesos de degradación a través de otros microorganismos, lo que conduce a la formación de zonas anóxicas y anaerobias con efectos fatales sobre los organismos habitantes [1-4]. En determinados casos, algunas especies de algas generan toxinas nocivas durante su degradación lo que, además, puede afectar a la salud de las personas cuando estas masas de agua presentan usos de tipo recreativo.

1.2. MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE FÓSFORO

En una EDAR los compuestos fosforados pueden eliminarse a través de

procesos de naturaleza biológica (en aquellos casos en que el tratamiento biológico está adaptado para ello) o por vía química mediante precipitación con compuestos de tipo coagulante, siendo una opción interesante combinar ambas estrategias para alcanzar porcentajes de eliminación elevados.

1.2.1. Eliminación biológica de fósforo

Los procesos biológicos de eliminación de fósforo obligan a la adopción de determinadas configuraciones en los reactores de la estación depuradora al requerir una etapa anaerobia en primera instancia. En esta etapa, los microorganismos acumuladores de polifosfato (PAO) obtienen energía al romper los enlaces de las moléculas de polifosfato (que acumulan a nivel intracelular) y poder reductor a través de la hidrólisis de glucógeno a glucosa. Ambos recursos son utilizados para consumir materia orgánica en forma de ácidos grasos volátiles u otras sustancias fácilmente asimilables (C_2 a C_5) y almacenarla como polihidroxialcanoatos (PHA). La hidrólisis de las moléculas de polifosfato conduce a la liberación de fósforo al medio [5-7].

En fase aerobia, los microorganismos PAO metabolizan el PHA acumulado en fase anaerobia para generar energía en forma de ATP que permite el crecimiento de la población microbiana, la regeneración del glucógeno y la acumulación intracelular de fósforo en forma de polifosfatos.

El objetivo, en términos de fósforo, es que la asimilación de este en fase aerobia presente un alcance superior a la liberación que ocurre en condiciones anaerobias. Esto es altamente dependiente de la relación entre los niveles de ácidos grasos vo-

látiles y el contenido de fósforo en agua. Bajo condiciones estables de proceso, es posible alcanzar valores de fósforo total entre 0,5 y 2 mg PT/L en el agua tratada dependiendo de las ratios entre los niveles de fósforo y de ácidos grasos volátiles en el influente [5-7]. Sin embargo, cuando los lodos de proceso entran en condiciones anaeróbicas, bien en sedimentaciones o en operaciones de digestión, puede producirse un aumento del contenido de fósforo soluble en agua debido a su liberación.

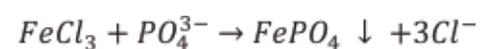
1.2.2. Eliminación de fósforo por precipitación química

El uso de compuestos de tipo coagulante en el tratamiento de aguas residuales tiene un impacto muy importante en la eliminación de fósforo a través de precipitación química con un coste relativamente bajo.

En aquellas estaciones en las que se ha implementado una estrategia de tipo CEPT (*Coagulant Enhanced Primary Treatment*) [6-9] en el tratamiento primario, parte de los compuestos fosforados orgánicos presentes en el influente pueden incrementar su sedimentabilidad a través del uso de coagulantes en esta etapa.

El fósforo soluble en forma de orto-fosfato procedente del propio influente o de los procesos de transformación e hidrólisis de polifosfatos o compuestos orgánicos en el tratamiento biológico puede reaccionar con compuestos coagulantes formando un precipitado. Cuando se utiliza cloruro férrico como coagulante, la reacción de precipitación química puede describirse según la

Ecuación 1:



Ec. 1

Estequiométricamente, el ratio de Fe:P para una precipitación completa de FePO₄ es de 1-1.5:1 en base molar. Esta ratio es conocido como factor β [6-9]. Sin embargo, en la práctica esta ratio es dependiente de diversos factores:

- El alcance en la eliminación de fósforo o el valor deseado en el efluente de la planta. Valores de fósforo en efluente por debajo de 0,2-0,3 mg PO₄/L requieren ratios Fe:P más elevadas para que la precipitación tenga lugar de manera completa. Esto obedece a que el metal, además de con el fósforo, reacciona con otras especies contenidas en agua. Por lo tanto, la aplicación de reglas de proporcionalidad para la precipitación de fósforo con alcances considerables no es válida.
- Punto de dosificación de la sal metálica. La presencia de sólidos en suspensión, en especial materia orgánica particulada, ejerce un efecto de demanda de coagulante. Por esta razón, a una misma dosis de coagulante, la eliminación de fósforo tendrá un alcance distinto si se implementan procesos de preprecipitación (en tratamiento primario), precipitación simultánea (en tratamiento biológico) o postprecipitación (tratamiento terciario).
- Durante el uso de compuestos coagulantes es necesario tener en cuenta que, además de la reacción descrita en la **Ecuación 1**, puede ocurrir de forma simultánea la formación de hidróxido metálico. La **Ecuación 2** describe el proceso cuando se utiliza un coagulante con base férrica en el sistema:

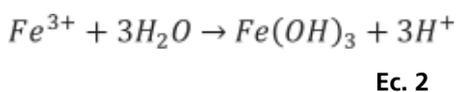


TABLA 1

PROPUESTA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE NUEVOS LÍMITES EN LA DESCARGA DE NUTRIENTES. Nota: * = aplicación en EDAR con capacidad superior a 100.000 he y en EDAR con capacidad superior a 10.000 he con descarga en zonas especialmente sensibles a la eutrofización [10, 11].

Nutriente	Propuesta de cambio		91/271/ECC	
	Valor en descarga	Porcentaje de eliminación	Valor en descarga	Porcentaje de eliminación
Fósforo	0,5 mg PT/L *	90%	1-2 mg PT/L	80%
Nitrógeno	6 mg NT/L *	85%	10-15 mg NT/L	70-80%

Parcialmente, la precipitación química del fósforo puede ser estequiométrica según lo descrito en la **Ecuación 1**, mientras que otro porcentaje puede tener lugar a través del atrapamiento de compuestos particulados de fósforo en redes de hidróxido metálico con una efectividad menor. La distribución entre ambos porcentajes, altamente dependiente del grado de mezcla del proceso, puede tener un efecto importante en el ratio Fe:P necesario.

2. PROYECTO DE NUEVA DIRECTIVA DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS (UWWTD)

2.1. CONTEXTUALIZACIÓN Y OBJETIVOS

La actual Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas [10] se adoptó en mayo de 1991 con el principal objetivo de proteger el medio ambiente de los efectos adversos de la descarga de aguas residuales y establecer unos estándares mínimos de tratamiento a nivel europeo. Sin embargo, la necesidad de actualizar esta directiva llevó a una revisión en profundidad de la misma en 2019 [11]. En esta revisión se identificaron distintos puntos de acción, entre los cuales la actualización de los límites

de determinados contaminantes en el agua tratada en virtud del avance de las técnicas de tratamiento desde la publicación de la normativa, así como la preocupación creciente por los nuevos contaminantes emergentes (de origen farmacéutico y microplásticos) y su impacto en la salud de las personas.

Los puntos identificados fueron motivo de una evaluación de impacto para así determinar la viabilidad de su implementación y el alcance de la misma. Así, en lo que se refiere a la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) se plantea el establecimiento de límites más estrictos (**Tabla 1**) en los efluentes a la salida de las estaciones depuradoras. Su implementación será sistemática en estaciones con capacidades de diseño superiores a los 100.000 habitantes equivalentes (he), pero también en estaciones con capacidades inferiores a los 10.000 he cuando la descarga se produzca en zonas especialmente sensibles a la eutrofización.

2.2. DIGITALIZACIÓN EN EL CONTROL DE LOS TRATAMIENTOS

La propuesta de revisión de la actual directiva de depuración de aguas residuales urbanas establece la necesidad de actualizar las estaciones depuradoras en materia de tecnologías de la información. El principal objetivo es el de incrementar



la transparencia en las operaciones y disponer de datos evolutivos de ciertos parámetros de interés a través de una monitorización continua. La digitalización de los tratamientos que se alcanza a través de la implementación de estas medidas permite, además, hacer uso de todas las herramientas de gestión de datos disponibles y para el soporte a la toma de decisiones estratégicas y el desarrollo de lógicas de control con un elevado grado de personalización de la estación en cuestión.

3. CONTROL DE LA PRECIPITACIÓN QUÍMICA DE FÓSFORO

La actual directiva de depuración de aguas residuales urbanas y su propuesta de modificación establecen los límites máximos permitidos en la concentración de nutrientes (en este caso fósforo) en el efluente de la estación (**Tabla 1**). Algunas estaciones cuentan con permisos de vertido acumulativos en base anual, mientras que en otras el límite es de base diaria.

Si se considera el proceso de precipitación química de fósforo a través del uso de compuestos de tipo coagulante, en muchos casos el cumplimiento de los límites permitidos en descarga se alcanza sacrificando los costes del tratamiento, es decir, a través de una sobredosificación sostenida en el tiempo. Habitualmente, la única modulación aplicada resulta de la corrección en las dosis implementadas según las analíticas diarias de verificación de la concentración de fósforo en descarga.

Esta operativa, diametralmente opuesta a la optimización de los costes de tratamiento, puede verse (y se ha visto) agravada en períodos de escasez de materias primas para la fabricación de sales metálicas

» KemConnect P es una aplicación desarrollada por Kemira Oyj para la optimización del uso de coagulantes en el proceso de precipitación química de fósforo en una planta depuradora

coagulantes y de incremento de los costes energéticos asociados a su fabricación. Es por estas razones que la implementación de estrategias avanzadas de control son clave en la optimización de los costes del tratamiento y el uso eficiente de los productos químicos asociados al mismo.

Existen en el mercado distintas lógicas de control asociadas al proceso de precipitación química del fósforo a través del uso de coagulantes. Quizás una de las más habituales consiste en la aplicación de lazos cerrados de control a través de un control clásico proporcional, integral y derivativo (PID). La determinación de la concentración de fósforo en agua a través de analizadores automáticos, sin embargo, no se obtiene de manera continua como sí ocurre con magnitudes tales como el pH, ORP o conductividad específica. Esto, juntamente con los tiempos de retención del proceso, lleva a que los lazos de control basados en un esquema PID sean de tipo discreto, lo que supone ciertamente un reto a nivel de sintonización de los controladores.

En momentos en los que los costes de los coagulantes se han mantenido bajos, una mal ajuste de los parámetros de control llevando a sobredosificaciones no ha sido un motivo de preocupación. Sin embargo, el escenario actual de disponibilidad, costes de fabricación elevados y previsión de límites de fósforo en descarga más estrictos, desata la necesidad de desarrollar

nuevas estrategias de control poniendo en el foco el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa vigente con el uso estrictamente necesario de productos químicos para ello.

3.1. ALGORITMO DESARROLLADO POR KEMIRA OYJ

La casuística específica de cada EDAR hace necesario el desarrollo de algoritmos de control basados en la acumulación de datos experimentales del proceso de eliminación de fósforo en la planta. La integración de leyes de control de tipo *If* → *Then* en algoritmos construidos a través de la lógica difusa es la base de KemConnect P, la aplicación desarrollada por Kemira Oyj para la optimización del uso de coagulantes en el proceso de precipitación química de fósforo.

Los mayores potenciales de ahorro de productos químicos en el proceso se observan en la implementación de KemConnect P en lazo cerrado de control (esquema tipo *feedback*) con determinación de fósforo en descarga y dosificación a la salida del tratamiento biológico. Ahora bien, las características de la estación, su configuración y la disponibilidad y ubicación de analizadores automáticos de fósforo pueden requerir otro tipo de estrategias de control para las que la aplicación está igualmente diseñada.

KemConnect P no se concibe únicamente como una herramienta de control local de la eliminación de fósforo por precipitación química,

ya que se complementa con una plataforma de análisis de datos operativos extraídos del propio proceso. La evaluación e incorporación de las nuevas experiencias en la estación permiten ajustar y redefinir parámetros de control, así como poder dar respuesta a nuevas situaciones para las que un control tradicional actuaría a la deriva.

4. CASO DE ESTUDIO

4.1. ANTECEDENTES

Se presenta en este artículo la implementación de la herramienta Kem-Connect P en la EDAR urbana de Vic, ubicada en Cataluña, con una capacidad de tratamiento de diseño de 340.000 he (aproximadamente unos 25.000 m³/día). El esquema de tratamiento implementado en la EDAR se detalla en la **Tabla 2**.

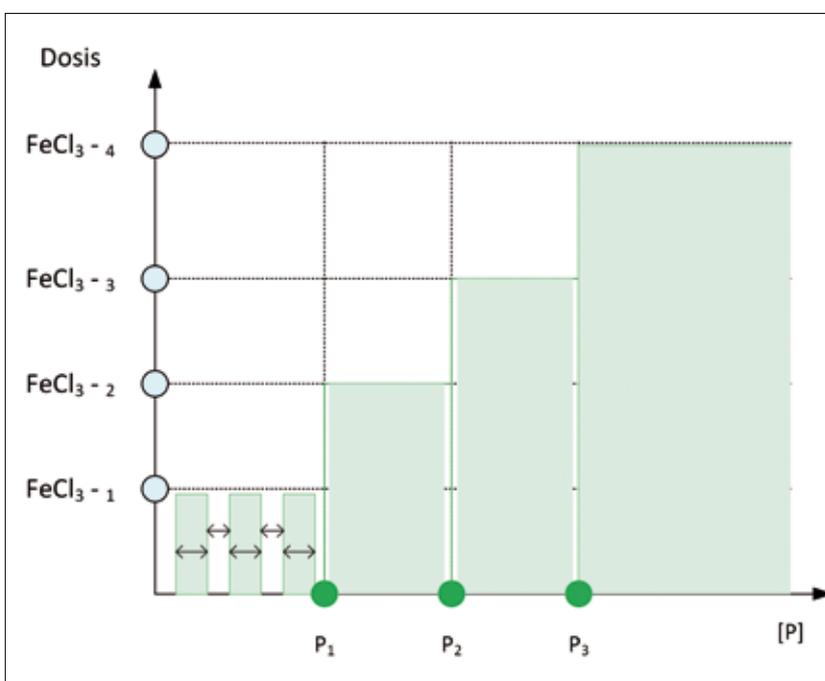
El control de la precipitación química de fósforo, previamente a la implementación de la solución Kemconnect P, se lleva a cabo a través de un algoritmo desarrollado en la propia planta, tomando como argumentos de entrada el valor de la concentración de orto-fosfato a la salida de la unidad de decantación secundaria y el caudal de agua tratada. El sistema de control establece 3 niveles de dosificación de cloruro férrico (FeCl³⁻², FeCl³⁻³ y FeCl³⁻⁴) en función de la concentración de orto-fosfato de salida (P₂, P₃ y P₄) y un esquema de dosificación basado en ciclos on/off de intensidad FeCl³⁻¹ y de cierta duración cuando la concentración de orto-fosfato en descarga se encuentra por debajo del valor de consigna (P₁) (**Figura 1**). A valores de salida de orto-fosfato por encima del nivel definido como P₄, la dosis de cloruro férrico no se incrementa y se mantiene en intensidad FeCl³⁻⁴.

TABLA 2

ESQUEMA DE TRATAMIENTO EN LA ESTACIÓN DEPURADORA DE VIC.

Tipo de tratamiento	Sí / No	Detalles
Tratamiento primario	Sí	Sin dosificación de coagulante
Tratamiento secundario	Sí	-
Eliminación de N	Sí	Nitrificación / desnitrificación
Eliminación de P	Sí	Precipitación química (FeCl ₃)
Digestión anaerobia	Sí	-
Desinfección	No	-

FIGURA 1. Representación esquemática de la lógica de control desarrollada en la EDAR de Vic.



4.2. ANTERIOR LÓGICA DE CONTROL IMPLEMENTADA

Se dispone de un histórico de operación de la estación que incluye los valores medios mensuales para el caudal de agua tratada, la concentración de fósforo total (mg PO₄/P/L) en el influente, después de la decantación primaria y en salida, así como el consumo de coagulante en el proceso de precipitación química.

La **Figura 2** muestra la evolución de la concentración de fósforo en los puntos detallados anteriormente durante el período comprendido

entre enero del 2019 y octubre de 2022, cuando la estación regula la dosificación de cloruro férrico para la eliminación de fósforo a través del algoritmo desarrollado en la planta. La **Figura 3** muestra la evolución en los valores medios mensuales de consumo de cloruro férrico durante el mismo período. La **Tabla 3** muestra el cálculo de los valores promedio, desviaciones estándar y valores máximos y mínimos en el período para la concentración de fósforo en salida y el consumo de férrico. Se observa que, para la



FIGURA 2. Evolución de los niveles de fósforo en la EDAR de Vic (de enero de 2019 a octubre de 2022).

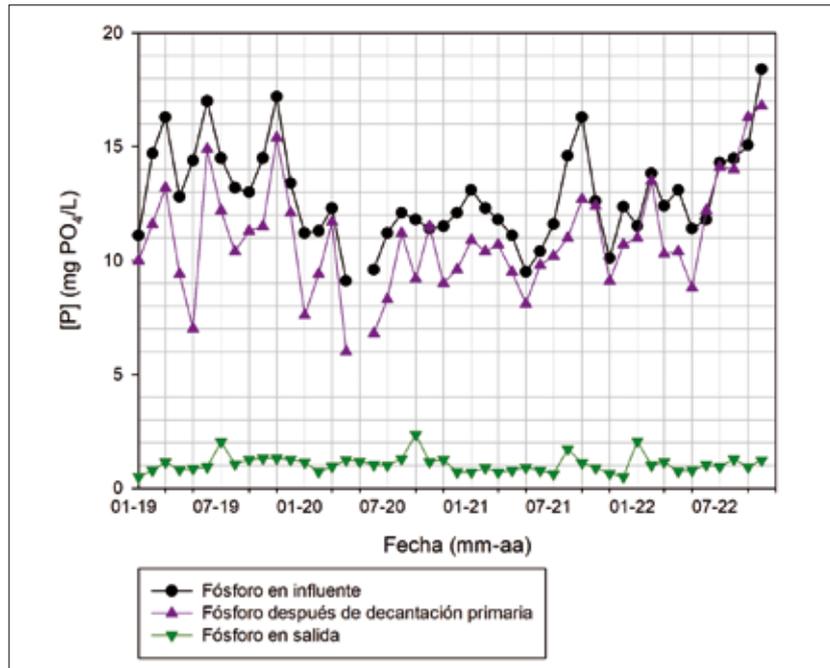


FIGURA 3. Consumo medio mensual de cloruro férrico en la EDAR de Vic (de enero 2019 a octubre de 2022). La línea verde discontinua representa el valor promedio de consumo.

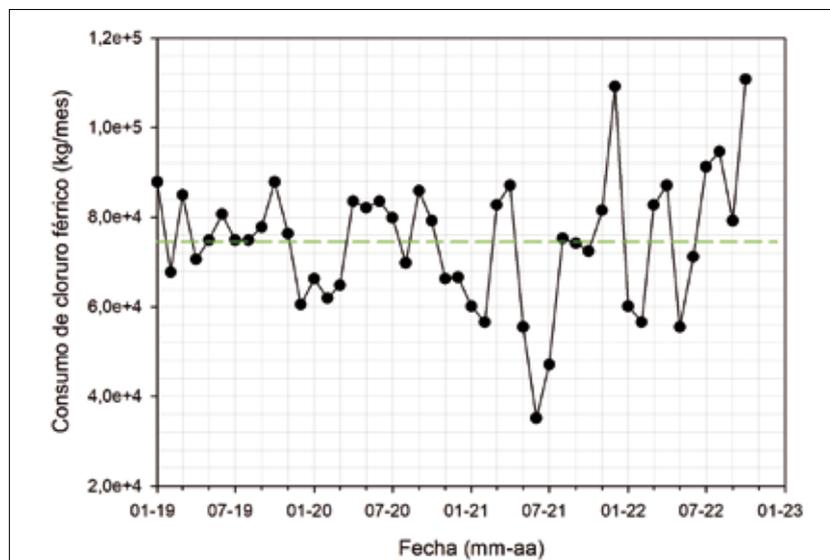


TABLA 3

CÁLCULO DE PROMEDIOS PARA LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN SALIDA Y CONSUMO DE FÉRRICO. DE ENERO DE 2019 A OCTUBRE DE 2022.

Parámetro	P _T en salida (mg PO ₄ /L)	Consumo FeCl ₃ (kg/mes)
Valor promedio del período	1,06	74.646
Desviación estándar	0,38	14.515
Valor máximo en período	2,35	110.779
Valor mínimo en período	0,5	35.136

concentración de fósforo, existen algunos episodios que llevan a valores promedio mensual por encima de 1 mg/L, alcanzándose picos superiores a 2 mg PO₄/L. En estos episodios, no obstante, el porcentaje de eliminación de fósforo sigue siendo superior al 80% respecto al valor del influente tal como se establece en la Directiva 91/271/ECC (Tabla 1).

4.3. IMPLEMENTACIÓN DE KEMCONNECT

La implementación de KemConnect P para el control de la dosificación de cloruro férrico en el proceso de precipitación química se inicia en noviembre de 2022, tomando alrededor de unos 20 días para la configuración y ajuste de parámetros del algoritmo adaptados a la dinámica del sistema. Se presentan en este artículo los resultados obtenidos en el período comprendido entre noviembre de 2022 y mayo de 2023.

La Figura 4 muestra los valores medios mensuales de concentración de fósforo en influente, después de la decantación primaria y en la salida de la estación. La Figura 5 muestra los valores medios de consumo mensual de cloruro férrico en la EDAR. Y la Tabla 4 muestra el cálculo de los valores promedio, las desviaciones estándar y los valores máximos y mínimos en el período para la concentración de fósforo en salida y el consumo de férrico.

Puede observarse que el valor promedio para la concentración de fósforo en salida en el período está especialmente influenciado por los valores alcanzados durante la puesta en marcha del sistema y ajuste de los parámetros de control. Una vez realizado el ajuste, los valores promedio se mantienen por debajo de 1 mg PO₄/L. Lo mismo ocurre con el

FIGURA 4. Evolución de los niveles de fósforo en la EDAR de Vica (de noviembre de 2022 a mayo de 2023).

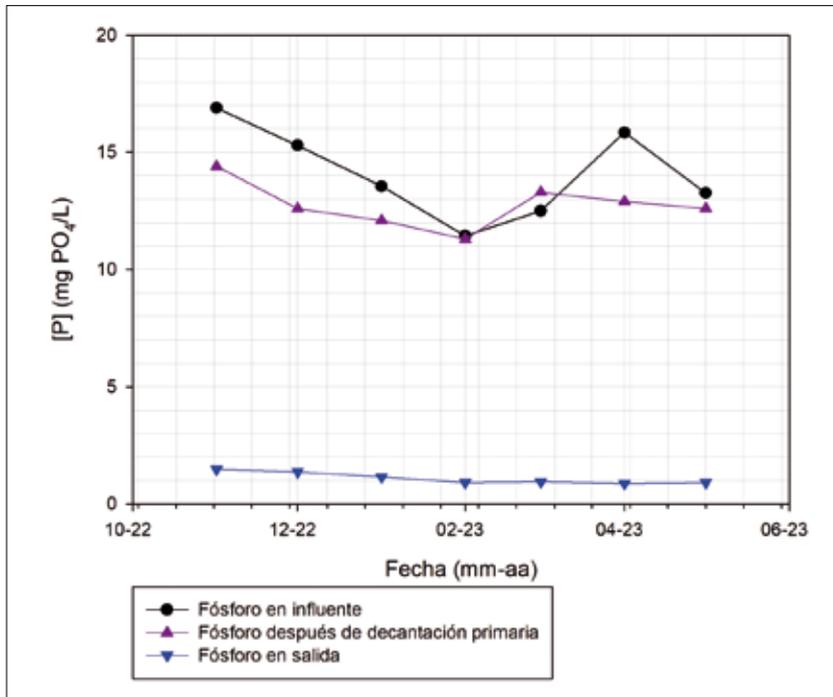


FIGURA 5. Consumo medio mensual de cloruro férrico en la EDAR de Vic (de noviembre de 2022 a mayo de 2023).

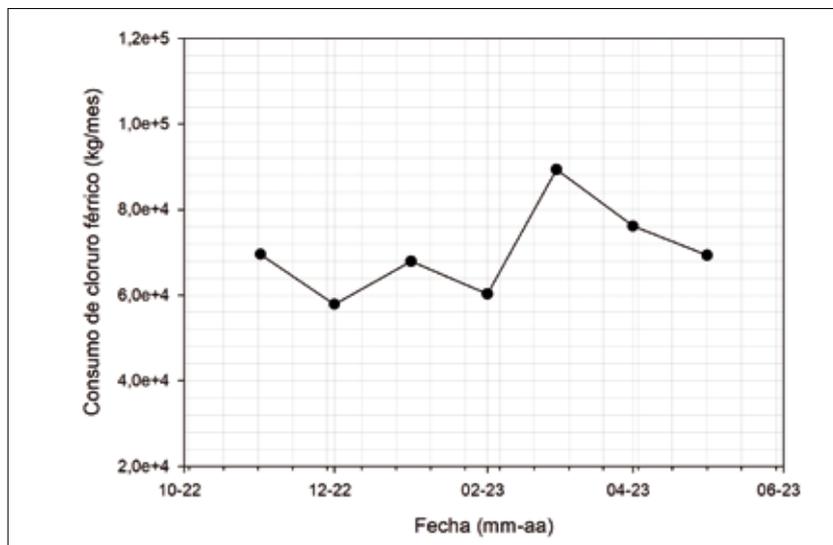


TABLA 4

CÁLCULO DE PROMEDIOS PARA LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN SALIDA Y CONSUMO DE FÉRRICO. DE NOVIEMBRE DE 2022 A MAYO DE 2023.

Parámetro	P _T en salida (mg PO ₄ /L)	Consumo FeCl ₃ (kg/mes)
Valor promedio del período	1,09	70.064
Desviación estándar	0,25	10.491
Valor máximo en período	1,48	89.366
Valor mínimo en período	0,87	57.859

valor máximo detectado en el período, que se alcanza durante la puesta en marcha del sistema.

La comparación de mayor interés, indicando un uso más eficiente del cloruro férrico en el proceso, es la que se puede establecer a través de los kg de cloruro férrico empleados por kg de fósforo alimentado en la estación. Una comparación entre todo el período monitorizado sin control por parte de Kemconnect P (de enero de 2019 a octubre de 2022) con el período comprendido entre noviembre de 2022 y mayo de 2023 indica que el proceso de precipitación química de fósforo consume un 2,2% menos de cloruro férrico por kg de fósforo alimentado (Tabla 5), con un ahorro global en el consumo de cloruro férrico del 6%. Así mismo, se consiguen valores medios mensuales de la concentración de fósforo en salida inferiores a 1 mg/L y un rango operativo (mínimo/máximo) más acotado, demostrando la estabilidad del algoritmo de control.

No obstante, existen determinados factores con una influencia muy importante en el cálculo de los valores promedio en la EDAR, como:

- Festividades.
- Incidencias en la estación.
- Situaciones anómalas debidas a la pandemia por COVID-19, con cambio de hábitos tanto a nivel doméstico como industrial, que afectan al funcionamiento de la estación.

Por estas razones, y principalmente por la última nombrada, quizás la comparación con mayor representatividad entre períodos sea entre noviembre de 2022 y mayo de 2023 (con control mediante KemConnect P) y el mismo período de un



año atrás (sin KemConnect), en la que las restricciones de movilidad y la actividad industrial presentaban un mayor grado de normalización. Comparando ambos períodos (**Tabla 6**), se observan usos más eficientes del cloruro férrico en el proceso de precipitación química de fósforo (15%) y ahorros globales de coagulante cercanos al 8% mediante el uso de KemConnect P.

5. CONCLUSIONES

La implementación de KemConnect P en el proceso de precipitación química de fósforo ha permitido operar a valores de fósforo en salida dentro de los rangos establecidos en la Directiva 91/271/ECC con un consumo de cloruro férrico inferior a la estrategia anterior en la planta. De esta manera, aumenta la eficiencia en el uso de recursos, en este caso del coagulante utilizado en la planta, disminuyendo los costes de tratamiento (kg cloruro férrico/kg de fósforo alimentado).

El algoritmo de control utilizado en la unidad KemConnect P, disminuyendo los tiempos de respuesta frente a perturbaciones en el sistema, ha permitido acotar el rango de la concentración de fósforo en salida con valores máximos medidos un 37% inferiores a la estrategia anterior. Esto permite una mayor estabilidad en el control del proceso con menores oscilaciones en la dosificación de cloruro férrico.

» La monitorización, registro y análisis de los datos del proceso llevados a cabo a través de KemConnect P permite digitalizar el tratamiento de precipitación química del fósforo, incrementando su visualización para una mejor comprensión y soporte a la toma de decisiones estratégicas

TABLA 5

CÁLCULO DE INDICADORES (I). COMPARATIVA PERÍODOS ENERO 2019 - OCTUBRE 2022 Y NOVIEMBRE 2022 - MAYO 2023.

Parámetro	Valor sin control KemConnect	Valor con control KemConnect	Diferencia (%)
kg FeCl ₃ /kg P alimentado	9,2	9	2,2%
Consumo FeCl ₃ (kg/mes)	74.646	70.064	6,1%

TABLA 6

CÁLCULO DE INDICADORES (II). COMPARATIVA PERÍODOS NOVIEMBRE 2021 - MAYO 2022 Y NOVIEMBRE 2022 - MAYO 2023.

Parámetro	Valor sin control KemConnect	Valor con control KemConnect	Diferencia (%)
kg FeCl ₃ /kg P alimentado	10,6	9	15,1%
Consumo FeCl ₃ (kg/mes)	76.082	70.064	7,9%

La monitorización, registro y análisis de los datos del proceso llevados a cabo a través de KemConnect P permite digitalizar el tratamiento de precipitación química del fósforo, incrementando su visualización para una mejor comprensión y soporte a la toma de decisiones estratégicas.

El uso de coagulante en la precipitación química de fósforo no es un proceso lineal. Cuando se requieren valores de fósforo en salida inferiores a 0,5 mg PO₄/L, las ratios molares de Fe:P aumentan respecto a las necesarias cuando la eliminación de fósforo requerida es menor. Una buena estrategia de control es crítica, ya que el consumo de coagulante a tasas de eliminación elevada puede verse incrementado considerablemente.

Por tanto, la implementación de KemConnect P en escenarios más restrictivos como los que plantea la propuesta de modificación de la actual directiva de tratamiento de aguas residuales urbanas puede contribuir a una disminución de los costes de tratamiento químico.

Bibliografía

- [1] Carpenter, S.R. *et al.* (1995). Biological control of eutrophication in lakes. *Environmental Science & Technology*, núm. 29, págs. 784-786.
- [2] Dodds, W.K. *et al.* (2009). Eutrophication of U.S. freshwaters: analysis of potential economic damages. *Environmental Science and Technology*, núm. 43, págs. 12-19.
- [3] Schindler, D.W. (2006). Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, núm. 51, págs. 356-363.
- [4] Conley, D.J. *et al.* (2009). Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, núm. 323.5917, págs. 1.014-1.015.
- [5] Grady, L.; Daigger, G.T.; Lim, H.C. (1999). *Biological wastewater treatment*. Marcel Dekker Inc., 2nd edition.
- [6] Tchobanoglous, G.; Burton, F.L.; Stensel, H.D. (2004). *Wastewater engineering, treatment and reuse*. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw Hill, 4th edition.
- [7] Henze, M.; Harremoës, P.; Jansen, J.L.C.; Arvin, E. (1996). *Wastewater treatment, biological and chemical processes*. Springer, 2nd edition.
- [8] Bratby, J. (2006). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. IWA Publishing, 2nd edition.
- [9] Shewa, W.A.; Dagnew, M. (2020). Revisiting chemically enhanced primary treatment of wastewater: a review. *Sustainability*, núm. 12, , pág. 5.928.
- [10] Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- [11] European Commission (2022). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment.