

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Estudio y propuesta de mejora del
proceso de depuración de la EDAR de
Zhongyuan (China)”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor:
Zhang, Peng Fei

Tutor:
González Romero, Juan Andrés
Mengual Cuquerella, Jesús

GANDIA, 2013

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción..... | 7 |
| 1.1. Consideraciones para el tratamiento de aguas residuales..... | 8 |
| 1.1.1. Protección del medio ambiente | 8 |
| 1.1.2. Depuración y desarrollo sostenible..... | 9 |
| 1.2. Evolución histórica de las tecnologías de tratamiento..... | 10 |
| 1.3. Estado actual del tratamiento del agua residual..... | 10 |
| 1.3.1. Incorporación de innovaciones biotecnológicas..... | 11 |
| 1.3.2. Eliminación de compuestos difícilmente biodegradables..... | 12 |
| 1.3.3. Requerimientos en equipamientos y reactivos..... | 12 |
| 1.3.4. Desarrollo de procesos simplificados..... | 13 |
| 1.4. Tratamiento primario avanzado..... | 13 |
| 1.4.1. Tratamiento primario | 13 |
| 1.4.2. Tratamiento primario mejorado químicamente (CEPT)..... | 13 |
| 1.4.3. Aplicaciones del proceso CEPT..... | 14 |
| 1.4.4. Mejora química del tratamiento primario..... | 15 |
| 1.4.5. Coagulantes..... | 15 |
| 1.5. Tendencias futuras en el desarrollo de tratamientos..... | 16 |
| 1.5.1. Mejoramiento del método del fango activo tradicional..... | 16 |
| 1.5.2. Desarrollo de tecnologías alternativas a los fangos activos..... | 16 |
| 1.5.3. Investigación de la tecnología de reutilización..... | 17 |
| 2. Descripción de la Estación de Depuración del Agua Residual de Zhongyuan..... | 18 |
| 2.1. Características del agua residual de entrada..... | 19 |
| 2.1.1. Caudal de agua residual entrante..... | 19 |
| 2.1.2. Calidad del agua residual entrante..... | 20 |
| 2.2. Proceso de Tratamiento de la EDAR de Zhongyuan..... | 21 |
| 2.2.1. Línea original de tratamiento..... | 21 |
| 2.2.2. Línea nueva de tratamiento..... | 23 |
| 2.2.3. Línea de tratamiento del fango..... | 24 |

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

| | |
|---|-----------|
| 3. Objetivos y justificación..... | 26 |
| 3.1. Definición del problema..... | 27 |
| 3.2. Objetivos..... | 27 |
| 3.2.1. Objetivo principal..... | 27 |
| 3.2.2. Objetivos secundarios..... | 27 |
| 3.3. Justificación de la técnica seleccionada..... | 28 |
| 4. Material y método..... | 29 |
| 4.1. Consideraciones previas..... | 30 |
| 4.2. Reactivos..... | 30 |
| 4.2.1. Selección del coagulante..... | 30 |
| 4.2.1. Características de los reactivos utilizados..... | 31 |
| 4.3. Diseño experimental..... | 33 |
| 4.3.1. Procedimiento experimental general..... | 33 |
| 4.3.2. Experimento de blanco..... | 34 |
| 4.3.3. Experimento de solo reactivo..... | 34 |
| 4.3.4. Experimento con adyuvante..... | 34 |
| 4.3.5. Experimento de pre-oxidación..... | 35 |
| 4.4. Medida de los contaminantes..... | 35 |
| 4.4.1. Análisis de DQO..... | 35 |
| 4.4.2. Análisis de DBO ₅ | 36 |
| 4.4.3. Análisis de sólidos en suspensión..... | 36 |
| 4.5. Caracterización del fango producido..... | 37 |
| 4.5.1. Determinación de sedimentabilidad del fango..... | 37 |
| 4.5.2. Determinación del grado de humedad..... | 37 |
| 5. Resultados de experimentos..... | 38 |
| 5.1. Experimentos de coagulación..... | 39 |
| 5.1.1. Eliminación de DBO ₅ | 39 |
| 5.1.2. Eliminación de DQO..... | 40 |
| 5.1.3. Eliminación de SS..... | 40 |
| 5.1.4. Eliminación de nitrógeno y fósforo..... | 41 |
| 5.1.5. Selección de coagulante..... | 41 |
| 5.1.6. Dosificación óptima..... | 43 |
| 5.2. Experimento utilizando PAM como adyuvante..... | 44 |

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

| | |
|--|-----------|
| 5.3. Experimento de oxidación previa..... | 44 |
| 5.4. Características del fango producido | 45 |
| 6. Planificación preliminar de CEPT | 47 |
| 6.1. Escala del proceso | 48 |
| 6.2. Objetivo del proyecto | 48 |
| 6.2.1. Diseño de la calidad del influente | 48 |
| 6.2.2. Meta de tratamiento | 48 |
| 6.3. Esquema del proceso..... | 48 |
| 6.4. Reactivos..... | 49 |
| 6.5. Análisis económico preliminar. | 49 |
| 6.6. Investigaciones futuras..... | 49 |
| 7. Conclusión | 50 |
| 8. Bibliografía | 53 |

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

Abstract

In this project we propose to apply a chemically enhanced primary treatment (CEPT) in the oldest process line of the WWTP in the zone Zhongyuan for improving its operation. Thus, it seeks to ensure that the effluent reaches the new target of emission. In laboratory level, we have studied the effectiveness of new polymeric coagulants iron and aluminum (PAC and PFS), and other traditional FeCl_3 and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. It has been observed that the process is capable of removing organic matter and suspended to give best results when using polymeric coagulants. The performance of process can be improved by using a pre-oxidation with KMnO_4 and using an adjuvant (polyacrylamide) of coagulation. And the sludge produced had good settling properties and moisture characteristics. Finally, we performed a preliminary design an improved process, proposing the use of PAC (8-10 mg/L of active component of Al_2O_3) and PAM (0.5-1 mg/L) for subsequent field trials.

Keywords: Enhanced primary treatment, Coagulation, PAC, PFS, Sludge.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

Resumen

En este trabajo se propone aplicar un tratamiento primario mejorado químicamente (CEPT) para mejorar el funcionamiento de la EDAR de Zhongyuan, en sustitución de su línea de proceso más antigua. De este modo, se pretende lograr que el efluente alcance el nuevo objetivo de emisión. A nivel de laboratorio, se ha estudiado la efectividad de nuevos coagulantes poliméricos de hierro y aluminio (PAC y PFS), además de otros tradicionales como FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Se ha observado que el proceso es capaz de eliminar la materia orgánica y en suspensión, obteniéndose mejores resultados al utilizar coagulantes poliméricos. El rendimiento del proceso puede mejorarse utilizando una oxidación previa con KMnO_4 y utilizando un adyuvante (poliacrilamida) de la coagulación. Los fangos producidos presentan buenas características de sedimentabilidad y humedad. Finalmente, se realiza un diseño preliminar del proceso, proponiendo el uso de PAC (8-10 mg/L de componente activo de Al_2O_3) y PAM (0.5-1 mg/L) para los posteriores ensayos de campo.

Palabras claves: Tratamiento primario avanzado, Coagulación, PAC, PFS, Fango.

1. Introducción

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

La protección del medio ambiente y el desarrollo son dos aspectos importantes en el siglo XXI. En el año 1992, Los líderes de Estado participan la reunión del desarrollo y medio ambiente mundial, aprobando la “Agenda 21” para proponer la estrategia del desarrollo sostenible que permita alcanzar un desarrollo compatible con los intereses la sociedad contemporánea sin comprometer los derechos de las generaciones futuras.

1.1. Consideraciones para el tratamiento de aguas residuales.

Para realizar una adecuada selección de los tratamientos de depuración de los vertidos de aguas residuales, además de los aspectos de protección del medio ambiente y desarrollo, debe considerarse los criterios de desarrollo sostenible de la sociedad [14].

1.1.1. Protección del medio ambiente.

En este sentido la primera consideración, acerca de la protección del medio ambiente, cabe considerar que entre las mayores fuentes de contaminación (agua residual, gas residual y residuos industriales) el agua residual constituye la principal de ellas debido a su gran cantidad y al grave perjuicio que sobre el medio ambiente puede ocasionar. La utilización de agua ha crecido significativamente debido el creciente desarrollo de la economía mundial y el progreso de la industrialización.

A nivel mundial, en el periodo 1900-1980, la utilización de agua en la agricultura ha aumentado 3,4 veces, su utilización en industria se ha incrementado 19,6 veces y el uso del agua en actividades domésticas ha crecido 12,4 veces. De hecho, se estima que en el año 1980 el agua utilizada asciende a $33.200 \times 10^8 \text{m}^3$ de agua anual, mientras que en el año 1999, esta cifra alcanzaría los $70.000 \times 10^8 \text{m}^3$ de agua anual [12]. Cabe considerar que la mayor parte de este volumen de agua (a excepción del agua utilizada en agricultura) se convierte en agua residual, que provocaría una contaminación del medio ambiente.

En China, la utilización total de agua es de $5.435 \times 10^8 \text{m}^3$ anual. Este volumen incluye usos rurales (74,6%), incluyendo agricultura, ganadería, usos forestales y de los habitantes locales, agua para uso industrial (20,7%) y el agua utilizada en los municipios (4,7%) [12]. Respecto a la emisión total del agua residual se estima un volumen de $593 \times 10^8 \text{m}^3$ que es 1,7 veces que la en el año 1993. En concreto, el agua residual industrial supone un 69% (36,4% del agua utilizada a nivel industrial), y el vertido doméstico constituye un 31% (72% del agua utilizada para usos domésticos). En la actualidad, se ha intensificado la exigencia de tratamiento de los vertidos industriales, alcanzándose una tasa superior al 90% [12]. No obstante, la mayor parte de estos tratamientos no alcanzan los criterios de calidad exigibles. Por su parte, la tasa de tratamiento de los vertidos urbanos es del 40% aproximadamente, debido, entre otros motivos, a la escasez de financiación. Si se tiene en cuenta que, en muchos casos, existe un anormal funcionamiento del tratamiento biológico, la tasa que realmente alcanza el objetivo de emisión se situaría en un 10% aproximadamente [12].

En consecuencia, un gran volumen de vertido no tratado o que no cumple el objetivo de emisión es descargado a los ríos y lagos provocando un agravamiento de la calidad de las aguas. Puede decirse, sin exagerar, que la contaminación y la insuficiente calidad del agua, ha provoca una escasez de los recursos hídricos

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

disponibles en China situando la tasa de agua disponible por habitante inferior a la cuarta parte de la media mundial [11].

1.1.2. Depuración y desarrollo sostenible.

El desarrollo de la sociedad no puede salir el agua. Por ello, para garantizar el desarrollo sostenible, el mantenimiento del ciclo hídrico juega un papel muy importante. En la naturaleza, el ciclo del agua tiene su propia ley interna de regulación. No obstante, aunque no podamos cambiar su dinámica, la alteración de que provoquemos en la calidad del agua contribuye a romper su equilibrio y seguramente sufriremos las consecuencias. En China, los problemas de inundaciones, escasez de agua y contaminación del agua no sólo condicionan el desarrollo económico, sino que deben ser considerados como un factor clave para lograr un desarrollo sostenible. Para resolver el problema del agua, hay tres factores que deben participar: conseguir ahorrar y reducir de la cantidad de agua utilizada, disminuir y prevenir la contaminación del agua, tratar los vertidos de aguas residuales y gestionar adecuadamente el recurso hídrico con políticas razonables por parte de la administración.

Por tanto, el incremento en los tratamientos de vertidos y la reducción del número total de emisiones son aspectos importantes para posibilitar el desarrollo de las civilizaciones. En este sentido, la preocupación del hombre por la preservación del agua ha evolucionado desde principios del siglo XIX, cuando se inicia el tratamiento de los vertidos, hasta la actualidad en la que la mayoría de países persiguen un, al menos, un tratamiento tras la contaminación y una posterior recuperación.

En la actualidad, en Estados Unidos existen unas 20.000 estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), unas 3.000 en Inglaterra y alrededor de 1.500 en Suecia. En algunos países pequeños con problemas de abastecimiento, como Israel, la tasa del tratamiento de los vertido casi alcanza un 100% [13], y las EDAR juegan una función muy importante en su desarrollo. En Estados Unidos son miles los ríos ya mejorados en su calidad del agua y en Japón la zona hídrica que no cumple el criterio ambiental se reduce a un nivel inferior al 0,1%, en Europa también se ha conseguido recuperar muchos ríos y logrado reaparecer organismos hídricos extinguidos hace 100 años.

Sin embargo en China, en contraste con los datos positivos y pese a que cada vez es mayor la inversión por año destinada al tratamiento de vertidos, el problema de contaminación sigue siendo importante ya que esta inversión sigue siendo insuficiente para abordar completamente el problema [11]. En el año 1999 la inversión total de la protección del medio ambiente es 82,32 billones yuan (10,29 billones euros aproxima), alrededor del 1% de PIB. De esta inversión, un 41% se ha destinado a la protección del recurso hídrico (0,4% de PIB) [11], aunque todavía bastante inferior a la destinada por la mayoría de los países desarrollados.

No obstante, la situación es cada vez mejor debido al incremento de la inversión, a la conciencia ciudadana, a la atención del gobierno en la elaboración de regulaciones más exigentes y al alto nivel de las tecnologías, por lo que se prevé que en el futuro próximo la situación ambiental pueda mejorar significativamente.

En actualidad, debido a que los recursos financieros son insuficientes y la existencia de limitaciones para vencer el desarrollo económico marcado por la oferta y la demanda, es muy importante seleccionar las técnicas de tratamiento que consigan un beneficio ambiental máximo con una inversión mínima.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

La ingeniería aporta múltiples técnicas de tratamientos de los vertidos, siendo el más el tratamiento biológico el más extendido por obtener buenos resultados de calidad. No obstante, su limitación para eliminar nitrógeno y fósforo junto con un coste de inversión de construcción y un coste de funcionamiento que, en ocasiones, puede no ser asumible, promueve la innovación en las tecnologías de tratamiento.

En China, actualmente, es imposible que la inversión en el tratamiento del agua sea igual a la de los países desarrollados. Por ello, ante la escasez de recursos económicos destinados, resulta muy importante desarrollar e investigar aquellas tecnologías que presenten un bajo coste. En este sentido, métodos como el tratamiento primario avanzado químicamente (CEPT, por sus siglas en inglés, "*Chemical Enhanced Primary Treatment*") resultan de especial interés para el tratamiento de residuos, especialmente de aquellos de pequeño caudal. De hecho, los datos reales apuntan que los CEPT desarrollados en las condiciones locales, no sólo obtienen resultados próximos a los de los tratamientos biológicos, sino también que presentan importantes ventajas en el ahorro de la energía, por lo que constituyen uno de los principales focos en la investigación y desarrollo de tratamiento de aguas residuales en la actualidad.

1.2. Evolución histórica de las tecnologías de tratamiento.

El tratamiento de los vertidos se ha usado desde hace siglos, si se considera la utilización de agua residual para la irrigación de tierras de cultivo en la antigua Grecia [9].

En el año 1954, en Holanda construye la primera planta (canal) basada en un proceso de oxidación biológica (fango activo) en el mundo, esta nueva técnica se extendió rápidamente en Europa, Norte-América y Australia. En China se usa esta tecnología desde hace ya casi 30 años [15].

En los años 70, científicos alemanes desarrollan la técnica combinada de adsorción y floculación-oxidación biológica (método AB) que presenta los dos tanques de aireación A y B. En el tanque A, el proceso presenta un corto tiempo de retención y una elevada carga orgánica, eliminando la materia orgánica por adsorción y floculación; por su parte, el tanque B elimina la materia orgánica residual de modo similar al proceso convencional de fangos activos. Por su operación complicada, en China hay una poca aplicación de esta tecnología. En este período se inicia también el desarrollo de tecnologías de tratamiento de tipo anaerobio a efectos de reducir los costes del proceso [1].

En los años 80, debido a un empeoramiento de la contaminación ambiental y a la presencia de importantes problemas de eutrofización de sistemas naturales, se desarrollan tratamientos capaces de eliminar nitrógeno y fósforo de las aguas residuales. En este sentido, aparecen tratamientos como los procesos A/O y A₂/O que combinan la utilización de etapas de naturaleza anaerobia y anóxica, además de la tradicional etapa aerobia, para posibilitar la eliminación de nitrógeno [1].

1.3. Estado actual del tratamiento del agua residual.

Con el desarrollo de la industrialización del mundo, la demanda de la protección medioambiental debe ser cada vez más importante. Por otro lado, la ciencia y tecnología mejora continuamente ofreciendo una oportunidad para el progreso de la ciencia de protección del medio ambiente. Como una parte importante de la protección del medio ambiente, el tratamiento del agua residual presenta un

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

progreso continuo y un constante desarrollo de tecnologías. Así, en las últimas décadas se han desarrollado múltiples variantes del tradicional proceso de fango activo, se ha avanzado en el tratamiento de vertidos industriales alcanzando una mejor calidad de éstos. En la actualidad, por el cambio de condiciones, pueden utilizarse tecnologías que hasta la fecha se descartaban por considerarse económicamente desfavorables.

Recientemente, en China el tratamiento de los vertidos ha presentado grandes avances relacionados con innovaciones biotecnológicas, tratamiento de compuestos difícilmente biodegradables, desarrollo de reactivos e instalaciones, mejora de la calidad del efluente y desarrollo de tecnologías simplificadas que permiten una fácil implantación.

1.3.1. Incorporación de innovaciones biotecnológicas.

Partiendo del tratamiento de fangos activos, los técnicos están intentando encontrar sistemas de tratamiento que ofrezcan ventajas, entre otras, en la estabilidad del proceso, en la reducción del consumo de energía y la simplicidad de operación del proceso. En este sentido, las principales innovaciones o tecnologías desarrolladas son:

- Procesos de oxidación total o baja carga. En estos procesos se elimina el decantador primario, y presentan como ventaja trabajar con una alta edad del lodo, provocando así una baja producción de fango. Los tipos más usuales incluyen canales de oxidación como el proceso Carrousel y el Orbal, o proceso de oxidación integrada [15], como el utilizado en la EDAR de Zhongyuan.

- Procesos de tratamiento por lotes. Se trata de procesos de oxidación biológica en discontinuo que permiten realizar múltiples etapas en un único tanque (los procesos de la entrada del vertido, la aireación, la sedimentación y la salida realizados en un tanque). Tiene las ventajas de una baja ocupación del suelo y de tratarse de un proceso simplificado. De estos, el proceso más utilizado es SBR (Sequential Batch Reactor) [15].

- El proceso de UNITANK [15], aúna las ventajas de los procesos de aireación en tanque agitado y de los canales de oxidación.

- Procesos para la eliminación de nutrientes. Entre otros, destacan el método A/O, A2/O utilizados para la eliminación de nitrógeno y fósforo. Estos procesos utilizan etapas anaeróbicas y anóxicas, para transformar el nitrógeno amoniacal (N-NH_3) a nitrógeno molecular (N_2) y para liberar el fósforo que es absorbido por el fango activo, eliminándose a través del fango residual [15].

- Procesos de membrana biológica. Este proceso está aplicándose principalmente en otros países y utilizándose en aplicaciones para el tratamiento de vertidos a nivel de pequeñas industrias. En China, en la actualidad se están acumulando las experiencias para poder ser aplicado posteriormente [15].

- Procesos anaeróbicos. Entre estos, el lecho de flujo ascendente de fango anaeróbico (UASB, por sus siglas en inglés), y otros, se utilizan para el tratamiento de vertidos industriales y vertidos urbanos de pequeño caudal. Las principales ventajas son el bajo consumo de energía, la baja producción del fango, la

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

producción biológica de energía a través de la producción de metano. En China, el volumen de un tanque anaeróbico máximo llega a 500 m³ [15].

Los nuevos tratamientos no sólo aumentan la eficiencia, sino también garantizan el funcionamiento y aumentan la calidad del efluente. Por ejemplo, en el proceso de fangos activos tradicional, si no se controla bien, puede presentar problemas de expansión del lodo. Los procesos como canales de oxidación integrados y otras nuevas tecnologías este problema casi no existe. Actualmente, el efluente de algunos nuevos procesos de EDAR es utilizado directamente para regar zonas verdes, lavar el coche y como refrigeración industrial.

1.3.2. Eliminación de compuestos difícilmente biodegradables.

Los vertidos que contienen compuestos contaminantes orgánicos de gran molécula y aromáticos presentan se consideran difícilmente biodegradables. Estos tipos de contaminantes son compuestos difíciles de degradar por los microorganismos comunes, o provocan daños al organismo como, por ejemplo, el vertido de coque, procedente de plantas petroquímicas o los pesticidas. Para tratar este tipo de vertidos, se utiliza carbón activo y otros adsorbentes para eliminarlos, pero tienen un alto coste y pueden causar una contaminación secundaria. En los últimos 20 años, la investigación acerca de la estructura de estas moléculas, y sus toxicidades, permite transformar sus estructuras materiales para aumentar así la biodegradabilidad. De este modo, puede utilizarse un proceso aerobio para biodegradarlos y un proceso físico-químico para su lograr su separación, como la sedimentación y la flotación, etc [15].

1.3.3. Requerimientos en equipamientos y reactivos.

Los nuevos procesos necesitan nuevos equipamientos y una nueva serie de reactivos químicos para aumentar la eficiencia y el efecto de la eliminación de los contaminantes.

Por una parte, la automatización se muestra imprescindible en algunos procesos, como el canal de oxidación integrado, que necesitan un sistema de control para realizar la vigilancia y el tratamiento automático. Esto implica una alta demanda de los medidores automáticos. Los nuevos objetivos de emisión, limitan los valores de nitrógeno y fósforo por hora, por tanto, si los fangos residuales no pueden adsorber fósforo rápidamente, se provoca su re-liberación, retornando con e el sobrenadante del fango. Actualmente, existe un equipo nacional para la concentración del fango y filtro de prensa con un precio equivalente a la cuarta parte del mismo equipo de extranjero. Otro ejemplo es el coste de aireación de los tratamientos aerobios, que constituye una alta proporción del consumo de la energía, sobre un 60% [10]. La investigación de nuevo equipos de aireación tiene una gran importancia. Por ejemplo, el aireador micrópilo aumenta a más del doble la eficiencia que el aireador espiral [10].

Por otro lado, tratamientos como el tratamiento primario mejorado químicamente, si no se dispone de reactivos de alto rendimiento, no es ventajosa su utilización, como sustitutivo del proceso secundario, más complicado. Para la deshidratación del fango, se trata un fango, con un 99% del agua, que se concentra por gravedad y se prensa mecánicamente [10]. El funcionamiento del equipo los equipos de deshidratación del fango también necesitan un alto rendimiento del coagulante orgánico.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

En consecuencia, si no existe una oferta de nuevos equipos y reactivos, es difícil realizar una innovación en los procesos de tratamiento.

1.3.4. Desarrollo de procesos simplificados.

Para atender a la situación real de las zonas pobres o en desarrollo es importante el desarrollo de técnicas de baja inversión, fácil manejo y bajo consumo energético. Una alternativa es la constituida por la mejora química del tratamiento primario (CEPT). Aunque la aplicación del tratamiento primario mejorado no es nueva, en los últimos años se está investigando para poder constituir un proceso completo e independiente con un rendimiento equivalente a la obtenida por tratamientos biológicos.

1.4. Tratamiento primario avanzado.

El proceso CEPT ya se utiliza desde los años 70, pero debido a su alta dosificación, al elevado coste de funcionamiento y la alta producción de fango residual, se utilización ha decrecido significativamente [1]. No obstante, en los años 90, con la aparición de coagulantes mucho más eficaces, se reducen los problemas anteriores. Su rápido desarrollo, y su aplicación en los países en desarrollo, prevén buenas perspectivas para resolver los problemas hídricos en el Siglo XXI [16].

El proceso CEPT es muy simple y tiene la ventaja de su fácil manejo, su bajo nivel de inversión y su bajo consumo de energía dado que no precisa la aireación. Por tanto, bien para la eliminación de contaminantes procedentes de la química moderna, o bien como alternativa u oportunidad de mejora de los tratamientos biológicos, su investigación y desarrollo se convierte en punto crucial en actualidad.

1.4.1. Tratamiento primario.

El proceso primario como un pre-tratamiento del proceso secundario es un método físico natural para eliminar los contaminantes suspendidos por sedimentación. Incluye un pre-tratamiento que contiene enrejados, desarenador y el propio decantador primario. En general, la eliminación de sólidos en suspensión (SS) se sitúa en el rango 30-60%, la de demanda biológica de oxígeno (DBO_5) sobre un 15-30% y la de demanda química de oxígeno (DQO) sobre un 30-50%, por lo que no alcanza los objetivos de emisión, y no puede utilizarse como único método de tratamiento, sino como pretratamiento acoplado a un proceso biológico [5]. Por tanto, por sí mismo no es capaz de solucionar el agravamiento de la calidad del agua como resultado del vertido de aguas residuales contaminadas.

1.4.2. Tratamiento primario mejorado químicamente (CEPT).

A partir del proceso normal de tratamiento primario, el CEPT consiste en una tecnología de refuerzo físico, químico o biológico, para incrementar la eliminación de los contaminantes. Debido al sustancial incremento en la eliminación de contaminantes, los índices de vertido pueden llegar a acercarse a los objetivos de emisión, por lo que puede ser utilizado como único proceso. Por otro lado, como se ha indicado anteriormente presenta las ventajas de ser un proceso simplificado, de baja inversión para su construcción y de fácil funcionamiento.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan



Figura 1.1: Tratamiento primario tradicional

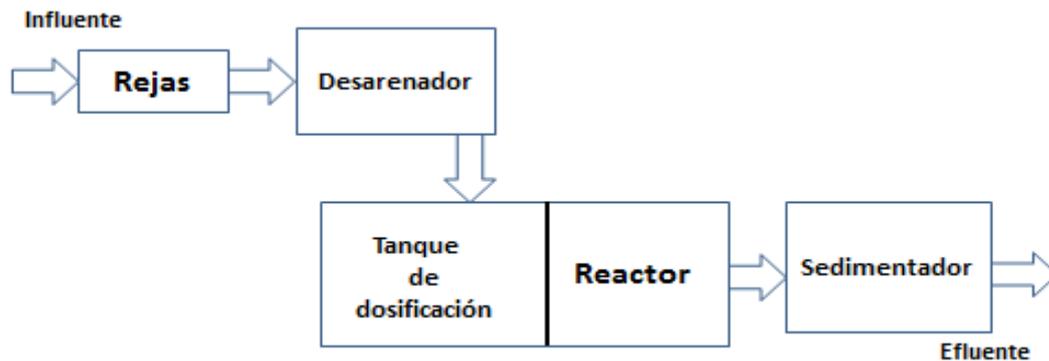


Figura 1.2: Proceso CEPT

1.4.3. Aplicaciones del proceso CEPT.

Por sus propias características, el proceso CEPT es aplicado en los siguientes casos [10]:

- El pre-tratamiento en aguas residuales de ciudades litorales antes de su descarga al mar. Por el agravamiento de la contaminación ambiental en el actualidad, los criterios para controlar la calidad del vertido que se descarga al mar son más exigentes. El tratamiento primario simplificado no puede satisfacer estos requisitos de descarga. Además, en la actualidad, debido a los graves problemas de eutrofización en zonas de desembocadura, existen criterios más estrictos para la eliminación de fósforo, demandando concentraciones inferiores a 1 mg/L que el tratamiento primario común no es capaz de alcanzar.

- Para el tratamiento de aguas residuales con baja concentración. En diversas situaciones los vertidos están diluidos o presentan una baja concentración por lo que su tratamiento es menos exigente. Esta situación sucede en determinados vertidos urbanos, donde la proporción de agua residual industrial es pequeña o el propio tratamiento interior de la industria hace que la calidad sea asimilable a de aguas residuales domésticas. También algunas ciudades o zonas integran las redes pluviales y de saneamiento por lo que la concentración del vertido es baja.

Por otra parte, en ocasiones el valor teórico de vertido considerado en el diseño de sistema de tratamiento es superior al valor real. Esto provoca procesos con altas inversiones pero con bajas eficacias de funcionamiento. En este tipo de situaciones, y por su economía, es viable que algunas zonas apliquen el tratamiento primario mejorado como alternativa.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

1.4.4. Mejora química del tratamiento primario.

El método químico [7] puede eliminar gran parte de compuestos orgánicos e inorgánicos particulados, algunos orgánicos disueltos y sustancias inorgánicas disueltas como fósforo. Ello se consigue mediante la adición de reactivos químicos que interaccionan con los contaminantes, provocando partículas más grandes que son más fáciles de eliminar del agua. En general, incluye una serie de procesos como la neutralización, la precipitación química, la oxidación y reducción, la floculación-coagulación entre otros.

Las operaciones de coagulación y floculación son que desestabilizan los coloides que son un parte de sólidos en el agua residual y consiguen su sedimentación. Los términos Coagulación y Floculación se utilizan ambos indistintamente en relación con la formación de agregados. Sin embargo, existen diferencias entre ambas, ya que la coagulación consiste en la desestabilización de un coloide producida por la eliminación de la doble capa eléctrica que rodea a todas las partículas coloidales, dando lugar a la formación de núcleos microscópicos. Por su parte, la floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas primero en microfloculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados floculos.

En el tratamiento de aguas residuales municipales, el principal método es la coagulación-floculación que incluye una serie de procesos de interacción, cohesión y floculación. El mecanismo del proceso de coagulación-floculación incluye la inestabilidad coloidal por la neutralización de cargas, la cohesión de las partículas por sus choques, el incremento del tamaño de los floculos por adsorción continua y por barrido. Estos mecanismos suceden conjuntamente en el agua, pero para distintos tipos de vertidos, distintos coagulantes y distintos fines de eliminación, la proporción entre ellas es diferente. Por ejemplo, en condiciones de pH ácido, alta concentración de impurezas y baja dosificación, el principal mecanismo es la inestabilidad y cohesión, mientras que pH neutro con una dosificación favorable, el principal mecanismo es la floculación. En resumen, debido a que son múltiples los factores que influyen en el proceso de coagulación, debe ser analizado y estudiado para la operación real bajo distintos ambientes [7].

Comparado con el tratamiento biológico, el proceso CEPT presenta una eliminación similar de SS, muy parecida de DQO y una eliminación de DBO_5 inferior. La eliminación de P es superior al tratamiento biológico convencional, alcanzando eliminaciones superiores al 90% [7], lo que juega un papel importante para combatir la eutrofización. Además, el fósforo de los sedimentos formados por la reacción de precipitación química (AlPO_4 o FePO_4) es estable y no se libera en el fango.

1.4.5. Coagulantes.

Evidentemente, la aptitud del coagulante juega un papel muy importante la eficiencia del proceso CEPT. Tradicionalmente, los principales motivos para no utilizar esta técnica están asociados a la preocupación por la alta producción de fango residual y el alto coste de su tratamiento. Sin embargo, ello es la consecuencia del uso de coagulantes de baja aptitud y alta dosificación. Actualmente, debido al desarrollo de la industria moderna, existe una gran disponibilidad de coagulantes de distintos tipos, precio y aptitud.

Los coagulantes más comunes son sales de aluminio y de hierro, con purezas que pueden llegar a superar el 95% y que gracias a su base de polímero puede

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

diseñarse como queramos. Gracias a la profunda investigación en la floculación, se ha conseguido que coagulantes complejos como polímero de silicato férrico (PFSiC), polímero de silicato de aluminio (PASiC) y otros incrementen notablemente el efecto de la floculación y la estabilidad. Coagulantes orgánicos como poliacrilamida presentan una eficiencia muy elevada, logrando un buen efecto de coagulación con dosificaciones bajas (0,5 mg/L) [7]. Por último, existen coagulante producidos biológicamente por microorganismos. Se trata de sustancias naturales que contienen moléculas de gran tamaño natural compuestos por varios polisacáridos, proteínas y péptidos producidos por el metabolismo de los microorganismos. Aunque el coagulante biológico tiene bastantes ventajas como, entre otras, el efecto de la coagulación, su baja dosificación requerida, su amplia aplicación, ninguna contaminación secundaria, la fácil separación de flóculos, su coste de producción es muy alto, no alcanzándose actualmente el nivel de producción industrial. Sin embargo, creemos en el futuro poder resolver el problema.

1.5. Tendencias futuras en el desarrollo de tratamientos.

Partiendo del desarrollo de los tratamientos de aguas residuales introducidos en los últimos años, y considerando la necesidad real del tratamiento del agua residual en el mundo, podemos concluir que todavía se necesita desarrollar algunos aspectos importantes en los próximos años. Las principales líneas de investigación deberían ir encaminadas a la mejora del proceso de fangos activos, a la búsqueda de tecnologías alternativas y a la reutilización de las aguas tratadas.

1.5.1. Mejoramiento del método del fango activo tradicional.

Para mejorar el tratamiento biológico tradicional, deben considerarse los aspectos siguientes:

- Simplificar el proceso, reducir la ocupación del suelo y acortar la inversión de la construcción.
- Aumentar la eficiencia de la aireación, ahorrar en el consumo de energía y reducir el coste de funcionamiento.
- Aumentar la capacidad de eliminación de nutrientes (N y P).
- Perseguir los objetivos de operación fácil y funcionamiento estable.
- Reducir la producción del fango, simplificar el tratamiento del fango y evitar la contaminación secundaria.

En la actualidad, la implementación de estos aspectos en la EDAR permite obtener claras mejoras, por lo que estas deben seguir constituyendo tendencias de desarrollo en el futuro.

1.5.2. Desarrollo de tecnologías alternativas a los fangos activos.

Aunque el proceso de fango activo puede eliminar materia orgánica y tiene unos efectos para eliminar N y P, incluso metales pesados por su gran adsorción, requiere gran cantidad oxígeno. Según los datos relevantes, el consumo de la energía del proceso de fango activo común es 0,25-0,45 kWh/m³, donde el consumo de aireación ocupa el 50-70% [15]. Aproximadamente, una EDAR que trate 10.000

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

m³/d consumiría 3500 kWh, de los que un 50% es desaprovechado, esto desperdicio no se corresponde con la estrategia nacional [15].

En relación a ahorrar la energía, los principales procesos alternativos existentes son el método anaeróbico y el tratamiento en suelo. El proceso anaerobio no necesita aireación, y del metano producido puede recuperarse parte de la energía; otro método es filtro verde natural, que utiliza los recursos biológicos en el sistema del suelo para depurar. Por ejemplo, en Estados Unidos, que dispone del sistema del tratamiento de suelo más grande del mundo, la cantidad del agua tratada por el tratamiento con suelo es similar a la del tratamiento de fango activo [15]. En China, por las limitaciones del recurso terrestre, su aplicación es limitada, pero en zonas donde sea favorable, debe promoverse esta “tecnología verde” para depurar los vertidos y ahorrar así en recursos energéticos y reducir el coste de tratamiento [15].

1.5.3. Investigación de la tecnología de reutilización.

Por la escasez del recurso hídrico, la reutilización directa del efluente de EDAR supone una meta para los técnicos ambientales, correspondiendo con el desarrollo sostenible. Por eso, la investigación de un proceso que permita la reutilización del efluente es la tendencia del futuro. También debe convertirse en una perspectiva desarrollar distintos criterios para favorecer la reutilización en distintas aplicaciones. Por ejemplo, cómo controlar los parámetros o que mejoras introducir para que el efluente del tratamiento por suelo alcance directamente los estándares requeridos para su uso en agua de riego de verduras, de césped y otras [16].

2. Descripción de la Estación de Depuración del Agua Residual de Zhongyuan

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

La EDAR (Figura 2.1) está situada en la ciudad Puyang en la provincia Henan de China, junto a la confluencia de los ríos Majia y Qibaili. La EDAR se empezó a construir en el año 1986 la primera fase (instalaciones originales), y en el año 1989 empezó a funcionar con capacidad para tratar 20.000 m³/d de agua residual doméstica. Posteriormente, en el año 2001 comenzó la construcción de una segunda fase, de ampliación y mejora de la EDAR, que en el año 2003 empezó a funcionar. Entonces se puede tratar una capacidad de tratamiento de hasta 70.000 m³/d en EDAR (50.000 m³ en las nuevas instalaciones y 20.000 m³ en las viejas instalaciones). En la actualidad, la planta está diseñada para con capacidad de tratamiento capaz de procesar las aguas residuales de 130.000 habitantes en un área 35 Km².

Sin embargo, los nuevos requisitos de vertido exigidos por el ayuntamiento hacen que la EDAR sea incapaz de cumplir con el objetivo de emisión. Especialmente, debido al menor rendimiento del proceso original. Por ello, se ha forzado el cierre del proceso original hasta lograr una mejora de su rendimiento.



Figura 2.1. EDAR de satélite en la Zona Zhongyuan.

2.1. Características del agua residual de entrada.

Comparando con las aguas residuales de otras ciudades, el agua residual de la ciudad de Zhongyuan presenta el mismo tipo de los contaminantes, aunque también posee características propias.

2.1.1. Caudal de agua residual entrante.

Debido al alto beneficio económico del campo petrolífero, existe una indiferencia en la población de Zhongyuan hacia el ahorro de agua, generando así una baja concentración de los contaminantes de esta zona debido a su alta dilución. Si bien, ello puede resultar ventajoso para su tratamiento, supone en contrapartida, la producción de un elevado caudal de vertido (véase Tabla 2.1). En consecuencia, si bien el proceso primario mejorado es difícil que pueda ser capaz de tratar toda el agua entrante, al menos sí puede permitir tratar una parte del mismo y reducir así la

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

alta carga que actualmente debe soportar las nuevas instalaciones (canal de oxidación). De este modo, se puede contribuir a una mejora en el funcionamiento global de la EDAR.

Tabla 2.1: Cantidad de agua residual doméstica en la Zona Zhongyuan[8].

| Zona | Población (habitantes) | Agua suministrada (m ³ /d) | Dotación per cápita (L/d.hab) | Vertido (m ³ /d) |
|-----------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Zhongyuan | 110.000 | 65.000 | 590 | 60.000 |

2.1.2. Calidad del agua residual entrante.

La presencia de vertidos industriales es pequeña y el agua residual doméstica supone más del 95%. Por otra parte, se trata de un vertido con una baja concentración de contaminantes motivado por el elevado consumo de agua existente en la zona. Este aspecto, permite una oportunidad para la aplicación del proceso primario mejorado químicamente.

Tabla 2.2: Estadístico de los contaminantes en el influente.

| Parámetros Contaminante | Influente | |
|----------------------------|------------------|--------------|
| | Intervalo (mg/L) | Media (mg/L) |
| DQO | 118-948 | 252,6 |
| DBO ₅ | 32,1-92,8 | 47,7 |
| Petróleo | 2,6-90,6 | 16,7 |
| SS | 115-190 | 162 |
| NH ₃ -N | 24,7-44,6 | 30,4 |

En la Tabla 2.2, podemos ver la calidad del agua residual en la Zona Zhongyuan. Puede observarse que existe un gran rango de variación en los valores de cada uno de los contaminantes. Las causas posibles son:

- Aunque la norma prescribe que el sistema de drenaje tiene que separar el agua de lluvia y el agua residual, la construcción real no llega a la expectativa anterior debido a una mala planificación y a la escasez de capital. Esto provoca que exista una descarga de aguas pluviales en el sistema del agua residual, con la consecuente variación de la cantidad y la calidad del agua residual, según se trate de época de temporal o época seca [2].

- La explotación y otras actividades, causa una contaminación del agua subterránea. En ocasiones este agua puede penetra en el vertido e incrementar el nivel de los contaminantes.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

- La insuficiente vigilancia, por varios motivos, permite que agua residual industrial insuficientemente tratada sea descargada en el sistema de alcantarillado, provocando un aumento de la concentración de los contaminantes.
- Una escasa conciencia ciudadana, provoca una contaminación directa al agua. Los posibles problemas anteriores pueden dificultar la aplicación del CEPT, por lo que debería reforzarse la vigilancia y mejorar el sistema alcantarillado. Más importante aún, debe ser el promover el “ahorro del agua” en la zona Zhonyuan, evitando así que como resultado del alto beneficio económico del campo petrolero se traduzca en un desperdicio del agua.

2.2. Proceso de Tratamiento de la EDAR de Zhongyuan.

La EDAR de Zhongyuan dispone de dos líneas de tratamiento según se muestra en la Figura 2.2 (proceso nuevo y viejo, según su fecha de instalación). Ambas líneas comparten el sistema de tratamiento de fango. Aunque ambos procesos utilizan la técnica de tratamiento biológico, el proceso utilizado es diferente y la calidad del efluente es distinta.

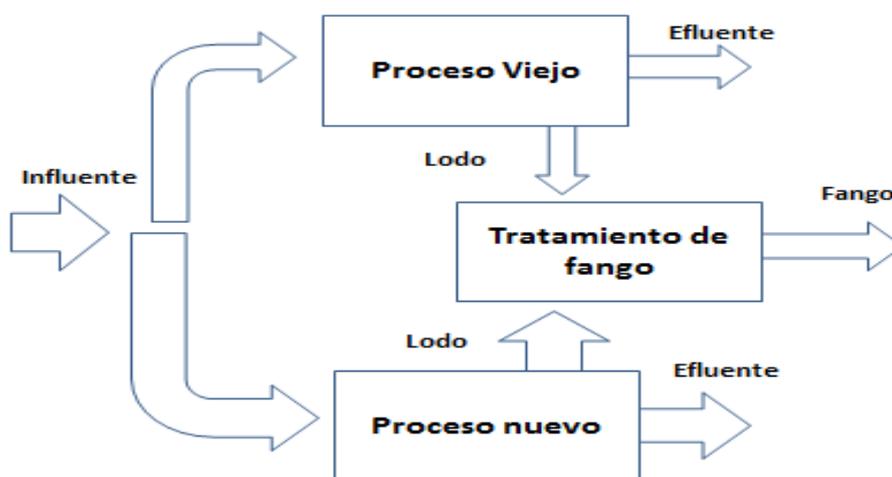


Figura 2.2: Proceso completo de EDAR de Zhongyuan.

2.2.1. Línea original de tratamiento.

El proceso de tratamiento original de la EDAR se muestra esquematizado en la Figura 2.3. En primer lugar, presenta una reja simple, consistente en una malla de hierro, que no presenta limpieza automática por lo que precisa operarios para la limpieza, cuando el influente contiene gran concentración de materia en suspensión. Posteriormente, el agua es tratada en un desarenador aireado, que gracias a la aireación permite eliminar grasas y limpiar suficientemente las arenas producidas. A continuación, el agua pasa a un decantador primario en el que es sometida a una sedimentación inicial que reduce el contenido de sólidos en suspensión, aligerando la carga del tratamiento biológico. El agua procedente del tratamiento primario es tratada a continuación en un tanque de aireación que constituye la etapa más importante en el proceso. En esta etapa se retiene el agua permitiendo su contacto entre con el fango activo y el oxígeno necesario para su degradación por parte de los microorganismos presentes en el tanque. El tanque está construido de hormigón y su forma es rectangular. La aireación tiene lugar a través de la inyección de aire

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

mediante difusores de burbuja que mejoran la transferencia aire-líquido y transfieren el oxígeno necesario en el proceso. El proceso se completa con una decantación secundaria que cuya función es la separación del fango del agua tratada. Esta etapa produce un fango concentrado, que parcialmente es recirculado al tanque de oxidación. Por último, el agua es tratada en un tanque de desinfección con el hipoclorito de sodio.

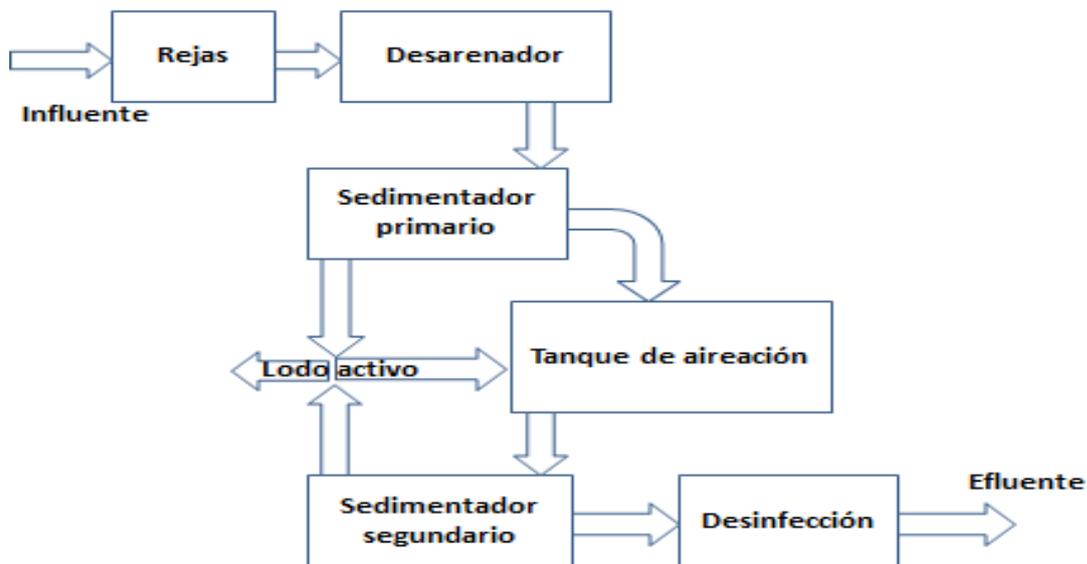


Figura 2.3: Esquema del proceso de tratamiento del agua de la línea original.

En la Tabla 2.3 se muestra la calidad producida por esta línea de tratamiento y los porcentajes de eliminación de los principales contaminantes presentes en el agua residual influente al proceso. Puede observarse que el proceso no presenta un elevado rendimiento en DBO₅, DQO y Petróleo (entre el 50 y 60 %). Además el proceso no permite eliminar nitrógeno, a excepción del utilizado por los microorganismos en su crecimiento y la concentración de nitrógeno (35.6 mg/L) y materia en suspensión (72 mg/L) en el efluente son elevadas.

Tabla 2.3: Estadístico de los contaminantes tratados en la línea original (proceso viejo).

| Parámetros Contaminante | Efluente | | Eliminación (%) | Objetivo de emisión (mg/L) |
|----------------------------|------------------|--------------|-----------------|----------------------------|
| | Intervalo (mg/L) | Media (mg/L) | | |
| DQO | 80-236 | 97 | 61,6 | 90 |
| DBO ₅ | 19,5-42,1 | 25 | 47,6 | 20 |
| Petróleo | 2-43,2 | 7 | 58,1 | 5 |
| SS | 21-112 | 72 | 55,6 | 30 |
| NH ₃ -N | 23,5-41,8 | 35,6 | 3,6 | 15 |

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

2.2.2. Línea nueva de tratamiento.

La primera mejora realizada en la EDAR ha consistido en añadir una nueva línea de proceso. Esta nueva línea de tratamiento está basada en un canal de oxidación que integra zonas aerobias, anóxicas y anaerobias según el proceso A2/O (Figura 2.5). Este proceso presenta un mayor rendimiento que el esquema convencional de fangos activados (línea original).

El fundamento del esquema A2/O, en el que está basado el canal que integra las diferentes etapas del tratamiento, consiste en la combinación de etapas de tratamiento aerobio y no-aerobio (anóxico o anaerobio). El sistema aúna las etapas de depuración en un único tanque y la separación de líquido y sólido, formando un dispositivo de reacción, sedimentación, separación y recirculación del fango, lo que permite aprovechar completamente las instalaciones y el espacio. Otra ventaja es su sistema de vigilancia automática (mostrado en la Figura 2.4) que permite vigilar, controlar y manejar el proceso entero, de modo automático, disponiendo de una alarma de protección automática.



Figura 2.4: Sistema de vigilancia de zanja de oxidación integrada.

En la Figura 2.5 se esquematiza el proceso de tratamiento de la nueva línea. En el proceso, en primer lugar, el agua atraviesa una reja de limpieza automática que no precisa limpieza manual. Posteriormente, el tanque de homogeneización permite abastecer un agua de caudal y calidad más uniforme al resto de la planta. Al agua procedente del homogeneizador se eliminan los sólidos de mayor tamaño restantes mediante un enrejado fino, que además actúa como sistema de protección del resto de equipos. A continuación, un desarenador rotacional con control PCL, separa y limpia las arenas. El control de PCL consigue una mejor calidad de la arena separada, en comparación al desarenador aireado de la otra línea, debido a su bajo contenido en agua y baja concentración de materia orgánica. El núcleo central del proceso está constituido por el tanque A2/O que dispone de zonas anaerobias, anóxicas y aerobias, así como de zona para la separación del fango. La línea contiene dos tanques paralelos idénticos, cada uno de los cuales procesa la mitad del agua recibida.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

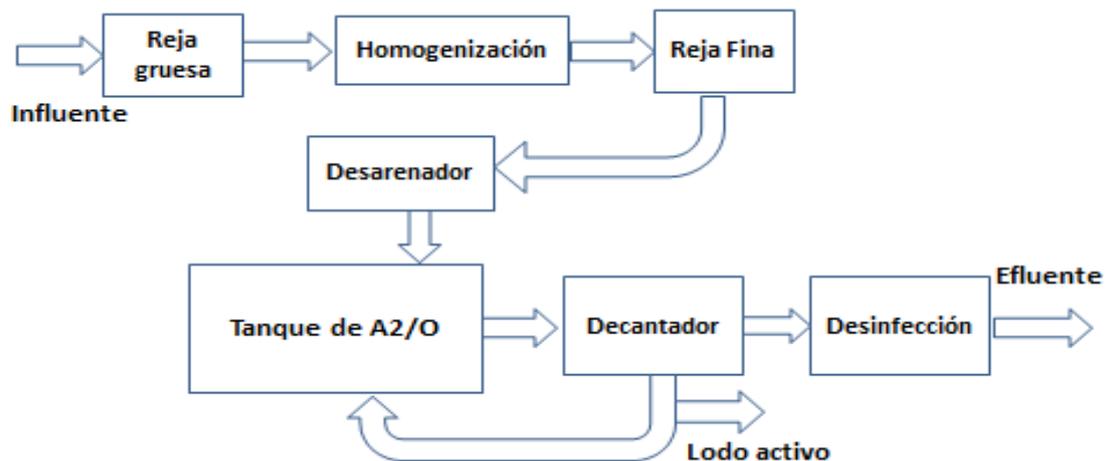


Figura 2.5: Esquema del proceso de tratamiento del agua de la línea nueva.

En la Tabla 2.3 se muestran la eliminación alcanzada por la nueva línea de tratamiento. Puede observarse que el porcentaje de eliminación es superior a los alcanzados por el tratamiento original, para todos los contaminantes presentes. Además, conjuntamente a la eliminación de materia orgánica, el sistema permite eliminar nitrógeno (75%) y fósforo. Durante condiciones normales de funcionamiento, la tasa de la eliminación de DQO es superior al 91%, la de DBO₅ es del 92% aproximadamente. Mientras, la eliminación de nitrógeno puede llegar hasta el 96% aproximadamente.

Tabla 2.4: Estadístico de los contaminantes tratados en la línea nueva.

| Parámetros Contaminante | Efluente | | Eliminación (%) |
|----------------------------|------------------|--------------|-----------------|
| | Intervalo (mg/L) | Media (mg/L) | |
| DQO | 11,2-78,9 | 34,3 | 86,4 |
| DBO ₅ | 2,8-19,0 | 13,3 | 72,1 |
| Petróleo | 0,1-4,7 | 1,8 | 89,2 |
| SS | 22-128 | 57 | 64,8 |
| NH ₃ -N | 0,6-23,8 | 7,6 | 75,0 |

2.2.3. Línea de tratamiento del fango.

El fango producido por ambas líneas de tratamiento es juntado y procesado en un mismo proceso. En la Figura 2.4 se esquematizan las etapas de dicho proceso. Los fangos mezclados se concentran por flotación, produciendo un fango concentrado con un contenido en agua del 94% aproximadamente. Posteriormente, el fango es

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

deshidratado por dos filtros prensas reduciendo su contenido en agua hasta un 70% aproximadamente.



Figura 2.6: Sistema del tratamiento de fango.

3. Objetivos y justificación.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

3.1. Definición del problema.

Según se ha indicado en el capítulo anterior la EDAR de Zhongyuan debe tratar un caudal medio diario de 60.000 m³ de aguas residuales domésticas.

La línea nueva de la EDAR debe afrontar un incremento en su carga de entrada, debido al cierre forzoso de la línea original (proceso viejo) de la planta por su bajo rendimiento y la insuficiente calidad de su efluente, según el nuevo objetivo de emisión establecido en el año 2013.

La capacidad máxima de diseño de la nueva línea es de 50.000 m³/d, inferior al caudal actual que recibe la EDAR, lo que supone un significativo exceso en la carga hidráulica que debe procesar la línea nueva tras el cierre de la línea original. En estas condiciones, el funcionamiento de la EDAR va a verse perjudicado y la calidad del efluente empeorará al tratarse de una línea infradiseñada para procesar todo el caudal de entrada. En consecuencia, la EDAR debe hacer frente a importantes multas debido a la mala calidad del efluente. Además, la operación con un exceso de carga conlleva mayores períodos de mantenimiento, en los que la capacidad de procesado de la línea disminuye a la mitad al tener que vaciar uno de los dos tanques que la componen.

La mejora de la línea de tratamiento original se hace imprescindible para poder abordar las consecuencias del problema: reducir la multa, mejorar la calidad del efluente de la EDAR y responder adecuadamente a la protección de la salud de los habitantes de la Zona Zhongyuan.

3.2. Objetivos.

Para hacer frente al problema existente, se propone el siguiente objetivo principal y específico.

3.2.1. Objetivo principal.

Analizar los problemas de funcionamiento de la EDAR de Zhongyuan (China) y proponer una alternativa que permita mejorar el funcionamiento de la planta y adecuar la calidad del efluente a los requisitos de vertido.

3.2.2. Objetivos secundarios.

- Realizar un análisis del funcionamiento de los procesos de la EDAR de Zhongyuan.
- Revisar las técnicas actuales disponibles que permitan solucionar el problema existente.
- Investigar experimentalmente a escala de laboratorio el proceso del tratamiento primario mejorado químicamente (proceso CEPT).
- Estudiar experimentalmente la eficiencia del proceso en función del tipo y dosis de coagulante utilizado.
- Estudiar experimentalmente la eficiencia de la oxidación química en función de la dosis de oxidante utilizado.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

- Analizar las propiedades y características de los fangos producidos por el proceso.
- Planificar y prediseñar una alternativa preliminar para la mejora de la línea original de la EDAR (proceso viejo).

3.3. Justificación de la técnica seleccionada.

Se estima que una reducción de 10.000 m³/d del caudal que, bajo las nuevas condiciones, deberá tratar la línea nueva (proceso A2/O) sería suficiente para un adecuado funcionamiento de dicha línea. No obstante, este caudal deberá ser procesado en la EDAR mediante un proceso mejorado al de la línea original de la EDAR (proceso antiguo).

La selección de la técnica de tratamiento a utilizar es una decisión compleja y muy importante. En general, debe tenerse en consideración tanto las características concretas (naturaleza, geología, economía y sociedad) de esta ciudad, además de conocer la calidad y composición del agua que necesitamos tratar. Si bien, las características socioeconómicas recomiendan optar la técnica de tratamiento más simple y económico, si fuese necesario no debería descartarse otras técnicas más avanzadas y/o complejas. Debe tenerse en cuenta que la selección satisface no sólo la necesidad actual, sino también a la necesidad de la planificación para el futuro. Además, debe asegurarse que, tras la reconstrucción de la EDAR que sea necesaria, ésta volverá a funcionar adecuadamente y con una alta eficiencia.

Dada las características del agua residual de Zhongyuan que debe procesarse, discutidas en el capítulo anterior, y considerando la disponibilidad de recursos económicos, puede resultar recomendable considerar una opción que suponga una baja inversión y bajo coste de funcionamiento. Ante la escasez de recursos económicos para invertir en la EDAR, consideramos optar por una mejora del proceso viejo en lugar de un nuevo proceso. Además de alcanzar el objetivo de calidad, deberá tratarse de un proceso con un bajo coste de funcionamiento.

El tratamiento primario convencional no parece resultar una alternativa viable, ya que no se muestra capaz de alcanzar la eliminación de contaminantes requerida. No obstante, basándose en dicho proceso, sería posible investigar experimentalmente si una mejora química del mismo es capaz de alcanzar el objetivo de emisión existente al tratar el agua residual de Zhongyuan.

Si bien este tratamiento (CEPT) puede resultar una combinación óptima entre su economía y su capacidad para la protección de medio ambiente. Sin embargo, dado el alto contenido de sólidos en suspensión y la elevada tipología doméstica del agua residual, la cantidad de agua que podría procesarse sería limitada. Aunque aparentemente este tratamiento presente las características locales evidentes, es necesario investigarlo experimentalmente ya que sus resultados dependen del agua a tratar y no puede ser extrapolado directamente de los de otra EDAR.

4. Material y método

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

4.1. Consideraciones previas.

Tras analizar las características de la EDAR de Zhongyuan, discutidas en los capítulos anteriores, se ha optado por seleccionar la mejora química del tratamiento primario debido a su baja inversión requerida y bajo coste de operación.

Dado que cualquier proceso de tratamiento precisa conocer la calidad del influente y tiene un objeto concreto, es necesario considerar las características de las aguas residuales influentes. Estas se caracterizan por su relativa “buena calidad” asociada a niveles de contaminación no excesivamente elevados. En concreto, según los datos de la Estación de Vigilancia Ambiental, la concentración de los contaminantes que contienen las aguas a tratar es relativamente baja y predomina un origen doméstico (95%), frente al industrial, de los contaminantes. Esto permite aplicar tratamientos sencillos, como la coagulación, floculación y oxidación química.

Las aguas residuales presentan un mayor exceso de sólidos en suspensión, en primer lugar, seguido por un exceso de DBO₅ y DQO. Los procesos de coagulación y floculación presentan un mejor efecto para eliminar dicha fracción de sólidos.

Dado que estos parámetros de contaminación están interrelacionados, la eliminación de determinados compuestos contaminantes supone una reducción simultánea de varios de estos parámetros. Así, por ejemplo, la eliminación de compuestos biodegradables volátiles reduce tanto la DBO₅ como la DQO y la eliminación de sólidos, a su vez, implica una reducción de DBO₅ y DQO. Por tanto, el reforzando los procesos de adsorción y barrido es posible eliminar una fracción de moléculas de tamaño medio-grande, generalmente compuestos orgánicos difícilmente biodegradable.

El pH puede condicionar la efectividad de los tratamientos de coagulación. Así, un pH ácido débil, típico de aguas residuales domésticas, presenta condiciones desfavorables para los procesos de coagulación-floculación. El pH de las aguas residuales se sitúa próximo a 7,0, debido a la contribución de los vertidos industriales (ligeramente básicos), por lo que se considera que no es preciso condicionar el pH.

A través de los experimentos de laboratorio, intentamos encontrar, entre otras, la dosis óptima de cada coagulante, las características del fango producido y el efecto de una pre-oxidación.

4.2. Reactivos.

A continuación se describen los criterios considerados en la selección de los coagulantes estudiados en el proceso, así como las características de los mismos.

4.2.1. Selección del coagulante.

Un aspecto clave para la viabilidad el tratamiento primario mejorado químicamente radica en la elección de un coagulante que presente alta eficiencia y buenas propiedades para la separación posterior.

Actualmente, los coagulantes utilizados se clasifican en orgánicos, inorgánicos y biológicos (procedentes de microorganismos). Algunos estudios de investigación muestran que los coagulantes procedentes de microorganismos, macromoléculas producidas naturalmente por procesos biológicos, presentan una alta eficiencia y

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

una baja tasa de producción de fango. Sin embargo, por ahora no se dispone de una producción industrial de estos, por lo que su aplicación a gran escala está limitada [6]. Entre los de tipo inorgánico, los principales son las sales de aluminio, de hierro, así como compuestos poliméricos a partir de estas. Entre los orgánicos, destacan compuestos sintéticos de alto peso molecular, como la poliacrilamida (PAM).

En el presente trabajo se ha optado por utilizar dos coagulantes poliméricos de tipo inorgánico (PFS y PAC). Estos coagulantes presentan una misma forma hidrolizada y el mismo mecanismo de coagulación y de formación de enlaces puente, por lo que podrían utilizarse conjuntamente. Para comparar la efectividad de los anteriores, se ha utilizado otros coagulantes más comunes, como sales de aluminio y de hierro. En concreto, $Al_2(SO_4)_3$ y $FeCl_3$.

Además, como coadyuvante, se ha seleccionado un compuesto orgánico de elevado peso molecular, en concreto PAM.

4.2.1. Características de los reactivos utilizados.

A continuación se describen las propiedades y características de los principales reactivos seleccionados (PAC, PFS y PAM), así como las del resto de reactivos más comunes utilizados.

4.3.2.1. Polímero de Cloruro de Aluminio (PAC)

La eficiencia del coagulante depende de su conformación en el agua. El PAC está diseñado para mejorar sus propiedades de coagulación. No se trata de un único compuesto, sino de un grupo de compuestos de distintas formas, cuya fórmula genérica es $Al_n(OH)_nCl_{3n-m}$. El grado de polimerización se denota por el coeficiente "N" de fórmula, y define el tamaño de molécula y su peso molecular. El valor de "N" se sitúa en el orden de miles [4]. En el agua, tiene lugar una alta ionización del compuesto, por lo que permite un alto poder de coagulación a través de la neutralización de cargas.

No obstante, si bien la densidad de carga positiva no es excesivamente elevada, lo que supondría que sólo podría neutralizar el coloide menos estabilizado, presenta un peso molecular particularmente grande que permite establecer enlaces puente de forma elevada. Debido a esto, presenta un excelente efecto de coagulación inmediata.

La basicidad (B) del compuesto viene establecida por la relación:

$$B = [OH]/3[Al]$$

Cuando el valor de B es más alto, el porcentaje de grupos OH en el compuesto es mayor, y si su forma es más próxima a la del $[Al_2(OH)_n]$. En estas condiciones, la precipitación es más favorable pero presenta una menor estabilidad. Por dicho motivo, la basicidad de PAC, configuración general, se sitúa entre el 50% y 80% aproximadamente [4].

Se ha utilizado PAC líquido con 10% de su concentración fabricado por la empresa Sanfeng de la provincia Shandong, con un contenido bajo del componente activo (Al_2O_3), próximo al 8%, por lo que supone trabajar con dosis relativamente altas. Y la solución de madre se ha diluido de 2% (mg/L) de PAC.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

4.3.2.2. Polímero de sulfato de hierro (PFS).

El PFS es un nuevo material coagulante, que puede ser visto como un producto intermedio del proceso de hidrólisis de sulfato férrico y su forma es más próxima a la del $\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}$. El método de producción puede ser variable, pero se fundamentan en oxidar distintos oxidantes férricos. Mediante el control del proceso de oxidación se puede obtener un PFS con distintas basicidades. Por ejemplo, en la industria, se utiliza la oxidación catalítica de aire (oxígeno) o la oxidación con clorato de potasio (o sodio) para producirlo, considerando la relación molar $\text{SO}_4^{2-}/\text{Fe}$ [4] como parámetro de control.

La basicidad (B) del compuesto viene establecida por la relación:

$$B = [\text{OH}]/3[\text{Fe}]$$

Cuando se añade la misma dosificación en alguna turbidez del vertido original, PFS con la distinta basicidad produce diferentes efectos de coagulación. En general, el efecto de coagulación es mejor en la mayor de turbidez y de basicidad. En este experimento, se utiliza 9,0-14,0% [4].

Se ha utilizado PFS líquido con 15% de su concentración fabricado por la empresa Xinlei de la provincia Shandong, con un contenido del componente activo (Fe^{3+}), del 11%. Y su solución de madre también se ha diluido de 2% de PFS.

4.3.2.3. Poliacrilamida (PAM).

El PAM es un grupo de macromoléculas, presente generalmente como sólido granular, aunque también es posible encontrarlo como líquido coloidal. El PAM anicónico es fácil de producir y presenta un bajo precio, por lo que es un agente de tratamiento de agua común. Por su parte, el PAM catiónico, además de adsorber partículas, es capaz de actuar frente a coloides cargados negativamente, lo que le hace un buen agente de tratamiento para la deshidratación de los fangos [4].

El PAM se disuelve fácilmente en agua fría y presenta una elevada viscosidad en la disolución. Por lo que se ha preparado una disolución de 0,2-0,5% que se reduce al 0,05-0,1% al utilizarse en el experimento. El PAM anicónico utilizado es fabricado por Sanfeng de la provincia Shandong, con un contenido del 90%, que presenta un peso molecular próximo a 9.000.000 g/mol.

4.3.2.4. Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Es un cristal blanco y soluble en agua aunque condicionada por la temperatura. Presenta un pH ácido, aproximadamente de 2,5. En el laboratorio, se utiliza el sólido de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ fabricado por la empresa Sanfeng de la provincia Shandong. Su contenido en impurezas es inferior a 0,15% y presenta un contenido de Al_2O_3 16%. Su solución de madre se ha diluido de 5% de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

4.3.2.5. Cloruro férrico (FeCl_3).

Es un coagulante común que es fácilmente soluble en agua. Presenta una buena precipitación del floculo formado y su efecto es mejor en agua con baja temperatura y turbidez.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

En el laboratorio se utiliza el sólido de FeCl_3 fabricado por la empresa Xinlei de la provincia Shandong y el contenido de Fe^{3+} es 34%. Y también su solución de madre se ha diluido de 5% de FeCl_3 .

4.3.2.6. Permanganato de potasio (KMnO_4).

El permanganato (MnO_4^-) es un fuerte agente oxidante, tanto sólido como en solución acuosa que permite transformar gran cantidad de compuestos orgánicos. En el laboratorio se utiliza los polvos de KMnO_4 fabricado por la empresa Changyuan de la ciudad Chongqing y el contenido es 99,2%.

4.3. Diseño experimental.

El principal objetivo del procedimiento experimental consiste en identificar la dosificación óptima de cada uno de los coagulantes para el agua residual de la Zona Zhongyuan, así como las dosificaciones más favorables para eliminar la mayor cantidad de los diferentes contaminantes presentes.

4.3.1. Procedimiento experimental general.

Se han realizado, a escala de laboratorio, ensayos de tratamiento del agua residual utilizando distintos coagulantes y diferentes dosificaciones de los mismos. Para ello, se ha tomado, en 6 vasos de 2000 mL, 500 mL del agua residual a tratar, y situado en un agitador ZR4-6 como el mostrado en la Figura 4.1. A continuación, se ha agitado la muestra durante 0.5 minutos con una velocidad de 200 vueltas/min. A continuación, se ha introducido, en cada uno de los vasos, las distintas dosis de coagulantes pre-diseñados, dejando el primer vaso como blanco. Se ha agitado la mezcla durante 0,5 minutos más a la misma velocidad. Posteriormente, se ha reducido la velocidad a 50 vueltas/min. y se ha mantenido durante 5 minutos para permitir una buena interacción química de los reactivos y formación de flóculos. Posteriormente, se ha detenido la agitación y se ha mantenido el sistema en reposo durante 10 minutos, lo que ha posibilitado la sedimentación del fango. Transcurrido dicho periodo, se ha separado una fracción del líquido sobrenadante para su análisis y se ha tomado los fangos para su caracterización posterior.



Figura 4.1: Agitador utilizado en el laboratorio.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

4.3.2. Experimento de blanco.

Antes añadir los reactivos, hace un experimento de blanco. En 6 vasos de 2000 mL, pone respectivamente 500 mL del agua residual con ausencias de los coagulantes y cumple el procedimiento general descrito anteriormente.

4.3.3. Experimento de solo reactivo.

Según la Tabla 4.1, en cada vaso con 500 mL del agua residual se añade la distinta dosis coincido con los reactivos y se utiliza el procedimiento general descrito anteriormente.

Tabla 4.1: las dosificaciones realizadas en el experimento de solo reactivo.

| Reactivo | Objetos de medición (SS, DBO ₅ , DQO) | Cambios de dosificaciones (mg/L) |
|---|--|---|
| Al ₂ (SO ₄) ₃ | Todos | 100;150;200;250;300;330;350;400;450;500;550 |
| FeCl ₃ | Todos | 30;60;90;100;120;150;180;210;240;270;300 |
| PAC | Todos | 10;20;30;40;50;60;70;80;90;100; |
| PFS | SS | 5;10;15;20;25;30;35;40;45;50 |
| | DQO y DBO ₅ | 50;100;150;200;250;300;350;400;450 |

4.3.4. Experimento con adyuvante.

Con el objeto de mejorar el rendimiento de los coagulantes poliméricos inorgánicos, se ha realizado un experimento en los que se ha añadido un coagulante de tipo orgánico (PAM aniónico) en combinación con uno de los coagulantes anteriores (PAC). A partir de los ensayos experimentales realizados se ha observado la tasa de eliminación de los contaminantes, las características del proceso de precipitación y del fango producido.

La dosis de PAC utilizada ha sido del 2% y la dosis de PAM aniónico del 0,25%. Se ha utilizado el procedimiento general descrito anteriormente, pero añadiendo los dos reactivos (PAC y PAM). En primer lugar se ha adicionado la disolución de PAC y, a continuación la de PAM coincido con la dosificación de Tabla 4.2.

Tabla 4.2: las dosificaciones realizadas en el experimento con adyuvante.

| Dosis de PAC (mg/L) | Cambio de dosis de PAM (mg/L) |
|------------------------|----------------------------------|
| 20 | 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 |
| 30 | 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 |

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

4.3.5. Experimento de pre-oxidación.

Para solucionar problemas de ennegrecimiento del agua, se ha decidido realizar ensayos de pre-oxidación (oxidación previa al tratamiento de coagulación), utilizando como oxidante el KMnO_4 . Estos problemas pueden originarse por distintos motivos.

Por una parte, en ocasiones, el agua residual contiene un exceso de reductores excedentes que causan un efecto desfavorable en el tratamiento, lo que requiere aumentar la dosis del coagulante.

El procedimiento ha consistido en la adición al agua residual de una dosis de KMnO_4 al 1%. Se ha realizado una agitación de la muestra mientras se añade el oxidante. Tras 15 minutos de agitación continua, se añade la dosis de la disolución de PAC al 2% y continuado con el procedimiento general descrito anteriormente. La dosificación de reactivo coincide con la siguiente Tabla 4.3.

Por otra parte, en algunos de los ensayos realizados con PFS se ha observado que, en ocasiones, tiene lugar la aparición de una coloración negra en el agua tratada. En estos casos, se ha adicionado unas gotas de KMnO_4 y agitado la muestra hasta una desaparición de negra.

Tabla 4.3: las dosificaciones realizadas en el experimento de solo reactivo.

| Dosis de PAC (mg/L) | Cambios de dosis de KMnO_4 (mg/L) |
|---------------------|--|
| 50 | 0; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; |

4.4. Medida de los contaminantes.

Tras los ensayos experimentales se ha extraído una fracción del líquido sobrenadante, en el que se ha medido los siguientes contaminantes: Demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y sólidos en suspensión (SS). Estos parámetros se han analizado también en el agua residual a tratar. A continuación se indica las técnicas analíticas utilizadas.

4.4.1. Análisis de DQO.

El valor de DQO determina la demanda necesaria de oxígeno, en condiciones ácidas, para oxidar a los compuestos orgánicos presentes, transformándolos a CO_2 y H_2O . Como oxidante se utiliza el KCr_2O_7 ya que es un oxidante muy fuerte, que puede oxidar casi todos los tipos de compuestos orgánicos presentes en el vertido [3].

En primer lugar se introduce una muestra de 2,5 mL de agua residual en un matraz de 50 mL. A continuación, se añade 2,5 mL de reactivo preparado (2 g HgSO_4 , 150 mL H_2SO_4 concentrada y 50 mL de KCr_2O_7 0,25 M) y 3,5 mL de la solución catalizador (2 g Ag_2SO_4 y 150 mL de H_2SO_4 concentrado). A continuación, se tapa con un tapón y se sella con teflón. Después se lleva a ebullición durante 2 horas bajo condiciones de refrigerante a reflujo, adaptado al matraz. Tras su enfriamiento, se diluye con 30 mL de agua destilada y se valora con $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 0,1$ M utilizando 2 gotas de solución de ferroína como indicador, hasta alcanzar un viraje a rojo violáceo. Paralelamente se realiza la valoración con un blanco.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

El método de cálculo:

$$DQO(mg/L) = \frac{(v_0 - v_1) \times C \times S \times 1000}{V}$$

Dentro: v_0 --- consumo de $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ en el blanco(mL);
 v_1 ---el consumo de $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ en la muestra(mL);
 c --- molaridad de $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ (mol/L);
 s ---peso molecular del oxígeno;
 V ---volumen de la muestra (mL).

4.4.2. Análisis de DBO_5 .

Como parámetro indicativo de la materia orgánica fácilmente biodegradable se ha utilizado la demanda química de oxígeno a los cinco días (DBO_5).

Como método se ha utilizado un método manométrico, utilizamos el DBO metro de modelo BOD-100K con la marca Kehuan mostrado en la Figura 4.2. El método está basado en la variación de presión del sistema como resultado del proceso biológico de oxidación. Se ha utilizado un inhibidor de la nitrificación y un absorbente del ácido carbónico producido.

El procedimiento ha consistido en añadir las muestras de 50 mL en las 6 botellas con la capacidad de 0-1000 mg/L de DBO_5 de cada. Posteriormente, se colocan en el DBO metro. Para retener el CO_2 producido y evitar que altere el nivel de presión en la lectura de DBO_5 , se ha utilizado NaOH sólida en los tapones de las botellas. Trascorridos 5 días, el equipo proporciona una lectura DBO_5 en mg/L a partir de la variación de presión ocasionada en la botella.



Figura 4.2: DBO metro utilizado en el laboratorio.

4.4.3. Análisis de sólidos en suspensión.

Para la determinación de los sólidos en suspensión (SS) se ha utilizado un método gravimétrico [3]. En primer lugar, se deseca un filtro ($0,47 \mu m$) y una capsula de porcelana en estufa a $105 \text{ }^\circ C$ hasta pesada constante. El filtro pesado se acopla al equipo de filtración a vacío. Se llena el embudo de filtración con nuestra muestra de 100 mL agitada completamente y se conecta la bomba de vacío. Cuando el proceso ha concluido, se limpia con agua destilada repetidas veces para evitar que se pierda parte de los sólidos. El filtro con los sólidos se

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

coloca sobre la cápsula de porcelana y se deseca en estufa a 105 °C. Posteriormente, se deja enfriar en el desecador y se pesa la capsula con el filtro y sólidos.

La determinación de la concentración de SS se realiza a través del siguiente cálculo:

$$SS(mg/L) = \frac{(A - B) \times 1000 \times 1000}{V}$$

Dentro: A---Peso del filtro y los sólidos no filtrados (g);

B---Peso del filtro (g);

V---Volumen de la muestra (mL).

4.5. Caracterización del fango producido.

Los fangos producidos en los ensayos anteriores se han caracterizado para estimar su grado de humedad y su sedimentabilidad.

4.5.1. Determinación de sedimentabilidad del fango.

La sedimentabilidad del fango se ha determinado en base al volumen ocupado por el fango después de un tiempo fijo de sedimentación. Este parámetro se conoce como índice volumétrico del fango y se define como el volumen (en mL) ocupado por un gramo de fango seco después de decantar 30 minutos en reposo en una probeta de un litro, es decir:

$$IVF = \frac{V_{30}}{X}$$

Dentro: X-- La concentración de sólidos suspendidos en el fango (g/L)

V_{30} —El volumen (mL) ocupado por el fango después de 30 minutos de sedimentación.

4.5.2. Determinación del grado de humedad

Para determinar el grado de humedad se ha utilizado el analizador de humedad por radiación infrarroja, de marca Chincan y modelo SFY-20 (Figura 4.3).



Figura 4.3: Analizador de humedad utilizado en el laboratorio.

5. Resultados de experimentos

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

5.1. Experimentos de coagulación.

Siguiendo el procedimiento experimental descrito en el capítulo anterior, se han utilizado, para tratar el agua residual de la ciudad de Zhongyuan distintas disoluciones preparadas de los coagulantes poliméricos PAC y PFS, así como de $Al_2(SO_4)_3$ y $FeCl_3$ para comparar con los anteriores. Se ha realizado un estudio experimental de la capacidad de estos coagulantes en la eliminación de SS, DQO y DBO_5 presente en el influente de EDAR. Para comparar la efectividad, se ha realizado un ensayo de tratamiento en ausencia de coagulante (blanco). Y en la Tabla 5.1, se muestra los resultados obtenidos para el blanco en la eliminación de cada contaminante.

TABLA 5.1: los resultados de blancos en 6 vasos y la media de ellos.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Media |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|-------|
| SS | 40 | 35 | 37 | 36 | 33 | 37 | 36 |
| DQO | 29 | 26 | 30 | 27 | 25 | 27 | 27 |
| DBO_5 | 20 | 18 | 19 | 21 | 18 | 20 | 19 |

5.1.1. Eliminación de DBO_5 .

En la Figura 5.1 se muestra la eliminación de DBO_5 obtenida en función del coagulante utilizado. En los resultados mostrados se observa que a medida que aumenta la dosis de coagulante, el porcentaje de eliminación de DBO_5 también cada vez crece. No se produce un problema de sobredosificación. El motivo es que la eliminación de DBO_5 depende, en gran parte, de procesos de adsorción y barrido, por lo que al aumentar el coagulante se incrementa la superficie total del coagulante produciendo así una mayor eliminación de DBO_5 . Por tanto, para obtener una alta eliminación de DBO_5 , en condiciones económicas viables, puede considerarse conveniente un aumento de la dosis. Se observa que los coagulantes poliméricos seleccionados (PAC y PFS) presentan una mayor eliminación en comparación con las sales de Fe y Al respectivas.

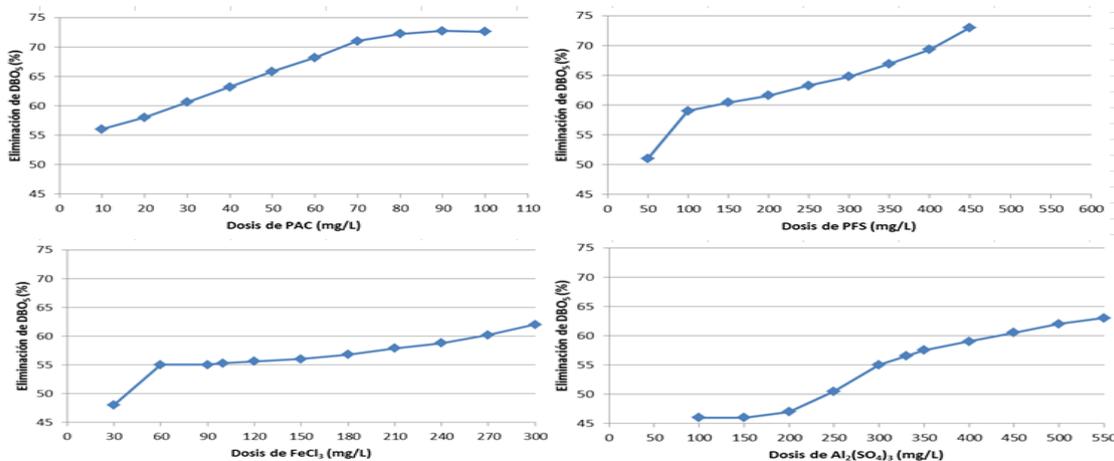


Figura 5.1: Eliminación de DBO_5 para distintos coagulantes.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

5.1.2. Eliminación de DQO.

En la Figura 5.2 se muestra la eliminación de DQO obtenida en función del coagulante utilizado. En cuanto a la eliminación de DQO se observa que existe una inestabilidad de la eliminación con la dosificación, lo cual significa que existe una dosificación óptima. Existe un problema de sobredosificación que es desfavorable a la eliminación del contaminante, al contrario de lo observado en la eliminación de. La causa puede atribuirse al fenómeno conocido como "reestabilización" La reestabilización sucede porque en presencia de un determinado exceso de coagulante, el coloide se vuelve parcialmente estable y no puede eliminarse. El proceso de reestabilidad puede incrementarse aumentando la dosis, de modo que una vez superada esta etapa, continúa la eliminación, aunque ello supone un desperdicio del coagulante. Los procesos de estabilización son debidos a la interacción con moléculas de gran tamaño y múltiples centros activos, por lo que este fenómeno tiene lugar principalmente con los coagulantes poliméricos PAC y PFS, tal y como se observa en la Figura 5.2.

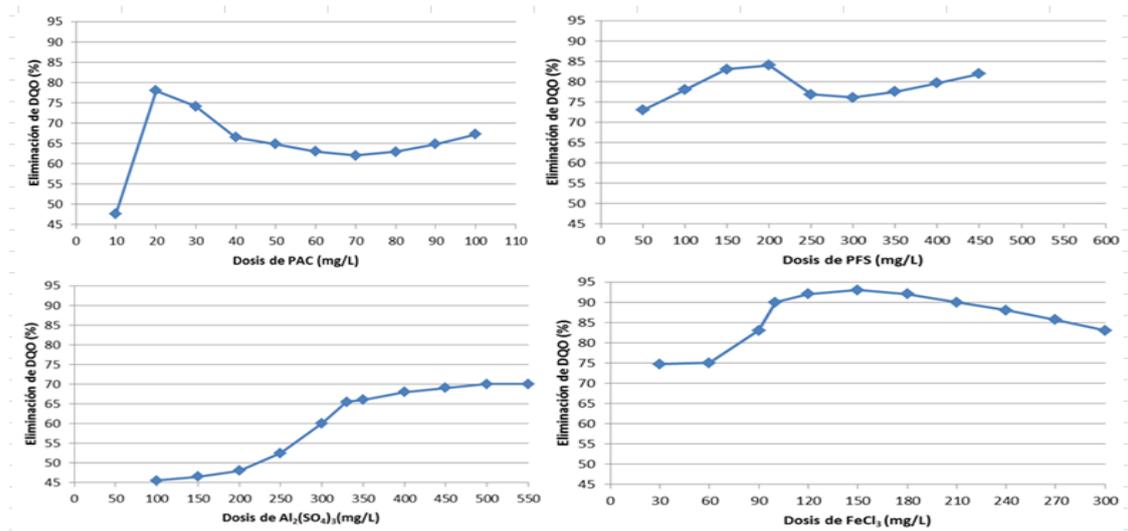


Figura 5.2: Eliminación de DQO para distintos coagulantes.

5.1.3. Eliminación de SS.

En la Figura 5.3 se muestra la eliminación de sólidos en suspensión (SS) obtenida en función del coagulante utilizado. Se observa que, al igual que sucedía en la eliminación de DQO, se produce un cierto efecto de reestabilización, aunque no tan significativo. La eliminación de SS es bastante buena para los distintos coagulantes, incluso a bajas dosificaciones. Los coagulantes poliméricos PAC y PFS presentan eliminaciones superiores a los coagulantes tradicionales.

El efecto de eliminación de SS se muestra excelente para los distintos coagulantes, incluso en una baja dosificación. Este resultado es muy interesante para el tratamiento del vertido doméstico de Zhongyuan que contiene un alto contenido de SS.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

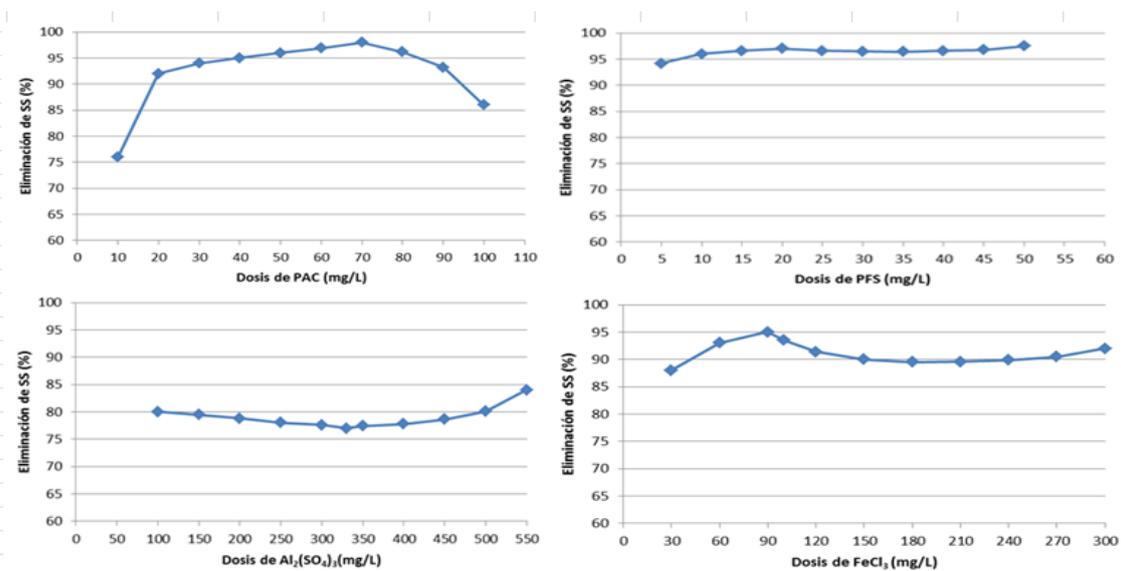


Figura 5.3: Eliminación de SS para distintos coagulantes.

5.1.4. Eliminación de nitrógeno y fósforo.

Si bien en este trabajo no se ha estudiado la eliminación de nitrógeno y fósforo, en la Bibliografía 9 se reporta la estadística de eliminación, obtenida en más de 100 ciudades de Estados Unidos en los 90, usando el tratamiento primario mejorado. Estos valores se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Porcentaje de eliminación de los contaminantes en el tratamiento primario mejorado de Estados Unidos [9].

| Contaminante | Coagulante | | |
|--------------------|-----------------|-----|---------------|
| | Sal de aluminio | Cal | Sal de hierro |
| DBO ₅ | 65 | 65 | 62 |
| DQO | 69 | 52 | 61 |
| SS | 70 | 70 | 67 |
| NH ₃ -N | - | 22 | 14 |
| P | 78 | 91 | 71 |

De estos valores se deduce que el tratamiento primario avanzado (CEPT) apenas conseguiría eliminar N, pero en cambio sí que es capaz de eliminar importantes cantidades del P influente, siendo mucho mejor que el tratamiento biológico convencional, lo que demuestra que también puede ser una buena opción para controlar la eutrofización.

5.1.5. Selección de coagulante.

En los apartados anteriores encontramos que los distintos coagulantes presentan una capacidad para eliminar los principales contaminantes presentes en el agua residual, por lo que deben considerarse también otros aspectos en la selección del coagulante más adecuado.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

A partir de los resultados anteriores se ha seleccionado la dosis óptima de coagulante para la eliminación de cada contaminante. Estas dosis óptimas por contaminante se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Comparación de las dosis óptimas y la eliminación correspondiente.

| Contaminante | | SS | DQO | DBO ₅ | Observación |
|---|-----------------|-----|-----|------------------|--|
| Coagulante | | | | | |
| PFS | Dosis (mg/L) | 300 | 200 | 450 | Fe ³⁺ ocupa 11% |
| | Eliminación (%) | 97 | 85 | 74 | |
| FeCl₃ | Dosis (mg/L) | 90 | 150 | 300 | Fe ³⁺ ocupa 34% |
| | Eliminación (%) | 94 | 92 | 62 | |
| PAC | Dosis (mg/L) | 70 | 20 | 100 | Al ₂ O ₃ ocupa 8% |
| | Eliminación (%) | 98 | 78 | 74 | |
| Al₂(SO₄)₃ | Dosis (mg/L) | 100 | 550 | 550 | Al ₂ O ₃ ocupa 16% |
| | Eliminación (%) | 80 | 75 | 65 | |

La inestabilidad de la eliminación de DQO puede suponer un problema, a pesar de que la tendencia total de eliminación se incrementa con la dosis. La DQO está compuesta por dos fracciones, DQO suspendida y DQO disuelta. La eliminación de DQO suspendida puede asociarse a la de SS, mientras que la eliminación de DQO disuelta va estar, parcialmente, asociada a la eliminación de DBO₅. Por eso, desde otro punto de vista, podemos sólo considerar DBO₅ y SS a la hora de seleccionar el coagulante.

En la eliminación de SS, el PAC, el PFS y el FeCl₃ son los coagulantes que presenta un mejor efecto, consiguiendo elevadas eliminaciones con dosis bajas de coagulante. Sin embargo, el FeCl₃ tiene menos efecto para eliminar DBO₅, cuando su dosificación llega 300 mg/L, sólo puede quitar 61%, siendo más aconsejable seleccionar PAC o PFS.

Entre estos, en dentro, el PAC puede formar un flóculo de gran superficie aunque con una baja sedimentación. Por el contrario, el PFS forma un flóculo más compactado y que tiene una alta velocidad de sedimentación. Sin embargo, puede provocar un oscurecimiento de la coloración del agua, por lo que requeriría una realizarse antes una oxidación previa para evitar dicho efecto.

Si comparamos la efectividad y coste de los coagulantes de aluminio (Al₂(SO₄)₃, PAC líquido o PAC cristalizado) mostrados en la Tabla 5.4, el Al₂(SO₄)₃ es un coagulante inorgánico ampliamente aplicado por su bajo coste, fácil uso y buen efecto de coagulación. Sin embargo, cuando la dosis de Al₂(SO₄)₃ es alta o hay muchas impurezas suspendidas, el flóculo de alumbre formado tiene el inconveniente de ser esponjoso y de difícil sedimentación, por lo que no se puede garantizar la calidad del efluente. El PAC tiene, además de un efecto evidente de coagulación, una fuerte adaptación al cambio de pH en el agua y se ha observado

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

una buena calidad del floculo de alumbre producido, así como una mejor calidad del efluente en comparación con el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Por otra parte, el precio de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (su principal ventaja) es similar al del PAC líquido (no siendo excesivamente alto el del PAC cristalizado), mientras que la calidad del efluente tratado es mejor al utilizar PAC.

Por todo ello, el PAC resulta una mejor opción para tratar el agua residual. En relación a su estado, el líquido de PAC es mejor que el cristalizado, porque provoca una reacción de hidrólisis más completa, además de presentar un menor coste.

Tabla 5.4: Comparación de los precios de distintos sales de aluminio y sus eficiencias.

| | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | PAC líquido | PAC cristalizado |
|--|------------------------------|-------------|------------------|
| Pureza de Al_2O_3 (%) | 16 | 8 | 16 |
| Precio (Yuan/Tm) | 600--700 | 500--600 | 2200--2800 |
| (Euro/Tm) | 75--87,5 | 62,5--75 | 275--350 |
| Dosis (mg/L) | 50--75 | 100--150 | 20--30 |
| Eliminación de SS (%) | 85--93 | 90--96 | 86--93 |
| Eliminación de DQO% | 75--80 | 80--87 | 80--85 |
| Coste de coagulante (Yuan/ 10^3 Tm agua) | 30--50 | 50--90 | 50--90 |

5.1.6. Dosificación óptima.

Según los resultados mostrados anteriormente, podemos encontrar la dosis óptima recomendada para cada uno de los coagulantes, tras considerar sus eficiencias y economías. En la Tabla 5.5 se muestran las dosis óptimas recomendadas, así como el porcentaje de eliminación que se conseguiría para cada coagulante de los estudiados.

Tabla 5.5: Comparación de la dosis óptima de los diferentes coagulantes.

| Orden | Coagulante | Dosis óptima (mg/L) | Tasa de eliminación (%) | | |
|-------|------------------------------|---------------------|-------------------------|-----|------------------|
| | | | SS | DQO | DBO ₅ |
| 1 | PAC | 30 | 94 | 78 | 74 |
| 2 | PFS | 50 | 98 | 73 | 51 |
| 3 | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | 100 | 79 | 57 | 52 |
| 4 | FeCl_3 | 100 | 94 | 89 | 55 |

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

En resumen, de la comparación anterior, podemos concluir que la opción más recomendable es el polímero de cloruro de aluminio (PAC) que presenta una dosis óptima menor y una eliminación global de SS, DQO y DBO₅ superior.

5.2. Experimento utilizando PAM como adyuvante.

Según los resultados anteriores el PAC resulta una buena opción. Sin embargo, comparado con el uso de PFS, forma un flóculo de gran superficie pero baja sedimentación. Para ayudar a mejorar el rendimiento del proceso cuando se utiliza PAC, se ha realizado un experimento en el que se ha añadido el adyuvante orgánico poliacrilamida (PAM). Los resultados muestran que se produce una escasa eliminación adicional de SS, un ligero incremento de la eliminación de DQO y una apreciable eliminación de DBO₅, que presenta un cambio evidente, según se muestra en la Figura 5.4.

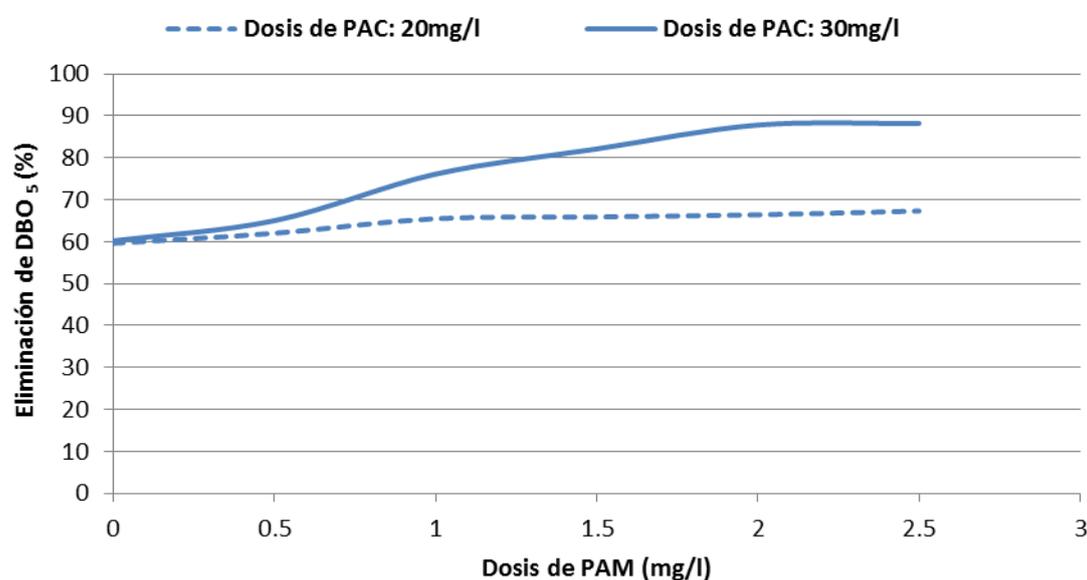


Figura 5.4: Eliminación de DBO₅ utilizando PAC como coagulante y PAM como adyuvante.

Por tanto, la eficiencia de PAC en la eliminación de DBO₅ es superior al combinarlo con PAM. Así, para una dosificación de PAC de 30 mg/L, la adición de 1 mg/L de PAM puede aumentar un 16% la eliminación de DBO₅. En este sentido, la combinación de ambos resulta una buena opción.

Además, otro aspecto de importancia es el coste de coagulante, ya que permite reducir la dosificación de PAC. Para eliminar un 60% de DBO₅, se precisa una dosis de 30 mg/L de PAC; pero adicionando 0,5 mg/L de PAM, la dosificación de PAC requerida se reduce a sólo necesita 20 mg/L.

Por último, también se reduce la producción de fango y se consigue reducir el coste de tratamiento asociado.

5.3. Experimento de oxidación previa.

En los ensayos de coagulación se ha observado que, en ocasiones la utilización de PFS produce un ennegrecimiento del color del agua. Este es un problema que puede limitar la utilización de PFS como coagulante a pesar de mostrar buena capacidad de eliminación de contaminantes y buenas propiedades de sedimentación.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

Este ennegrecimiento puede deberse a que en las tuberías de la EDAR existe una descomposición anaeróbica del fango que produce H_2S . Este gas puede reducir al hierro procedente del coagulante (Fe^{3+}) a Fe^{2+} causando el color negro del agua.

Para tratar de evitar este problema se ha propuesto estudiar el resultado de realizar una oxidación previa con $KMnO_4$, a efecto de reducir la oxidación del hierro utilizado en el proceso.

Además, la pre-oxidación también tiene un efecto positivo en el tratamiento del vertido, se ha observado que no sólo resuelve el problema del color negro del agua al usar una sal de hierro, sino que también puede aumentar la eliminación de contaminantes orgánicos (DBO_5 y DQO), por lo que su uso puede extenderse también a coagulantes de aluminio.

Por ello, se ha ensayado la mejora en la eliminación que se podría alcanzar al realizar una oxidación previa a la utilización del coagulante PAC que mostraba un mejor resultado global. En la Figura 5.5 podemos ver los resultados obtenidos. Se observa el incremento en la eliminación de DQO y DBO_5 , mostrando una dosis óptima de alrededor de 8-10 mg/L. En comparación con el proceso sin oxidación previa, para una dosis de 50 mg/L de PAC, aumenta la tasa de eliminación de DQO aumenta de 50% a 85%, y la de DBO_5 se eleva de 65% a 70%. Este aspecto puede permitir utilizar menos dosis de coagulantes para alcanzar el porcentaje de eliminación de DBO_5 y DQO deseado, lo que supone además un menor coste.

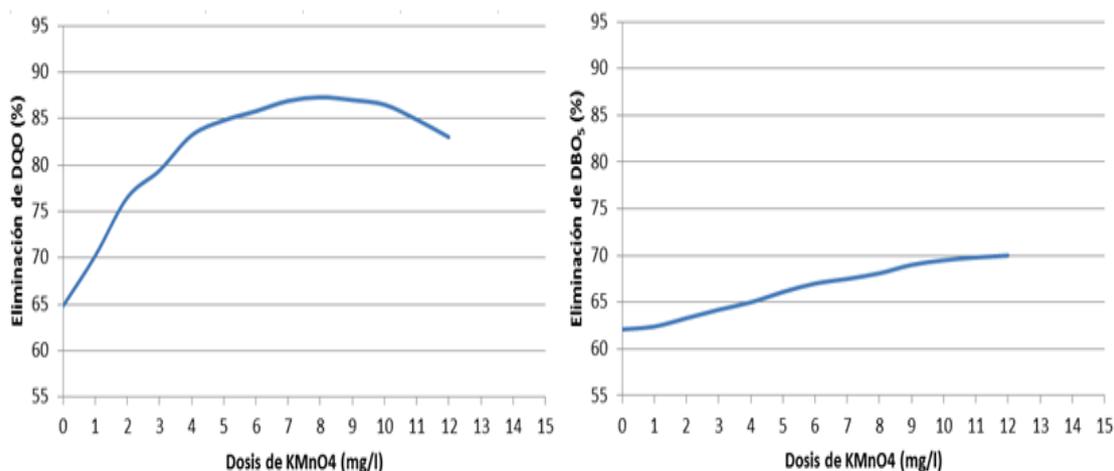


Figura 5.5: Eliminación de DQO y DBO_5 para distintas dosis de $KMnO_4$, con una dosis de PAC de 50mg/L.

No obstante, si bien existe una mejora de calidad, al introducir una operación previa y partiendo de la idea de mantener el proceso con una operación lo más simple posible, no resultaría conveniente utilizar la pre-oxidación salvo si se utiliza sal de hierro.

5.4. Características del fango producido.

Un aspecto importante en el proceso del tratamiento primario avanzado es la sedimentabilidad del fango. En la Figura 5.6 se muestra comparación entre el fango inicial y lo sedimentado en 30 min.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

Los resultados muestran que, en todos los casos existe una proporción de asentamiento tras 30min inferior al 30%. Por otra parte, el porcentaje de agua presente en los fangos se sitúa en el orden del 97,8-98,5%.

Entre los fangos producidos en los distintos experimentos realizados, cabe indicar que el fango producido al utilizar los reactivos PAM y PAC conjuntamente es el que mejor propiedades presenta, destacando una buena compactación, rápida sedimentación, fácil deshidratación y bajo contenido en agua.



Figura 5.6: Sedimentación del lodo.

6. Planificación preliminar de CEPT

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

6.1. Escala del proceso.

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento de la línea de proceso biológico original de la EDAR de Zhong yuan y reducir la carga que, actualmente, soporta la nueva línea de la EDAR se propone planificar como alternativa al proceso original un tratamiento primario mejorado químicamente con capacidad para tratar 10.000 m³/d de las aguas residuales entrantes, considerando un coeficiente de variación punta de 1,5.

6.2. Objetivo del proyecto.

La línea de tratamiento propuesta deberá ser capaz de reducir la contaminación influente a la EDAR de la Zona Zhongyuan para adaptarla a los nuevos objetivos de emisión.

6.2.1. Diseño de la calidad del influente.

Según los datos reales de la vigilancia y un análisis estadístico de la calidad del vertido en la Zona Zhongyuan, diseña una calidad del influente con un nivel de contaminación recogido en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Calidad diseñada del agua residual.

| Contaminante | DQO | DBO ₅ | SS | NH3-N |
|----------------------|-----|------------------|-----|-------|
| Valor diseñado(mg/L) | 270 | 60 | 150 | 25 |

6.2.2. Meta de tratamiento.

Según el nuevo objetivo de emisión, la calidad de efluente tiene que garantizar una irrigación de la agricultura. En la Tabla 6.2 se muestra el nuevo objetivo de emisión para cada contaminante y el porcentaje de eliminación que deberá conseguir el proceso para cada uno de estos.

Tabla 6.2: Objetivo de emisión y la eliminación diseñada.

| Contaminante | DQO | DBO ₅ | SS |
|----------------------------|-----|------------------|----|
| Objetivo de Emisión (mg/L) | 90 | 20 | 30 |
| Eliminación diseñada (%) | 66 | 67 | 80 |

6.3. Esquema del proceso.

A continuación se muestra un esquema de las etapas de operación que deberá presentar el nuevo proceso de tratamiento, basado en un tratamiento primario mejorado químicamente. El diagrama de flujo del proceso se muestra en la Figura 6.1.

Considerando el factor de bajo coste y baja inversión necesaria, se propone un proceso que conste de las etapas de reja gruesa, reja fina, homogenización, desarenador rotacional, tanque para el tratamiento primario avanzado (coagulación-floculación), sedimentador y desinfección. Además, dado que los experimentos realizados muestran que el fango producido contiene una humedad del 97,8-98,5% resulta viable su tratamiento conjunto con el fango de la línea biológica, compartiendo el sistema de tratamiento de fango actual.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

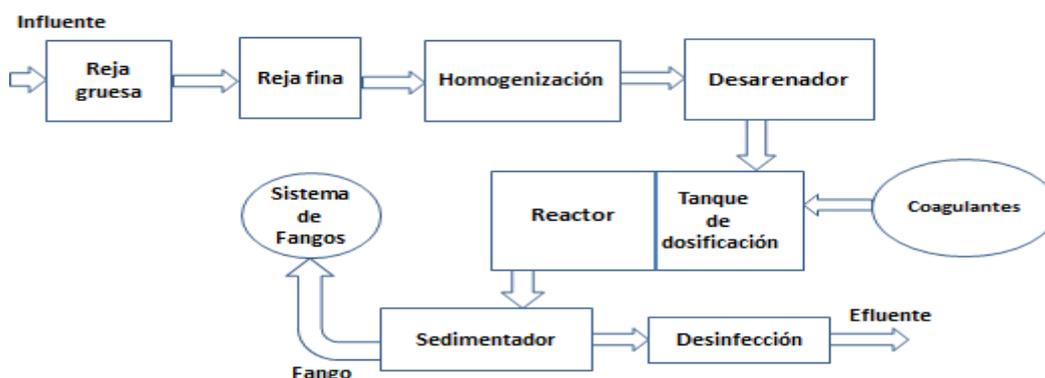


Figura 6.1: Esquema de proceso del tratamiento primario avanzado propuesto.

6.4. Reactivos.

Según los resultados obtenidos en el presente trabajo, para obtener un nivel de tratamiento que alcance el objetivo de emisión de SS, DQO y DBO₅, se proponen dos alternativas.

En primer lugar, utilizar el coagulante PAC como único reactivo. En este sentido, en forma líquida presenta un coste más bajo, aunque presenta un menor contenido de Al₂O₃, requiere una dosificación superior, tiene mayor dificultad de transporte y almacén, o bien en forma sólida que presenta mejores propiedades aunque su coste es más elevado. En base a los experimentos de laboratorio, se propone una dosificación de 100 mg/L (8 mg/L de Al₂O₃).

La segunda alternativa es la dosificación conjunta del coagulante PAC y el adyuvante PAM. En base a los experimentos de laboratorio, se propone una dosificación de 100-130 mg/L (8-10 mg/L de Al₂O₃) de PAC y 0,5-1 mg/L de PAM.

No obstante, deberá estudiarse la situación real y otros posibles problemas de operación a nivel de planta piloto o campo, que pudiesen recomendar la utilización de otras dosificaciones o coagulantes.

6.5. Análisis económico preliminar.

De la evaluación preliminar de la economía del proceso, se estima un coste de funcionamiento de aproximadamente 0,25 yuan/m³ (0,04 euro/m³). Este coste no llega a la mitad del coste que tiene el tratamiento biológico tradicional. En consecuencia, se estima que la puesta en marcha del proceso propuesto puede suponer un ahorro en el coste de funcionamiento de la EDAR de 770.000 yuan/año (96.250 euros/año) en comparación con la utilización de un tratamiento biológico tradicional.

6.6. Investigaciones futuras.

La propuesta recogida en el esquema de la Figura 6.1 ofrece un proceso viable. No obstante se requiere un estudio previo a mayor profundidad para su confirmación. En concreto, esta propuesta requiere ser confirmada a través de ensayos de campo o en planta piloto, para analizar otros posibles detalles e investigar otros posibles problemas o dificultades operativas.

7. Conclusión

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

- Para mejorar el funcionamiento de la EDAR de Zhongyuan se requiere mejorar el rendimiento de su línea de proceso más antigua. Si bien, el proceso biológico a través del canal de oxidación es más popular en China para plantas grandes y medianas, su alta inversión y su coste de funcionamiento no es viable debido a la escasez de recursos económicos. Tras el estudio realizado, la instalación de un proceso de tratamiento primario mejorado químicamente (CEPT) resultaría viable, y permitiría alcanzar los objetivos de vertido con una baja inversión y bajo coste de funcionamiento.

- En comparación con coagulantes comunes como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3 , los coagulantes poliméricos PAC y FPS presentan una mejor efectividad en el tratamiento del agua residual y producen un flóculo capaz de sedimentar es más fácil y rápidamente.

- Tanto la utilización de PAC y PFS permiten una excelente eliminación de sólidos en suspensión (SS), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO_5). La eliminación de DBO_5 es proporcional a la dosificación. En la eliminación de DQO se observa un efecto de reestabilización.

- La comparación entre PAC y FPS establece que el PAC forma un flóculo de gran superficie pero con una menor sedimentación, mientras que el PFS puede provocar un oscurecimiento de la coloración del agua.

- La utilización conjunta de PAC y poliacrilamida (PAM) como adyuvante, mejora la sedimentabilidad e incrementa su eficiencia en la eliminación de DQO y DBO_5 . Además, se reduce la dosis de PAC requerida, reduciéndose el coste de coagulante. Otro aspecto de importancia es que permite reducir la producción de fango lo que consigue reducir el coste de su tratamiento.

- El problema de ennegrecimiento causado al utilizar PFS se soluciona con una oxidación previa utilizando KMnO_4 . Además, se consigue un efecto positivo en la eliminación de materia orgánica (DBO_5 y DQO) y, por tanto, una reducción de la dosis de coagulante a utilizar.

- En todos los casos, los fangos producidos muestran una buena sedimentabilidad, inferior al 30% y un grado de humedad del orden del 97,8-98,5%. En especial, el uso combinado de los reactivos PAM y PAC es el que produce un fango de mejor calidad, destacando una buena compactación, rápida sedimentación, fácil deshidratación y bajo contenido en agua. Este fango puede ser tratado en la línea actual de tratamiento de fango existente en la EDAR.

- Atendiendo al grado de eliminación de contaminantes obtenido, se propone como opción óptima el uso combinado de PAC y PAM. Cuando los valores de DBO_5 influente no sean elevados, puede incluso prescindirse del uso de PAM y añadir únicamente PAC. Se recomienda una dosificación de PAC de 8-10 mg/L (de Al_2O_3) y, en caso de alta carga contaminante o DBO_5 elevada, la adición conjunta de 0.5-1 mg/L de PAM.

- De la evaluación económica preliminar del proceso CEPT propuesto, se estima un coste de funcionamiento de aproximadamente 0,25 yuan/ m^3 (0,04 euro/ m^3) inferior a la mitad del coste del proceso biológico sustituido. En consecuencia, se estima que la puesta en marcha del proceso propuesto puede suponer un ahorro en el coste de funcionamiento de la EDAR de 770.000 yuan/año (96.250 euros/año). No

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

obstante, para su confirmación se requiere realizar más pruebas a nivel de planta piloto y campo.

8. Bibliografía

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

1. Asano. T. y Mills. RA. (1990) Planning and Analysis for water reuse projects. Journal AWWA, Jan.pp.38—47.
2. Agency of wastewater treatment in China. Conclusión and improved experienc for the stages of Zhongyuan WWTP, 2009.
<http://www.dowater.com/jishu/2009-11-11/16081.html> (February 27).
3. Baidu. Determination of each indicator in the WWTP,2012,
<http://wenku.baidu.com/view/b407955a3b3567ec102d8a56.html> (February 25)
4. Baidu; Coagulants,2013,
<http://baike.baidu.com/view/1168046.htm> (April 15)
5. Chen,Yaozong (1992). Plan of the water discharge construction. Beijing: The Chinese construction and industry editions.
6. Feng ting,Li;Fa shan,Zhao;Yan,Zhao(2005). Coagulant and flocculant. Beijing: Chemical Industry editions.
7. Guan liang, Liang; Qing liang, Zhao(2009), The primary chemical treatment reinforced. Beijing: China Environmental Science editions.
8. Guohui,Zhang; Xiao yun,Song;Qi,Qiao;Rong feng, Zhao. Implementation of the integrated process of oxidation ditch for the removal of domestic wastewater treatment plant of Zhongyuan, 2006.
<http://124.240.187.81:82/1Q2W3E4R5T6Y7U8I9O0P1Z2X3C4V5B/file.lw23.com/a/ad/ad1/ad159ffa-6e98-40d2-81ec-db7953604e58.pdf> (February 27)
9. Hong, Jie (1998). Progress planning techniques to save water resources of cities in China. Shanghai: Wenni editions.
10. Jian dong,Zhao;Zi li,Li; Suggestions for improving the overall WWTP stages,2005.
<http://wenku.baidu.com/view/657a5191daef5ef7ba0d3c8e.html> (February 28)
11. Liu,Bohe y Zhang, Huitong (2000). The current situation in China and measures of wastewater reuse. Jilin: Heilongjiang Education editions.
12. Peng,Keshan y Shi,Hui (2002). The problem of China´s water resources and their sustainable use. Beijing: Human resources and China´s environmental editions.
13. Shelef.G. y Azov.Y. (1996). The coming era of intensive wastewater reuse in the Mediterranean region. Water Science Technology. 33(10-11), pp. 115 — 125.
14. Zhang,Ping,etc, with drafting group of “ Sustainable Development Report of China”(2002). Report of China´s sustainable development. Beijing: China Environmental Science editions.

Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan

15. Zhang,Zhonghe translation, Culp.RL., Wesner.GM. y Culp.GL. autores (1986). Superior treatment of wastewater from the city. Beijing: The Chinese construction and industry editions.
16. Zhang,Zhongxiang y Qian, Yibian (1998). The sustainable development of cities and the measures to prevent water pollution. Beijing: The Chinese construction and industry editions.