



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Optimización del proceso físico-químico aplicado al
tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de
plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la
instalación para un caudal de 500 m³/d

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Blasco Herrero, Eva

Tutor/a: Ferrer Polonio, Eva

Cotutor/a: Luján Facundo, María José

Cotutor/a externo: HERNANDEZ MARTINEZ, CARLOS

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO
FÍSICO-QUÍMICO APLICADO AL
TRATAMIENTO DE UN AGUA
RESIDUAL GENERADA DE LA
LIMPIEZA DE PLÁSTICOS EN LA
EMPRESA ESLAVA PLÁSTICOS S.A.
DISEÑO DE LA INSTALACIÓN PARA
UN CAUDAL DE 500 m³/d.**

AUTOR: EVA BLASCO HERRERO

TUTORES: EVA FERRER POLONIO
MARÍA JOSÉ LUJAN FACUNDO
CARLOS HERNÁNDEZ MARTINEZ

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar las gracias a mi familia por el apoyo incondicional recibido durante estos cuatro años de universidad y por haber confiado en mí, aun cuando yo no lo hacía.

Gracias también a mis compañeros y amigos del Grado en Ingeniería Química por la ayuda y el apoyo en los malos momentos, sin vosotros nada hubiera sido igual.

Asimismo, agradecer a la empresa Eslava Plásticos S.A, por haberme dado la oportunidad de realizar las prácticas y poder llevar a cabo este trabajo.

Por último, gracias a mis tutores por la dedicación y el interés recibido durante la realización del trabajo, sin ellos no habría sido posible.

Con todo esto, doy por finalizada una de las mejores, y a la vez más duras, épocas de mi vida.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se va a realizar un estudio del funcionamiento de la depuradora en la empresa Eslava Plásticos S.A, localizada en la provincia de Valencia (Quart de Poblet). En esta depuradora se trata agua residual de alta carga procedente del lavado de plástico, que es el paso previo a su posterior reciclado. Esta depuradora consta de diversos tratamientos unitarios: pretratamiento, tratamiento físico-químico, tratamiento biológico y deshidratación de fangos.

La planta depuradora reutiliza parte del agua tratada en el proceso, en concreto la salida del tratamiento físico-químico, pero actualmente no puede reutilizar mucha cantidad, debido a que los sólidos en suspensión y la conductividad no lo permiten. Es por ello, que se va a realizar un estudio del proceso de coagulación-floculación que tiene lugar en el tratamiento primario (físico-químico), para optimizar el proceso. Para ello, se llevarán a cabo ensayos jar-test para estudiar la influencia de los siguientes parámetros: concentraciones aplicadas de coagulante y floculante y pH del agua a tratar. La finalidad es disminuir la conductividad final del agua tratada y los sólidos en suspensión, que son parámetros críticos en este proceso, ya que de ello depende la cantidad de agua que se puede reutilizar en el proceso.

También se va a realizar un estudio de la relación que tienen los sólidos en suspensión presentes en el agua residual con la cantidad de productos químicos a dosificar. Este tipo de ensayo se realizará con vistas a calcular la mejora, tanto en ahorro de reactivos como en los parámetros críticos del proceso, que supondría introducir un filtrado entre 300 y 150 micras, tras el filtrado a 500 micras que realiza actualmente la empresa.

Tras evaluar los resultados obtenidos experimentalmente, se realizará el diseño de la planta de depuración para el tratamiento de 500 m³/d de agua residual. Para realizar dicho diseño se partirá de la instalación que se tiene actualmente, incluyendo algunas propuestas de mejora.

Con este TFG, se pretende fomentar el aprovechamiento del agua residual tratada en la depuradora dentro de la empresa, contribuyendo con ello al objetivo de alcanzar una economía circular. Además, cuanto mayor sea la cantidad de agua a recircular, se contribuirá en mayor medida a alcanzar varios de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) planteados en la Agenda 2030, como son el ODS 6-Agua limpia y saneamiento y el ODS 12-Producción y consumo responsables.

Palabras clave: Limpieza de plásticos, agua residual, coagulación-floculación, Jar-test, conductividad, sólidos en suspensión.

RESUM

En el present Treball Fi de Grau (TFG) es realitzarà un estudi del funcionament de la depuradora en l'empresa Eslava Plásticos S.A, localitzada a la província de València (Quart de Poblet). En aquesta depuradora es tracta aigua residual d'alta càrrega procedent de la rentada de plàstic, que és el pas previ al seu posterior reciclatge. Aquesta depuradora consta de diversos tractaments unitaris: pretractament, tractament físic-químic, tractament biològic i deshidratació de fangs.

La planta depuradora reutilitza part de l'aigua tractada en el procés, en concret la sortida del tractament físic-químic, però actualment no pot reutilitzar molta quantitat, ja que els sòlids en suspensió i la conductivitat no ho permeten. És per això, que es realitzarà un estudi del procés de coagulació-floculació que té lloc en el tractament primari (físic-químic), per a optimitzar el procés. Per a això, es duran a terme assajos jar-test per estudiar la influència dels següents paràmetres: concentracions aplicades de coagulant i floculant i pH de l'aigua a tractar. La finalitat és disminuir la conductivitat final de l'aigua tractada i els sòlids en suspensió, que són paràmetres crítics en aquest procés, ja que d'això depèn la quantitat d'aigua que es pot reutilitzar en el procés.

També es realitzarà un estudi de la relació que tenen els sòlids en suspensió presents en l'aigua residual amb la quantitat de productes químics a dosificar. Aquest tipus d'assaig es realitzarà amb vista a calcular la millora, tant en estalvi de reactius com en els paràmetres crítics del procés, que suposaria introduir un filtrat entre 300 i 150 micres, després del filtrat a 500 micres que realitza actualment l'empresa.

Després d'avaluar els resultats obtinguts experimentalment, es realitzarà el disseny de la planta de depuració per al tractament de 500 m³/d d'aigua residual. Per a realitzar aquest disseny es partirà de la instal·lació que es té actualment, incloent algunes propostes de millora.

Amb aquest TFG, es pretén fomentar l'aprofitament de l'aigua residual tractada en la depuradora dins de l'empresa, contribuint amb això a l'objectiu d'aconseguir una economia circular. A més, com més gran siga la quantitat d'aigua a recircular, es contribuirà en major mesura a aconseguir diversos dels objectius de desenvolupament sostenible (ODS) plantejats a l'Agenda 2030, com són el ODS 6-Agua limpa y saneamiento i el ODS 12-Producción y consumo responsables.

Paraules clau: Neteja de plàstics, aigua residual, coagulació-floculació, jar-test, conductivitat, sòlids en suspensió.

ABSTRACT

In this final work, the performance of the industrial wastewater treatment plant of the company *Eslava Plásticos S.A.*, located in the province of Valencia (Quart de Poblet), have been studied. This treatment plant treats highly charged residual water from the washing of plastics, which is the step prior to its subsequent recycling. This plant is divided in several stages: pre-treatment, physical and chemical treatment, biological treatment, and sludge treatment.

Part of the wastewater treated in the wastewater treatment plant, specifically the effluent of physical-chemical treatment, is reused in the company. However, it cannot reuse a big quantity currently, mainly due to the suspended solids and the conductivity values. For this reason, a study of the coagulation-flocculation process (physical and chemical) is studied in this work, to optimize it. Jar-Test studies will be carried out to determine the influence of the following parameters: coagulant and flocculant concentrations and the wastewater pH. The objective is to decrease the final conductivity and suspended solids concentration, which are critical parameters during this process, because the quality of the water that can be reused depends on them.

In addition, it is analyzed the relation between the suspended solids in the wastewater and the quantity of chemical products added. These experiments will be carried out to calculate the improvement in both the reagents savings and critical parameters of the process. This means introducing a filter between 300 and 150µm, in contrast to the 500µm that the industry currently has. After evaluating the experimental results, the design of the wastewater treatment plant with a flow of 500m³/d of wastewater will be carried out. For this design, some proposals have been included in order to improve the current wastewater treatment plant.

In this final work, one of the objectives is to promote the exploitation and recycling of the wastewater treated in the plant, in order to promote a circular economy. Furthermore, with the reuse of the wastewater treated it is achieved to foment and work the Sustainable Development Goals (SDG) presented in the 2030 Agenda, like SDG 6-Clean water and sanitation and 12-Responsible consumption and production.

Keywords: washing of plastics, wastewater, coagulation-flocculation, Jar-Test, conductivity, suspended solids.

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Documento 1. Memoria
- Documento 2. Presupuesto
- Documento 3. Planos

DOCUMENTO 1

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. JUSTIFICACIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA Y MEDIOAMBIENTAL.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	2
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN	4
3.1 INDUSTRIA DEL RECICLADO DE PLÁSTICOS	4
3.1.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS	5
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	7
3.3 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS Y PROBLEMÁTICA ASOCIADA.....	8
3.4 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EN ESTUDIO	10
3.4.1 PRETRATAMIENTO	12
3.4.1.1 DESBASTE	12
3.4.1.2 HOMOGENEIZACIÓN	14
3.4.2 TRATAMIENTO PRIMARIO: FÍSICO-QUÍMICO.....	14
3.4.2.1 SISTEMA DAF.....	15
3.4.2.2 PLANTA DE PREPARACIÓN DE POLIELECTROLITO PARA EL TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO	18
3.4.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO: REACTOR BIOLÓGICO AEROBIO Y DECANTADOR SECUNDARIO	19
3.4.4 TRATAMIENTO DE FANGOS	21
3.4.4.1 HOMOGENEIZADOR DE LODOS	21
3.4.4.2 DESHIDRACIÓN DE FANGOS.....	22
3.5. REUTILIZACIÓN DE AGUAS Y LEGISLACIÓN APLICABLE.....	23
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	26
4.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	26
4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL: ENSAYOS JAR-TEST	27
4.3 PROCEDIMIENTO ANALÍTICO	29
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	33
5.1 ENSAYOS CON EL AGUA RESIDUAL	33
5.1.1 ENSAYOS ADICIONALES.....	36
5.2 ENSAYOS CON EL AGUA RESIDUAL DILUIDA	37
CAPÍTULO 6. DISEÑO	42
CAPÍTULO 7. ESTUDIO ECONÓMICO	48
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	53
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de reciclado.....	7
Figura 2. Etapas de la depuradora.....	12
Figura 3. Tamiz vibratorio de 500 micras	13
Figura 4. Pozo de bombeo 1.....	13
Figura 5. Rototamiz	13
Figura 6. Pozo de bombeo 2.....	14
Figura 7. Homogeneizador	14
Figura 8. Sistema compuesto por los 3 DAFs	15
Figura 9. Cámara de flotación	16
Figura 10. Cámara de aguas claras	16
Figura 11. Bombas dosificadoras de sosa cáustica y coagulante	17
Figura 12. Pozo de aguas reutilizadas	17
Figura 13. Planta de preparación del polielectrolito utilizado en el tratamiento primario	18
Figura 14. Cámara de preparación, de maduración y de almacenaje del polielectrolito sólido.....	18
Figura 15. Principio de funcionamiento de los procesos aerobios	19
Figura 16. Reactor biológico aerobio	19
Figura 17. Soplante de émbolos rotativos.....	20
Figura 18. Decantador secundario	21
Figura 19. Homogeneizador de fangos.....	21
Figura 20. Planta de preparación de polielectrolito utilizado en el tratamiento de fangos	22
Figura 21. Decanter centrifugo.....	23
Figura 22. Equipo Jar-Test (FLOCUMATIC)	27
Figura 23. pH-metro GLP 21+	30
Figura 24. Conductímetro GLP 31+	30
Figura 25. Turbidímetro TL2310.....	30
Figura 26. Rampa de filtración para SS.....	31
Figura 27. Probetas para medir el volumen sedimentado.....	31
Figura 28. a) Termorreactor TR 300. b) Espectrofotómetro Spectroquant NOVA 30.....	32
Figura 29. Superficie de respuesta para la variable de salida Cond+Turb+SS, al tratar el agua residual variando pH y concentración de coagulante, para 0,05 mL/L de floculante	34
Figura 30. Superficie de respuesta para estimar el pH óptimo.....	34
Figura 31. Superficie de respuesta para apreciar el coagulante mínimo.....	35
Figura 32. SS tras el tratamiento físico-químico para las muestras diluidas.....	39
Figura 33. Turbidez tras el tratamiento físico-químico para las muestras diluidas	40

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

Figura 34. Conductividad tras el tratamiento físico-químico para las muestras diluidas	40
Figura 35. Agua residual de partida	42
Figura 36. Diagrama de bloques de la planta depuradora propuesta	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del agua residual	11
Tabla 2. Valores límite vertido a Red de Alcantarillado municipal de Quart de Poblet	24
Tabla 3. Valores límite de reutilización	25
Tabla 4. Valores de pH, concentración de coagulante y floculante	26
Tabla 5. Parámetros de la muestra de partida y de su clarificado	33
Tabla 6. Resultados obtenidos para los ensayos óptimos.....	36
Tabla 7. Parámetros de la muestra de partida (M-2).....	36
Tabla 8. Ensayos con diferentes floculantes (0,1 mL/L de coagulante y 0,044 mL/L de floculante) a tres pHs.....	37
Tabla 9. Caracterización de las muestras diluidas.....	38
Tabla 10. Ensayos con el agua residual diluida al pH de la muestra	39
Tabla 11. Características del agua residual tras el tamiz.....	44
Tabla 12. Características esperadas para el agua tras el nuevo pretratamiento (tamiz + sedimentación).....	45
Tabla 13. Características esperadas para el agua residual tras el nuevo tratamiento físico-químico ..	46
Tabla 14. Tarifa de químicos	48
Tabla 15. Estudio económico de los reactivos del sistema actual en la empresa Eslava Plásticos S.A.	48
Tabla 16. Estudio económico de los reactivos en el diseño propuesto	49
Tabla 17. Estudio económico del consumo eléctrico en la planta actual	49
Tabla 18. Estudio económico del consumo eléctrico en el diseño propuesto	50
Tabla 19. Mano de obra en la planta actual.....	51
Tabla 20. Mano de obra en el diseño propuesto	51
Tabla 21. Resumen estudio económico	52

CAPÍTULO 1. JUSTIFICACIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA Y MEDIOAMBIENTAL

El agua es uno de los recursos naturales más importantes para la vida, ya que se utiliza en multitud de ámbitos: consumo humano, doméstico, industrial, agrícola, urbano, etc. Además, es fuente de vida para todos los seres vivos del planeta.

Constituye alrededor del 72 % de la superficie de la Tierra y del 50 al 90 % de la masa de los organismos vivos. La localización de esta se sitúa en los océanos, los glaciares, las aguas continentales (superficiales y subterráneas) y en la atmósfera. Es una sustancia abundante, pero aproximadamente solo el 0,7 % de ella existe en forma de aguas superficiales, donde suele tener las condiciones físicas y químicas más convenientes para el consumo humano (si previamente se ha potabilizado), pudiéndose destinar a la alimentación, la higiene y varias actividades humanas como la agricultura y la industria. Debido al crecimiento de la población y de la industrialización se genera mayor cantidad de agua contaminada y se llega a superar la capacidad de autodepuración de la naturaleza, por ello es necesario depurar el agua antes de verterla al medio ambiente, eliminando todos los contaminantes y desechos que pueda llevar para poder darle un nuevo uso.

En el presente Trabajo Fin de Grado, se quiere promover la reutilización del agua residual tratada en la depuradora en estudio, optimizando el proceso de coagulación-floculación, así se ayuda al objetivo de fomentar la economía circular, además de que conlleva un ahorro hidráulico y económico. La economía circular es un modelo de negocio en el que se evita el total desecho de los residuos, reutilizando el empleo de éstos una y otra vez. Este modelo se puede aplicar al agua, ya que es un recurso finito y renovable, por ello se quiere obtener el máximo rendimiento posible del tratamiento de depuración, para posteriormente reutilizarse en la propia y reducir la generación de residuos todo lo posible así como tener un proceso más económico (Cordero Ferrero, 2019).

Además, cuanto mayor sea la proporción de agua a recircular en el proceso, se contribuirá en mayor proporción a alcanzar varios de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) planteados en la Agenda 2030 (*Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030 - Agenda 2030*, s. f.). El ODS 6-Agua limpia y saneamiento consiste en garantizar el suministro de agua en calidad y cantidad suficientes, para garantizar el buen desarrollo de la sociedad y para luchar contra la pobreza y las enfermedades en cualquier parte del mundo. El trabajo realizado contribuye a conseguir esta ODS, ya que se persigue una optimización del proceso físico-químico de la depuradora en estudio, para que el agua se depure correctamente, utilizando la cantidad justa de químicos, garantizando la calidad requerida. El ODS 12-Producción y consumo responsables se basa en promover la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, fomentar la gestión ecológica de los productos químicos y reducir la generación de residuos. También se pretende ejecutar la puesta en marcha de prácticas sostenibles en empresas y el acceso universal a toda la información sobre la vida en la naturaleza. El trabajo también contribuye a lograr esta ODS, ya que se busca la reutilización de la mayor parte de agua del proceso y el mínimo consumo de reactivos, logrando una mínima generación de residuos.

1.2 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

El trabajo fin de grado tiene como objeto utilizar los conocimientos adquiridos a lo largo de los cuatro años universitarios del Grado en Ingeniería Química, en el presente trabajo de investigación, demostrando el aprendizaje y la capacidad de aplicación de éstos. Los conocimientos aplicados se basan principalmente en las asignaturas Tecnología del Medio Ambiente (12279), Ampliación de Ciencia de Materiales (12273), Proyectos en Ingeniería Química (12280) y Experimentación en Ingeniería Química II (12291).

Además, otro objetivo de este trabajo es conseguir los créditos correspondientes a la asignatura Trabajo Fin de Grado (12330) para la finalización del Grado en Ingeniería Química en la Universitat Politècnica de València.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

El **objetivo principal** que persigue este trabajo es la optimización del proceso de depuración de la estación depuradora de la empresa Eslava Plásticos S.A. La mejora que se pretende hacer es tanto para que el proceso funcione mejor, minimizando la conductividad y sólidos en suspensión, como para reducir los gastos económicos y la generación de residuos. Con el fin de cumplir este objetivo, se plantean una serie de **objetivos específicos**:

- Estudio del proceso de coagulación-floculación para el agua residual generada en la empresa mediante ensayos Jar-Test, para poder encontrar la concentración de coagulante y floculante óptimas y el pH óptimo del agua a tratar. En base a los resultados, se seleccionarán las condiciones óptimas para la operación.
- Estudio de la relación de los sólidos en suspensión que contiene el agua residual con la cantidad de productos químicos a dosificar. Este análisis, se llevará a cabo a partir de diluciones de la muestra de partida y con ensayos Jar-Test, utilizando las condiciones óptimas del objetivo anterior y reduciendo estas concentraciones.
- Diseño de la planta de depuración para el tratamiento de 500 m³/día de agua residual. Se partirá de la instalación actual de la empresa, incluyendo propuestas de mejora. Y una vez el diseño esté completo se realizará un presupuesto económico de esta propuesta.
- Realizar un estudio económico del tratamiento de esta agua residual industrial y estimar el coste final del agua tratada (€/m³).

CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN

3.1 INDUSTRIA DEL RECICLADO DE PLÁSTICOS

En este apartado se va a comentar la caracterización de los plásticos con sus propiedades y su clasificación, el reciclaje de los plásticos y los tipos de reciclaje que existen.

3.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

El uso del plástico se ha ido incrementado en la sociedad hasta convertirse en un material esencial para la vida humana, insustituible por otros materiales en muchas aplicaciones. Pero este material presenta dos grandes problemas, es difícil de reciclar y es de origen fósil.

Los plásticos son polímeros constituidos por macromoléculas formadas a partir de estructuras sencillas (monómeros) que están conectadas entre sí de forma lineal, ramificada o entrecruzada.

Normalmente, se entiende por plástico cualquier material formado mayoritariamente por un polímero (natural o sintético) con los correspondientes aditivos. Las propiedades físico-químicas que destacan de estos materiales son: bajo peso, resistencia al ataque químico, resistencia al envejecimiento, estabilidad térmica, permeabilidad, adherencia, baja conductividad térmica y eléctrica, resistencia a ácidos y disolventes, etc. (Castells & de Gracia, 2012).

De acuerdo con Hachi Quintana & Rodríguez Mejía (2010), los plásticos se pueden clasificar según su plasticidad en termoplásticos o termoestables:

- Los termoplásticos fluyen como un líquido viscoso cuando se calientan y se solidifican cuando se enfrían. Además, conservan sus propiedades, aunque se caliente o se enfríe el material. Son moldeables plásticamente, reciclables y es el tipo de plástico que más se utiliza. Los principales tipos son el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, el cloruro de polivinilo, el nylon y el polietileno tereftalato.
- Los termoestables funden cuando se calientan y se solidifican al aplicar aún más calor. Éstos pueden reprocesarse por fusión, pero no pueden ser recalentados ni remodelados. Son generalmente más resistentes, pero más duros y frágiles. Los principales tipos son resina de poliéster, formaldehído de melanina, urea-formaldehído y fenol-formaldehído. Estos plásticos no se suelen reciclar.

Los materiales con los que trabaja la empresa de estudio se van a detallar a continuación (*Eslava Plásticos - Reciclado, Compounding, Distribución*, s. f.):

- El polipropileno es un polímero termoplástico que se obtiene a partir de la polimerización del propileno. Algunos de los usos más comunes son protecciones en agricultura, tuberías de riego, envases y embalajes, extrusión, inyección y termoformado, etc. Su fórmula química es (C₃H₆)_x y sus principales características son la resistencia química y el aislamiento eléctrico.

- El polietileno es un polímero termoplástico obtenido de la polimerización del etileno, y puede ser de alta o de baja densidad, ambos son utilizados en protecciones en agricultura, envases y embalajes, piezas técnicas, filmes para bolsas y láminas, etc. Su fórmula química es (CH₂)_x y se caracteriza por ser insoluble en agua, por su alta resistencia al desgaste y su resistencia química.
- El poliestireno es también un polímero termoplástico creado a partir de la polimerización del estireno y se usa en envases y embalajes, piezas técnicas, etc. Su fórmula es (C₈H₈)_x y destaca por ser aislante térmico y resistente al agua y químicos.

3.1.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS

La gestión de residuos se compone de la recogida, el transporte y el tratamiento de los residuos (plantas de clasificación, reciclado, valorización energética y vertedero controlado). El primer punto es incentivar la minimización del volumen y el peso de los residuos, y después dar prioridad a la reutilización, el reciclado y la valorización de los residuos sobre otras técnicas (eliminación).

Toda gestión de residuos debe comenzar con la reducción en su propia fuente, en el caso de los plásticos viene por parte de la industria petroquímica, la fabricante de diferentes tipos de plásticos, de la industria transformadora, la que a partir de los plásticos fabrica otros productos finales y del envasador (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010).

En las plantas de clasificación se realiza la separación de aquellos elementos de los residuos que puedan ser reciclados, si previamente se ha aplicado una recogida selectiva de los residuos se aumenta el rendimiento de la planta. El reciclaje consiste en recuperar los desechos sólidos, para poder reutilizarlos o aprovecharlos como materias primas, para así darle una nueva vida a los residuos, pudiéndose reducir el uso de energía y nuevas materias primas, suponiendo además un ahorro económico y una disminución del impacto ambiental producido por los residuos (Bolaños Zea, 2019).

El reciclaje alarga la vida útil de los materiales plásticos, ya que posibilita la reutilización de los materiales para convertirlos nuevamente en productos plásticos semejantes o diferentes a los originales. Con ello, se reduce el uso de combustibles no renovables, puesto que los plásticos provienen del petróleo y la necesidad de esta materia prima se reduce mediante el uso de granza recuperada de residuos plásticos (Carranza Gaona, 2010a). Pero el reciclado también conlleva una serie de problemas: cambios en su estructura debido a altas temperaturas, su reciclado es limitado, gran volumen de almacenamiento, composición no uniforme, limpieza de los residuos y necesidad de separación de los diferentes polímeros.

La otra alternativa es la valorización energética, que consiste en aprovechar el contenido energético de los residuos. Esta valorización se realiza mediante la recuperación de la energía contenida en los gases de combustión producidos por la incineración de los residuos.

3.1.3 TIPOS DE RECICLAJE

Según el mecanismo de reciclaje y el tipo de valorización, se pueden diferenciar tres tipos: mecánico, químico y energético (Hachi Quintana & Rodríguez Mejía, 2010).

- **Reciclaje mecánico**

Es uno de los métodos más sencillos para recuperar los residuos plásticos, consiste en la conversión de los desechos plásticos en granza, por lo que el plástico puede volver a ser utilizado. Los tipos de plástico que se pueden reciclar mediante este método son el polietileno, el polipropileno, el polietileno tereftalato y el poliestireno, pero cada uno de ellos se tiene que reciclar por separado, previamente es conveniente una recogida selectiva de estos y tras ello una separación mediante equipos de separación óptica. El reciclaje mecánico consta de varias etapas:

- Trituración; el plástico se fragmenta en pequeñas porciones con un molino especial.
- Eliminación de contaminantes no plásticos.
- Lavado; se elimina la suciedad que llevan los desechos plásticos, el proceso acaba cuando la suciedad permanece suspendida en el agua sin que se fije al producto.
- Secado; se retira el agua que lleva el material, se lleva a cabo mediante centrifugado, que elimina el exceso de agua.
- Aglutinado; se completa el secado y se compacta el material, reduciendo el volumen. También se pueden incorporar aditivos, como cargas, pigmentos o lubricantes.
- Extrusión para formar pellets; se funde y se vuelve la masa plástica homogénea. A la salida de la extrusora se hace pasar por un filtro y por un granulador para transformarlos en granza. Esta granza se utiliza en la fabricación de nuevos productos plásticos.

- **Reciclaje químico**

Este reciclaje consiste en diferentes procesos en los que las moléculas de los polímeros son rotas para dar origen a la materia prima básica, que puede utilizarse para fabricar nuevos plásticos. La aplicación de este tipo de reciclaje es factible para mezclas de polímeros, es decir se evita la separación de los tipos de plásticos.

Los principales procesos son:

- Pirólisis; es el craqueo de moléculas debido al calentamiento de estas en el vacío, el proceso produce hidrocarburos que pueden ser procesados posteriormente en refinerías.
- Hidrogenación; los plásticos se tratan con hidrógeno y calor, así se rompen las cadenas poliméricas y se convierten en petróleo sintético que se podrá utilizar en refinerías y plantas químicas.
- Gasificación; los plásticos se calientan con aire u oxígeno y se obtienen gases de síntesis como el monóxido de carbono e hidrógeno, que se podrán utilizar para producir metanol o amoníaco.

- Quimiolisis; es un proceso que se aplica a poliésteres, poliuretanos, poliacetales y poliamidas. Se basa en la aplicación de procesos solvolíticos para reciclarlos y transformarlos de nuevo en los monómeros básicos para la producción de nuevos plásticos.
- **Valorización energética**

Este método se aconseja en plásticos muy sucios, deteriorados o mezclados con otros materiales de difícil separación, se aplica a los plásticos que no pueden ser tratados por reciclaje mecánico ni químico, además se evita la separación de los tipos de plástico. La valorización energética se realiza mediante la incineración de los residuos, que se introducen en un horno en el que se produce la combustión en presencia de oxígeno, y donde el calor que se desprende se utiliza para calentar un líquido que pasará a estado gaseoso y generará energía (Carranza Gaona, 2010b).

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La estación depuradora que se estudia en el presente TFG pertenece a la empresa Eslava Plásticos S.A, la cual fue fundada hace más de 40 años. Esta empresa se dedica a la recuperación y el reciclado de materiales plásticos y a la comercialización de subproductos plásticos reclasificados y polímeros vírgenes. La capacidad anual de producción es de 30.000 toneladas de plástico reciclado, complementada con 30.000 toneladas de distribución. Como ya se ha descrito en el apartado anterior, los materiales con los que trabaja son polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE) y poliestireno (PS).

La empresa cuenta principalmente con dos plantas en las que se lleva a cabo el reciclado de los materiales plásticos mecánicamente, una de ellas dedicada a la selección y el lavado y la otra al extrusionado, representado este proceso en la Figura 1. En la planta de selección y lavado solo se trata el polietileno de baja densidad. Los plásticos que llegan a dicha planta se seleccionan obteniendo solo el producto deseado mediante separación óptica y después se lava, para enviarlo posteriormente al proceso de extrusión. Todos los demás productos que se tratan en la planta de extrusión llegan a la empresa ya seleccionados y limpios, listos para moldear. La planta de extrusionado se compone de cuatro líneas de extrusión, en las que en cada una de ellas se lleva a cabo el procesado de cada tipo de plástico (PP, HDPE, LDPE, PS), dándole la forma y el color deseados.

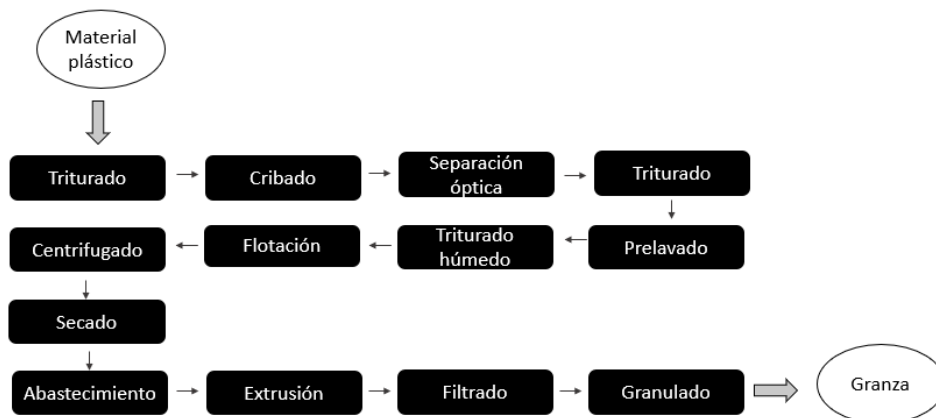


Figura 1. Proceso de reciclado

3.3 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS Y PROBLEMÁTICA ASOCIADA

3.3.1 CARACTERÍSTICAS Y PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES

El agua es un elemento fundamental, fuente de vida de todos los seres vivos, necesaria para el proceso de las funciones orgánicas, además de imprescindible para el uso humano, tal como la alimentación, la salud y la industria.

Las aguas naturales pueden ser utilizadas directamente, por ejemplo, para uso agrícola, o ser potabilizadas en una estación de tratamiento de aguas potables (ETAP) en la cual se trata el agua para que pueda ser consumida por el ser humano sin ningún tipo de riesgo. Después de pasar por la ETAP, ésta puede ser destinada a usos domésticos o industriales. Tras el uso en cualquiera de estas dos opciones, el agua tiene que ser tratada en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR). Si proviene de una industria, debe tratarse en una estación depuradora de aguas residuales industriales (EDARI), si no cumple con los parámetros de la ordenanza municipal, o bien, tras la correspondiente autorización, tratarse en una estación depuradora de aguas residuales urbanas (EDARU), a la que llegan las aguas residuales urbanas e industriales, las infiltraciones y aportaciones incontroladas al alcantarillado y las aguas pluviales.

La necesidad constante del ser humano por el uso de este recurso natural da como resultado la contaminación diaria de grandes cantidades de agua, lo que reduce la calidad, además de la cantidad de agua disponible para el consumo humano. Esto sumado a una población mundial en crecimiento transforma este fenómeno en un problema cada vez más grave (Muñoz Cruz, 2008).

La contaminación del agua se define como “la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o introducir condiciones en el agua que impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica” (Fernández Rivas, 2018).

Un agua residual es aquella que se genera tras el uso de un agua natural o de red en cualquier actividad. La generación de estas aguas es inevitable en las actividades humanas, las cuales modifican las características del agua inicial, contaminándolas e impidiendo su uso posterior, además de poder ser transmisoras de enfermedades, y por lo tanto es un problema que se debe resolver.

Las aguas residuales, además de contener patógenos, contienen otras muchas sustancias contaminantes. En función de la procedencia de estas aguas, el tipo de contaminantes varía y pueden estar presentes de forma coloidal o disuelta. De entre ellos, cabría destacar la materia orgánica biodegradable y el problema de la eutrofización, debido a la presencia de nutrientes (nitrógeno y fósforo), que produce en el crecimiento desmesurado de un cierto tipo de algas que crecen en aguas cerradas y suponen un problema cuando se acumulan, pues consumen mucha cantidad de oxígeno, y cuando este se va acabando, las algas mueren y se convierten en sustrato para los microorganismos, que forman capas en la superficie del agua que impiden el paso de la luz, por lo tanto la disminución de la biodiversidad. Además, en función del tipo de agua residual, también pueden encontrarse sustancias tóxicas y peligrosas (Robles et al., 2011).

Es por todo ello que, si no se depuran las aguas residuales, se ocasionan daños al medio ambiente, impactando en los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres, además de ocasionar riesgos y daños para la salud pública, de ahí la gran importancia del tratamiento de estas aguas antes de su vertido.

En el tratamiento de las aguas residuales, se llevan a cabo procesos físicos, químicos y biológicos destinados a disminuir los contaminantes y permitir el vertido de las aguas residuales depuradas, minimizando los riesgos para el medio ambiente y la población (Fernández Rivas, 2018).

3.3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Existen muchos tipos de aguas residuales, las cuales se pueden clasificar según su procedencia, sus características químicas, físicas y biológicas o su estado.

Seguidamente se clasifican las aguas residuales según su procedencia (Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, 1995):

- **Urbanas:** aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial.
- **Domésticas:** aguas residuales procedentes de zonas de viviendas y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.
- **Industriales:** todas las aguas residuales generadas en empresas con cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.

A continuación, se clasifican según sus características químicas, físicas y biológicas (Muñoz Cruz, 2008):

- **Potables:** aguas que pueden ser consumidas por los seres humanos y animales, sin riesgo de contraer ninguna enfermedad ni patología. Para que el agua se pueda clasificar como potable ha debido de ser tratada para el consumo humano. La salinidad del agua potable está en torno a 300 ppm. Las causas de que un agua no sea potable son las bacterias y virus, los minerales en forma de partículas o disueltos, los productos tóxicos y las partículas en suspensión.
- **Saladas:** aguas en las que la concentración de sales es relativamente alta, su salinidad es de 30000 ppm. El agua es salada por la alta concentración de sales minerales disueltas que tiene, predominando el cloruro sódico. Esta se puede encontrar tanto en los océanos como en los mares de la Tierra.
- **Salobres:** aguas que tiene mayor cantidad de sal disuelta que las aguas dulces, pero menos que las aguas saladas, su salinidad es de 3000 ppm. Este tipo de agua se obtiene a partir de la mezcla de agua dulce y agua salada, por ejemplo, se encuentra en los deltas al mezclarse el agua del río con la del mar, o también en algunos acuíferos con rocas salinas.
- **Dulces:** aguas que contienen cantidades mínimas de sales disueltas, pudiéndose distinguir así del agua del mar. El agua dulce se encuentra principalmente en las aguas superficiales y subterráneas.

- **Duras:** aguas que contienen un alto nivel de minerales, pudiéndose destacar carbonatos de magnesio y calcio y sulfatos de azufre y hierro, poseen una dureza superior a 120 mg de carbonato cálcico por litro (mg CaCO₃/L).
- **Blandas:** aguas que tienen muy poca cantidad de cloruro sódico y de iones de calcio y magnesio, su dureza es ínfima. Siempre es dulce y puede ser de diferentes colores, dependiendo de las partículas en suspensión que contenga.
- **Negras:** aguas contaminadas con sustancias fecales y orina, que provienen de desechos orgánicos. Se les denomina negras por el color que tienen y están constituidas por todas aguas que, son transportadas por la red de alcantarillado, e incluyen, a veces, las infiltraciones del agua y las aguas pluviales.
- **Grises:** o también denominadas aguas residuales no cloacales, son aguas generadas por los usos domésticos, en los cuales no figuran los desechos del retrete, ya que serían aguas cloacales. Las aguas grises suelen descomponerse más rápidamente que las aguas negras y tienen mucho menos fósforo y nitrógeno. Generalmente, estas aguas contienen un pequeño porcentaje de aguas negras.

Finalmente, según su estado:

- **Frescas:** aguas que contienen una concentración de oxígeno disuelto suficiente para que la degradación de materia biodegradable se produzca aeróbicamente.
- **Sépticas:** aguas que no tienen una concentración suficiente de oxígeno disuelto, la degradación que se produce es anaerobia, y produce malos olores y gases como metano y ácido sulfhídrico.

3.4 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EN ESTUDIO

Una EDARI es una planta de tratamiento de agua aplicada al tratamiento de aguas residuales de un sector industrial. Como ya se ha comentado, en el caso en estudio la planta depuradora trata agua residual proveniente de un lavado de plásticos, agua de alta carga orgánica, sólidos (plásticos y no plásticos) y conductividad. Su finalidad es depurar estas aguas y eliminar los contaminantes, y que sea posible el vertido al alcantarillado o su reutilización directa.

Las estaciones depuradoras convencionales constan de tres tipos de procesos: físicos, químicos y biológicos. Los físicos son los que llevan a cabo una separación física de los sólidos; los químicos son los que suponen la adición de productos químicos al agua residual para modificar sus propiedades; y los tratamientos biológicos consisten en procesos biológicos en los que los microorganismos actúan sobre la materia orgánica biodegradable para transformarla en productos inocuos (CO₂ y H₂O) (Jorge, 2020).

Generalmente, los tipos de tratamientos en una EDARI son: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario y tratamiento de fangos.

- El pretratamiento tiene como objetivo la eliminación de la contaminación voluminosa, para proteger los procesos posteriores de abrasiones y obstrucciones.
- El tratamiento primario tiene como finalidad la eliminación de sólidos por medios físico-químicos. Por medios físicos se eliminan los sólidos sedimentables (y de la materia orgánica que los acompaña) gracias a sus características de tamaño y densidad, y por medios químicos se eliminan los sólidos en suspensión. Además, existen otras opciones de tratamiento como la modificación de pH, que sirve para mejorar el tratamiento primario o para preparar el agua para el tratamiento biológico secundario.
- El tratamiento secundario pretende eliminar la materia orgánica biodegradable (y los sólidos en suspensión no retenidos en tratamientos anteriores) mediante tratamiento biológico.
- El tratamiento terciario se utiliza para eliminar la materia orgánica no retenida en el proceso biológico (no biodegradable), para desinfectar el agua eliminando los patógenos presentes y/o para eliminar los sólidos en suspensión que todavía no han sido retenidos.
- El tratamiento de fangos sirve para reducir el volumen de fangos generado en las diferentes etapas del proceso, concentrándolo y deshidratándolo mediante diversas operaciones, para reducir su poder de fermentación estabilizándolo.

Según el manual de IqD InvesQuia, S.L. (2020), en el cual se describen los elementos que configuran la instalación de depuración de la empresa, se va a explicar el funcionamiento de dicha depuradora, la cual consta de los siguientes tratamientos unitarios:

- Pretratamiento.
- Tratamiento primario: físico-químico.
- Tratamiento secundario: biológico aerobio.
- Deshidratación de fangos.

Esta planta depuradora tiene que tratar el agua residual industrial producida por la fábrica durante la limpieza de los plásticos, tal y como ya se ha comentado, pudiéndose ver sus principales características en la Tabla 1. Estos datos se presentan en forma de rango de valores, ya que los parámetros del agua residual varían en función de la suciedad que pueda llevar el plástico.

Tabla 1. Características del agua residual

Parámetros	Valores promedio del agua residual
Caudal máximo	576 m ³ /día
pH	7 - 8
Conductividad	2000 – 3000 μ S/cm
Sólidos en suspensión (SS)	2000 – 5000 mg/L
Demanda química de oxígeno (DQO)	3000 – 4000 mg O ₂ /L

Por otro lado, en la Figura 2 se puede ver el diagrama de bloques que muestra todas las etapas de la depuradora, para poder entenderla mejor.

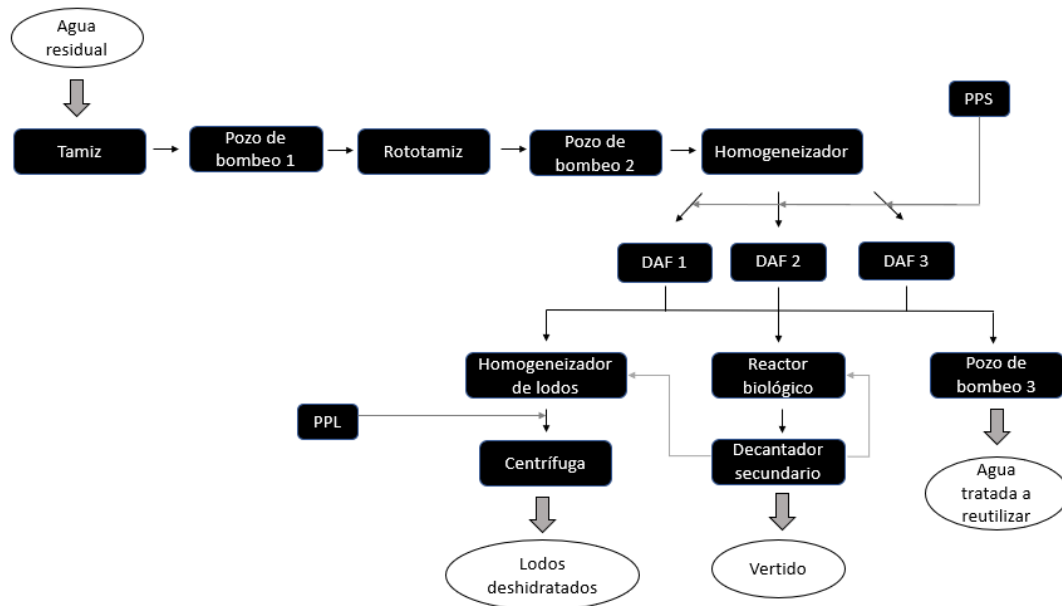


Figura 2. Etapas de la depuradora

A continuación, se describen cada una de las etapas del tratamiento en las que se incluyen cada uno de los equipos descritos en la Figura 2.

3.4.1 PRETRATAMIENTO

El pretratamiento es la etapa preliminar del tratamiento de la depuradora, comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen como finalidad separar del agua residual producida por la fábrica la mayor cantidad posible de materias, que por su tamaño o naturaleza podrían crear problemas en los tratamientos posteriores de depuración. Por lo tanto, el objetivo del pretratamiento es la eliminación de la contaminación (sólidos voluminosos, arenas y gravas, grasas) y proteger a los procesos posteriores de que sufran obstrucciones y abrasiones. A continuación, se indican las distintas etapas y equipos utilizados en esta etapa del proceso.

3.4.1.1 DESBASTE

Esta parte del tratamiento se realiza dentro de la planta de procesado mediante un tamiz dinámico vibratorio que filtra a 500 µm (Figura 3), el cual retiene los sólidos más grandes como papeles, plásticos grandes, etiquetas, botellas, etc. Las aguas residuales producidas en la planta industrial llegan al pozo de bombeo 1 (Figura 4) de entrada a la EDARI, libre de sólidos gruesos.



Figura 3. Tamiz vibratorio de 500 micras



Figura 4. Pozo de bombeo 1

Tal y como se ve en la figura 1, desde el pozo 1 pasa el agua residual a un rototamiz (Figura 5) antes de llegar al pozo 2 (Figura 6). Esta operación consiste en la separación de los sólidos de tamaño superior a 1,5 mm. En principio, la presencia del rototamiz no parece que tenga sentido, ya que el agua que llega ya ha pasado por un tamiz de 0,5 mm. Sin embargo, el rototamiz tiene una función de seguridad, ya que entre el pozo 1 y 2 hay un ingreso de agua de un canal perimetral que hay alrededor de la fábrica.



Figura 5. Rototamiz



Figura 6. Pozo de bombeo 2

3.4.1.2 HOMOGENEIZACIÓN

El tanque homogeneizador de 215 m³, ilustrado en la Figura 7, recoge las aguas provenientes del pozo de bombeo 2. Sus funciones son de homogeneización. Consigue uniformizar las propiedades del agua mediante una bomba soplante de aire y 20 difusores, que permiten mezclar las aguas y evitar que decanten los sólidos presentes en ellas. También hace la función de pulmón, que consiste en la acumulación de las aguas para poder trabajar con el tratamiento físico-químico posterior y amortiguar las variaciones de caudal y las concentraciones de DBO₅.



Figura 7. Homogeneizador

3.4.2 TRATAMIENTO PRIMARIO: FÍSICO-QUÍMICO

El objetivo principal del tratamiento físico-químico es la separación de los sólidos en suspensión (eliminación de la turbidez) y de la materia orgánica que los acompaña.

Para la separación de los sólidos presentes en el agua se dosifica un coagulante y un floculante y se utiliza aire cavitado para que estos sólidos separados floten y se puedan eliminar del sistema enviándolos a la etapa de deshidratación de fangos. Esta separación por flotación se consigue en los sistemas de flotación de aire (DAF).

3.4.2.1 SISTEMA DAF

El sistema se compone de tres DAFs, representados en la Figura 8, que son sistemas de flotación por aire cavitado. Es un tratamiento físico de separación de partículas en el cual las partículas en suspensión más ligeras que el agua ascienden hacia la superficie, y así se pueden retirar mediante un sistema de rasquetas. Cada uno de estos DAF está compuesto por un serpentín, una cámara de flotación y una cámara de aguas claras y tiene una capacidad máxima de 8 m³/h.

- **El serpentín:** consiste en un tubo de PVC donde se lleva a cabo la dosificación de productos químicos y la medición del pH del agua. En éste se realiza la etapa de coagulación y la etapa de floculación. Al final del serpentín se inyecta aire cavitado a través de las bombas de cavitación.
- **La cámara de flotación,** mostrada en la Figura 9, es la cámara más grande del DAF, dónde se produce la separación del fango flotado y del agua. En esta cámara es donde se encuentran las rasquetas que hacen que se desechen los fangos. En esta cámara hay un sistema de control de altura, que permite adaptar la altura del fango y del agua para así ajustar el arrastre del fango por parte del sistema de rasquetas.
- **La cámara de aguas claras,** mostrada en la Figura 10, es la última cámara del DAF, dónde se encuentra el agua clarificada. de la cámara de flotación En esta cámara el agua debe ser transparente, no debe tener turbidez. A la salida de esta cámara hay dos posibilidades, enviar esta agua tratada al reactor biológico o devolverla al interior de la fábrica para que sea reutilizada.



Figura 8. Sistema compuesto por los 3 DAFs

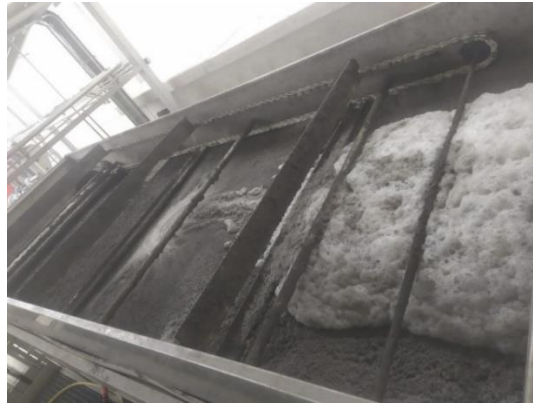


Figura 9. Cámara de flotación



Figura 10. Cámara de aguas claras

El presente TFG se centra en el tratamiento de coagulación-floculación, el cual es un proceso físico-químico de tratamiento de aguas en el que se convierte la materia coloidal en partículas susceptibles de separación por sedimentación. Además, se consigue aumentar el rendimiento de eliminación de los sólidos en suspensión. Los coloides son partículas que presentan cargas (generalmente de signo negativo) en su superficie, por lo cual se produce una repulsión eléctrica entre dichas partículas que imposibilita su agrupación (Sigalat Navarro, 2013). Las diferentes etapas del tratamiento físico-químico se van a describir con mayor detalle a continuación:

- **Etapas de coagulación:** dosificación de coagulante en el serpentín a través de una bomba dosificadora (Figura 11). El coagulante se utiliza para desestabilizar las partículas coloidales neutralizando las cargas eléctricas y así hacer que estas puedan unirse a otras partículas.
- **Etapas de ajuste de pH:** este ajuste se realiza a través de un controlador de pH y con la dosificación de sosa cáustica mediante bombas dosificadoras (Figura 11). Se mide el pH que tiene el agua y en función de éste se adiciona una cierta cantidad de sosa cáustica al 30%, para alcanzar el punto de consigna de 8,5 establecido en el mismo controlador. Para una lectura correcta de pH hay que realizar una limpieza del electrodo de pH semanalmente y evitar una medición errónea debido al ensuciamiento. Además, también hay que realizar una calibración mensual del electrodo de pH, para verificar su correcto funcionamiento.



Figura 11. Bombas dosificadoras de sosa cáustica y coagulante

- **Etapa de floculación:** dosificación de floculante a través de una bomba. El floculante se prepara a partir de un polielectrolito catiónico sólido para tener una disolución al 0,2%, más adelante se explicará la preparación del polielectrolito. Este se utiliza para agrupar los microfloculos formados gracias al coagulante.
- **Etapa de flotación:** inyección de aire cavitado mediante la bomba de cavitación. Esta etapa consiste en la inyección de microburbujas directamente al caudal del agua residual. Gracias a las burbujas formadas, se consigue que estas arrastren eficientemente partículas de pequeño y gran tamaño formadas durante la coagulación/floculación y que el fango flote. Para la formación de burbujas, se debe presurizar la mezcla de aire y agua en el DAF entre 2 y 4 bares.
- **Evacuación del fango flotado:** se realiza a través del sistema de rasquetas presentes en la parte superior de la cámara de flotación. El funcionamiento de estas es automático y temporizado, pudiéndose modificar estos tiempos.

Una vez se tiene el agua clarificada, en la cámara de aguas claras del DAF, se puede enviar al reactor biológico o al pozo 3, para ser reutilizada esta agua en la propia empresa (Figura 12).



Figura 12. Pozo de aguas reutilizadas

3.4.2.2 PLANTA DE PREPARACIÓN DE POLIELECTROLITO PARA EL TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO

El polielectrolito es un agente químico en forma de polvo que se utiliza para la aglutinación de sólidos coloidales. Este reactivo se debe preparar previamente y para ello es necesario elaborar una dilución con agua, ya que es un producto con una concentración determinada y que debe respetar unos tiempos de maduración y preparación. Durante este tiempo de maduración, el monómero se transforma en un polímero y en función del grado de polimerización, éste cumplirá con la función de adherirse a las partículas pequeñas, aumentar su tamaño y hacerlas flotar.

La planta de preparación del polielectrolito sólido (PPS), representada en la Figura 13, está compuesta por tres cámaras distintas (Figura 14), por una tolva con el polielectrolito en polvo y por un sinfín para la dosificación de polielectrolito. La primera cámara es de preparación del polielectrolito, donde está instalado un agitador para mezclarlo con el agua de red y dar lugar a un polielectrolito diluido. La segunda es una cámara de maduración con agitación, que da lugar al polielectrolito preparado y listo para ser dosificado. La tercera cámara sirve para el almacenaje de polielectrolito preparado hasta su dosificación.



Figura 13. Planta de preparación del polielectrolito utilizado en el tratamiento primario



Figura 14. Cámara de preparación, de maduración y de almacenaje del polielectrolito sólido

3.4.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO: REACTOR BIOLÓGICO AEROBIO Y DECANTADOR SECUNDARIO

La materia orgánica biodegradable que queda disuelta y en suspensión, así como el resto de las partículas sólidas que no se han eliminado en los tratamientos anteriores, son eliminadas mediante procesos biológicos. Los requisitos de este proceso son la presencia de nutrientes (nitrógeno y fósforo en las cantidades requeridas por los microorganismos), un pH adecuado en tratamientos biológicos (pH alrededor al pH neutro), la presencia de materia biodegradable y la ausencia de sustancias tóxicas.

Los microorganismos, gracias a la materia orgánica biodegradable, al oxígeno disuelto y a los nutrientes, degradan esta materia orgánica y generan los productos inocuos, que se pueden apreciar en la Figura 15.

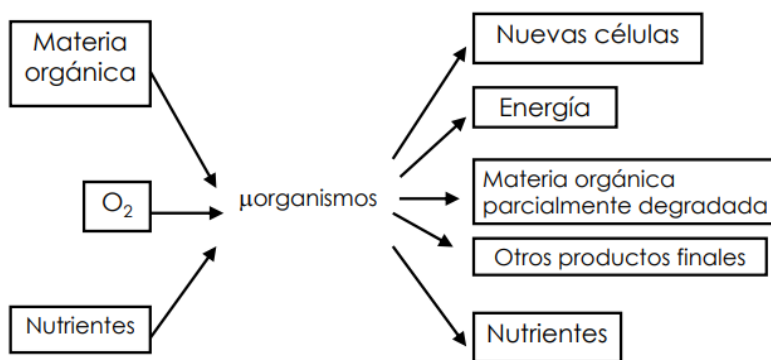


Figura 15. Principio de funcionamiento de los procesos aerobios
Figura adaptada de las diapositivas de la asignatura Tecnología del Medio Ambiente (2021)

En el reactor biológico de 448 m³ que se puede ver en la Figura 16, proliferan los microorganismos formando una mezcla sólido-líquido, denominada licor de mezcla. La correcta operación de la planta debe conducir a un licor de color marrón, fluido, con ausencia de olor y con presencia de espumas ligeras de color blanco. El tanque del reactor biológico funciona en continuo, de forma que recoge y trata las aguas claras provenientes de los DAFs.



Figura 16. Reactor biológico aerobio

La aireación del reactor biológico está compuesta por una soplante de émbolos rotativos (Figura 17) que inyecta aire al reactor biológico. Esta soplante está dentro de una cabina insonorizada que está ubicada al lado del reactor biológico. El aire que sale de esta soplante pasa a través de un colector y se inyecta al reactor a través de 3 subcolectores con 20 difusores de burbuja cada uno.

Es recomendable que, al menos, una vez al año se extraigan los difusores para recuperarlos utilizando ácido cítrico como antiincrustante. El mantenimiento correcto de los difusores hace que la transferencia de oxígeno sea mayor y que disminuya el consumo energético. Para un ahorro energético, también es necesario que la sonda de oxígeno esté calibrada (una vez al mes) y que actúe el variador de frecuencia de la soplante, de tal forma que cuando el oxígeno esté por encima de 1,5 ppm la soplante trabaje a mínimos y cuando esté por debajo de 0,5 ppm la soplante trabaje a máximos. Además, se debe efectuar semanalmente una limpieza de la sonda de oxígeno, para evitar una medición errónea debido al ensuciamiento. La vida útil del sensor está estimada entre 2 y 3 años, dependiendo de las condiciones a las que esté expuesto.



Figura 17. Soplante de émbolos rotativos

Tras el reactor biológico se dispone de un decantador secundario, mostrado en la Figura 18. En este decantador se realiza una separación física del agua tratada y el fango biológico. El agua clarificada sale por el vertedero de la zona superior y se envía por gravedad directamente al vertido de red de alcantarillado. Los fangos que sedimentan en el decantador secundario deben de ser recirculados al reactor biológico, para mantener la población de microorganismos vivos en el reactor, o purgados, para eliminar el exceso de fangos, debido al crecimiento de la biomasa, y/o evitar que haya microorganismos envejecidos en el licor mezcla. Por lo tanto, una parte de los lodos se envía al pozo de homogeneización de fangos para su tratamiento y otra parte se vuelve a enviar al reactor biológico.

El reactor debe estar funcionando 24 horas y la aireación no puede parar en ningún momento, ya que los microorganismos lo necesitan para llevar a cabo sus propios ciclos metabólicos y para depurar.



Figura 18. Decantador secundario

3.4.4 TRATAMIENTO DE FANGOS

El objetivo del tratamiento de fangos es reducir el volumen de fango eliminando la mayor cantidad de agua posible, así como estabilizarlo para evitar su fermentación.

3.4.4.1 HOMOGENEIZADOR DE LODOS

El homogeneizador de lodos consiste en un depósito de 40 m³, ilustrado en la Figura 19, al que llegan los fangos procedentes de los DAFs y los fangos en exceso provenientes del reactor biológico.

El fango formado en los DAF es enviado por gravedad y el fango del reactor a través de una bomba neumática. Este homogeneizador cuenta con un agitador que permite mezclar el fango y de una bomba soplante que inyecta aire en el mismo depósito, para ayudar a mezclar el fango y airearlo y así evitar problemas de olores. También cuenta con un nivel óptico que permite visualizar el nivel de fango en el depósito. Este equipo tiene un sistema de seguridad, de forma que si se alcanza el nivel máximo del homogeneizador se producirá una alarma y se detendrá el proceso DAF para evitar un posible desbordamiento.



Figura 19. Homogeneizador de fangos

3.4.4.2 PLANTA DE PREPARACIÓN DE POLIELECTROLITO PARA EL TRATAMIENTO DE FANGOS

El polielectrolito diluido se utiliza para acondicionar químicamente los lodos previamente a la etapa de deshidratación.

En este caso se utiliza un polielectrolito líquido, que también se prepara por dilución y para el que se respetan los correspondientes tiempos de maduración y flotación, como en el caso del utilizado en el tratamiento primario. En este tiempo el monómero se convierte en un polímero. La planta de preparación del polielectrolito líquido (PPL) está compuesta de tres cámaras distintas (Figura 20). La primera contiene el producto concentrado (polielectrolito líquido monómero). La segunda es una cámara de preparación donde hay un agitador para mezclar el polielectrolito con el agua de red y dar lugar al polielectrolito diluido, con una concentración del 0,12%. La tercera cámara sirve para la maduración y el almacenaje del polielectrolito diluido preparado. Esta operación se realiza de manera automática y controlada por los niveles que tienen los tanques. La dosificación del polielectrolito es de 500 L/h.



Figura 20. Planta de preparación de polielectrolito utilizado en el tratamiento de fangos

3.4.4.2 DESHIDRACIÓN DE FANGOS

Los lodos generados tanto en el tratamiento físico-químico DAF como en el reactor biológico están recogidos en el homogeneizador de lodos, tal y como ya se ha comentado. Cuando se alcanza el nivel de trabajo en el homogeneizador, se pone en marcha de forma automática la etapa de deshidratación, alimentando al decanter centrífugo (Figura 21) a través de una bomba. Previamente a la entrada al decanter centrífugo, los lodos se acondicionan químicamente con el polielectrolito proveniente de la planta PPL para mejorar la deshidratación del fango.

Los lodos deshidratados caen en un sinfín transportador y se envían a un contenedor de lodos, para que posteriormente se los lleve una empresa a fin de gestionarlos como un residuo peligroso. Las aguas resultantes son enviadas por gravedad al pozo de bombeo 1, donde se juntan con el agua residual de lavado para ser depuradas.

Cuando el nivel de lodos del homogeneizador es bajo (detectado por el nivel óptico), la etapa de deshidratación de lodos para automáticamente y se realiza una limpieza del decanter centrífugo, al abrirse una electroválvula que permite la entrada de agua de red durante un tiempo configurable. La limpieza del decanter centrífugo es muy importante y sobre todo de la válvula antirretorno, ya que si se produce un emboce, no llegan los fangos a este equipo y el pozo de homogeneización de lodos se llena.



Figura 21. Decanter centrífugo

3.5. REUTILIZACIÓN DE AGUAS Y LEGISLACIÓN APLICABLE

La reutilización de aguas residuales es una fuente alternativa y sostenible para atender demandas agrarias, industriales, urbanas y de ocio. Además, su uso permite la liberación de agua de mayor calidad para garantizar usos prioritarios y una ventaja económica y ecológica (Rico et al., 2016).

La reutilización tiene como objetivo la conservación y el aumento de los recursos de agua disponible, y esto se consigue mediante las siguientes actuaciones: el uso de agua reutilizada, en aquellos usos que no precisan de agua de calidad; la mejora del cumplimiento de las normativas ambientales de la gestión de los consumos de agua y vertidos de aguas residuales; el aumento de los recursos de agua existentes y la aparición de nuevas fuentes de suministro; la reducción de la necesidad de agua, etc. (Salgot & Folch, 2008).

Con la reutilización del agua se obtienen un ahorro económico, ya que el coste del agua de red es superior al coste que supone la depuración de aguas para su reutilización y un ahorro de recursos hídricos y minimización del impacto ambiental, ya que se consume menor cantidad de agua de red y se promueve el reciclado de aguas.

Así como las aguas depuradas son aguas residuales que se han sometido a un proceso de tratamiento el cual adecua su calidad a la normativa de vertidos aplicable, las aguas reutilizadas son aguas residuales depuradas que se han sometido a un proceso de tratamiento adicional o complementario que adecua la calidad al uso que se destinan (Robles et al., 2011). La reutilización en el caso en estudio consiste en el aprovechamiento de aguas ya utilizadas en el lavado de plásticos y que han sido sometidas a un proceso de depuración para conseguir una determinada calidad, para el mismo fin, es decir, el lavado de plásticos.

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

En la empresa en estudio, Eslava Plásticos S.A, el agua utilizada para lavar las materias plásticas proviene de agua de red y de agua reutilizada. Tras el proceso físico-químico que se da en los DAFs de la planta depuradora, el agua puede ser enviada al tratamiento biológico (reactor biológico y decantador) para su posterior vertido al alcantarillado o bien, puede ser de nuevo conducida al interior de la planta de lavado de plásticos, para su reutilización.

Una vez en la planta se dosifica solo el agua de salida de uno de los tres DAFs que se mezcla con tanta agua de red como sea necesaria para diluir el agua concentrada y obtener la calidad necesaria. La planta no puede funcionar solo con agua reutilizada, porque supondría un circuito cerrado en el que siempre se utilizaría la misma agua, lo cual conllevaría algunos problemas, como el aumento de la conductividad y la saturación de las aguas, al haber contaminantes que no se podrían eliminar nunca solo con el tratamiento físico-químico, lo que supondría un empeoramiento del proceso de lavado. Sin embargo, mejorando el proceso en los DAF sería posible reutilizar un porcentaje mayor del utilizado actualmente.

Los límites de vertido a los que se somete la empresa Eslava Plásticos S.A, para el agua residual generada, son impuestos por la Red de Alcantarillado de Quart de Poblet, y se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores límite vertido a Red de Alcantarillado municipal de Quart de Poblet

Parámetro	Límite de vertido
pH	5,5 – 9
Conductividad	3000 μ S/cm
Sólidos en suspensión	500 mg/L
DQO	1000 mg O ₂ /L
Demanda biológica de oxígeno (DBO ₅)	500 mg O ₂ /L

Nota: Tabla adaptada de la Ordenanza reguladora de vertidos a la red municipal de alcantarillado de Quart de Poblet (2001).

Comparando estos datos con las características del agua residual generada en la planta (tabla 1), se observa que el valor de conductividad está al límite y que se supera con creces la concentración de SS y DQO, por lo que es necesario la depuración antes de su vertido.

En cuanto a la reutilización de aguas, se debe tener en cuenta la siguiente legislación:

- La Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, contiene una modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, en la que se ha dado nueva redacción del artículo 109.1:

«El Gobierno establecerá las condiciones básicas para la reutilización de las aguas, precisando la calidad exigible a las aguas depuradas según los usos previstos. El titular de la concesión o autorización deberá sufragar los costes necesarios para adecuar la reutilización de las aguas a las exigencias de calidad vigentes en cada momento»

- El **Real Decreto 1620/2007**, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas. De forma resumida, este Real Decreto asegura una protección adecuada del medio ambiente y de la salud, al tiempo que promueve su desarrollo, incorporando la reutilización de aguas en la planificación del recurso hídrico. Este RD cuenta con las autoridades sanitarias para la elaboración y ejecución de la legislación sobre aguas, así pues, se cumple con el objetivo previsto por la Ley General de Sanidad, sobre la participación en las Administraciones a través de la vigilancia sanitaria, la promoción y la mejora de los sistemas que permiten cumplir los parámetros de calidad compatibles con la sanidad de las personas. En él se definen las aguas reutilizadas, así como las aguas depuradas y las regeneradas, conforme con las posibilidades de reutilización que la norma establece y admite en la doctrina jurídica y técnica. Además, se establecen las condiciones necesarias para que se puedan utilizar las aguas regeneradas, los procedimientos para la depuración de aguas depuradas, la obtención de la concesión y la autorización de reutilización, relativas a los usos admitidos y los criterios de calidad. Finalmente, cuenta con dos anexos: el anexo I, que recopila los criterios de calidad para la utilización de las aguas regeneradas de acuerdo con sus posibles usos, teniendo en cuenta los mínimos obligatorios exigibles; y en anexo II, que cuenta con el modelo normalizado en la solicitud a presentar para la obtención de la concesión o autorización de las aguas depuradas (Real Decreto 1620/2007).

Los valores máximos admisibles para reutilización del agua residual en usos industriales, como el lavado de plásticos llevado a cabo en la empresa objeto de estudio, se adjuntan a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores límite de reutilización

Parámetro	Límite de vertido
Sólidos en suspensión	35 mg/L
Turbidez	15 NTU
Escherichia Coli	10000 UFC/100 mL

Nota. Adaptado del Real Decreto 1620/2007 (2007)

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Seguidamente se incluye la metodología seguida para llevar a cabo los ensayos realizados en el presente TFG.

4.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para llevar a cabo los ensayos de una forma sistematizada, se optó por utilizar un diseño de experimentos realizado con la aplicación Statgraphics Centurion. Se hará a partir del método superficie de respuesta, con el objetivo de establecer las condiciones óptimas de los ensayos realizados en el laboratorio. Se escogió este método ya que ayuda a entender mejor el planteamiento del experimento y permite identificar fácilmente las condiciones óptimas de estudio de forma gráfica.

El método de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten analizar problemas en los que una o varias variables de interés (variables de entrada) pueden tener influencia sobre otras (variables de salida). En este caso se van a optimizar las variables de interés (pH, concentración de coagulante y de floculante), a partir del resultado obtenido en cuanto a las variables de salida (valores de conductividad, turbidez y sólidos en suspensión), teniendo en cuenta que el objetivo es minimizar estos parámetros. Tras introducir los valores máximos y mínimos de las variables de interés, se generan valores intermedios de estas, dando lugar a la Tabla 4, a partir de la cual se programan los ensayos a realizar en el laboratorio.

Tabla 4. Valores de pH, concentración de coagulante y floculante

	pH	[Coagulante] mL/L	[Floculante] mL/L
1	9	0,105	0,05
2	5	0,070	0,03
3	5	0,105	0,07
4	5	0,140	0,03
5	9	0,140	0,05
6	9	0,070	0,07
7	9	0,140	0,07
8	9	0,140	0,03
9	5	0,105	0,05
10	7	0,140	0,05
11	7	0,070	0,03
12	7	0,070	0,07
13	5	0,140	0,07
14	9	0,070	0,03
15	9	0,105	0,03
16	5	0,070	0,05
17	7	0,140	0,07

Tabla 4 continuación. Valores de pH, concentración de coagulante y floculante

	pH	[Coagulante] mL/L	[Floculante] mL/L
18	7	0,105	0,03
19	7	0,070	0,05
20	9	0,105	0,07
21	5	0,070	0,07
22	9	0,070	0,05
23	5	0,140	0,05
24	7	0,105	0,07
25	5	0,105	0,03
26	7	0,105	0,05
27	7	0,140	0,03

4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL: ENSAYOS JAR-TEST

El ensayo jar-test (test de jarras) se utiliza para la optimización del proceso de coagulación-floculación, con el objetivo de determinar la concentración de coagulante y floculante y el pH óptimos para conseguir la disminución de los sólidos en suspensión, la materia orgánica, y disminución de la turbidez y la conductividad del clarificado.

El equipo jar-test está compuesto por seis ejes giratorios con una paleta en la base con la función de agitar la muestra, tal y como se puede ver en la Figura 22. Cuenta también, con teclas para modificar la velocidad de agitación (rpm) y el tiempo de agitación.

Gracias a la realización de los ensayos jar-test se pueden comparar y evaluar la efectividad de los coagulantes y floculantes aplicados a un tipo determinado de agua bajo ciertas condiciones experimentales.



Figura 22. Equipo Jar-Test (FLOCUMATIC)

En este apartado se van a definir los ensayos que se han llevado a cabo en el laboratorio del ISIRYM (Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambientel) de la UPV, los cuales se pueden dividir en dos grandes bloques: ensayos con el agua residual y ensayos con el agua residual diluida. El agua residual utilizada en los ensayos se toma tras el vibrotamiz y se transporta en un bidón de 25 L a los laboratorios de la UPV.

- **Ensayos con el agua residual**

Se va a probar la concentración de coagulante utilizada en la empresa y dos concentraciones por debajo de esta (0,14, 0,10 y 0,07 mL/L). Para cada una de ellas, se dosificará la concentración de floculante usada en la empresa y dos por debajo (0,07, 0,05 y 0,03 mL/L). En todas estas combinaciones (9 ensayos) se probarán tres pH diferentes (5, pH de la muestra y 9). Con todo ello se plantea la primera batería de ensayos con 27 test a realizar, que permitirán seleccionar la concentración y pH óptimos de trabajo.

Los ensayos se llevan a cabo a temperatura ambiente (19,0 ± 1,5°C). Los reactivos que se utilizan en estos ensayos, que se especifican a continuación, son los mismos que se usan en la planta de tratamiento de la empresa Eslava Plásticos S.A:

- **“Flocubat 18”** es un coagulante de policloruro de aluminio, utilizado para el tratamiento físico-químico del agua y para el espesamiento y sedimentación de fangos en procesos de filtración. Es un líquido viscoso de color amarillo.
- **“Hyfloc XT543”** es un floculante compuesto por una poliacrilamida catiónica en polvo, utilizado para el tratamiento de aguas y deshidratación de fangos, su aspecto es un sólido granular blanco y se recomienda preparar las disoluciones entre 0,1% y 0,5%.
- **Sosa cáustica líquida (NaOH)** es un líquido incoloro e inodoro, este es estable, corrosivo y de carácter básico, por ello se ha utilizado para ajustar el pH del agua residual a un pH básico.
- **Ácido clorhídrico (HCl)** es un líquido transparente o parcialmente amarillento y con olor fuerte, es corrosivo y de carácter ácido, utilizado para ajustar el pH del agua residual a un pH ácido.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Tras agitar vigorosamente el agua residual contenida en el bidón, para asegurar la toma de una muestra homogénea, se extraen muestras de 500 mL en vasos de precipitados de 1 L.
- En primer lugar, se ajusta el pH con NaOH o HCl, según corresponda.
- Se llevan las muestras al equipo jar-test, se ajusta la velocidad de giro a 150 rpm y se añade la dosis correspondiente de coagulante, agitando durante dos minutos.
- Se reajusta la velocidad de giro a 50 rpm y se añade la dosis de floculante, dejándolo actuar durante dos minutos más.
- Después se vierten las muestras en probetas de 1 L y se dejan sedimentar durante 30 minutos. Pasado el tiempo, se mide el volumen de sólido sedimentado y se toman muestras del sobrenadante para medir el pH, la conductividad, la turbidez y los sólidos suspendidos (SS).

Se considerarán como ensayos óptimos aquellos que utilicen la mínima cantidad de reactivos y que proporcionen la mínima turbidez, sólidos en suspensión y conductividad. Además, también se tendrá

en cuenta en la selección del ensayo óptimo que, para el tratamiento biológico posterior, el pH debe estar en torno a 7.

Una vez se han seleccionado los ensayos óptimos se medirán además la DQO, el N_{total} y el P_{total} de los sobrenadantes.

Durante la realización de los ensayos en el laboratorio se vio que el floculante probado no tenía demasiado efecto sobre los resultados obtenidos, por lo que se realizaron unos ensayos adicionales. Estos ensayos consistieron en realizar algunos ensayos de jar-test sin floculante y utilizando otros dos floculantes que se tenían en el laboratorio, uno con carácter catiónico y otro aniónico, presentados a continuación, que se probaron con la misma concentración que la usada para el floculante de la empresa:

- **SITRAFLOCK SA-20:** poliacrilamida parcialmente hidrolizada en polvo. Es un floculante de carácter aniónico utilizado en clarificación de aguas residuales industriales, aguas superficiales y para el acondicionamiento de lodos. Es un sólido granular blanco y se suele preparar en concentraciones de 0,1% o 0,5%.
- **SITRAFLOCK ASC-253:** floculante catiónico orgánico de alto peso molecular, que se utiliza en todos los procesos de separación sólido-líquido. Su aspecto es un polvo blanco granulado y se recomienda preparar en soluciones de una concentración entre 0,1 y 0,5%.

- **Ensayos con agua residual diluida**

En estos ensayos se quiere valorar cómo afecta una disminución en los SS iniciales del agua residual en la necesidad de reactivos y en los resultados de turbidez, SS y conductividad tras el tratamiento físico-químico. Para ello, se va a diluir el agua residual y se va a probar la opción óptima obtenida en los ensayos anteriores y dos concentraciones inferiores de coagulante y floculante. Para llevar a cabo las diluciones, se dejan sedimentar 2 L de la muestra de partida para tener un sobrenadante con menos SS y se preparan diluciones mezclando un 25%, 50% y 75% del sobrenadante con la muestra inicial. Esta metodología es necesaria para mantener la conductividad de la muestra de agua residual, ya que usar agua de red para diluir disminuiría este parámetro y podría enmascarar los resultados.

El procedimiento a seguir es el mismo que en la primera batería de ensayos y se miden los mismos parámetros (volumen de sólido sedimentado, pH, conductividad, SS y turbidez).

4.3 PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

En el siguiente apartado se van a explicar los procedimientos analíticos y los equipos utilizados para llevar a cabo la medición de los distintos parámetros estudiados en los ensayos de jar-test.

- **pH:** mide la acidez o la basicidad el agua, midiendo exactamente la concentración de protones (H⁺). Se mide en una escala de 0 a 14, los valores inferiores a 7 se consideran ácidos, los superiores a 7 básicos y un pH de 7 indica neutralidad. Se mide mediante un pH-metro, que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

El pH se mide en un pH-metro modelo GLP 21+ de Crison (Figura 23).



Figura 23. pH-metro GLP 21+

- **Conductividad:** es la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica según los cationes y aniones disueltos en esta. Está relacionada con la concentración de sales disueltas. Se mide mediante un conductímetro, que mide la resistencia de la disolución entre dos electrodos y sus unidades son $\mu\text{S}/\text{cm}$ o mS/cm . La conductividad se mide en un conductímetro modelo GLP 31+ de Crison (Figura 24).



Figura 24. Conductímetro GLP 31+

- **Turbidez:** mide la capacidad de absorción o dispersión de la luz en el agua. Está relacionada con la concentración de sólidos en suspensión. Se mide mediante un turbidímetro y sus unidades se dan en NTU. La turbidez se mide mediante el turbidímetro modelo TL2310 de HACH (Figura 25).



Figura 25. Turbidímetro TL2310

- **Sólidos en suspensión:** mide la concentración de sólidos que quedan retenidos en un filtro con un determinado tamaño de poro. La medición de los SS sigue la siguiente metodología.
 - Se pesa un vidrio de reloj junto con el filtro utilizado (m1). El filtro utilizado es de acetato de celulosa con un tamaño de poro de 0,45 µm.
 - Se sitúa el filtro en una rampa de filtrado (Figura 26) y se filtran 25 mL de muestra (V) con la ayuda de una bomba a vacío.
 - Se deja secar el filtro en la estufa a 100°C durante una hora.
 - Se deja en el desecador hasta que se alcance la temperatura ambiente y se pesa de nuevo el vidrio de reloj con el filtro (m2).
 - Aplicando la Ecuación 1, se obtienen los sólidos en suspensión en mg/L

$$SS \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{m2-m1}{V} \quad (\text{Ecuación 1})$$



Figura 26. Rampa de filtración para SS

- **Volumen de sólido sedimentado:** son los sólidos capaces de sedimentar en un cierto periodo de tiempo, en este caso 30 min. Se mide en mL/L. Este ensayo se lleva a cabo en probetas de 1 L, tal y como se puede ver en la Figura 27.

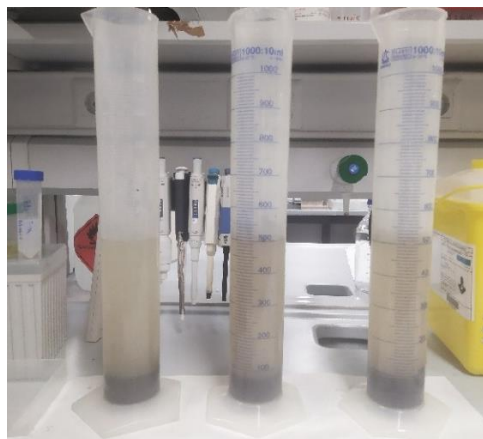


Figura 27. Probetas para medir el volumen sedimentado

- **DQO:** demanda química de oxígeno, es la medida directa de la materia orgánica total que hay en un agua residual a partir del oxígeno consumido en la oxidación química de la materia orgánica. Se mide en mg/L. Para medir la DQO de las muestras se utilizan cubetas de reacción de MERCK con un rango de medida de 25 a 1500 mg/L, que utilizan el método de análisis por oxidación sulfúrica con dicromato potásico (K₂Cr₂O₇) y sulfato de plata como catalizador. Fotométricamente se determinan los iones Cr³⁺. Este procedimiento sigue las normas DIN ISO 15705.

Se usa un termorreactor TR 300 (Figura 28.a) y un espectrofotómetro Spectroquant NOVA 30 (Figura 28.b), ambos de MERCK.

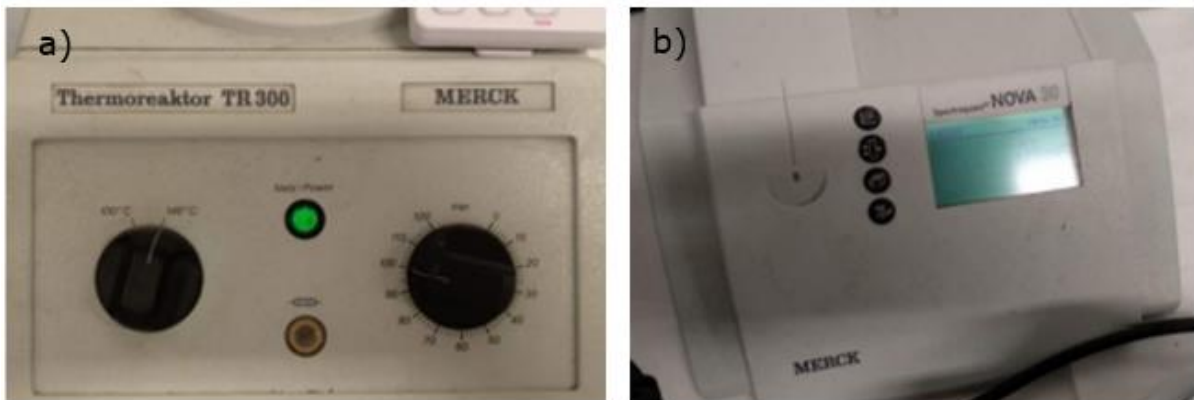


Figura 28. a) Termorreactor TR 300. b) Espectrofotómetro Spectroquant NOVA 30

- **Nitrógeno total (N_T):** mide el nitrógeno orgánico e inorgánico. Se mide en mg/L. Para medir el nitrógeno total se utilizan cubetas de reacción de MERCK con un rango de concentración entre 10 y 150 mg/L, que siguen el método Koroleff, en el cual los compuestos inorgánicos y orgánicos de nitrógeno se transforman en nitratos. Estos nitratos, en contacto con una solución sulfúrica y fosfórica, forman junto al 2,6-dimetilfenol el compuesto 4-nitro-2,6-dimetilfenol, que se determina fotométricamente. Este procedimiento sigue las normas EN ISO 11905-1, para la disgregación y la DIN 38405-9 para la determinación de nitratos. También se utiliza en el ensayo el termorreactor (Figura 28.a) y el espectrofotómetro (Figura 28.b).
- **Fósforo total (P_T):** se mide la contribución del fósforo orgánico e inorgánico. Se mide en mg/L. Para medir el fósforo total también se utilizan cubetas de reacción de MERCK con un rango de concentración entre 0,5 y 25 mg/L. En este caso, se determina fotométricamente el azul de fosfomolibdeno, que procede de reducir con ácido ascórbico el ácido molibdofosfórico que se forma con los iones ortofosfato y los iones molibdato. Este procedimiento sigue las normas EPA 365.2+3, la APHA 4500-P E y al DIN EN ISO 6878. Para este análisis también se utiliza el termorreactor (Figura 28.a) y el espectrofotómetro (Figura 28.b).

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En este capítulo se van a mostrar los resultados obtenidos en las dos baterías de ensayos realizadas, con muestras de partida de agua residual y con muestras diluidas. También se incluyen los ensayos adiciones con floculantes. La metodología de estos ensayos se ha explicado en el apartado de procedimiento experimental.

5.1 ENSAYOS CON EL AGUA RESIDUAL

En este apartado se van a estudiar los ensayos de jar-test realizados a partir de una muestra de agua residual (M-1), cuya caracterización inicial se puede ver en la Tabla 5. Además, también se muestran los resultados obtenidos para el clarificado de la misma muestra, tras un tiempo de sedimentación de 30 min, sin adición de coagulantes ni floculantes, ni modificación de pH (M-1 clarificada).

Tabla 5. Parámetros de la muestra de partida y de su clarificado

Muestra	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbidez (NTU)	Sólidos en suspensión (mg/L)
M-1	6,5	2590	*	2447,6
M-1 clarificada	6,6	2450	589	217,2

(*) El valor de la turbidez no se pudo medir por superar el límite superior del equipo.

Tal y como se puede apreciar en la tabla 5, con una sedimentación de 30 minutos y sin necesidad de añadir ningún reactivo, es posible eliminar el 91,12% de los sólidos en suspensión. Esto nos indica que la mayor parte de los sólidos de la muestra son sedimentables, por lo que su eliminación se podría llevar a cabo con un tratamiento físico mediante un decantador. Con la eliminación de estos SS, se consigue también una ligera reducción de la conductividad y el pH de la muestra sería apto para tratamiento biológico.

Como ya se ha explicado en el apartado 4.1, para analizar los resultados obtenidos en los ensayos expuestos en la tabla 1, se ha optado por un diseño de experimentos, utilizando el método de superficie de respuesta.

En función del pH y de las concentraciones de coagulante y floculante se analizan tres variables de salida del proceso (la conductividad, la turbidez y los sólidos en suspensión), las cuales se intentan minimizar. Dado que la condición óptima sería aquella en que los tres parámetros de salida fueran mínimos, se opta por crear una única variable que los incluya. Para ello, en primer lugar se normaliza cada uno de los valores de estos parámetros, dividiendo el resultado obtenido tras el tratamiento entre su valor inicial (Ecuación 2), de forma que se obtendrá un valor entre 0 y 1.

$$\text{Parámetro normalizado } (X_N) = \frac{X_i}{X_0} \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

- X_i es la conductividad, turbidez o SS tras cada uno de los ensayos realizados.
- X_0 es la conductividad, turbidez o SS de la muestra de partida.

En segundo lugar, como para cada ensayo se tienen tres parámetros normalizados, se suman, con lo que se tiene una única variable de salida, que tendrá un valor entre 0 y 3 y que es la suma de los efectos de las tres variables.

Minimizando esta nueva variable (Cond+Turb+SS) aseguramos que obtenemos el resultado que minimiza al máximo las tres variables a la vez. A continuación, se muestran los resultados del estudio estadístico del diseño de experimentos, mostrándose la superficie de respuesta.

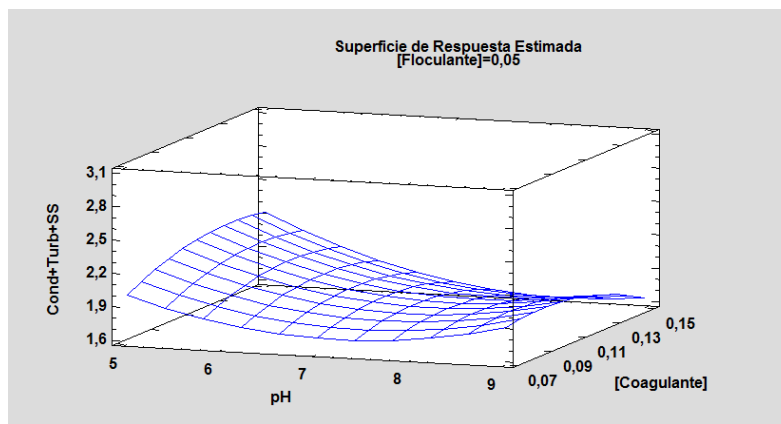


Figura 29. Superficie de respuesta para la variable de salida Cond+Turb+SS, al tratar el agua residual variando pH y concentración de coagulante, para 0,05 mL/L de floculante

En la Figura 29 se puede ver la superficie de respuesta dada por la variable Cond+Turb+SS en función del pH y las concentraciones de coagulante (para una concentración de floculante de 0,05 mL/L). Para poder apreciar con mayor precisión el mínimo de coagulante y el pH, se va a rotar esta figura, obteniéndose las Figura 30 y Figura 31:

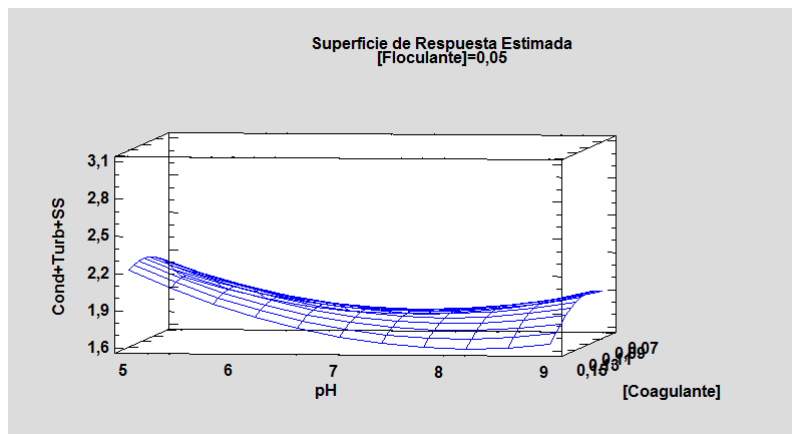


Figura 30. Superficie de respuesta para estimar el pH óptimo

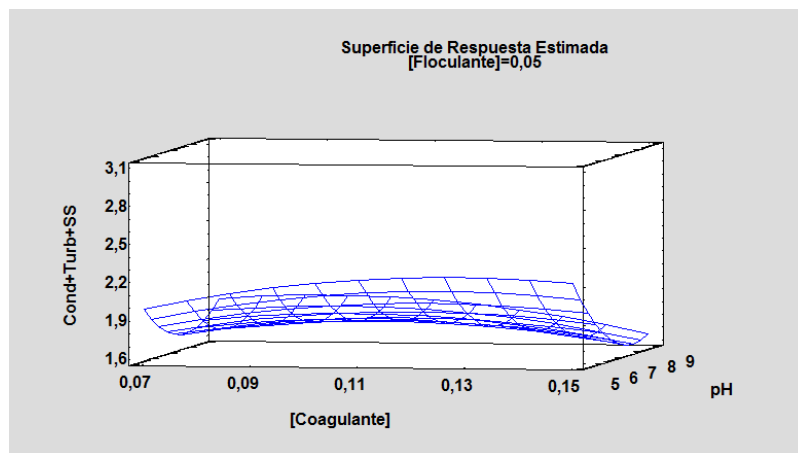


Figura 31. Superficie de respuesta para apreciar el coagulante mínimo

En la Figura 30 se puede ver que el pH que minimiza los tres parámetros críticos está en torno a 7,5 y 8 y en la figura 31 el coagulante que los minimiza se sitúa sobre 0,14 mL/L, viendo que por defecto se establece 0,05 mL/L como la dosis óptima de floculante.

Aunque los resultados óptimos se encuentren a un pH ligeramente básico, la mejora conseguida con respecto a operar al pH de la muestra (situado entre 6,5 y 7) no justifica el gasto derivado del uso de sosa cáustica para subir el pH y el aumento consiguiente de la conductividad por adicionar sales. Por lo tanto, se va a establecer el óptimo de pH en el de la muestra.

En cuanto al floculante, la superficie de respuesta no muestra los resultados para las concentraciones de 0,07 y 0,03. Analizando mediante gráficos de EXCEL estas otras opciones, se comprueba que, teniendo en cuenta el ahorro de reactivos y los resultados de los parámetros de salida, se establece como óptimo una concentración de floculante de 0,05 mL/L.

A pesar de que en la superficie de respuesta se haya establecido una dosis óptima de coagulante de 0,14 mL/L, se van a estudiar también otros parámetros como la DQO, N y P, en función de los óptimos de pH y floculante ya establecidos, para determinar la dosis de coagulante más adecuada. Los ensayos a estudiar, según la numeración de indicada en la Tabla 4 son los siguientes:

Ensayo 10 → 0,140 mL/L de coagulante + 0,05 mL/L de floculante a pH de la muestra.

Ensayo 19 → 0,070 mL/L de coagulante y 0,05 mL/L de floculante a pH de la muestra.

Ensayo 26 → 0,105 mL/L de coagulante + 0,05 mL/L de floculante a pH de la muestra.

Estos ensayos se repitieron para verificar la repetibilidad de los resultados obtenidos. En la Tabla 6 se presentan las dos repeticiones para cada ensayo.

Tabla 6. Resultados obtenidos para los ensayos óptimos

Ensayo	Volumen de sólido sedimentado (mL/L)	Conductividad (μS/cm)	Turbidez (NTU)	Sólidos en suspensión (mg/L)	DQO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
Ensayo 10	80	2960	249	240	1575	61	1,6
Ensayo 10R	70	2940	239	216	1590	64	3,5
Ensayo 19	64	2830	267	176	1505	54	1,7
Ensayo 19R	56	2920	236	200	1543	59	3,2
Ensayo 26	60	2720	314	188	1278	50	1,3
Ensayo 26R	60	2870	247	248	1378	58	2,9

A la vista de los resultados, se observa que para la muestra con mayor cantidad de coagulante es en la que se consigue el mejor resultado de turbidez. Sin embargo, es la que mayor cantidad de sólidos en suspensión tiene. Comparando los ensayos con 0,07 y 0,10 mL/L de coagulante, se puede apreciar que la cantidad de sólidos en suspensión no varía mucho. Aunque la turbidez es algo mayor para el ensayo con 0,07 mL/L, tanto la conductividad como la DQO son menores. Por lo tanto, se establece como óptimo el ensayo 3, con 0,07 mL/L de coagulante.

Ensayo óptimo → 0,07 mL/L coagulante + 0,05 mL/L floculante, a pH de la muestra.

La relación adecuada de nitrógeno y fósforo en función de la DQO para un tratamiento biológico es 100:5:1 (DQO:N:P). Para la opción óptima seleccionada, esta relación es 100:3,9:0,1, por lo que, si el tratamiento biológico tiene bajo rendimiento, se podría valorar introducir alguna fuente adicional de estos nutrientes, en especial de P.

5.1.1 ENSAYOS ADICIONALES

Tras la realización de los primeros ensayos y tras analizar los resultados comentados anteriormente, se observó que el floculante no tenía un efecto significativo en los resultados finales, por eso se optó por realizar unos ensayos adicionales con otros dos floculantes para evaluar si el usado por la empresa es el más adecuado.

Los ensayos se realizaron con una nueva muestra de agua residual (M-2), pudiéndose ver sus características en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de la muestra de partida (M-2)

Muestra	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbidez (NTU)	Sólidos en suspensión (mg/L)
M-2	6,7	2410	692	3163

En estos ensayos se probó el floculante utilizado por la empresa y se comparó con los otros dos floculantes, uno aniónico y otro catiónico, descritos en la metodología. Para todos ellos la cantidad de coagulante utilizada fue 0,1 mL/L y la de floculante 0,044 mL/L. Para cada par coagulante/floculante se testeó a pH 5, 6 y al de la muestra. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 8, donde V sed es el volumen de sólido sedimentado.

Tabla 8. Ensayos con diferentes floculantes (0,1 mL/L de coagulante y 0,044 mL/L de floculante) a tres pHs

Muestra	pH	V sed (mL/L)	Conductividad (μS/cm)	Turbidez (NTU)
Floculante empresa	5,0	180	3410	431
	6,0	110	2600	522
	muestra	110	2330	569
Floculante aniónico	5,0	140	3370	529
	6,0	160	2660	367
	muestra	150	2360	409
Floculante catiónico	5,0	100	3400	445
	6,0	120	2630	471
	muestra	130	2390	518

Los mejores resultados de turbidez se encuentran en las muestras a pH 6 y al pH de la muestra, pero principalmente se va a intentar buscar el óptimo en el pH de la muestra, ya que en los ensayos anteriormente realizados este era el óptimo, y esto supondría un ahorro de reactivos. Por ello, se va a comparar los tres floculantes a partir del porcentaje de eliminación de la turbidez.

El floculante utilizado por la empresa es de carácter catiónico, de ahí que presente una similitud de los resultados con el otro floculante catiónico, en los que se eliminan los porcentajes más pequeños de turbidez, con un 17,8% y 25,1%, respectivamente. El floculante aniónico es el que obtiene unos mejores resultados de turbidez, con una eliminación del 40,9%, lo que lleva a pensar que un floculante aniónico optimizaría el proceso físico-químico operando al pH de la muestra.

5.2 ENSAYOS CON EL AGUA RESIDUAL DILUIDA

Para estos ensayos se utilizó una muestra nueva (M-3) cuya caracterización se presenta en la Tabla 9. En esta tabla, también se muestran los parámetros más relevantes (pH, sólidos en suspensión, turbidez y conductividad) tras las diluciones realizadas. Así mismo, también se decidió realizar los mismos ensayos para una muestra tomada tras un tratamiento de sedimentación de 30 min (M-3 clarificada).

Tabla 9. Caracterización de las muestras diluidas

Muestra	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbidez (NTU)	Sólidos en suspensión (mg/L)
M-3	7,3	2230	454	796
Dilución 25%	7,3	2230	368	516
Dilución 50%	7,2	2230	315	440
Dilución 75%	7,3	2240	268	208
M-3 clarificada	7,1	2240	151	112

En primer lugar, cabe destacar que la M-3 tenía un contenido en SS más bajo de lo habitual, que suele estar entre 2000-2500 mg/L. Esto es debido al tipo de ensuciamiento de los plásticos lavados en el periodo de la toma de muestra, que puede hacer variar las características del agua residual.

Como era de esperar, a medida que aumenta el porcentaje de dilución de la muestra, disminuyen los sólidos en suspensión y la turbidez, manteniéndose la conductividad en torno a los mismos valores, que era lo que se pretendía con la metodología llevada a cabo. Además, tal y como ya se vio en el apartado 5.1.1, tras el proceso de sedimentación de la muestra, se obtiene un alto porcentaje de eliminación de turbidez y SS, pudiéndose ver al comparar la muestra de partida M-3 con la muestra del sobrenadante M-3 clarificada. Al dejar sedimentar 30 min la muestra, la cantidad de sólidos que sedimentan sin ayuda de coagulantes y floculantes es elevada, un 85,9%, y la turbidez disminuye un 66,7%.

Estos resultados indican que aproximadamente el 86% de los sólidos de la M-3 son sedimentables, valor similar a la M-1, en la que eran sedimentables el 91%, a pesar de que el contenido inicial en SS de ambas muestras fue muy diferente (2447,6 mg/L para M-1 y 796,0 mg/L para la M-3). Se puede llegar a la conclusión de que, con solo dejar sedimentar la muestra 30 min, la calidad del agua mejora sin necesidad de adicionar coagulante y floculante. Esto lleva a pensar, que un posible pretratamiento para mejorar el funcionamiento de la planta sería mediante un sedimentador, para reducir los sólidos en suspensión y que el tratamiento físico-químico posterior se lleve a cabo de manera más eficiente.

Para esta parte del TFG no se ha realizado un diseño de experimentos, ya que el número de ensayos era más reducido y no se ha considerado necesario. Para cada una de las diluciones y para la M-3 clarificada, se han elaborado ensayos jar-test al pH de la muestra y con los óptimos de concentración de coagulante y floculante obtenidos en el apartado 5.1. tal y como se indicó en la metodología, también se han realizado jar-test para concentraciones un 70% y un 50% sobre el óptimo. Con ello, se han realizado un total de 12 ensayos, que se pueden ver en la Tabla 10.

Tabla 10. Ensayos con el agua residual diluida al pH de la muestra

Muestra	[Coagulante] mL/L	[Floculante] mL/L
Dilución 25%	0,070	0,050
	0,050	0,035
	0,030	0,025
Dilución 50%	0,070	0,050
	0,050	0,035
	0,030	0,025
Dilución 75%	0,070	0,050
	0,050	0,035
	0,030	0,025
M-3 clarificada	0,070	0,050
	0,050	0,035
	0,030	0,025

Los resultados obtenidos tras los ensayos se pueden ver a continuación en las Figura 32, Figura 33 y Figura 34.

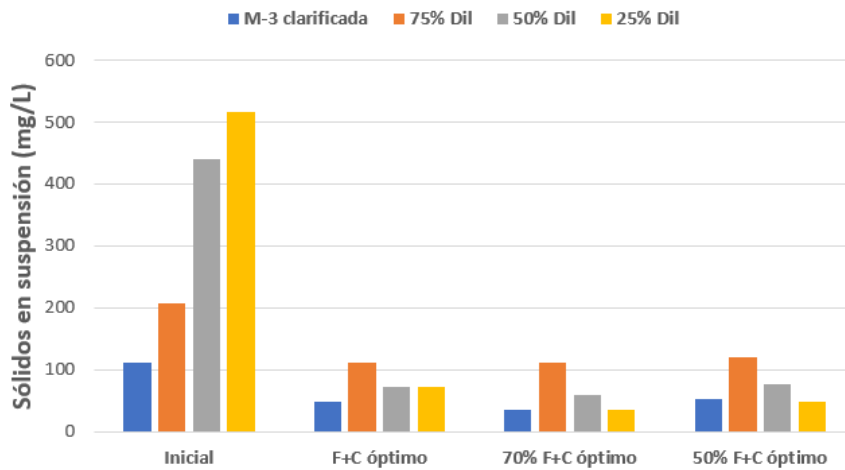


Figura 32. SS tras el tratamiento físico-químico para las muestras diluidas

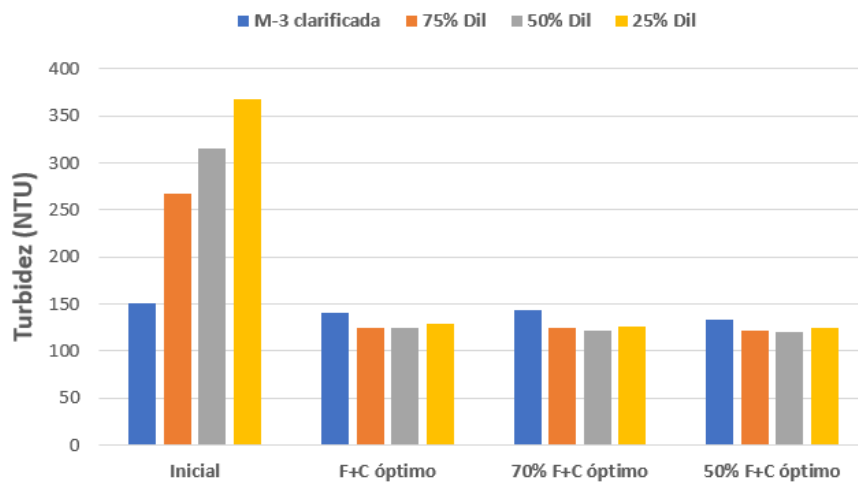


Figura 33. Turbidez tras el tratamiento físico-químico para las muestras diluidas

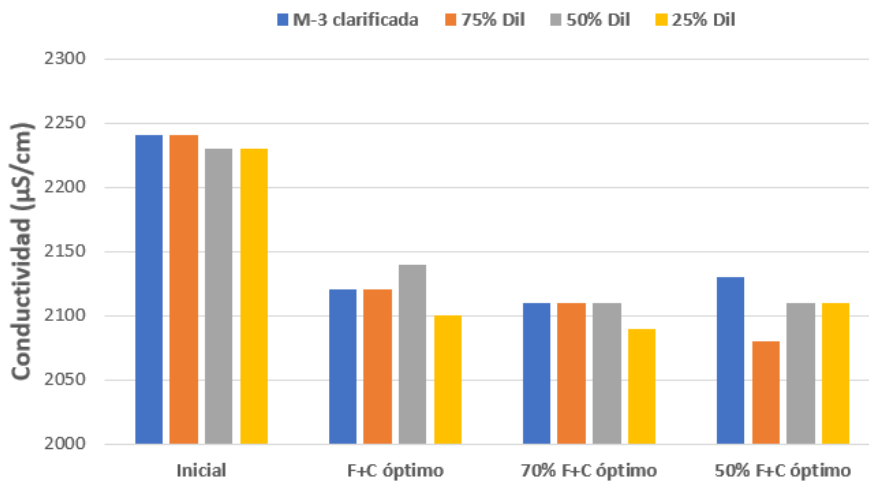


Figura 34. Conductividad tras el tratamiento físico-químico para las muestras diluidas

A la vista de las Figura 32, Figura 33 y Figura 34, se puede concluir:

- La adición de reactivos disminuye todos los parámetros estudiados en cada uno de los ensayos realizados por lo que con la adición de coagulante y floculante se mejoran las características del agua residual.
- A pesar de que en cada ensayo hay diferentes porcentajes de dilución y una dosificación diferente de reactivos, los resultados finales son similares en todos los casos. Por ejemplo, al comparar la muestra clarificada y la muestra con un 25% de dilución, que son las que presentan más diferencia en cuanto a sus características iniciales, se puede ver que tanto los SS como la turbidez tras el tratamiento llegan a resultados muy parecidos en cualquiera de los ensayos, el valor medio de los SS se sitúa en torno a 70 mg/L, y los valores de la turbidez están en torno a 125 NTU. Por tanto, con los reactivos utilizados, parece haber un límite en la calidad del agua que se puede obtener.

- Sucede lo mismo al comparar las dosis de reactivos dosificada, es indiferente la cantidad añadida de estos, ya que se llega a resultados muy similares, en cualquier caso. Esto hace pensar que, para cada concentración de sólidos en suspensión se debería adecuar unas cantidades de reactivos para optimizar su uso. De esta forma:
 - Cuando los SS están por debajo de 500 mg/L, la cantidad de coagulantes y floculantes se puede bajar a 0,035 y 0,025 mL/L, sin perder calidad del agua tratada.
 - Cuando los SS están en torno a 2500 mg/L, la cantidad de coagulante y floculantes óptima se establece en 0,07 y 0,05 mL/L.
 - Para cantidades intermedias se deberían optimizar los resultados.

CAPÍTULO 6. DISEÑO

En este capítulo se va a realizar el diseño de la instalación formada por una depuradora para tratar un caudal de agua residual de 500 m³/día procedente del lavado de plásticos de la empresa objeto de estudio.

En la Figura 35 se puede ver el agua residual generada en el lavado de los plásticos tras sedimentar durante 30 minutos.

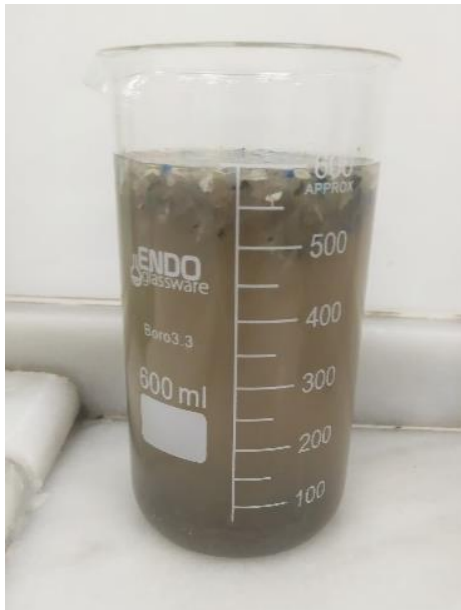


Figura 35. Agua residual de partida

En esta agua residual se diferencian tres fases: en la fase superior se encuentran los plásticos residuales que quedan del lavado; en la fase intermedia se encuentra la fase más acuosa con la materia no sedimentable, y en la fase inferior la materia sedimentable. Por ello, para realizar el diseño se va a tener en cuenta que los plásticos que flotan se pueden separar en el tamiz de la planta original; los sólidos sedimentables se van a separar por decantación y la fase acuosa se tratará mediante el físico-químico posterior. Además, como se ha visto anteriormente que los sólidos tras el tratamiento de coagulación-floculación sedimentan fácilmente y con cortos tiempos de retención, se van a utilizar decantadores en sustitución de los sistemas de flotación (DAFs) actualmente instalados.

La instalación propuesta está formada por un pretratamiento, un tratamiento primario (físico-químico) y la deshidratación de fangos. Las modificaciones planteadas se encuentran en el pretratamiento y tratamiento primario. En la Figura 36 se han resaltado en color rojo aquellos tratamientos que se han modificado respecto al actual (representado anteriormente en la Figura 2). Otro cambio importante, es la eliminación del tratamiento secundario (biológico), ya las características del agua tratada con el diseño propuesto cumplen las especificaciones para vertido a alcantarillado (indicadas en la Tabla 2).

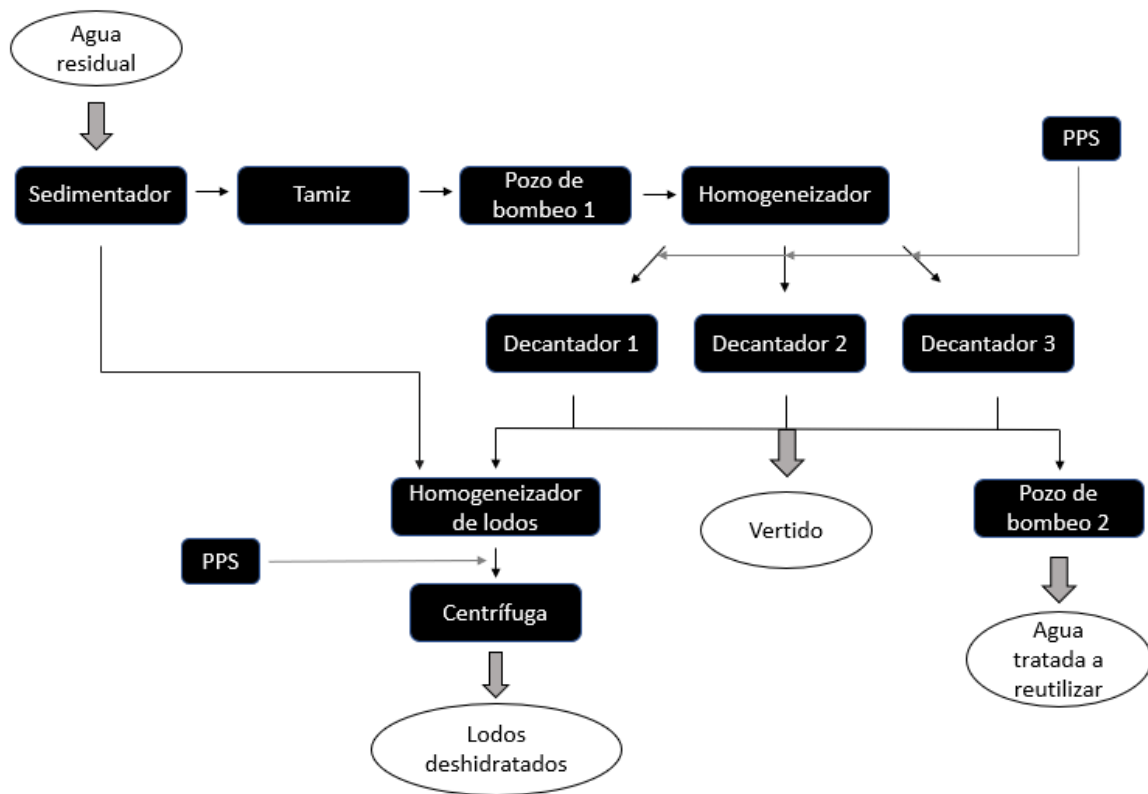


Figura 36. Diagrama de bloques de la planta depuradora propuesta

6.1 PRETRATAMIENTO

La mejor opción sería colocar primero el sedimentador y después el tamiz, para evitar un mayor ensuciamiento del tamiz debido a los sólidos sedimentables. Como no se dispone de datos para esa configuración, ya que los ensayos se han hecho con agua residual tras el tamiz (debido a la configuración actual de la empresa), se hace el diseño colocando el tamiz en primer lugar. Además, se elimina el rototamiz, el cual en el diseño original de la planta se utiliza para eliminar las partículas por encima de 1,5 mm que provienen de un canal perimetral que rodea la fábrica, ya que se decide introducir esta corriente directamente al tamiz de 500 μm . De esta forma, se puede eliminar también el pozo de bombeo 2 que ya no será necesario, ya que, por rebose del sedimentador y efecto de la gravedad, pasaría directamente el agua residual al homogeneizador.

Con ello se tiene que el pretratamiento se compone de un tamiz, un pozo de bombeo, un sedimentador y un homogeneizador, descritos todos a continuación.

El tamiz se utiliza para eliminar los sólidos más grandes, que mayoritariamente son los restos de plásticos que se quedan flotando en la superficie del agua residual (como se puede observar en la Figura 35). Se va a utilizar un vibrotamiz modelo ZEUS de la casa comercial Filtra Vibration con filtrado de 500 micras, que es el mismo que se usa en la planta original. Tras este tratamiento se obtiene un agua residual con las características adjuntas en la Tabla 11. Estos valores corresponden a datos reales medidos para 22 muestras en días diferentes, por lo que se presentan como un valor medio con su desviación estándar.

Tabla 11. Características del agua residual tras el tamiz

pH	Conductividad (μS/cm)	Sólidos en suspensión (mg/L)
7,5 ± 0,5	2630 ± 480	3858,3 ± 1774,2

Tras el tamiz, el agua residual se lleva al pozo de bombeo 1 para ser trasladada a un sedimentador.

Diseño del sedimentador: este elemento sirve para llevar a cabo un tratamiento físico de separación de partículas en el cual aquellas que son más pesadas que el agua, se depositan por acción de la gravedad en el fondo de un tanque. El principal objetivo es eliminar los sólidos sedimentables, a la vez que también se elimina la materia orgánica que está adherida a estos sólidos. Se va a diseñar un sedimentador de flujo horizontal para un caudal de entrada residual (Q_e) de 500 m³/día, un tiempo de retención hidráulico (t_R) de 30 minutos y se va a suponer una velocidad de sedimentación (q_A) de 1 m/h [en base a lo visto en la asignatura de Tecnología del Medio Ambiente, de forma que se puede calcular el volumen, el diámetro y la altura de dicho tanque de sedimentación a partir de las ecuaciones 3, 4 y 5 obtenidas a partir de “Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores de UNATSABAR”, respectivamente.

$$V = t_R \times Q_e = 10,42 \text{ m}^3 \quad (\text{ecuación 3})$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \times \text{Área}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times \frac{Q_e}{q_A}}{\pi}} = 5,15 \text{ m} \quad (\text{ecuación 4})$$

$$H = \frac{V}{\text{Área}} = 0,5 \text{ m} \quad (\text{ecuación 5})$$

Según la Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores consultada, un criterio de diseño es que la altura del sedimentador debe estar entre 1,5 y 2,5 m, por lo tanto, no es factible una altura de 0,5 m. Por ello, atendiendo a las recomendaciones de diseño se opta por una altura de 1,5 m, a partir de la cual se va a recalculer el volumen final, manteniendo el diámetro calculado.

$$V_{final} = \text{Área} \times H = 31,25 \text{ m}^3$$

Con este volumen final, se ha sobredimensionado el sedimentador, por lo que se obtendría un mayor rendimiento de eliminación de sólidos.

Tras el sedimentador, el agua fluye hasta un tanque de homogeneización de 215 m³, utilizado para almacenar y homogeneizar las características del agua.

Una vez finalizado el pretratamiento, teniendo en cuenta que los resultados experimentales nos indican que entre el 86 y el 91% de los SS van a sedimentar tras el tamiz y a partir de los resultados obtenidos en las M-1 (que tiene características similares a los medios mostrados en la Tabla 11), se pueden estimar las características de pH, conductividad y SS del agua tras el sedimentador, cabiendo esperar los resultados adjuntos en la Tabla 12.

Tabla 12. Características esperadas para el agua tras el nuevo pretratamiento (tamiz + sedimentación)

pH	Conductividad (μS/cm)	Sólidos en suspensión (mg/L)
7,5 ± 0,5	2487,8 ± 642,1	342,4 ± 222,7

6.2 TRATAMIENTO PRIMARIO: FÍSICO-QUÍMICO

En este tratamiento el principal objetivo es la eliminación de los sólidos en suspensión y, con ello parte de la turbidez y la materia orgánica que los acompaña.

En el diseño propuesto se lleva a cabo el proceso físico-químico mediante la dosificación del coagulante y floculante utilizados en la empresa, y la posterior sedimentación de dichos sólidos mediante tres decantadores que sustituyen a los DAFs. Desde el punto de vista energético, se consigue un ahorro de diferentes elementos de los DAFs, que en los decantadores no son necesarios, como las tres bombas de cavitación con sus respectivas válvulas neumáticas de aire y los tres controladores de descebe de las bombas de cavitación. Otro de los cambios introducidos es trabajar al pH de la muestra, esto lleva asociada una menor dosificación de reactivos con la eliminación de la sosa cáustica que se añade actualmente.

El sistema de dosificación de los químicos y la planta de preparación (PPS), son los mismos que los de la planta actual. Sin embargo, van a cambiar las concentraciones de estos reactivos, ya que tras el pretratamiento propuesto la cantidad de sólidos en suspensión ha disminuido considerablemente en comparación con los resultados obtenidos en la planta actual, ya que tras el tamiz se llevaba el agua al tratamiento físico-químico con una cantidad de SS de aproximadamente 3800 mg/L y ahora tras el pretratamiento diseñado el agua contiene una concentración de SS alrededor de 342 mg/L.

En la parte experimental se ha visto que se puede ajustar la concentración de coagulante y floculante en función de los SS iniciales. Gracias a los ensayos realizados con el agua residual diluida se ha podido hacer una analogía entre el ensayo con la muestra diluida al 75% (con 208 mg/L de sólidos en suspensión) y el valor medio esperado tras el pretratamiento (342,4 mg/L). En este ensayo las dosis óptimas eran 0,035 mL/L de coagulante y 0,025 mL/L de floculante, con lo que se reduce un 75% la dosis de coagulante y un 64,3% la de floculante, además de ahorrar los 0,055 mL/L de sosa que se añaden en el tratamiento actual. Con ello se tiene que la diferencia es notable y la ventaja de modificar el pretratamiento también se refleja en el ahorro de productos químicos, además de en la mejora de la calidad del agua.

A cada decantador le llegan 7 m³/h (ya que se establecen 3 líneas de tratamiento en paralelo), por tanto, al hacer el ajuste de los químicos para este caudal, se obtiene una concentración a dosificar en cada línea de tratamiento de 245 mL/h de coagulante y de 175 mL/h de floculante.

Tras la dosificación de los químicos, el agua residual se lleva a los tres decantadores en paralelo. El diseño de los decantadores se va a llevar a cabo para un caudal de entrada (Q_e) de 7 m³/h, un tiempo

de retención hidráulico (t_R) de 30 minutos y suponiendo una velocidad de sedimentación (q_A) de 1 m/h. Así pues, según las ecuaciones 3, 4 y 5 se obtiene el volumen, el diámetro y la altura de cada tanque de decantación.

$$V = t_R \times Q_e = 3,5 \text{ m}^3$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 \times \text{Área}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times \frac{Q_e}{q_A}}{\pi}} = 3 \text{ m}$$

$$H = \frac{V}{\text{Área}} = 0,5 \text{ m}$$

La altura de 0,5 m no es factible, tal y como se ha comentado en el diseño del sedimentador del pretratamiento. Por ello, se escoge una altura de 1,5 m, manteniendo el diámetro calculado y se obtiene el volumen final del decantador.

$$V_{\text{final}} = \text{Área} \times H = 10,5 \text{ m}^3$$

Tras el proceso de coagulación-floculación y la sedimentación, los resultados que se espera tener, en base a los ensayos de laboratorio, se pueden ver en la Tabla 13.

Tabla 13. Características esperadas para el agua residual tras el nuevo tratamiento físico-químico

pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Sólidos en suspensión (mg/L)
7,4 \pm 0,7	2310,1 \pm 843,2	197,3 \pm 181,7

Según los valores límite de vertido adjuntos en la Tabla 2, se cumplen las especificaciones para verter a la red de alcantarillado, por lo que no es necesario el tratamiento biológico y toda el agua que no se pueda reutilizar se vierte directamente a la alcantarilla.

Asimismo, conforme a los límites de reutilización (Tabla 3), el agua no debe contener más de 35 mg/L de sólidos en suspensión, por lo tanto, se va a hacer una estimación de la cantidad de agua que se puede reutilizar. Si en el tratamiento se obtienen 197 mg/L de SS, solo se podría recircular el 18% del agua generada. De los 20 m³/h que se requieren en la planta de lavado de plástico, el caudal a recircular sería de 3,6 m³/h. Este caudal es muy pequeño, pero se estima, que al haber sobredimensionado los decantadores en el pretratamiento y también los que hay tras la coagulación/floculación, el contenido en SS finales será inferior a los 197 mg/L y el caudal a recircular probablemente sea mayor.

Otra forma de reducir aún más los SS finales es cambiar el floculante utilizado. Tal y como se ha demostrado en el apartado 5.1.1, estudiando otros floculantes, se vio que se podían mejorar las características finales del agua con otros reactivos, pero esto requeriría de más experimentación.

6.3 DESHIDRATACIÓN DE FANGOS

En la etapa del tratamiento de los fangos no se ha introducido ninguna modificación y se diseñará tal y como está actualmente en la planta objeto de estudio. Cabe destacar, que en el nuevo diseño de la instalación se ha eliminado el reactor biológico, por lo que en esta planta se tratará el fango proveniente del decantador situado en el pretratamiento y el de los tres decantadores tras el proceso de coagulación/floculación. Se lleva a cabo una deshidratación mecánica a partir de una centrifuga tipo decanter centrífugo de la casa Peralisi de la serie Baby, a la que llegan los fangos previamente acondicionados químicamente con polielectrolito proveniente de la planta de polielectrolito PPL. Este polielectrolito se dosifica diluido hasta una concentración del 0,12% y a razón de 500 L/h.

Las dimensiones del decanter centrífugo son 2060 x 780 x 1095 mm. La limpieza con agua de red es muy importante y el tiempo de limpieza óptimo tiene que ser sobre 10 minutos. La velocidad de la centrifuga a vacío debe ser superior a 5050 rpm en este proceso, para asegurar que la maquina esté limpia por dentro y para evitar problemas mecánicos.

CAPÍTULO 7. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se va a llevar a cabo un estudio económico del tratamiento del agua residual industrial, incluyendo el gasto asociado a los reactivos, el consumo energético, la mano de obra y el mantenimiento de la instalación. Se va a comparar el coste actual que tiene la empresa y el que tendría si se instalan las modificaciones propuestas en el presente TFG.

En primer lugar, se van a calcular los costes asociados al consumo de reactivos. En la Tabla 14 se muestran los costes reales de los reactivos que actualmente se usan.

Tabla 14. Tarifa de químicos

Producto químico	Precio
Coagulante planta PPS	3,25 €/L
Floculante planta PPS	4,20 €/kg
Sosa cáustica al 30%	0,32 €/L
Poliectrolito planta PPL	3,85 €/L

Para ambos casos (el tratamiento actual y las modificaciones aquí planteadas) se va a suponer un caudal de 500 m³/d, que corresponde al caudal de 7 m³/h que llega a cada uno de los 3 DAF o sedimentadores, según sea el diseño actual de la planta o el propuesto en este TFG. Los cálculos se realizan para un funcionamiento de 352 días al año, trabajando las 24 h del día.

A continuación, en la Tabla 15 y Tabla 16, se van a exponer el estudio económico de consumo de reactivos del sistema actual en la empresa Eslava Plásticos S.A y del diseño propuesto.

Tabla 15. Estudio económico de los reactivos del sistema actual en la empresa Eslava Plásticos S.A

Producto químico	Dosis	Cantidad/año	€/año	€/m ³
Coagulante planta PPS	2,94 L/h	24.837,12 L/año	80.720,64	0,455
Floculante planta PPS	0,29·10 ⁻³ kg/h	24,84 kg/año	104,32	0,59·10 ⁻³
Sosa cáustica 30%	1,16 L/h	9.757,44 L/año	3.122,38	0,018
Poliectrolito planta PPL	0,60 L/h	5068,8 L/año	19.514,88	0,110
			103.462,22	0,583

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

Tabla 16. Estudio económico de los reactivos en el diseño propuesto

Producto químico	Dosis	Cantidad/año	€/año	€/m ³
Coagulante planta PPS	0,74 L/h	6.209,28 L/año	20.180,16	0,113
Floculante planta PPS	0,11·10 ⁻² kg/h	8,87 kg/año	37,26	0,2·10 ⁻³
Polielectrolito planta PPL	0,24 L/h	3.041,28 L/año	11.708,92	0,065
			31.926,34	0,178

En el capítulo 6 del diseño propuesto se ha explicado el cambio en la dosificación del coagulante y floculante. La reducción del polielectrolito para fangos es debida a la eliminación del tratamiento biológico, ya que de esta manera los fangos solo provienen del tratamiento físico-químico, suponiendo que la contribución de los fangos en el tratamiento biológico era de aproximadamente un 40%, la dosis de polielectrolito se reduce en esta proporción, pasando de 0,6 a 0,24 L/h.

A continuación, se presentan en la Tabla 17 y Tabla 18 el consumo energético para la configuración actual de la planta y para el diseño propuesto, siendo la tarifa de luz contratada de 0,245 €/kW·h.

Tabla 17. Estudio económico del consumo eléctrico en la planta actual

Equipos		Potencia consumida (kW)	€/año	€/m ³
Vibrotamiz (modelo ZEUS)		1,1	2.276,73	0,128
Pozo bombeo 1	Bomba pozo 1	2,2	4.553,47	0,025
Rototamiz (modelo TR6151)		0,55	1.138,36	0,006
Pozo bombeo 2	Bomba pozo 2	2,2	4.553,47	0,025
Pozo 3 recirculación	Bomba pozo 3	0,48	993,48	0,005
Homogeneizador (215 m ³)	Bomba soplante	1,8	3.725,56	0,020
	Compresor	0,82	1.697,20	0,009
Equipos DAF	3 bombas entrada	0,48	2.980,45	0,016
	3 bombas dosificadoras de coagulante	1,3	8.072,06	0,045
	3 bombas dosificadoras de floculante	1,3	8.072,06	0,045
	3 bombas dosificadoras de sosa	1,3	8.072,06	0,045

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

Tabla 17 continuación. Estudio económico del consumo eléctrico en la planta actual

Equipos		Potencia consumida (kW)	€/año	€/m ³
Equipos DAF	3 bombas de cavitación	2,5	15.523,20	0,087
	3 motores de las paletas	0,44	10,12	5.7·10 ⁻⁵
	3 bombas de salida hacia el pozo 3	0,48	2.980,45	0,016
Reactor biológico (448 m ³)	3 bombas entrada	0,48	2.980,45	0,017
	Bomba soplante	1,8	3.725,56	0,021
	Compresor	0,82	1.697,20	0,010
Decantador 2º	Bomba entrada	0,48	993,48	0,006
Homogeneizador de lodos (40 m ³)	3 bombas salida DAF	0,48	993,48	0,006
	Agitador CMD (*)	0,75	1.552,32	0,009
	Bomba dosificadora de polielectrolito	1,3	2.690,68	0,015
Centrífuga Baby 3		7,5	15.523,20	0,088
			159.867,66	0,534

(*) Las paletas de los DAFs funcionan 40 s cada hora.

Tabla 18. Estudio económico del consumo eléctrico en el diseño propuesto

Equipos		Potencia consumida (kW)	€/año	€/m ³
Vibrotamiz (modelo ZEUS)		1,1	2.276,73	0,013
Pozo bombeo 1	Bomba pozo 1	2,2	4.553,47	0,026
Pozo 2 recirculación	Bomba pozo 2	0,48	993,48	0,006
Homogeneizador (215 m ³)	Bomba soplante	1,8	3.725,56	0,021
	Compresor	1,8	3.725,56	0,021
Decantadores	3 bombas entrada	0,48	2.980,45	0,017
	3 bombas dosificadoras de coagulante	1,3	8.072,06	0,045
	3 bombas dosificadoras de floculante	1,3	8.072,06	0,045

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

Tabla 18 continuación. Estudio económico del consumo eléctrico en el diseño propuesto

Equipos		Potencia consumida (kW)	€/año	€/m ³
Decantadores	3 bombas salida de salida hacia pozo 2	0,48	993,48	0,006
	3 bombas de salida hacia vertido	0,48	993,48	0,006
Homogeneizador de lodos (40 m ³)	3 bombas salida DAF	0,48	993,48	0,006
	Agitador CMD	0,75	1.552,32	0,009
	Bomba dosificadora de polielectrolito	1,3	2.690,68	0,015
Centrífuga Baby 3		7,5	15.523,20	0,088
			96.054,02	0,322

Además, también se debe tener en cuenta el mantenimiento de las instalaciones, que el diseño actual cuenta con dos peones con una dedicación al tratamiento del agua residual de 30 minutos al día y el diseño propuesto tan solo con un peón con la misma dedicación diaria, debido a la eliminación del tratamiento biológico, pudiéndose ver estos costes en la Tabla 19 y la Tabla 20.

Tabla 19. Mano de obra en la planta actual

Mano de obra	€/h	€/año	€/m ³
2 peones ordinarios	12,77	4.495,04	0,025
Oficial de primera	13,42	2.361,92	0,013
Ingeniero Químico	18,25	3.212,00	0,018
		10.068,96	0,056

Tabla 20. Mano de obra en el diseño propuesto

Mano de obra	€/h	€/año	€/m ³
1 peón ordinario	12,77	2.247,52	0,013
Oficial de primera	13,42	2.361,92	0,013
Ingeniero Químico	18,25	3.212,00	0,018
		7.821,44	0,044

A continuación, en la Tabla 21 se presenta un resumen del estudio económico para poder comparar todos los costes que tiene la empresa actualmente y los que tendría con el diseño propuesto.

Tabla 21. Resumen estudio económico

Diseño	Concepto	€/año		€/m³	
Actual	Reactivos	103.462,22	273.398,84	0,583	1,173
	Energía	159.867,66		0,534	
	Mano de obra	10.068,96		0,056	
Propuesto	Reactivos	31.926,34	135.970,80	0,178	0,544
	Energía	96.223,02		0,322	
	Mano de obra	7.821,44		0,044	

Comparando el sistema actual de la empresa con el diseño propuesto se puede ver una gran diferencia del coste que conlleva el tratamiento del agua al año, pasando de 273.398,84 € a 135.970,80 €, de forma que se consigue una reducción del 50,26% del coste final, ya que hay un ahorro de reactivos, energético y de mano de obra. A forma de resumen, se enumeran las diferencias entre el diseño actual y el propuesto, que repercuten sobre el ahorro en el tratamiento:

- Un pozo menos de bombeo.
- Se elimina el rototamiz.
- Se reduce la dosificación de coagulante y floculante en un 75% y 64,3%, respectivamente.
- Se elimina la dosificación de sosa cáustica.
- No se hacen uso de los elementos de los DAFs, tales como las bombas de cavitación.
- Se elimina el tratamiento biológico.

La reducción más notable se encuentra en los reactivos, ya que se consigue una reducción del 69,14%, a la que le sigue la disminución del consumo energético, que supone una reducción del coste del 39,81%, y finalmente la reducción de la mano de obra contribuye en disminuir un 22,32% el coste final.

Por lo tanto, el coste del agua tratada disminuye con la aplicación del diseño propuesto, pues con el nuevo diseño sería de 0,544 €/m³ y anteriormente era de 1,173.

La puesta en marcha del diseño propuesto conllevaría una mayor calidad del agua tratada, con lo que se contribuye con la OD6. Además, se consigue una reducción del coste final del tratamiento del agua residual y a disminuir el impacto ambiental, pudiéndose reducir la cantidad de químicos a dosificar y la energía consumida, contribuyendo con ello a fomentar el consumo responsable de los productos químicos, con lo que ayudamos a conseguir la OD12.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Final de Grado se ha realizado un estudio de la planta de tratamiento de aguas de la empresa Eslava Plásticos S.A. con el fin de optimizar el proceso. En particular, se han propuesto alternativas de mejora en el pretratamiento y en el tratamiento físico-químico aplicados al agua residual generada en el lavado de plásticos.

Tras evaluar los resultados experimentales, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Tras el estudio del proceso de coagulación-floculación del agua residual, mediante los ensayos jar-test, se han seleccionado las condiciones óptimas de operación: concentración de coagulante de 0,07 mL/L, concentración de floculante de 0,05 mL/L, con un pH de trabajo correspondiente al pH natural de la muestra, que suele estar en torno a 7.
- Con la realización de estos ensayos se ha visto que entre el 86 y 92% de los sólidos del agua residual son sedimentables (con 30 min de sedimentación), por lo que su eliminación se podría llevar a cabo mediante un sedimentador situado en el pretratamiento.
- También se observó que el floculante utilizado por la empresa (de carácter catiónico) no tenía un efecto significativo en los resultados finales. Tras realizar ensayos con otros dos floculantes diferentes, uno catiónico y otro aniónico, comprobándose que el que mejores resultados obtenía al pH del agua residual era el aniónico, obteniendo un 41% de eliminación de la turbidez frente al 18% del utilizado por la empresa, en las mismas condiciones (coagulante 0,1 mL/L, floculante 0,044 mL/L y 30 minutos de tiempo de sedimentación).
- Los ensayos jar-test con el agua residual diluida indicaron que se pueden reducir las cantidades de reactivos a utilizar al disminuir el valor inicial de SS, pues cuando los SS están en torno a 2500 mg/L la cantidad de coagulante y floculante se establece en 0,07 y 0,05 mL/L, pero cuando estos están por debajo de 500 mg/L se puede disminuir a la mitad la dosis de los reactivos. Sin embargo, parece haber un límite en la calidad del agua que se puede obtener, ya que al comparar las dosis de reactivos dosificada, es indiferente la cantidad añadida de estos, ya que se llega a resultados muy similares.
- Respecto al diseño hecho para la instalación, se tiene en cuenta que tanto los sólidos iniciales del agua residual, como los sólidos tras el tratamiento físico/químico son sedimentables. Además, se opera al pH del agua. Finalmente, con la calidad de agua esperada para las modificaciones propuestas, se cumple con los requisitos para verter el agua tratada directamente a alcantarillado y es posible reutilizar 3,6 m³/h. Con todo ello, los cambios que se introduce el nuevo diseño con respecto al actual son los siguientes:
 - Tras el vibrotamiz, que elimina partículas por encima de 500 µm (principalmente plásticos), se instala un sedimentador, que elimina entre un 87% y 91% de los sólidos iniciales, lo que conllevará un ahorro de reactivos, reduciéndose un 75% la dosis de coagulante, un 64,3% la de floculante necesarios en el siguiente paso.

- Se sustituyen los DAFs por decantadores. Con este nuevo sistema habrá un menor consumo energético, debido a que los sedimentadores requieren mucha menos energía que los sistemas DAFs.
 - Se eliminación la dosificación de sosa, con el consiguiente ahorro en reactivos.
 - Se elimina el tratamiento biológico, con el consiguiente ahorro en energía y en personal.
- Con el diseño propuesto se consigue reutilizar 3,6 m³/h en el proceso de lavado.
 - El estudio económico del diseño propuesto consigue una reducción del coste final del tratamiento del agua residual de un 50,26%. Con ello se tiene que el precio del tratamiento es 0,544 €/m³, el cual es un precio competitivo comparado con el precio medio del tratamiento del agua para uso doméstico, que es 1,9 €/m³ (iAgua, 2020).

Finalmente, se puede concluir que se han cumplido los objetivos marcados en este trabajo, llegando a la conclusión principal de que el diseño de la planta actual es mejorable y que no está diseñada conforme a las características del agua. Para optimizar el proceso se deberían llevar a cabo las modificaciones propuestas en el diseño realizado, ya que además de suponer un ahorro económico contribuye a disminuir el impacto ambiental, consumiendo menos reactivos, una menor cantidad de energía y fomentando una economía más circular. Además, sería necesario probar otro coagulante y floculante, para abaratar costes y mejorar la calidad del agua final.

CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

Bolaños Zea, J. J. G. (2019). *Reciclado de plástico PET* [Trabajo Final de Grado, Universidad Católica San Pablo]. <http://repositorio.ucsp.edu.pe>

Carranza Gaona, N. P. (2010a). *Diseño del proceso de lavado de residuos plásticos provenientes de invernadero* [B.S. thesis]. QUITO/EPN/2010.

Castells, X. E., & de Gracia, L. J. (2012). *Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración: Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Díaz de Santos.

Cordero Ferrero, J. (2019). *Economía circular: El ciclo integral del agua y la eficiencia energética. Encuentros Multidisciplinares*.

Eslava Plásticos—Reciclado, Compounding, Distribución. (s. f.). Recuperado 30 de abril de 2022, de <https://www.eslavaplasticos.com/>

Fernández Rivas, F. (2018). *Seguimiento de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas en Cantabria* [Trabajo Final de Grado, Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/>

GUÍA PARA EL DISEÑO DE DESARENADORES Y SEDIMENTADORES - PDF Free Dowload. (s.f.). Recuperado el 4 de julio de 2022, de <https://docplayer.es/15102100-Guia-para-el-diseno-de-desarenadores-y-sedimentadores.html>

Hachi Quintana, J. G., & Rodríguez Mejía, J. D. (2010). *Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de polietileno tereftalato (PET), en la ciudad de Guayaquil* [B.S. thesis].

iAgua, reacción. (202, diciembre 10). Estudio AEAS-AGA 2020: *El precio medio del agua para uso doméstico en España es de 1,90 €/m³* [Text]. iAgua; iAgua. <https://www.iagua.es/noticias/aeas/estudio-aeas-aga-2020-precio-medio-agua-uso-domestico-espana-es-190-eum3>

IqD InvesQuia, S.L. (2020). *Manual de funcionamiento de la depuradora de aguas residuales de Eslava Plásticos S.A.*

Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, Pub. L. No. Real Decreto-ley 11/1995, BOE-A-1995-27963 37517 (1995). <https://www.boe.es/eli/es/rdl/1995/12/28/11>

Jorge, L. R. de. (2020, diciembre 15). *El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes* [Text]. iAgua; iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>

Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030—Agenda 2030. (s. f.). Recuperado 4 de mayo de 2022, de <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm>

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

Muñoz Cruz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. [Trabajo Final de Grado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/514>

Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. (s. f.). 22.

REGLAMENTO (UE) 2020/741 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua—Buscar con Google. (s. f.). Recuperado 16 de mayo de 2022.

Rico, A., Arahuetes Hidalgo, A., & Morote Seguido, Á. F. (2016). *Depuración y reutilización de aguas residuales regeneradas en las regiones de Murcia y Valencia* [Trabajo Final de Grado, Universidad de Alicante]. <https://rua.ua.es/dspace/>

Robles, F. O., Rojo, J. C. T., & Bas, M. S. (2011). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes.: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. Ediciones Díaz de Santos.

Salgot, M., & Folch, M. (2008). Reutilización de aguas residuales. *Aguas continentales. Gestión de recursos hídricos, tratamiento y calidad del agua, Informes CSIC, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid*.

Sigalat Navarro, M. (2013). *Estudio del tratamiento físico-químico de las aguas residuales de una industria de procesado y congelado de verduras* [Trabajo Final de Máster, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/>

DOCUMENTO 2

PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

PRESUPUESTO	1
I. CUADRO DE PRECIOS DEL TRABAJO DE INGENIERÍA.....	1
II. CUADRO DE PRECIOS DE LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO	4

PRESUPUESTO

Tras realizar el diseño y el estudio económico de la planta depuradora para optimizar el tratamiento del agua residual generada durante la limpieza de plásticos en la empresa Eslava S.A, se va a elaborar el presupuesto correspondiente al estudio realizado por esta estudiante en las instalaciones de la UPV, así como el presupuesto necesario para llevar a cabo el diseño propuesto en este Trabajo Fin de Grado.

I. CUADRO DE PRECIOS DEL TRABAJO DE INGENIERÍA

En el cálculo del cuadro de precios de la mano de obra para la elaboración de este TFG se han considerado las 300 horas equivalentes a los 12 créditos del trabajo y una retribución de 4,3 €/h según el salario mínimo establecido en las prácticas de empresa, pudiéndose ver este coste en la Tabla 1.

Además, dentro del trabajo de ingeniería, se tendrán en cuenta los costes relacionados con los reactivos utilizados en los ensayos (Tabla 2) y los relacionados con el uso de los equipos y las instalaciones de la UPV (Tabla 3).

Tabla 1. Presupuesto parcial de la mano de obra del trabajo de ingeniería

Código					
1	Mano de obra				
Subcódigo	Unidad	Descripción	Cantidad (ud)	Precio (€/ud)	Importe (€)
1.01	h	Estudiante de Ingeniería Química	300	4,30	1290,00
			25% Costes Indirectos	1.290,00	322,50
				Total	1.612,50

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

Tabla 2. Presupuesto parcial de los reactivos en el trabajo de ingeniería

Código					
2	Reactivos empleados para los diferentes ensayos				
Subcódigo	Unidad	Descripción	Cantidad (ud)	Precio (€/ud)	Importe (€)
2.01	mL	NaOH 40%	10	0,02	0,2
2.02	mL	HCl 36%	10	0,01	0,1
			25% Costes Indirectos	0,3	0,075
3	Materiales de un solo uso necesarios para la realización de los ensayos				
3.01	ud	Filtros de acetato	39	0,50	19,50
3.02	cubeta	Kits de reactivos para DQO	6	4,56	27,36
3.03	cubeta	Kits de reactivos para N _{total}	6	6,08	36,48
3.04	cubeta	Kits de reactivos para P _{total}	6	5,28	31,68
			25% Costes Indirectos	115,02	28,75
				Total	144,15

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

Tabla 3. Presupuesto parcial de los equipos e instalaciones en el trabajo de ingeniería

Código					
4	Diferentes equipos y material empleados en los ensayos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Materiales usados en el transcurso diario del laboratorio				
Código	Unidad	Descripción	Cantidad (ud)	Precio (€/ud)	Importe (€)
4.01	Número de unidades	Equipos	7	25,00	175,00
4.02	Número de unidades	Utensilios	7	25,00	175,00
			25% Costes Indirectos	350,00	87,50
5	Instalaciones empleadas en la UPV (ensayos realizados en el Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiente de la UPV).				
5.01	día	Instalaciones	40	20,00	800,00
			25% Costes Indirectos	800,00	200,00
				Total	1.437,50

De esta forma, con el coste total de todas las unidades de obra del presupuesto de ejecución del proyecto, se calcula el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) del trabajo en ingeniería (Tabla 4).

Tabla 4. Presupuesto de Ejecución Material (PEM) del trabajo en ingeniería

Código	Unidad de obra	Importe (€)
1	Mano de obra	1.612,50
2	Reactivos	0,375
3	Materiales de un solo uso	143,77
4	Equipos e utensilios	437,50
5	Instalaciones	1000,00
Total		3.194,15

El Presupuesto de Ejecución Material del trabajo de ingeniería asciende a la expresada cantidad de **TRES MIL CIENTO NOVENTA Y CUATRO CON QUINCE CÉNTIMOS**.

II. CUADRO DE PRECIOS DE LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO

En este apartado se va a realizar el presupuesto de la ejecución del proyecto diseñado en el presente TFG, en el que se va a contemplar un tiempo de obra de un mes, con una jornada laboral de 5 días a la semana y 8 horas al día.

En primer lugar, se presenta el cuadro de precios del presupuesto parcial de la mano de obra en la 6.

Tabla 5. Presupuesto parcial de la mano de obra de la ejecución del proyecto

Código					
1	Mano de obra				
Subcódigo	Unidad	Descripción	Cantidad (ud)	Precio (€/ud)	Importe (€)
1.01	h	Peón ordinario	160	12,77	2.043,20
1.02	h	Oficial de primera	160	13,42	2.147,20
1.03	h	Fontanero	160	13,23	2.116,80
1.04	h	Jefe de montaje	160	14,20	2.272,00
1.05	h	Ingeniero Químico	160	18,25	2.920,00
				Total	11.499,20

En segundo lugar, se detallan los equipos necesarios con sus precios unitarios en la Tabla 6, para determinar el coste total de los equipos a instalar en la planta según el diseño propuesto.

Tabla 6. Presupuesto parcial de los equipos de planta de la ejecución del proyecto

Código					
2	Equipos de la planta				
Subcódigo	Unidad	Descripción	Cantidad (ud)	Precio (€/ud)	Importe (€)
2.01	ud	Sedimentador primario	1	11.102,41	11.102,41
2.02	ud	Sedimentador	3	3.730,41	11.191,23
2.03	ud	Válvula de seguridad	4	1.711,00	6.844,00
2.04	ud	Válvula de regulación	4	1.299,00	5.196,00
				Total	34.333,64

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m3/d.

De esta forma, con el coste total de todas las unidades de obra del presupuesto de ejecución del proyecto se calcula el Presupuesto de Ejecución Material (PEM), el cual se muestra en la Tabla 8.

Tabla 7. Presupuesto de Ejecución Material (PEM) de la ejecución del proyecto

Código	Unidad de obra	Importe (€)
1	Mano de obra	11.499,20
2	Equipos de la planta	34.333,64
	Total	45.832,84

Asciende el Presupuesto de Ejecución Material de la ejecución del proyecto a la expresada cantidad de **OCHENTA Y OCHO MIL DOSCIENTOS TREINTA Y DOS EUROS CON OCHENTA Y TRES CÉNTIMOS.**

Considerando los gastos generales (13%), el beneficio industrial (6%), y el IVA del proyecto (21%), se obtiene el Presupuesto de Base de Licitación, en la Tabla 8.

Tabla 8. Presupuesto de Base de Licitación de la ejecución del proyecto

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	45.832,84
Gastos generales (GG): 13%	5.958,27
Beneficio industrial (BI): 6%	2.749,97
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	54.541,08
IVA: 21%	11.453,62
Presupuesto de Base de Licitación	65.994,70

El Presupuesto de Base de Licitación asciende a la expresada cantidad de **SESENTA Y CINCO MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y CUATRO CON SETENTA CÉNTIMOS.**

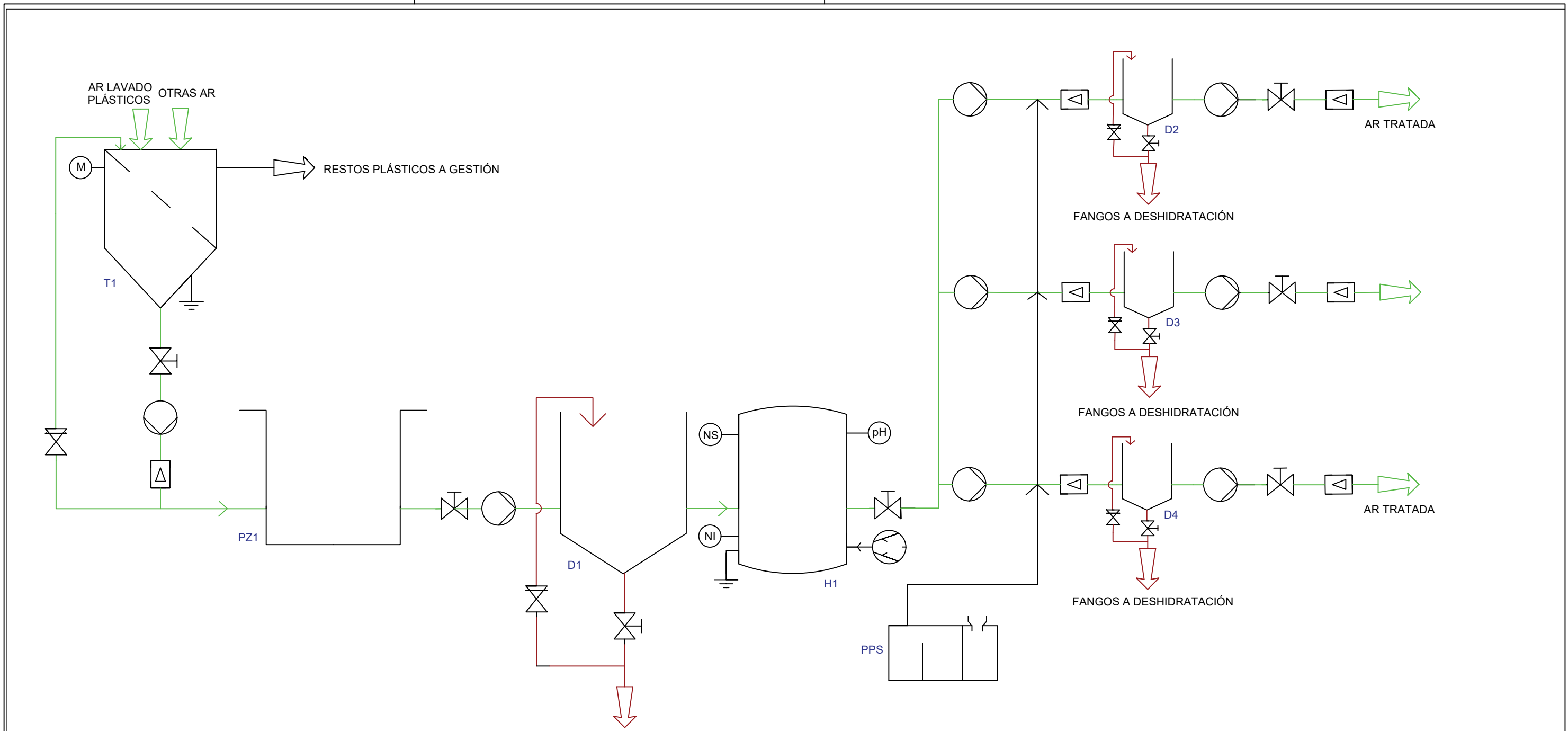
DOCUMENTO 3

PLANOS

Optimización del proceso físico-químico aplicado al tratamiento de un agua residual generada en la limpieza de plásticos en la empresa Eslava Plásticos S.A. Diseño de la instalación para un caudal de 500 m³/d.

ÍNDICE DE PLANOS

Diagrama de flujo del pretratamiento y del tratamiento físico-químico del diseño propuesto...PLANO 1



MATERIA SEDIMENTABLE A LÍNEA DE FANGOS

LEYENDA

T1	VIBROTAMIZ	PZ1	POZO DE BOMBEO 1	D1	DECANTADOR PRIMARIO
H1	HOMOGENEIZADOR	D2, D3, D4	DECANTADORES SECUNDARIOS	PPS	PLANTA DE POLIELECTROLITO SÓLIDO
(M)	MOTOR ELÉCTRICO	(V)	VÁLVULA DE REGULACIÓN	(B)	BOMBA
(C)	CAUDALÍMETRO	(V)	VÁLVULA DE SEGURIDAD	(T)	TOMA A TIERRA
(NS)	NIVEL SUPERIOR	(NI)	NIVEL INFERIOR	(pH)	SENSOR DE PH
(A)	AIREADOR	(L)	LÍNEA DE AGUAS	(R)	LÍNEA DE FANGO