



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN PARA  
TRATAR UN AGUA RESIDUAL TEXTIL  
COMBINANDO TRATAMIENTO  
FÍSICO-QUÍMICO Y OXIDACIÓN  
AVANZADA ( $Q_{\text{diseño}} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ )**

AUTOR: EDUARDO FLORENCIA CEVALLOS

TUTORA: BEATRIZ ELENA CUARTAS URIBE

COTUTORA: AMPARO BES PÍA

**Curso Académico: 2015-16**



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quería agradecer la atención, dedicación y apoyo que he recibido por parte de mis tutoras Beatriz Elena Cuartas Uribe y María Amparo Bes Pia, sin vuestra ayuda y conocimiento no hubiese sido posible realizar este trabajo final de grado.

A mis padres Henry Modesto Villacrés Gavica y Nadhia Katherine Cevallos Sotomayor, por enseñarme que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se puede conseguir en esta vida.

A mis hermanos Ricardo, Nicolás y hermana Valeria, por todo lo aportado hacia mi persona.

A mi novia Camila, por ser pieza fundamental en mi vida.

A mi tía Alicia y abuela Magaly, por haberme brindado vuestra ayudada en todo lo que necesitará.

A todos mis profesores de carrera, por haber transmitido vuestros conocimientos hacia mí.

A mis compañeros del laboratorio, por haberme ayudado desinteresadamente cuando surgía cualquier tipo de duda.



## RESUMEN

El presente Trabajo Final de Grado tiene como finalidad diseñar una instalación para tratar el agua residual procedente de la industria textil. El tratamiento consiste en aplicar un tratamiento físico-químico y un tratamiento de oxidación avanzada. Para definir los parámetros de ambos tratamientos, se han realizado ensayos a nivel de laboratorio empleando disoluciones modelo. En el tratamiento físico-químico se han ensayado diferentes coagulantes y floculantes, haciéndose un barrido de concentraciones y pH.

A continuación, el sobrenadante obtenido en el tratamiento físico-químico es sometido a un proceso de oxidación avanzada, concretamente con el método Fenton, probándose diferentes concentraciones de  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ . La calidad final de agua tratada se evaluó en términos de la demanda química de oxígeno (DQO), color, hierro y turbidez.

**Palabras clave:** agua residual, industria textil, tratamiento físico-químico, oxidación avanzada.



## RESUM

El present Treball Fi de Grau té com a finalitat el disseny d'una instal·lació per al tractament d'aigua residual procedent de la indústria tèxtil. El tractament consisteix en aplicar un tractament físic-químic i un tractament d'oxidació avançada. Per a definir els paràmetres dels dos tractaments s'han realitzat assajos a nivell de laboratori emprant dissolucions model. Al tractament físic-químic s'han assajat diferents coagulants i floculants, fent-se un estudi a diferents concentracions i pHs.

A continuació, el sobrenadant obtingut al tractament físic-químic és sotmès a un procés d'oxidació avançada, concretament amb el mètode Fenton, provant-se diferents concentracions de  $\text{FeCl}_3$  i  $\text{H}_2\text{O}_2$ . La qualitat final de l'aigua tractada es va aevaluar en termes de la demanda química d'oxigen (DQO), color, ferro i terbolesa.

**Paraules clau:** aigua residual, indústria tèxtil, tractament físic-químic, oxidació avançada.





## **ABSTRACT**

The following final assignment aims to design an installation for the treatment of wastewater from the textile industry. The treatment consists in applying a physic-chemical and an advanced oxidation treatment. To define the parameters of both treatments, there have been done essays on a laboratory scale using model solutions. In the physic-chemical treatment different coagulants and flocculants were tested, making a sweep of concentrations and pH.

Next, the supernatant obtained after the physic-chemical treatment is subjected to an advanced oxidation process by Fenton method. Several concentrations of  $\text{FeCl}_3$  and  $\text{H}_2\text{O}_2$  are tested. The final quality of the water was evaluated in terms of the chemical oxygen demand(DQO), color, iron and turbidity.

**Keywords:** wastewater, textile industry, physic-chemical treatment, advanced oxidation.



# **DOCUMENTO 1:**

## **MEMORIA**



**DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG**

DOCUMENTO 1: MEMORIA

DOCUMENTO 2: PLANO

DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO

**INDICE DE LA MEMORIA**

1. OBJETIVOS .....	1
2. ANTECEDENTES .....	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	3
3.1. JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA .....	3
3.2. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	3
4. LEGISLACIÓN APLICABLE .....	4
4.1. AGUAS RESIDUALES.....	4
4.1.1. Legislación Europea.....	4
4.1.2. Legislación Nacional .....	4
4.1.3. Legislación Comunidad Valenciana .....	5
5. INDUSTRIA TEXTIL .....	6
5.1. INTRODUCCIÓN .....	6
5.2. SITUACIÓN DEL SECTOR A NIVEL EUROPEO Y NACIONAL.....	8
6. TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA TEXTIL.....	9
6.1. PRETRATAMIENTO .....	9
6.1.1. Tamizado .....	9
6.1.2. Separador de grasas y flotantes.....	9
6.1.3. Homogeneización.....	10
6.2. TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO.....	10
6.2.1. Coagulación .....	10
6.2.2. Floculación.....	12
6.2.3. Sedimentación.....	13
6.3. PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA .....	13
6.3.1. Proceso Fenton.....	15

7. METODOLOGÍA.....	16
7.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	16
7.1.1. Preparación y caracterización del agua residual modelo .....	16
7.1.2. Ensayos de coagulación-floculación (Jar-Test).....	17
7.1.3. Ensayos de oxidación avanzada .....	21
7.2. TÉCNICAS ANALÍTICAS.....	25
7.3. MEDIDAS DE SEGURIDAD.....	31
8. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	35
8.1. AGUA RESIDUAL MODELO.....	35
8.2. RESULTADOS DEL JAR-TEST.....	35
8.3. RESULTADOS OXIDACIÓN AVANZADA .....	46
9. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN .....	54
9.1. CÁLCULOS DE LA INSTALACIÓN.....	54
9.1.1. Tanque de homogeneización .....	54
9.1.2. Tratamiento físico-químico .....	54
9.1.3. Tratamiento de oxidación avanzada .....	58
9.1.4. Recogida de agua tratada.....	61
9.1.5. Dosificación de reactivos químicos .....	61
9.2. ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN.....	63
9.2.1. Equipos principales.....	63
9.2.2. Equipos secundarios.....	66
10. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA .....	70
11. CONCLUSIONES .....	72
12. BIBLIOGRAFÍA.....	73
13. ANEXO .....	75

## 1. OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este Trabajo Final de Grado (TFG) es el **diseño de una instalación para tratar un agua residual textil**, minimizando así el impacto que esta genera en el medio ambiente. Para ello se aplicarán técnicas de depuración de aguas residuales tales como: tratamiento físico-químico y oxidación avanzada. Finalizado el tratamiento del agua residual se evaluará la calidad del agua resultante con el fin de conocer si cumple con la legislación vigente y puede ser vertida a la red de alcantarillado.

Como objetivos específicos del TFG se establecen los siguientes:

- Caracterización de los parámetros más representativos del agua residual modelo.
- Evaluación del rendimiento de los métodos de depuración aplicados: físico-químico y oxidación avanzada.
- Comparación de los distintos coagulantes y floculantes utilizados en el tratamiento físico-químico.
- Obtención de la dosis óptima de los reactivos utilizados, en cada proceso: físico-químico y oxidación avanzada.
- Elaboración de un presupuesto para la instalación diseñada.

## 2. ANTECEDENTES

El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión de suma importancia a nivel mundial, ya que disponer de agua de buena calidad y en cantidad suficiente, permitirá que el impacto generado no deteriore la calidad del medio ambiente, y por ende en la salud y la calidad de vida de sus habitantes.

Las aguas procedentes de la red de saneamiento, son tratadas en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) donde, una vez eliminadas las sustancias nocivas, se reintegran a los cauces fluviales en condiciones de calidad óptimas o se permite la posibilidad de su reutilización [1].

Las civilizaciones de la antigüedad concretamente la civilización griega fue la primera sociedad en mostrar interés por la calidad del agua que consumían. Retiraban el agua utilizada mediante sistemas de aguas residuales junto con el agua de lluvia, seguido utilizaban embalses de aireación con el fin de purificar el agua. Los romanos aplicaron el tratamiento por aireación para mejorar la calidad del agua, y agregaron técnicas de protección contra gérmenes externos en aquellos sitios donde se almacenaba el agua. Después de la caída del imperio romano hubo poco desarrollo en relación con los sistemas de tratamiento del agua.

Tuvieron que pasar muchísimos años, y no es hasta el siglo XVIII cuando las ciudades empiezan a desarrollarse tecnológicamente. El primer suministro de agua potable para toda una ciudad, fue construido en Paisley, Escocia, en el año 1804 por John Gibb. Tres años después se empezó a transportar agua filtrada a la ciudad del Glasgow. La primera planta de tratamiento de agua conocida, fue creada en Paris, Francia, empezó a funcionar en el año 1806. El agua sedimentaba durante doce horas, luego se pasaba por sistemas de filtración. Los filtros consistían de arena, carbón y su tiempo de aplicación era de seis horas [2].

A finales del siglo XIX, las ciudades españolas, empezaron a preocuparse por la calidad del agua, debido a las epidemias y los problemas de salubridad que padecían sus habitantes. Esto generó que los ingenieros de caminos buscaran soluciones para evacuar las aguas residuales urbanas y abastecer de agua potable a la población. Asimismo, la cada vez mayor preocupación medioambiental genera que en todo el país se invierta en el tratamiento de aguas residuales, con el fin de cumplir la normativa, pasando a crear empresas públicas y privadas para la gestión del ciclo del agua [3].



### **3. JUSTIFICACIÓN**

#### **3.1. JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA**

El presente estudio es de utilidad debido a que cada día mayor cantidad de agua y productos químicos son utilizados para llevar a cabo distintos procesos industriales. Esto ocasiona un grave problema medio ambiental, debido a que pocas industrias realizan una depuración de sus aguas.

Los tintes y colorantes encontrados en las aguas residuales de la industria textil, son compuestos poco biodegradables, impidiendo su degradación en el medio ambiente por lo que es importante plantear alternativas para la gestión de estos residuos y evitar así la contaminación que puedan generar.

La mayoría de los colorantes deben su color a la presencia de compuestos orgánicos de tipo aromático con dobles enlaces conjugados. Debido a los problemas asociados a la biodegradación mediante los métodos convencionales, se han hecho estudios sobre métodos físico-químicos como la coagulación y la floculación, así como procesos de oxidación avanzada como el método Fenton, los cuales mostraron ser efectivos para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con estos compuestos [4].

En este TFG se desarrolla un tratamiento efectivo y económico para tratar las aguas residuales que contienen colorantes. De forma que la industria pueda verter y/o reutilizar sus aguas residuales, cumpliendo en todo momento con los requisitos exigidos por la legislación vigente.

#### **3.2. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA**

Cumpliendo con lo exigido para la obtención del título de Grado en Ingeniería Química, se elabora el presente Trabajo Final de Grado, en el que se aplican los conocimientos adquiridos en el grado.

Para desarrollar el TFG será necesario aplicar y validar conceptos teóricos sobre los distintos tratamientos de aguas residuales, realizar consultas bibliográficas, tomar decisiones, manejar información adecuada. Todo ello, es necesario para la formación del estudiante, ya que ayudará a que el graduado adquiera las competencias propias del Grado en Ingeniería Química y las pueda aplicar para el desempeño de la labor profesional.

## 4. LEGISLACIÓN APLICABLE

### 4.1. AGUAS RESIDUALES

Se denomina aguas residuales a las aguas que se obtienen después de haber realizado algún proceso, ligado a la actividad humana, sea en domicilios, en las fábricas, en actividades ganaderas, etc.

Las aguas residuales suelen contener grasas, materia orgánica, detergentes, minerales, residuos de la industria, y muchas sustancias más que suelen ser tóxicas. Es por ello que estas aguas deben ser depuradas.

Las estaciones depuradoras son las encargadas de realizar el tratamiento más adecuado para así descontaminar las aguas residuales. A continuación, se hará mención de todo el marco legal en materia de depuración de aguas residuales y con aplicación para este proyecto.

#### 4.1.1. Legislación Europea

- Directiva 91/271/CEE del Consejo firmada en mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Directiva 98/15/CEE de la Comisión firmada en febrero de 1998, por lo que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo, en relación con determinados requisitos establecidos en el anexo I, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

#### 4.1.2. Legislación Nacional

- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Resolución de 25 de mayo de 1998, de la Secretaría de Estado de Aguas y Costas, por la que se declaran las «zonas sensibles» en las cuencas hidrográficas intercomunitarias.
- Resolución de 10 de julio de 2006, de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, por la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias.
- Resolución de 30 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias.
- Prevención y el Control Integrados de la Contaminación, IPPC
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido.
- Orden ARM/1312/2009, de 20 de mayo de 2009, por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado dominio público hidráulico y de los vertidos al mismo.

#### **4.1.3. Legislación Comunidad Valenciana**

- Ley 2/1992 del Gobierno Valenciano firmada en marzo de 1992, sobre el saneamiento de aguas residuales de la Comunidad Valenciana.
- Decreto 266/1994 del Gobierno Valenciano firmado en diciembre de 1994, por lo que se aprueba el Reglamento sobre el Régimen Económico-Financiero y Tributario del Canon de Saneamiento.
- Decreto 193/2001 del Gobierno Valenciano firmado en diciembre de 2001, por lo que se modifica el Reglamento sobre el Régimen Económico-Financiero y Tributario del Canon de Saneamiento aprobado mediante Decreto 266/1994 del Gobierno Valenciano.

## 5. INDUSTRIA TEXTIL

### 5.1. INTRODUCCIÓN

La industria textil comprende al sector industrial de la economía que se dedica a la fabricación de productos como: fibras naturales, fibras sintéticas, hilados, telas, tintados, y asimismo incluye a los productos derivados de estos, que adquiere el consumidor.

Las fibras son las materias primas con mayor importancia, que produce la industria textil debido a que son básicas en muchos procesos; dependiendo del tipo de fibra su origen puede ser químico o petroquímico si se trata de fibras sintéticas, agro ganadero si se trata de fibras naturales.

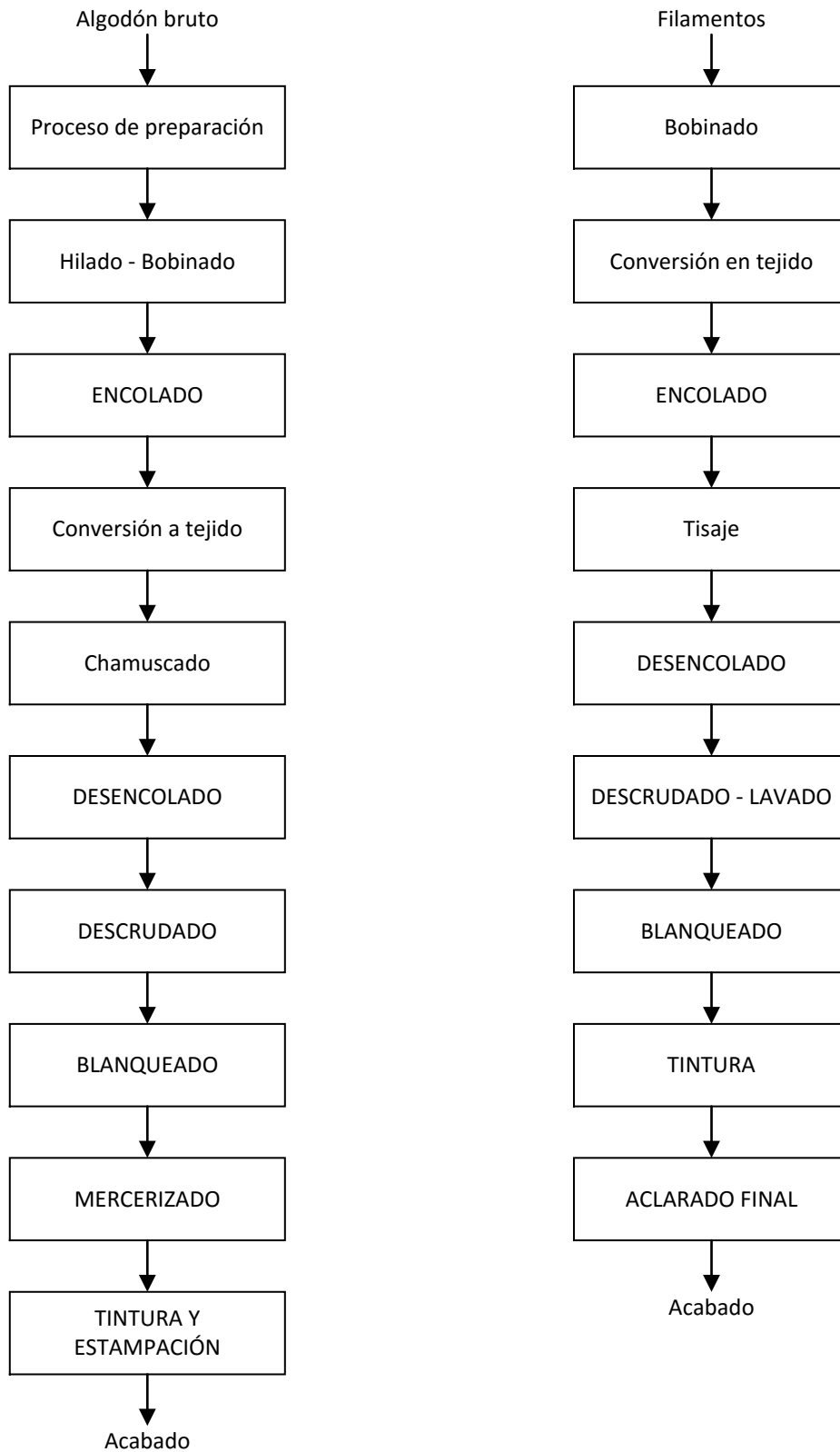
Hasta el siglo XX las fibras más comunes y que más se empleaban eran las obtenidas a partir de la naturaleza como el algodón, la lana, el lino y la seda, pero con el avance de la química orgánica empezó la fabricación de las fibras sintéticas como el nylon y el polyester. Una vez obtenida la fibra, independientemente del tipo ya sea natural o sintética, se llevará a cabo un proceso de hilado para transformar las fibras en hilo y tela, seguido de un proceso de acabado donde se las tiñe, blanquea, estampa por ejemplo y el proceso de confección. Este último es el encargado de transformar la tela en una prenda o en cualquier tipo de objeto [5].

Las operaciones que tienen lugar en la industria textil pueden variar dependiendo del tipo de fibra de que se trate, el acabado que se requiera y la forma de hacerlo de cada fabricante. En la siguiente página, se muestra una figura con dos diagramas, en el primero se explica de manera esquemática el procesado de una fibra vegetal como el algodón, y el segundo el procesado de una fibra sintética o mezcla [6].

En general, las operaciones para la elaboración de un tejido pueden ser las indicadas en la figura 5.1. La industria textil genera gran cantidad de agua residual en sus procesos productivos especialmente en la etapa de tintura, la cual consiste en poner la materia textil en contacto con una solución de colorante para que sea absorbido por la tela [6].

Los residuos generados dependerán del tipo de colorante utilizado. Entre los principales colorantes se encuentran los colorantes reactivos, colorantes directos, colorantes tina, colorantes sulfurosos y colorantes azoicos [7].

Los colorantes reactivos son utilizados especialmente en la lana y el nylon, contienen grupos químicos que se unen por enlace covalente a la tela. Los colorantes tina son compuestos insolubles en agua, poseen una excelente durabilidad del color y estabilidad, su fijación se lleva a cabo mediante una reacción redox. Los colorantes sulfurosos son compuestos solubles en el agua se utilizan principalmente para teñir telas de celulosa, este tipo de colorante se oxida para conseguir su fijación. Los colorantes azoicos son los más utilizados en la actualidad, poseen grandes cualidades aromáticas y son de colores vivos [7].



**Figura 5.1. (A) Proceso de elaboración de tejido de algodón; (B) Proceso de elaboración de tejido a partir de una fibra sintética o mezcla [6].**

## 5.2. SITUACIÓN DEL SECTOR A NIVEL EUROPEO Y NACIONAL

Los productos textiles, tales como hilos, fibras, ropa y telas son consumidos de manera masiva en todo el mundo. Tradicionalmente la mayoría de la producción textil se encontraba en Europa y Norteamérica, desde hace unos pocos años esto ha cambiado, hoy en día es Asia la parte del mundo donde mayor producción textil existe, especialmente en China e India. A pesar de todo, en Europa, la industria textil es una de las más relevantes debido a la gran cantidad de empleos que genera y la creciente demanda de productos. Los últimos datos estructurales indican que, en 2013, un total de 185000 compañías empleaban 1.7 millones de personas con un volumen de negocios de 166 mil millones de euros. Asimismo, la industria textil suma el 3% de la fabricación de valor añadido y el 6% de empleo en Europa [8].

La industria textil en la Unión Europea se compone de pequeñas empresas. Compañías de menos de 50 empleados suman más del 90% de la fuerza laboral y producen casi el 60% del valor añadido. Los mayores productores de la industria son los 5 países más populares de la Unión Europea: Italia, Francia, Reino Unido, Alemania y España. Juntos suman cerca de tres cuartas partes de la producción total de la Unión Europea [8].

En España las zonas de mayor producción se encuentran en Galicia, Cataluña y la Comunidad Valenciana. Según datos del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, en 2014 un total de 14378 compañías mantenían ocupadas a más de 82 mil personas, con una cifra de negocios de 9 mil millones de euros [9].

## 6. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA TEXTIL

La industria textil necesita mucha agua en varias de las etapas del proceso de producción. El agua residual que se obtiene suele contener grasa, aceite, colorantes y otros productos químicos utilizados en las distintas etapas.

El tratamiento de las aguas residuales dependerá de los componentes del agua residual, debido a que no todas las plantas industriales producen un único producto de una misma manera, no se emplean las mismas cantidades de aguas y los mismos productos químicos. Esto hace que existan muchas maneras de tratar un agua residual producida en la industria textil, por lo que será conveniente elegir la más adecuada en función de sus características.

Entre los principales contaminantes están **los sólidos en suspensión, minerales, aceites, grasas e impurezas disueltas**. Los sólidos en suspensión y minerales son sustancias que se depositan lentamente sobre los cursos del agua, por lo que es necesario removerlos. Los aceites y grasas, son tóxicos para la vida acuática animal y vegetal debido a que impiden el paso de la luz, pueden ocasionar problemas de mantenimiento tanto en la red de alcantarillado como en las plantas de tratamiento.

Las impurezas disueltas son los contaminantes más importantes presentes en las aguas residuales textiles, dentro de este grupo están los ácidos, las sales, reductores, oxidantes, materia orgánica disuelta, colorantes, y muchos más productos solubles.

A continuación, se comentan los tratamientos más utilizados para este tipo de aguas residuales.

### 6.1. PRETRATAMIENTO

#### 6.1.1. Tamizado

El tamizado consiste en separar los sólidos de mayor tamaño que pueda contener el agua residual, para evitar obstrucciones en las conducciones de la planta de tratamiento o que se disminuya la eficacia de los tratamientos posteriores. Suelen ser rejillas por las que se hace circular agua, construidas por barras de metal dispuestas en paralelo y espaciadas una determinada longitud [10].

#### 6.1.2. Flotación

La presencia de grasas y aceites en un agua residual textil no es 100 % garantizada, dependerá de si la empresa hace uso de algún tipo de solvente como, por ejemplo, alcohol blanco o algún tipo de hidrocarburo que comúnmente se usan en el tratamiento de lanas [10].

La flotación consiste en generar burbujas de aire de diámetro muy pequeño, que se unirán a los sólidos no disueltos, elevándolos de esta forma hasta la superficie. Este método será adecuado en el caso de que las partículas en suspensión tengan una densidad menor o muy parecida a la del agua, del mismo modo en el caso de que se formen emulsiones, seguido se realiza un barrido con rasquetas, llevándose los sólidos que se encuentren en la parte superior a una rampa de evacuación.

### **6.1.3. Homogeneización**

Esta etapa se realiza con el fin de homogeneizar las características del agua, debido a que a la planta depuradora llegan aguas residuales con características diferentes. Siendo necesario regular las características fisicoquímicas del agua a tratar [10].

## **6.2. TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO**

A la materia en suspensión contenida en el agua residual que tiene un tamaño de partícula entre 1 micra y nanómetro a estas partículas se las conoce como partículas coloidales. Debido a las fuerzas de repulsión eléctrica que existe entre ellas (no se agrupan, por lo que no forman partículas de mayor tamaño) y a su bajo peso tienen velocidad de sedimentación muy lenta y no se pueden eliminar del agua mediante un proceso de sedimentación convencional. Para reducir o eliminar el contenido de las partículas coloidales del agua residual se emplean tratamientos físico-químicos.

El tratamiento físico-químico consiste en favorecer la eliminación de partículas coloidales mediante el uso de unos productos químicos denominados coagulantes y floculantes. Las partículas coloidales constituyen una parte importante de la contaminación de las aguas, ya que ocasionan turbidez y color en el agua.

En este punto se describirían con detalles las etapas del tratamiento físico-químico las cuales son coagulación, floculación y sedimentación.

### **6.2.1. Coagulación**

La coagulación consiste en desestabilizar las partículas coloidales, por neutralización de sus cargas electrostáticas, generalmente negativas, dando como resultado la formación de un floculo. La coagulación se consigue mediante la adición de un producto químico denominado coagulante. Los coagulantes suelen ser electrolitos en solución que aportan carga contraria a la del coloide [11].



El electrolito al solubilizarse en el agua libera iones positivos, con una densidad de carga suficiente para atraer a las cargas negativas de las partículas coloidales y de esta forma neutralizarlas. Esto da paso a que se formen agregados de baja solubilidad que sedimentan [11].

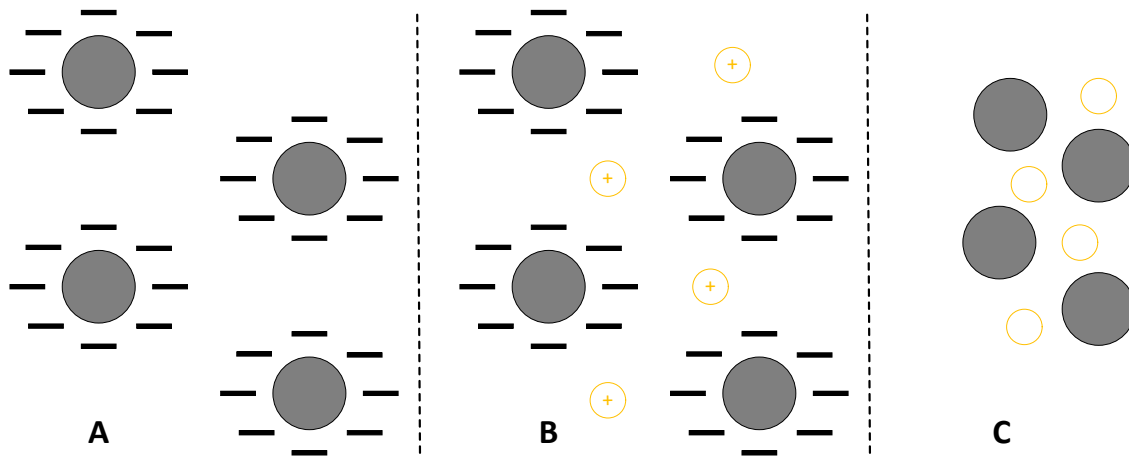
Comúnmente se utilizan sales con cationes de elevada relación carga/masa como  $\text{Fe}^{3+}$  o  $\text{Al}^{3+}$ . Las sales de  $\text{Fe}^{3+}$  suelen ser  $\text{FeCl}_3$  o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , con eficacia similares, pueden ser agregadas al agua residual en estado sólido o líquido. Cabe recalcar que la utilización de una u otra dependerá de si se desea tener en el agua un determinado anión, es decir cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) o sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ). Las sales de  $\text{Al}^{3+}$  pueden ser  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  o policloruro de aluminio, este último presenta una ventaja ya que posee mayor porcentaje en peso de aluminio por kilogramo dosificado. Además de las sales de hierro y aluminio, los polielectrolitos orgánicos también se utilizan como coagulantes y pueden ser catiónicos, aniónicos y no iónicos. Las cantidades a dosificar son menores que las de las sales, pero la eficacia y el coste son mucho mayores [12].

La concentración de coagulante necesaria para llevar a cabo el tratamiento, está relacionada con la turbidez del agua y tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación; una dosis baja de coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula coloidal, la formación de flóculos es muy baja, por lo tanto la turbidez es elevada; una dosis alta de coagulante produce que la carga de la partícula coloidal se invierta, se genera mucha cantidad de flóculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto la turbidez es igualmente elevada [11].

Un factor importante que influye en el proceso de coagulación es el pH. Cada coagulante tiene un intervalo de pH en el que se produce una mejor coagulación. Trabajar fuera de este intervalo disminuye la eficacia del proceso. Otro factor importante para que la coagulación sea óptima es la agitación de la mezcla, el coagulante deberá difundirse de manera rápida, ya que el tiempo de coagulación es corto [12].

No existe regla que determine que coagulante es más eficaz, que concentración es necesaria o a que pH debe estar el agua, la elección más adecuada dependerá de las características fisicoquímicas que presente el agua residual y será necesario realizar el ensayo Jar-Test, donde se analice los resultados obtenidos con distintos coagulantes, a distintas concentraciones y ajustando a pH diferentes [12].

En la figura 6.1 se muestra un esquema del funcionamiento de los coagulantes.



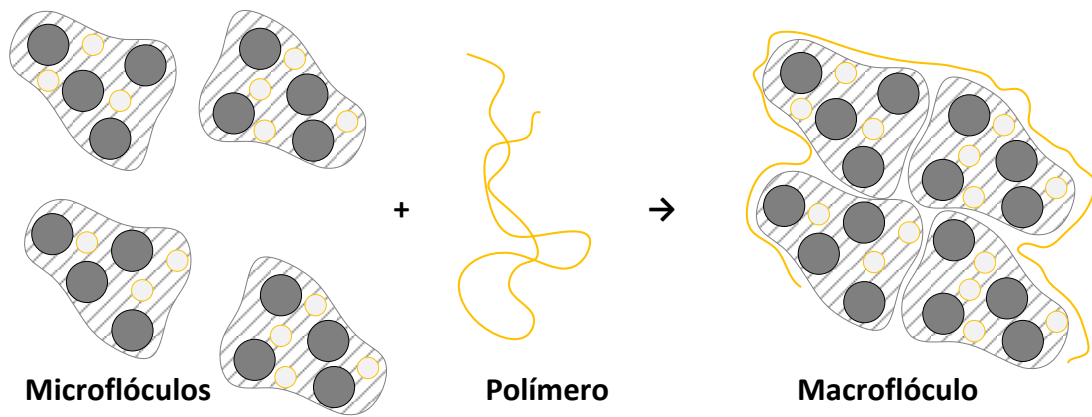
**Figura 6.1. Esquema básico del funcionamiento de los coagulantes. (A) Partículas coloidales; (B) Adición de coagulante catiónico; (C) Partículas coloidales desestabilizadas.**

### 6.2.2. Floculación

La floculación es el proceso posterior a la coagulación, el cual consiste en la captación de las partículas neutralizadas en forma de flóculos, con el fin de aumentar su volumen y peso. Los flóculos inicialmente pequeños, crecen y se aglomeran formando sólidos de mayor tamaño capaces de decantar, aumentando así la velocidad de sedimentación de los flóculos. Para realizar este proceso se añade un floculante, el cual actúa reuniendo a las partículas individuales para formar redes, creando puentes de una superficie a otra. Los floculantes sintéticos poseen una estructura polimérica, con masa molecular elevada, son solubles en agua y presentan cargas eléctricas o grupos ionizables por lo que se denominan polielectrolitos [13].

Para la concentración del floculante se debe tener en cuenta los límites de solubilidad y la naturaleza del agua residual, no se debe adicionar floculante de manera descontrolada ya que se puede producir la hidrólisis antes de la floculación. Existe un rango de dosis establecido para los floculantes que comúnmente se utilizan y suele ser usado de forma orientativa para realizar el proceso. Además, la floculación debe realizarse a velocidades lentas de agitación para no romper los flóculos formados [13].

En la figura 6.2 se muestra un esquema del funcionamiento de los floculantes.



**Figura 6.2. Esquema básico del funcionamiento de los floculantes.**

### 6.2.3. Sedimentación

Esta etapa consiste en separar los agregados formados que se encuentran en el seno del agua. Para ello es necesario dejar decantar la muestra para que mediante acción de la gravedad los sólidos sedimenten. La sedimentación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar o lo que es lo mismo cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación [12].

Existen varios tipos de sedimentadores, en función de las características de las partículas a sedimentar y el sentido del flujo de agua. Los más habituales en el tratamiento físico-químico son los sedimentadores circulares, donde el flujo de agua es radial desde el centro hacia fuera, por lo que la velocidad con la que se desplaza el agua disminuye cuanto más se aleje del centro del sedimentador, haciéndolo adecuado ya que las partículas se aglomeran, aumentando su masa y por ende la velocidad de sedimentación a medida que estas descienden [12].

Los sedimentadores lamelares se utilizan como alternativa a los sedimentadores convencionales, ya que pueden tratar caudales mayores ocupando menor superficie, pero trabajando a mayor superficie de sedimentación debido a la disposición de las lamelas [12].

En ambos casos las partículas depositadas en el fondo de los equipos forman un fango que es arrastrado hacia la salida del equipo mediante rasquetas.

## 6.3. PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA

Los procesos de oxidación avanzada son una de las tecnologías más importantes desarrolladas, tienen como objetivo la eliminación de compuestos solubles poco biodegradables en las aguas residuales. Los procesos aplicados a la oxidación avanzada consisten en la oxidación química a temperatura ambiente y presión atmosférica. El agente

oxidante necesario es el radical hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ) que posee una elevadísima capacidad como oxidante, y con tiempos cortos de reacción [14].

Debido a la alta capacidad oxidante del radical hidroxilo es posible eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos logrando reducir los niveles de DQO, DBO, COT y toxicidad en las aguas residuales. Los procesos de oxidación avanzada resultan muy efectivos en la depuración de compuestos recalcitrantes, tóxicos y contaminantes poco biodegradables, eliminación de color, desinfección.

Los radicales hidroxilo se generan in situ por aplicación directa o por la combinación de agentes oxidantes como el ozono, el peróxido de hidrógeno, la radiación ultravioleta o las sales férrico/ferrosas, entre otros. En la tabla 6.1 se muestra una lista de los procesos de oxidación avanzada clasificados en fotoquímicos y no fotoquímicos.

**Tabla 6.1. Procesos de oxidación avanzada clasificados en fotoquímicos y no fotoquímicos [14].**

Procesos no Fotoquímicos	Procesos Fotoquímicos
1. Ozonización en medio alcalino ( $\text{O}_3/\text{OH}\cdot$ )	1. Oxidación en condiciones sub y supercríticas
2. Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ )	2. Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
3. Proceso Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) y relacionados	3. UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$
4. Oxidación electroquímica	4. UV/ $\text{O}_3$
5. Radiólisis y y tratamiento con haces de electrones	5. Foto-Fenton y relacionados
	6. Fotocatálisis heterogénea

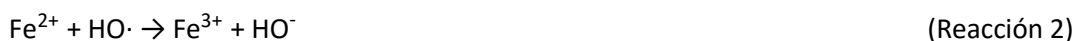
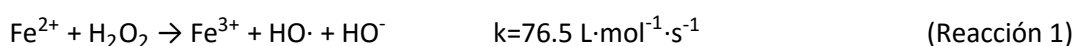
Todos los procesos de oxidación avanzada producen reacciones que se caracterizan por su baja selectividad y por las altas velocidades de reacción. La selección del proceso más adecuado se hace en función de su eficacia y coste, y éstos dependen a su vez de la concentración y tipo de contaminante a tratar.

Los compuestos no biodegradables que dan color al agua como las aminas aromáticas resultan muy difíciles de tratar, debido a que poseen una estructura muy estable. Por lo que aplicar tratamientos convencionales a estas aguas residuales resulta ineficiente. Uno de los procesos de oxidación avanzada que ha demostrado ser muy efectivo a la hora de tratar estos efluentes, ya que es capaz de romper el enlace  $-\text{N}=\text{N}-$  típico de los colorantes azoicos, es el proceso Fenton, con el cual se consigue eliminar el color del agua. En el siguiente apartado se describirá en qué consiste el proceso Fenton.

### 6.3.1. Proceso Fenton

Entre los diferentes procesos de oxidación avanzada disponibles, el proceso Fenton presenta alta eficacia y bajo coste. El proceso Fenton resulta muy efectivo en el tratamiento de aguas contaminadas con compuestos alifáticos y aromáticos clorados, bifenilos policlorados, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, fenoles, etc. Se aplica en el tratamiento de efluentes de lixiviados de vertederos municipales y empresas papeleras y textiles [15].

El proceso Fenton consiste en combinar peróxido de hidrogeno con sales de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ ). El ion de hierro correspondiente hace de catalizador, para la formación de radicales hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ). A continuación, se muestra el mecanismo de reacción.



La reacción 1 corresponde a la formación de radicales hidroxilo, dichos radicales pueden reaccionar por dos vías, la oxidación del catión ferroso y el ataque a la materia orgánica, según la reacción 2 y 3 respectivamente.

La formación de radicales hidroxilo puede incrementarse mediante el uso de la radiación UV (Proceso Foto-Fenton) lo cual incrementa la velocidad de degradación de los contaminantes. El proceso puede ser de dos tipos, dependiendo de la fase en la que se encuentra el catalizador, el primer tipo denominado homogéneo en donde las especies químicas se encuentran en fase acuosa, y el segundo tipo denominado heterogéneo que emplea un catalizador sólido en donde el ion  $\text{Fe}^{3+}$  se encuentra soportado o inmovilizado sobre un material [14]

La concentración de los reactivos influye en la eficacia del proceso y en la cinética de la reacción. Ambas mejoran con el aumento de los reactivos, pero un exceso de hierro produce reacciones secundarias como la formación de hidróxidos de hierro, un exceso de peróxido de hidrógeno puede dar lugar a la degradación del mismo por los radicales hidroxilo [14].

Llevar a cabo la reacción a pH altos, disminuye la eficacia del proceso debido a la precipitación del hierro en forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . A pH menores que 2 el ion  $\text{Fe}^{2+}$  produce la formación de  $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$  que reacciona muy lentamente con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  obstaculizando la generación de  $\text{OH}\cdot$  [15].

En este trabajo se propone el uso de sulfato ferroso para llevar a cabo la reacción en fase homogénea, a pH igual a 3 para obtener una mayor eficiencia debido a que a este pH el hierro actúa mejor como catalizador y esto produce una mayor cantidad de radicales [16].

## 7. METODOLOGÍA

En este apartado se presenta el procedimiento experimental, las técnicas analíticas empleadas junto con la instrumentación de laboratorio necesaria para llevar a cabo los ensayos realizados. Además, se incluirá un apartado donde se explique las medidas de seguridad adoptadas en el laboratorio.

### 7.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 7.1.1. Preparación y caracterización del agua residual modelo

El agua residual modelo contiene  $\frac{3}{4}$  partes de agua de acequia de Vera y  $\frac{1}{4}$  parte de una disolución compuesta de: almidón en una concentración de 1.5 g/L, carboximetilcelulosa en una concentración de 150 ppm, cloruro de sodio (NaCl) en una concentración 0.5 g/L, carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) en una concentración de 1 g/L, tres tintes azoicos de nombre comercial direct red 28, direct yellow 12 y direct black 38, en una concentración de 25 ppm cada uno y ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) en una concentración de 0.5 g/L [17].

Previo a los ensayos se realiza la caracterización del agua residual modelo preparada para posteriormente determinar los rendimientos de los tratamientos realizados. Se prepararon 4 disoluciones de agua residual modelo para las distintas semanas de trabajo. En la tabla 7.1 se muestran los parámetros para la caracterización del agua residual modelo.

**Tabla 7.1. Parámetros de caracterización del agua residual modelo.**

Semana	Turbidez (NTU)	Conductividad (mS/cm)	pH	DQO (ppm)	Hierro total (ppm)
1					
2					
3					
4					

La semana 1 y 2 se realizaron los ensayos Jar-Test, que se describirá más adelante, con varios coagulantes y floculantes a distintas concentraciones y pH de trabajo, para posteriormente elegir las condiciones de operación más adecuadas para el tratamiento físico-químico. La semana 3 y 4 se realizaron más ensayos Jar-Test en las condiciones de operación más adecuadas, posteriormente al sobrenadante que se obtiene del ensayo Jar-Test se llevó al proceso de oxidación avanzada, en el cual se realizó un diseño de experimentos para determinar las concentraciones de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso óptimas para el tratamiento.

### 7.1.2. Ensayos de coagulación-floculación (Jar-Test)

El ensayo Jar-Test consiste en adicionar dosis crecientes de coagulante y floculante a una serie de muestras del agua residual modelo, con el propósito de hallar las dosis óptimas de coagulante y floculante que deben añadirse al agua para su tratamiento. Se realizan ensayos de manera simultánea empleando el equipo Jar-Test, los resultados obtenidos en laboratorio dependerán no solo de la dosis de producto químico que se adicione sino del tiempo y la velocidad de agitación de las muestras. En primer lugar, se realiza el ensayo de coagulación y posteriormente el ensayo de floculación.

#### Material

- Vasos de precipitados de 1L.
- Probetas de 50 mL.
- Equipo Jar-Test (Figura 7.1).
- Conos Imhoff.
- Hidróxido sódico (NaOH) 1 M.
- Coagulante 1: Cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) 5000 ppm.
- Coagulante 2: FLOCUSOL - PA/18 5000 ppm.
- Floculante 1: Policloruro de aluminio (PACl) 500 ppm.
- Floculante 2: FLOCUSOL - AT/811 5000 ppm.

#### Procedimiento ensayo de coagulación

Para el ensayo de coagulación se emplean los dos tipos de coagulantes, indicados anteriormente, se fija una velocidad de agitación rápida para mayor difusión durante un tiempo corto de trabajo. Las concentraciones de los coagulantes necesarias para llevar cabo el ensayo se encuentran dentro un rango específico a las que se suele trabajar con estos productos.

Para ejecutar el ensayo se adopta el siguiente procedimiento: Se colocan 3 vasos de precipitados con agua residual; se adiciona el volumen de coagulante necesario para conseguir en cada muestra una concentración de 50, 100 y 150 ppm, respectivamente usando una de las probetas para medir; se mezcla rápidamente durante 5 minutos a 130 rpm; se adiciona NaOH para regular el pH dentro de un rango de 6 – 7; finalizado los 5 minutos se vierte el agua en un cono Imhoff, dejándola reposar durante 30 minutos; se anota el volumen de sólidos sedimentados y se procede a caracterizar el efluente.

#### Procedimiento ensayo de floculación

Finalizado el ensayo de coagulación, se realiza el ensayo de floculación; se emplean los dos tipos de floculantes, indicados anteriormente, se fija una velocidad de agitación lenta durante un periodo largo de trabajo, para que de este modo no se rompan los flóculos formados en el

ensayo de coagulación. Para el ensayo con  $\text{FeCl}_3$  como coagulante se usa como floculante polielectrolito de aluminio y para el ensayo con FLOCUSOL - PA/18 se usa como floculante FLOCUSOL - AT/811.

Para ejecutar el ensayo se adopta el siguiente procedimiento: Se escoge 1 vaso de precipitados con agua residual, a la cual se le ha realizado el ensayo de coagulación previamente; se adiciona el volumen de floculante necesario para conseguir en cada muestra una concentración de 0.5, 1 y 1.5 ppm para el caso del  $\text{FeCl}_3$  y de 1 ppm para el caso del FLOCUSOL - PA/18 usando las probetas para medir; se mezcla lentamente durante 30 minutos a 30 rpm; finalizado los 30 minutos se vierte el agua en un cono Imhoff, dejándola reposa durante 30 minutos; se anota el volumen de sólidos sedimentados y se procede a determinar los demás parámetros de caracterización del agua.

Las condiciones de los ensayos se recogen en las tablas 7.2 y 7.3 junto con los parámetros de caracterización:

**Tabla 7.2. Condiciones del ensayo Jar-Test, para el coagulante 1 y el floculante 1.**

Muestra	[ $\text{FeCl}_3$ ] (ppm)	[PACl] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)	DQO (ppm)	Hierro (ppm)	Color
1	50	0.5 - 1.5							
2	100	0.5 - 1.5							
3	150	0.5 - 1.5							

**Tabla 7.3. Condiciones del ensayo Jar-Test, para el coagulante 2 y el floculante 2.**

Muestra	[PA/18] (ppm)	[AT/811] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)	DQO (ppm)	Hierro (ppm)	Color
4	50	1							
5	100	1							
6	150	1							

En la figura 7.1 se muestra el equipo utilizado para los ensayos de coagulación-floculación y el aspecto del agua residual textil modelo antes y durante un ensayo. Se puede apreciar la formación de flóculos en los vasos de precipitados.



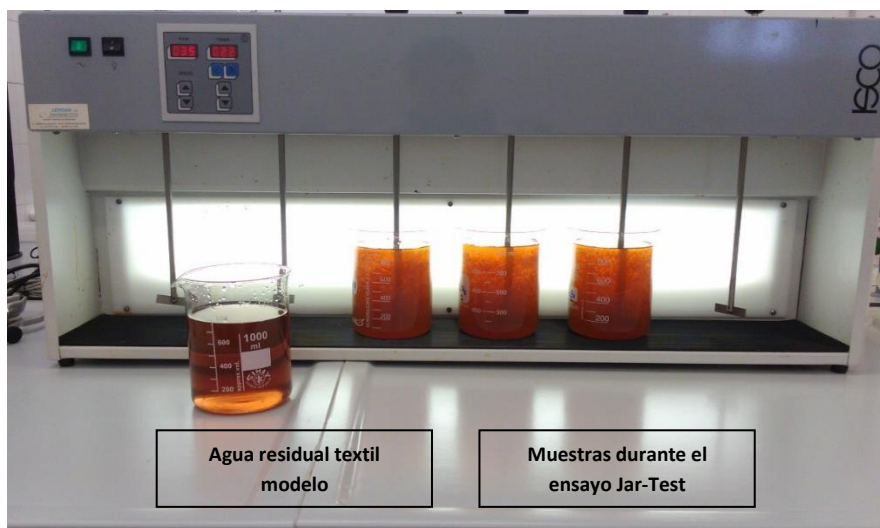


Figura 7.1. Ensayo Jar-Test.

### Preparación de las disoluciones de trabajo

#### ✚ Hidróxido sódico (NaOH)

Se prepara un litro de sosa cáustica 1 M para regular el pH de las muestras de agua residual. Para preparar la disolución es necesario conocer el peso molecular de la sosa cáustica ya que se encuentra en el laboratorio en forma de hojuelas.

$$[ ] = \frac{n}{V} \rightarrow 1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = \frac{n}{1 \text{ L}} \rightarrow n = 1 \text{ mol}$$

$$n = \frac{m}{\text{PM}} \rightarrow 1 \text{ mol} = \frac{m}{40 \text{ g mol}^{-1}} \rightarrow m = 40 \text{ g}$$

#### ✚ Coagulante 1: Cloruro de hierro (FeCl<sub>3</sub>)

Se prepara un litro de cloruro de hierro de 5000 ppm, que se añadirá a las muestras de agua a distintas concentraciones para realizar el ensayo Jar-Test. Se parte de una botella suministrada por una casa comercial, por lo que será necesario conocer la densidad y la riqueza de cloruro férrico que contiene.

$$[ ] = \frac{m}{V} \rightarrow 5000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{m}{1 \text{ L}} \rightarrow m = 5 \text{ g}$$

Riqueza de cloruro férrico: 30 %.

$$m_{\text{final}} = \frac{5 \text{ g}}{0.3} = 16.67 \text{ g}$$

$$V = \frac{m_{\text{final}}}{\rho} = \frac{16.67 \text{ g}}{1306 \text{ g L}^{-1}} = 0.01276 \text{ L} = 12.76 \text{ mL}$$

### ✚ Coagulante 2: FLOCUSOL - PA/18

El FLOCUSOL - PA/18 es un producto a base de policloruro de aluminio líquido, sustituto del sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , sólido y se emplea como coagulante en el tratamiento de aguas residuales.

Se prepara 100 mL de este coagulante a una concentración de 5000 ppm que, posteriormente se añadirá a las muestras de agua a distintas concentraciones para realizar el ensayo Jar-Test. Se parte de una botella suministrada por una casa comercial, por lo que será necesario únicamente conocer la densidad, ya que la riqueza del producto es del 100%.

$$[ ] = \frac{m}{V} \rightarrow 5000 \frac{mg}{L} = \frac{m}{0.1 L} \rightarrow m = 500 \text{ mg}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{500 \text{ mg}}{1000 \text{ mg mL}^{-1}} = L = 0.50 \text{ mL}$$

### ✚ Floclulante 1: Policloruro de aluminio

El policloruro de aluminio es un polielectrolito que se emplea como floclulante en el tratamiento de aguas residuales. Ya que finalizada la coagulación ayuda a la agregación entre las partículas no cargadas, provocando de esta forma su crecimiento.

Se prepara 100 mL de este floclulante a una concentración de 500 ppm que, se añadirá a las muestras de agua residual a distintas concentraciones una vez haya finalizado el tratamiento de coagulación usando cloruro férrico como coagulante. Se parte de una disolución “madre” de 50000 ppm.

$$[ ] \cdot V = [ ]' \cdot V'$$

$$50000 \frac{mg}{L} \cdot V = 500 \frac{mg}{L} \cdot 100 \text{ mL}$$

$$V = 1 \text{ mL}$$

### ✚ Floclulante 2: FLOCUSOL - AT/811

El FLOCUSOL - AT/811 es un floclulante orgánico a base de policloruro de dialildimetilamonio (poliDADMAC) que se emplea en conjunto con el sulfato de alúmina sólido en el tratamiento de aguas residuales.

Se prepara 100 mL de este floclulante a una concentración de 5000 ppm que, se añadirá a las muestras de agua residual a distintas concentraciones una vez haya finalizado el tratamiento de coagulación usando FLOCUSOL - PA/18 como coagulante. Se parte de una botella suministrada por una casa comercial, por lo que será necesario únicamente conocer la densidad, ya que la riqueza del producto es del 100%.

$$[ ] = \frac{m}{V} \rightarrow 5000 \frac{mg}{L} = \frac{m}{0.1 L} \rightarrow m = 500 \text{ mg}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{500 \text{ mg}}{1100 \text{ mg mL}^{-1}} = L = 0.46 \text{ mL}$$

### Características de los coagulantes y floculantes ensayados

A continuación, en las tablas 7.4 y 7.5 se muestran las características de los coagulantes y floculantes respectivamente, utilizados en los ensayos Jar-Test.

**Tabla 7.4. Características de los coagulantes ensayados.**

Coagulante	Dosis (ppm)	pH óptimo	Aplicaciones
FeCl <sub>3</sub>	35-150	4-7	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tratamiento de aguas residuales</li> <li>2. Potabilización de agua</li> </ol>
PA/18	5-1000	6-9	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tratamiento de aguas residuales</li> <li>2. Espesamiento de fangos</li> <li>3. Clarificación de agua potable</li> <li>4. Separación del aceite mineral</li> </ol>

**Tabla 7.5. Características de los floculantes ensayados.**

Floculante	Dosis (ppm)	pH óptimo	Aplicaciones
PACI	0.5-5	-	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tratamiento de aguas residuales</li> <li>2. Clarificación de efluentes</li> </ol>
AT/811	0.5-3	-	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tratamiento de aguas residuales</li> <li>2. Espesamiento de fangos</li> <li>3. Purificación de agua</li> <li>4. Separación del aceite mineral</li> </ol>

#### 7.1.3. Ensayos de oxidación avanzada

Finalizado el ensayo Jar-Test y obtenidas las dosis óptimas de floculante y coagulante, se prosigue a realizar el ensayo de oxidación avanzada para eliminar los compuestos orgánicos poco biodegradables (colorantes) que se encuentren en el agua. Para este ensayo se ha realizado un **diseño de experimentos**, con los siguientes factores de influencia: concentración de peróxido de hidrógeno, concentración de sulfato ferroso, los cuales serán evaluados en el apartado de resultados experimentales (8). Además de los reactivos, factores como la temperatura y el pH afectan al proceso, pero suele ser muy frecuente trabajar a temperatura ambiente y pH de rango 2.5 - 3, por lo que se ha realizado este ensayo a temperatura ambiente y pH igual a 3. También cabe destacar que el tiempo de reacción y el tipo de contaminante influyen en el proceso, pero se ha demostrado que periodos cortos de reacción de 10 a 20 minutos consiguen buenos niveles de degradación por lo que para este ensayo se elige un tiempo de 15 minutos [16]. Como se ha mencionado el tinte azoico es un contaminante poco biodegradable procedente de la industria textil por lo que el proceso de

oxidación avanzada resulta efectivo para degradarlo. Previo a la realización del ensayo se determinaron los parámetros característicos del agua residual, para posteriormente valorar la eficacia del tratamiento físico-químico.

#### Material

- Vasos de precipitados de 100 mL.
- Probetas de 10 mL.
- Agitador magnético
- Peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) 2 vol.
- Sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ) 1000 ppm.
- Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 1M.

#### Procedimiento

Para ejecutar el ensayo se adopta el siguiente procedimiento: Se toman 50 mL del sobrenadante obtenido en el ensayo Jar-Test anterior, se depositan en un vaso de precipitados de 100 mL; se adiciona el volumen de agente oxidante en este caso peróxido de hidrogeno necesario para conseguir la concentración deseada usando una probeta para medir; se adiciona el volumen de catalizador en este caso sulfato ferroso necesario para conseguir la concentración deseada usando otra probeta para medir; se agregan un par de gotas de ácido sulfúrico, necesarias para disminuir el pH a 3; se agita durante 15 minutos a una velocidad normal; finalizado los 15 minutos se separan del agua el fango que se genera; se toma una muestra del agua y se procede a determinar los parámetros de caracterización. En la figura 7.2 se muestra el material utilizado en este ensayo.

#### **Diseño de experimentos**

Para el diseño de experimentos se han elegido las concentraciones de agente oxidante y de catalizador como factores de influencia. En la tabla 7.6 se presentan las condiciones del experimento con las variables de interés en este caso turbidez, DQO, hierro total y color en el clarificado.

Tabla 7.6. Diseño de experimentos para el ensayo de oxidación avanzada.

Experimento	[FeSO <sub>4</sub> ] (ppm)	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] (ppm)	Turbidez (NTU)	DQO (ppm)	Hierro (ppm)	Color
1	25	25				
2	25	50				
3	25	75				
4	50	25				
5	50	50				
6	50	75				
7	75	25				
8	75	50				
9	75	75				

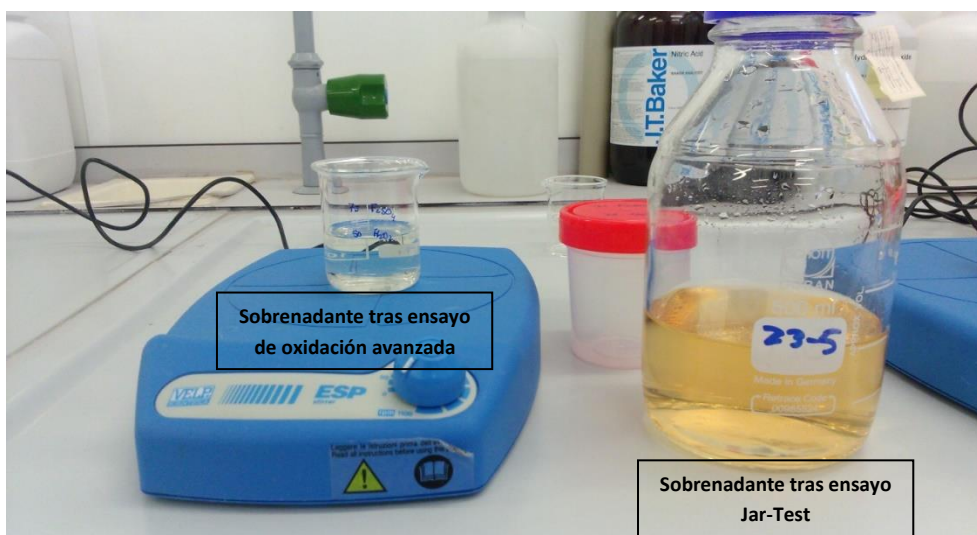


Figura 7.2. Ensayo de oxidación avanzada.

### Preparación de las disoluciones de trabajo

#### ✚ Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

Se prepara 500 mL de peróxido de hidrógeno 2 volúmenes que actuará como agente oxidante de la materia orgánica en el ensayo de oxidación avanzada. Se parte de una botella suministrada por una casa comercial, por lo que será necesario conocer la riqueza de peróxido de hidrógeno y los volúmenes que contiene la botella. Además del peso molecular del peróxido de hidrógeno.

En primer lugar, se calcula el volumen que ocupa un mol de O<sub>2</sub>, a condiciones normales de presión y temperatura (0 °C y 1 atm) aplicando la fórmula de los gases perfectos.

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{1 \text{ mol} \cdot 0.082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 273 \text{ K}}{1 \text{ atm}} = 22.4 \text{ L}$$

Conociendo que cada mol de oxígeno proviene de la descomposición de 2 moles de peróxido de hidrógeno y que un litro de agua oxigenada de X volúmenes desprende X litros de oxígeno, se establece la siguiente relación:

$$22.4 \text{ L O}_2 \rightarrow 22.4 \text{ vol H}_2\text{O}_2 = 2 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \text{H}_2\text{O}_2$$

$$2 \text{ vol H}_2\text{O}_2 = 0.1786 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 6 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Datos: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100 volúmenes, riqueza 30 % p/v.

$$[\ ] = \frac{n}{V} \rightarrow 0.1786 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = \frac{n}{0.5 \text{ L}} \rightarrow n = 0.0893 \text{ mol}$$

$$n = \frac{m}{\text{PM}} \rightarrow 0.0893 \text{ mol} = \frac{m}{34 \text{ g mol}^{-1}} \rightarrow m = 3.04 \text{ g}$$

$$V = \frac{3.04 \text{ g}}{0.3 \text{ g mL}^{-1}} = 10.12 \text{ mL}$$

#### ✚ Sulfato de hierro II (FeSO<sub>4</sub>)

Se prepara un litro de sulfato ferroso de 1000 ppm, que actuará como catalizador del peróxido de hidrógeno. Para preparar la disolución es necesario conocer el peso molecular de la sustancia pura además de la sal heptahidratada ya que se encuentra en estado de hidratación en el laboratorio.

$$m_{\text{FeSO}_4} = 1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 1 \text{ L} = 1000 \text{ mg} = 1 \text{ g}$$

$$n_{\text{FeSO}_4} = \frac{m_{\text{FeSO}_4}}{\text{PM}_{\text{FeSO}_4}} = \frac{1 \text{ g}}{151.908 \text{ g mol}^{-1}} = 6.583 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$m_{\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}} = n_{\text{FeSO}_4} \cdot \text{PM}_{\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}} = 6.583 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot 278.05 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1.83 \text{ g}$$

#### ✚ Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Se prepara un litro de ácido sulfúrico 1 M, al igual que la sosa cáustica, servirá para regular el pH de las muestras de agua residual. Para preparar la disolución es necesario conocer el peso molecular del ácido sulfúrico, como se parte de una botella suministrada por una casa comercial es necesario conocer la densidad y la riqueza de ácido sulfúrico.

$$[\ ] = \frac{n}{V} \rightarrow 1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = \frac{n}{1 \text{ L}} \rightarrow n = 1 \text{ mol}$$

$$n = \frac{m}{\text{PM}} \rightarrow 1 \text{ mol} = \frac{m}{98 \text{ g mol}^{-1}} \rightarrow m = 98 \text{ g}$$

Riqueza de ácido sulfúrico: 96 %.

$$m_{\text{final}} = \frac{98 \text{ g}}{0.96} = 102.08 \text{ g}$$

$$V = \frac{m_{\text{final}}}{\rho} = \frac{102.08 \text{ g}}{1840 \text{ g L}^{-1}} = 0.05548 \text{ L} = 55.48 \text{ mL}$$

## 7.2. TÉCNICAS ANALÍTICAS

La caracterización de las muestras del agua residual modelo, sin tratar y tratada, incluyo los siguientes parámetros:

- pH.
- Turbidez.
- Conductividad.
- Concentración de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ).
- Demanda química de oxígeno total DQO.
- Color (medida de absorbancias).

Adicionalmente se determinó el volumen de fango sedimentado a los 30 minutos:

- $V_{30}$ .

### Medición de pH

Para la determinación del pH se usa un pH-metro marca Delta OHM (figura 7.3).

#### Procedimiento

Se coloca la sonda (previamente calibrada) dentro de la muestra y se agita ligeramente hasta que la lectura se estabilice.



**Figura 7.3. pH-metro.**

### **Medición de la turbidez**

Para la determinación de la turbidez se usa un turbidímetro marca Dinko modelo D-112 (figura 7.4).

#### Procedimiento

Primero se debe calibrar el equipo, luego se deposita la muestra para su medición en el vial correspondiente hasta donde indique la marca. Se introduce el vial que contiene la muestra al equipo, se procede a la medición y se obtiene el valor. Es recomendable lavar el vial que contiene la muestra después de cada medida.



**Figura 7.4. Turbidímetro D-112 marca Dinko.**

### **Medición de la conductividad**

Para la determinación de la conductividad se usa un conductímetro marca Delta OHM (figura 7.5).

#### Procedimiento

Se coloca la sonda (previamente calibrada) dentro de la muestra, quedando completamente sumergida, se agita ligeramente hasta que la lectura se estabilice.



**Figura 7.5. Conductímetro.**



### **Medición de la concentración de hierro**

Para la determinación de la concentración de hierro se dispone del kit 114896 TEST FOTOMÉTRICO DE HIERRO de MERCK (figura 7.6) rango (1 - 50 mg/L). El método se basa en reducir los iones hierro con ácido ascórbico a iones hierro III. Una vez se lleva a cabo la reacción los iones III forman un complejo rojo (2,2' bipyridina) que se determina fotométricamente. Si no se agrega ácido ascórbico (reactivo Fe-1K) se determinan únicamente la concentración de hierro II.

#### Contenido del kit

- 1 frasco de reactivo Fe-1K.
- 25 cubetas de reacción.
- 1 dosificador azul.
- 1 hoja con etiquetas redondas autoadhesivas para numerar las cubetas.

#### Procedimiento

1. Pipetear 1 mL de la muestra, en una cubeta de reacción. Cerrar la cubeta y mezclar.
2. Tomar el frasco de reactivo Fe-1K sustituir la tapa del frasco por el dosificador azul.
3. Añadir 1 dosis del reactivo Fe-1K, en la cubeta de reacción. Cerrar la cubeta y agitar vigorosamente hasta que el reactivo se haya disuelto completamente.
4. Dejar en reposo 5 minutos.
5. Insertar la cubeta dentro del espectrofotómetro marca SPECTROQUANT NOVA 60 de MERCK (figuran 7.8).
6. Tomar la medida que marque el espectrofotómetro.

### **Medición de la DQO**

La DQO es un parámetro que relaciona directamente a la materia orgánica, tanto en suspensión como en disolución, presente en el agua residual. La demanda química de oxígeno indica la cantidad de oxígeno procedente del dicromato potásico que, bajo condiciones específicas de trabajo, reacciona con las sustancias oxidables presentes en el agua residual.

Para la determinación de la DQO se dispone del kit 114541 TEST FOTOMÉTRICO DE DQO de MERCK (figura 7.6) rango (25 – 1500 mg/L). El método se basa en oxidar la muestra de agua con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. De modo que la cantidad de dicromato que se reduce a  $\text{Cr}^{3+}$  será proporcional a la cantidad de materia oxidable.

#### Contenido del kit

- 25 cubetas de reacción.
- 1 hoja con etiquetas redondas autoadhesivas para numerar las cubetas.

### Procedimiento

1. Agitar por balanceo la cubeta de reacción para poner en suspensión el sedimento.
2. Verter cuidadosamente 3 mL de la muestra sobre el reactivo en la pared interna de la cubeta de reacción mantenida inclinada, usar gafas protectoras. La cubeta empezará a calentarse.
3. Cerrar firmemente la cubeta con tapa roscada.
4. Sujetar la cubeta de la tapa roscada y agitar vigorosamente para que se produzca una mezcla completa.
5. Insertar la cubeta dentro del termoreactor precalentado, modelo TR 300 de MERCK (figura 7.7). Durante 120 minutos a 148 °C
6. Sacar la cubeta del termoreactor y colocarla en un soporte de tubos de ensayo para que se enfríe. No enfriar con agua.
7. Al cabo de 10 minutos agitar la cubeta por balanceo y dejar enfriar a temperatura ambiente un tiempo mínimo de 30 minutos.
8. Insertar la cubeta dentro del espectrofotómetro marca SPECTROQUANT NOVA 60 de MERCK (figura 7.8).
9. Tomar la medida que marque el espectrofotómetro.



**Figura 7.6. Test Merck.**



**Figura 7.7. Termoreactor TR 300 marca Merck.**



**Figura 7.8. Spectroquant nova 60 marca Merck.**

### **Medición del color**

Para determinación la cantidad de color, se mide la absorbancia de la muestra a distintas longitudes de onda utilizando un espectrofotómetro DR 6000 marca HACH (figura 7.9).

#### Procedimiento

1. Encender el equipo y seleccionar absorbancia.
2. Seleccionar la longitud de onda deseada.
3. Ajustar el equipo insertando una celda que contenga agua destilada.
4. Cerrar el equipo y presionar el botón Ajustar 0. Repetir este procedimiento con todos los valores de longitudes de onda que vayan a ser utilizados.
5. Remover la celda que contiene agua destilada y colocar otra celda con la muestra a ser examinada.
6. Presionar el botón de medición de absorbancia.
7. Esperar a que la medida de absorbancia aparezca en la pantalla.

Una vez obtenidas las absorbancias de la muestra se emplea la Ec. 1 [18].

$$\text{Color} = \frac{A_{(\lambda=436)}^2 + A_{(\lambda=525)}^2 + A_{(\lambda=620)}^2}{A_{(\lambda=436)} + A_{(\lambda=525)} + A_{(\lambda=620)}} \quad (\text{Ec. 1})$$



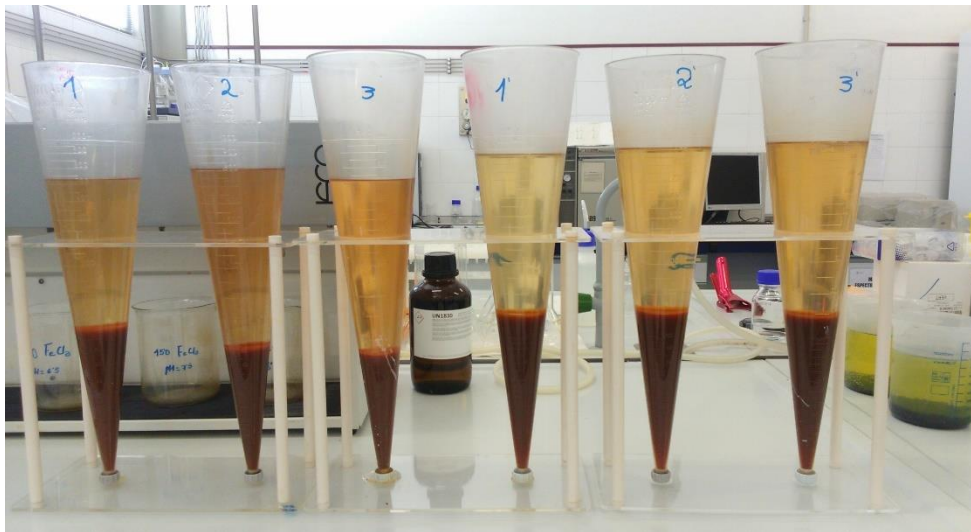
**Figura 7.9. Espectrofotómetro DR 6000 marca Hach.**

### ✚ Volumen de fango ( $V_{30}$ )

Permite determinar el volumen de lodo o fango sedimentado al verter en un cono Imhoff un litro de muestra al cabo de 30 minutos.

#### Procedimiento

Primero se agita la muestra de un litro de agua residual para alcanzar una mejor homogeneización luego se introduce rápidamente en el cono Imhoff hasta la marca de un litro, se deja sedimentar y al cabo de 30 minutos se toma la altura de fango sedimentado expresada en mL/L. En la figura 7.10 se muestra el ensayo de sedimentación de 6 muestras y la determinación de la  $V_{30}$  utilizando conos Imhoff



**Figura 7.10. Ensayo de sedimentación con conos Imhoff.**

### 7.3. MEDIDAS DE SEGURIDAD


En este apartado se incluye la tabla 7.7 que muestra un resumen de la ficha de seguridad de los productos químicos utilizados que presentan riesgo o peligro. Además, se enumeran las medidas de seguridad tomadas en el laboratorio.

**Tabla 7.7 Resumen de la ficha de seguridad de los productos químicos utilizados.**

Compuesto	Pictogramas	Factor de riesgo	Consecuencias	Medidas preventivas
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> anhidro		<b>Nocivo</b>	<b>H319:</b> Provoca irritación ocular grave	<p><b>P264:</b> Lavarse...concienzudamente tras la manipulación.</p> <p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P305+P351+P338:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.</p> <p><b>P337+P313:</b> Si persiste la irritación ocular: Consultar a un médico.</p>
CH <sub>3</sub> COOH 80%		<b>Corrosivo</b>	<b>H314:</b> Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.	<p><b>P260:</b> No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.</p> <p><b>P264:</b> Lavarse...concienzudamente tras la manipulación.</p> <p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P301+P330+P331:</b> EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.</p> <p><b>P303+P361+P353:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.</p> <p><b>P501:</b> Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.</p>
NaOH		<b>Corrosivo</b>	<p><b>H314:</b> Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.</p> <p><b>H290:</b> Puede ser corrosivo para los metales.</p>	<p><b>P260:</b> No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.</p> <p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P303+P361+P353:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.</p> <p><b>P305+P351+P338:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.</p> <p><b>P310:</b> Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACION TOXICOLOGICA o a un médico.</p> <p><b>P501:</b> Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.</p>

<p>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 96%</p>		<p><b>Corrosivo</b></p>	<p><b>H314:</b> Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.</p>	<p><b>P260:</b> No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.</p> <p><b>P264:</b> Lavarse...concienzudamente tras la manipulación.</p> <p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P301+P330+P331:</b> EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.</p> <p><b>P303+P361+P353:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.</p> <p><b>P501:</b> Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.</p>
<p>FeCl<sub>3</sub> 30% p/p</p>	 	<p><b>Nocivo</b></p> <p><b>Corrosivo</b></p>	<p><b>H290:</b> Puede ser corrosivo para los metales.</p> <p><b>H302:</b> Nocivo en caso de ingestión.</p> <p><b>H315:</b> Provoca irritación cutánea.</p> <p><b>H317:</b> Puede provocar una reacción alérgica en la piel.</p> <p><b>H318:</b> Provoca lesiones oculares graves.</p>	<p><b>P390:</b> Absorber el vertido para que no dañe otros materiales.</p> <p><b>P261:</b> Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.</p> <p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P307+P311:</b> EN CASO DE exposición: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico.</p> <p><b>P501:</b> Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.</p>
<p>FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></p>		<p><b>Nocivo</b></p>	<p><b>H302:</b> Nocivo en caso de ingestión.</p> <p><b>H319:</b> Provoca irritación ocular grave.</p> <p><b>H315:</b> Provoca irritación cutánea.</p>	<p><b>P264:</b> Lavarse... concienzudamente tras la manipulación.</p> <p><b>P270:</b> No comer, beber ni fumar durante su utilización.</p> <p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P301+P312:</b> EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico si se encuentra mal.</p> <p><b>P302+P352:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.</p> <p><b>P501:</b> Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.</p>
<p>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100 vol. 30% p/v</p>		<p><b>Nocivo</b></p>	<p><b>H302:</b> Nocivo en caso de ingestión.</p> <p><b>H318:</b> Provoca lesiones oculares graves.</p>	<p><b>P264:</b> Lavarse... concienzudamente tras la manipulación.</p> <p><b>P270:</b> No comer, beber ni fumar durante su utilización.</p> <p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P301+P312:</b> EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico si se encuentra mal.</p> <p><b>P305+P351+P338:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS:</p>

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

		<b>Corrosivo</b>		<p>Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.</p> <p><b>P310:</b> Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACION TOXICOLOGICA o a un médico.</p>
PACI		<b>Nocivo</b>	<p><b>H315:</b> Provoca irritación cutánea.</p> <p><b>H319:</b> Provoca irritación ocular grave</p>	<p><b>P280:</b> Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p><b>P302+P352:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.</p> <p><b>P332+P313:</b> En caso de irritación cutánea: Consultar a un médico.</p> <p><b>P305+P351+P338:</b> EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.</p> <p><b>P337+P313:</b> Si persiste la irritación ocular: Consultar a un médico.</p> <p><b>P501:</b> Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.</p>
PA/18	No cumple	<b>Nocivo</b>	<p>Provoca irritación cutánea.</p> <p>Provoca irritación ocular.</p> <p>Nocivo en caso de ingestión.</p> <p>Puede irritar las vías respiratorias.</p>	<p>Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p>EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Enjuague inmediatamente con abundante agua. Solicitar atención médica si aumenta la irritación. Despójese de la ropa afectada y lave la zona de la piel expuesta al producto con jabón suave y agua; a continuación, enjuague con agua caliente.</p> <p>EN CASO DE CONTACTO CON OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando. Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACION TOXICOLOGICA o a un médico.</p> <p>EN CASO DE INGESTIÓN: NO provoque el vómito. Dar agua a beber si la víctima está completamente consciente/desperta. Consiga atención médica de emergencia.</p> <p>Si respira con dificultad, transportar a la víctima al exterior y mantener en reposo en una posición confortable para respirar.</p>
AT/811	No cumple	<b>Nocivo</b>	<p>Provoca irritación cutánea.</p> <p>Provoca irritación ocular.</p> <p>Nocivo en caso de ingestión.</p> <p>Puede irritar las vías respiratorias.</p>	<p>Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.</p> <p>EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL U OJOS: Enjuague inmediatamente con abundante agua. Solicitar atención médica si aumenta la irritación.</p> <p>EN CASO DE INGESTIÓN: NO provoque el vómito. Enjuáguese la boca. Consiga atención médica de emergencia.</p> <p>Si respira con dificultad, transportar a la víctima al exterior y mantener en reposo en una posición confortable para respirar.</p>

### **Seguridad en el laboratorio**

1. Lo primero que se debe hacer dentro del laboratorio es localizar los dispositivos de seguridad más próximos: salidas de emergencia, lavajos, duchas, extintores, mantas ignífugas y botiquín.
2. Durante la estancia en el laboratorio es obligatorio usar bata, pantalones largos, zapatos cerrados y gafas. Los guantes deberán utilizarse durante la manipulación de los productos químicos.
3. Antes de utilizar cualquier reactivo, se toma su ficha de seguridad y se identifican sus pictogramas, con el fin de tomar medidas preventivas.
4. En el caso de que el reactivo sea una sustancia líquida, no se debe pipetear directamente de la botella, se debe sacar una porción pequeña a un vaso de precipitados.
5. Los reactivos que requieran cuidado especial, serán manipulados en la vitrina.
6. Los residuos generados, se introducirán en contenedores etiquetados correctamente para su posterior gestión.
7. Se debe comprobar el buen estado del material para realizar los ensayos antes de su utilización.
8. No se debe utilizar ningún equipo sin conocerlo.
9. Se debe seguir las instrucciones dadas por el profesor o recogidas en el guion.
10. En caso de duda, consultar con el profesor o el encargado de laboratorio.
11. No se debe abandonar el laboratorio mientras se está llevando a cabo algún ensayo.
12. Finalizado los ensayos, se debe limpiar el material usado.
13. Antes de salir del laboratorio, lavarse las manos y quitarse la bata.



## 8. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 8.1. AGUA RESIDUAL MODELO

En este apartado se muestra la tabla 8.1 que corresponde a los valores obtenidos para la caracterización del agua residual.

**Tabla 8.1. Parámetros de caracterización del agua residual modelo.**

Semana	Turbidez (NTU)	Conductividad (mS/cm)	pH	DQO (ppm)	Hierro total (ppm)
1	88.00	2.23	7.50	-	-
2	98.55	2.77	8.80	-	-
3	37.67	2.37	8.74	678	< 1
4	10.64	2.94	7.89	630	< 1

Como se observa para todos los casos el agua residual tiene carácter básico o alcalino y una conductividad baja. Los valores de turbidez del agua residual modelo varia debido a que el agua que se recogió de la acequia de Vera no fue la misma para todas las semanas y es muy probable que se deba a que el agua de acequia no mantuvo la concentración de sólidos suspendidos constante a lo largo de las semanas de trabajo. Por lo que respecta a la DQO los valores de concentración, que se obtuvieron la semana 3 y 4, no son tan elevados. Por otro lado, los valores de concentración de hierro son mínimos ya que están por debajo de 1 ppm.

### 8.2. RESULTADOS DEL JAR-TEST

#### 1º Ensayo

En primer lugar, se muestra la tabla 8.2 correspondiente a los resultados de la coagulación usando como coagulante cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ). En este experimento se adicionan dosis de 50, 100 y 150 ppm de coagulante intentando fijar el pH de todas las muestras en un valor de 7.5 con la adición de NaOH, es importante mencionar que en este experimento se utilizó como alimento el agua residual correspondiente a la semana 1.

**Tabla 8.2. Resultados del 1º ensayo de coagulación.  $\text{FeCl}_3$  como coagulante.**

Muestra	[ $\text{FeCl}_3$ ] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)
1	50	3.50	7.30	90	40.93
2	100	3.81	7.34	150	36.56
3	150	4.34	7.47	165	8.69

De la tabla anterior se observa que **a medida que se aumenta la concentración de  $\text{FeCl}_3$  la turbidez disminuye**, obteniendo un valor mínimo de 8.69 para una concentración de 150 ppm. Así mismo, **la cantidad de sedimentado es mayor cuando la dosis de coagulante aumenta ( $V_{30}$ )**, es decir que a concentraciones mayores de coagulante se obtiene mayor generación de fangos. El parámetro  $V_{30}$  es muy importante ya que el fango generado luego debe ser gestionado como residuo, por lo que interesa un valor de  $V_{30}$  no tan alto. Por otro lado, la conductividad inicial era de 2.23 mS/cm y finalizado el 1º ensayo de coagulación aumenta debido a que el  $\text{FeCl}_3$  disuelto en las muestras aporta conductividad, además ocasiona que el pH disminuya, a valores ácidos por lo que es necesario subirlo agregando NaOH, que también aporta conductividad a las muestras. En la figura 8.1 se muestra el aspecto del agua residual finalizado el ensayo de coagulación para las tres concentraciones de coagulante. En la figura 8.2 se muestra la representación gráfica del volumen de materia sedimentado en 30 minutos en función de la concentración de coagulante utilizada. En la figura 8.3 se muestra la representación gráfica de la turbidez de las muestras de agua residual en función de la concentración de coagulante utilizada.

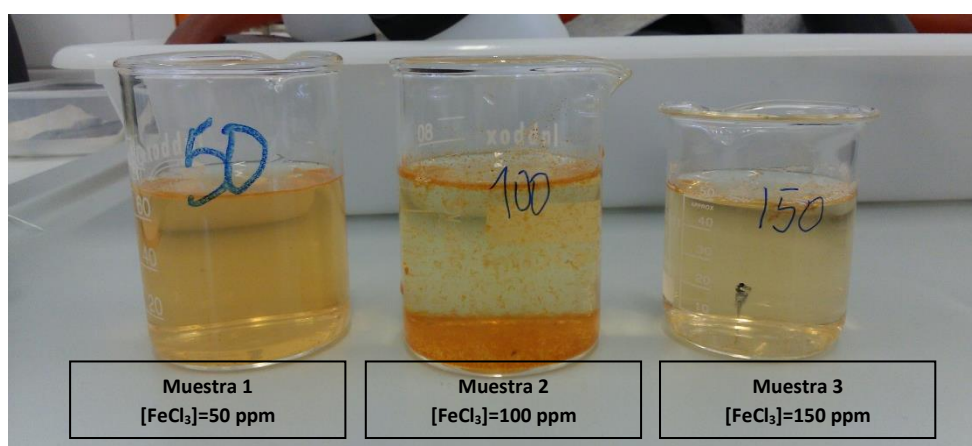


Figura 8.1. Aspecto del sobrenadante de las muestras finalizado el 1º ensayo de coagulación.

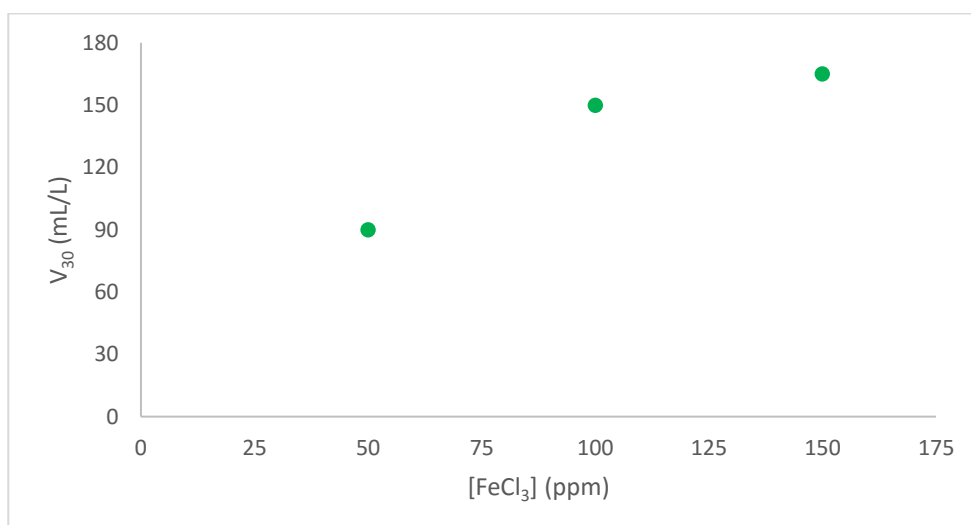
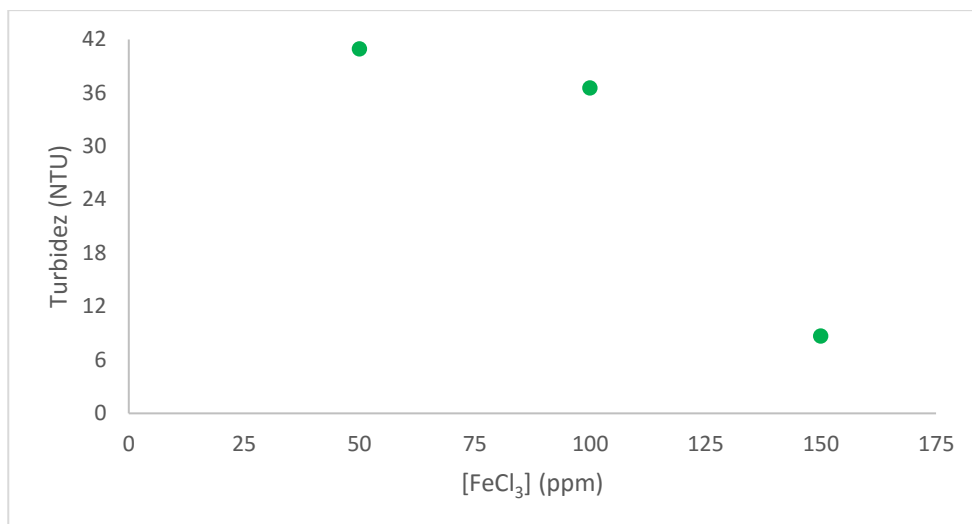


Figura 8.2. Representación de la  $V_{30}$  frente a la concentración de  $\text{FeCl}_3$ .



**Figura 8.3. Representación de la turbidez frente a la concentración de FeCl<sub>3</sub>.**

Como interesa una turbidez y una  $V_{30}$  pequeñas, se eligen las dosis de 50 y 150 ppm de FeCl<sub>3</sub> como dosis orientativas ya que la dosis de 50 ppm proporciona la menor  $V_{30}$  y la dosis de 150 ppm proporciona la menor turbidez.

### 2º Ensayo

Con las dos concentraciones obtenidas del primer ensayo (50 y 150 ppm) se realizan más ensayos de coagulación, variando el pH de trabajo en una unidad por encima y por debajo de 7.5, con la finalidad de obtener la dosis óptima y el pH óptimo para la coagulación. Los resultados de los parámetros de caracterización tras finalizar el 2º ensayo se muestran en la tabla 8.3. En la figura 8.4 se muestran la etapa de sedimentación de las muestras finalizado el experimento. Para la realización del 2º ensayo de coagulación se utilizó como alimento el agua residual de la semana 2.

**Tabla 8.3. Resultados del 2º ensayo de coagulación. FeCl<sub>3</sub> como coagulante a distintos pH.**

Muestra	[FeCl <sub>3</sub> ] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)
1.1	50	3.50	<b>6.31</b>	130	41.03
1.2	50	3.22	<b>7.36</b>	86	52.64
1.3	50	3.74	<b>8.54</b>	78	78.26
2.1	150	4.65	<b>6.24</b>	150	15.15
2.2	150	4.89	<b>7.35</b>	155	13.59
2.3	150	4.75	<b>8.24</b>	145	24.05

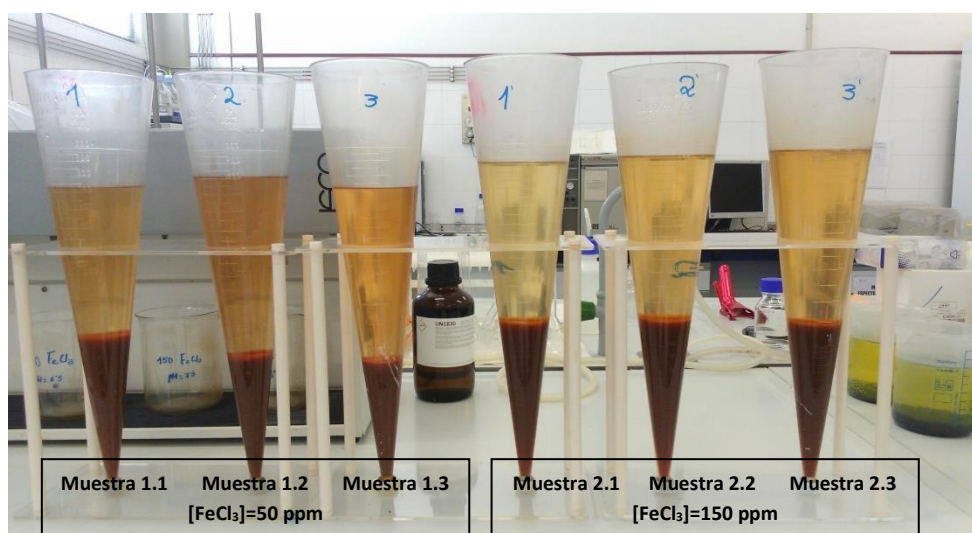


Figura 8.4. Sedimentación de las muestras tras finalizar el 2º ensayo de coagulación.

De la tabla 8.3 se observa que las muestra 2.1 y 2.2, que tienen una concentración de 150 ppm de coagulante y un pH igual a 6.24 y 7.35 respectivamente, obtuvieron valores bajos de turbidez. Por otro lado, **las muestras que tienen una concentración de 50 ppm de coagulante, no disminuyeron mucho la turbidez** del agua ya que inicialmente se parte de una turbidez de 98.55 NTU y como máximo se reduce a 41.03 NTU. En la figura 8.5 se muestra la representación gráfica del volumen de materia sedimentado en 30 minutos en función del pH para cada concentración de coagulante (50 y 150 ppm). En la figura 8.6 se muestra la representación gráfica de la turbidez de las muestras de agua residual en función del pH para cada concentración de coagulante (50 y 150 ppm).

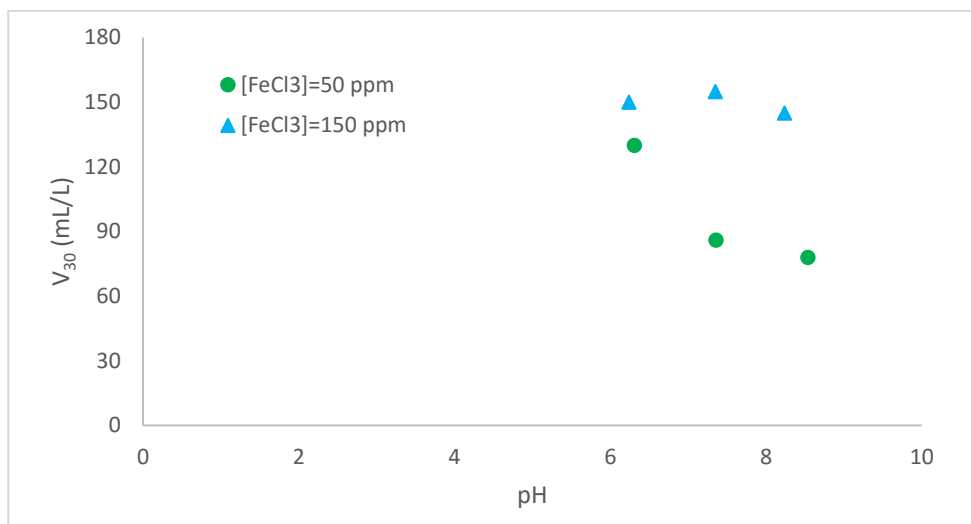
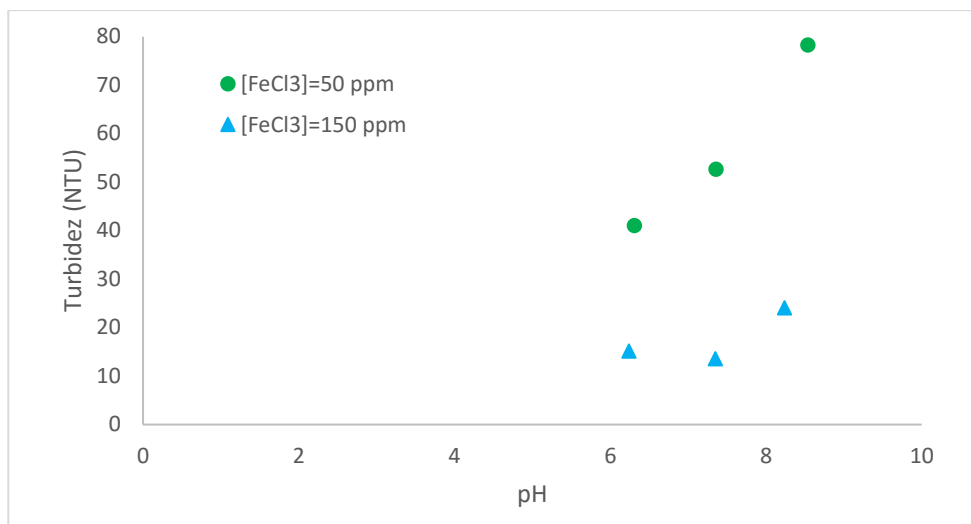


Figura 8.5. Representación de la  $V_{30}$  frente al pH.



**Figura 8.6. Representación de la turbidez frente al pH.**

Como se observa en las gráficas anteriores, **la turbidez más baja se obtiene cuando la concentración de coagulante es de 150 y a pH cercanos a 7**. Por otro lado, lo  $V_{30}$  es muy similar para todos los pH cuando la concentración de coagulante es de 150 ppm, y para el caso de 50 ppm la  $V_{30}$  tiene un valor cercano a las que se obtienen cuando la concentración de coagulante es de 150 ppm a un pH de 6.5.

Se elige 150 ppm como concentración óptima de  $\text{FeCl}_3$  y un pH orientativo de 7 ya que para estos valores las muestra 2.1 y 2.2 obtuvieron la menor turbidez con un valor de 15.15 NTU y 13.59 NTU respectivamente y las muestras con una concentración de 50 ppm de  $\text{FeCl}_3$  no disminuyeron mucho la turbidez.

### 3º Ensayo

Obtenidas la dosis óptima de coagulante se realizan ensayos de floculación, adicionando 0.5, 1 y 1.5 ppm de PACl con la finalidad de obtener la dosis de floculante óptimo. Para la realización de este experimento se utilizó como alimento el agua de la semana 3. Los resultados de los parámetros de caracterización tras finalizar el 3º ensayo se muestran en la tabla 8.4. En la figura 8.7 se muestran la etapa de sedimentación de las muestras finalizado el experimento. En la figura 8.8 se muestra la representación gráfica del volumen de materia sedimentado en 30 minutos en función de la concentración de floculante. En la figura 8.9 se muestra la representación gráfica de la turbidez de las muestras de agua residual en función de la concentración de floculante.

Tabla 8.4. Resultados del 3º ensayo Jar-Test. FeCl<sub>3</sub> como coagulante. PACl como floculante.

Muestra	[FeCl <sub>3</sub> ] (ppm)	[PACl] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	V <sub>30</sub> (mL/L)	Turbidez (NTU)
1	150	0.5	3.36	6.33	28	13.94
2	150	1	3.15	6.22	27	20.57
3	150	1.5	3.81	6.18	31	24.63

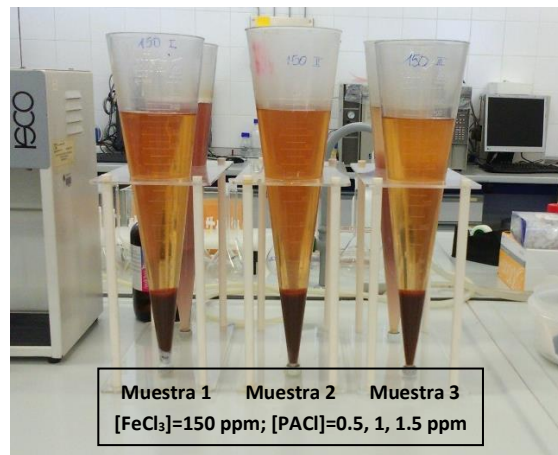
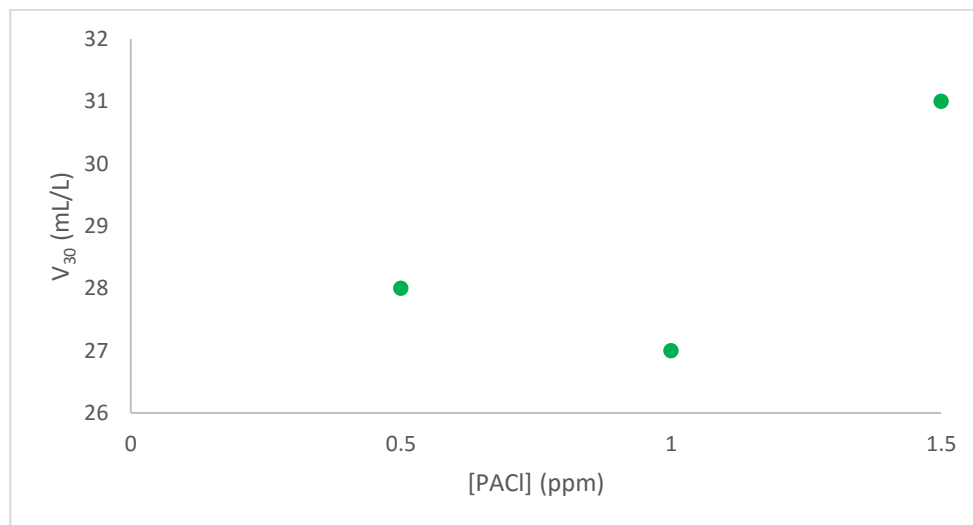
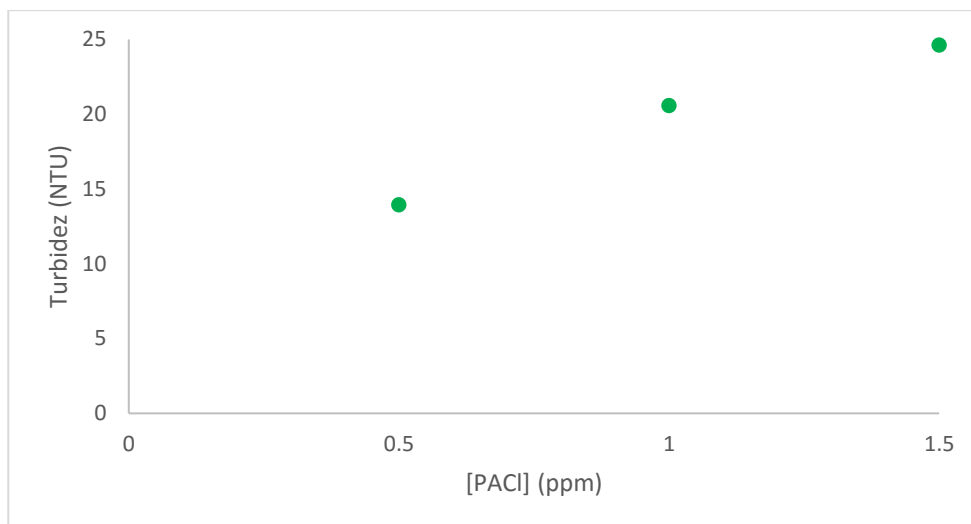


Figura 8.7. Sedimentación de las muestras tras finalizar el 3º ensayo Jar-Test.

Figura 8.8. Representación de la V<sub>30</sub> frente a la concentración de PACl.



**Figura 8.9. Representación de la turbidez frente a la concentración de PACI.**

Como se observa en la tabla 8.4 **la muestra 1 presenta la menor turbidez con un valor de 11.52 NTU, cuando la concentración de PACI es de 0.5 ppm** y una  $V_{30}$  de 28 mL/L. Si se observa la gráfica 8.8 se aprecia que la  $V_{30}$  es muy similar para todas las muestras, por lo que la dosis de floculante no influye mucho en la  $V_{30}$  ya que se pueden considerar que todas son iguales. Dado que la turbidez más pequeña es la obtenida cuando la concentración de PACI es de 0.5 ppm se elige dicha dosis como dosis óptima de floculante. Entonces finalizado el 3º ensayo Jar-Test se han obtenido las dosis óptimas de  $\text{FeCl}_3$  y PACI la cuales son de 150 ppm para el caso del coagulante y de 0.5 ppm para el caso de floculante.

#### 4º Ensayo

Con la finalidad de comparar los resultados anteriores se decide utilizar otro coagulante y otro floculante, PA/18 y AT/811 respectivamente, indicados en el apartado 7.1.2. Como dosis se elige de 150 ppm para el coagulante PA/18 y 1 ppm para el floculante AT/811. A continuación, se realiza un nuevo ensayo Jar-Test usando como alimento el agua de la semana 3 y el coagulante y floculante anteriormente mencionados a un pH de 7 el ensayo se repitió dos veces para obtener resultados más precisos. En el tratamiento físico-químico 1 se utiliza  $\text{FeCl}_3$  como coagulante y PACI como floculante, en el tratamiento físico-químico 2 se utiliza PA/18 como coagulante y AT/811 como floculante.

Los resultados de los parámetros de caracterización tras finalizar el 4º ensayo se muestran en la tabla 8.5, 8.6 correspondiente al tratamiento 1 y 8.7 y 8.8 correspondientes a tratamiento 2. En la figura 8.10 se muestran la etapa de sedimentación de las muestras finalizado el experimento. Es importante mencionar que para ambos tratamientos se midieron los parámetros tras finalizar el ensayo de coagulación y tras finalizar el ensayo de floculación.

Tabla 8.5. Resultados del 4º ensayo de coagulación.  $\text{FeCl}_3$  como coagulante.

Muestra	[ $\text{FeCl}_3$ ] (ppm)	[PACI] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)
1.1	150	-	3.19	6.56	26	21.35
1.2	150	-	3.28	6.54	22	21.09

Tabla 8.6. Resultados del 4º ensayo de coagulación-floculación.  $\text{FeCl}_3$  como coagulante. PACI como floculante.

Muestra	[ $\text{FeCl}_3$ ] (ppm)	[PACI] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)
1.1	150	0.5	3.33	6.99	23	21.09
1.2	150	0.5	3.33	6.82	21	20.95

Tabla 8.7. Resultados del 4º ensayo de coagulación. PA/18 como coagulante.

Muestra	[PA/18] (ppm)	[AT/811] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)
2.1	150	-	2.60	7.61	29	32.61
2.2	150	-	2.68	7.54	28	34.37

Tabla 8.8. Resultados del 4º ensayo de coagulación-floculación. PA/18 como coagulante. AT/811 como floculante.

Muestra	[PA/18] (ppm)	[AT/811] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)
2.1	150	1	2.70	7.36	28	5.60
2.2	150	1	2.72	7.41	25	7.88

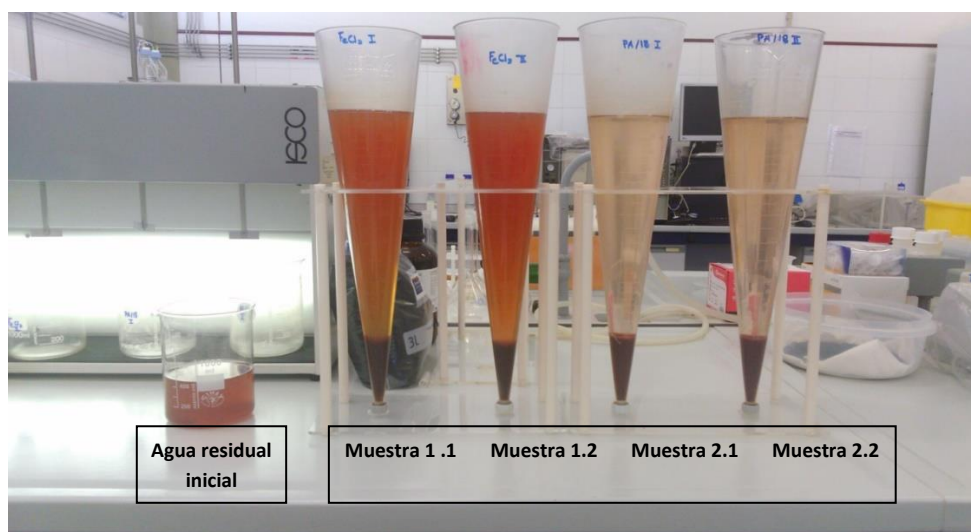


Figura 8.10. Sedimentación de las muestras tras finalizar el 4º ensayo Jar-Test.



Como se observa en las tablas 8.6 y 8.8 la  $V_{30}$  resultante de los tratamientos es muy similar, por lo que se puede considerar que **ambos tratamientos (1 y 2) generan una  $V_{30}$  pequeña**, lo cual interesa. Por otro lado, la conductividad del agua obtenida tras finalizar el tratamiento 1 es levemente mayor que la obtenida tras finalizar el tratamiento 2. La mayor diferencia se encuentra en la turbidez obteniendo un valor menor para finalizar el tratamiento 2. Sin embargo, si se compara únicamente el ensayo de coagulación para ambos casos en las tablas 8.5 y 8.7 se observa que el cloruro férrico genera una menor turbidez en comparación con el PA/18. Siendo el floculante AT/811 el producto químico que más disminuye la turbidez.

Posteriormente se tomó el sobrenadante de las muestras 1.2 y 2.1, obtenidas del 4º ensayo de coagulación-floculación, por presentar la menor turbidez en cada tratamiento y se pasó a medir la concentración de hierro la demanda química de oxígeno y el color, para de esta forma poder determinar que tratamiento es más efectivo. Los resultados de la medición de DQO y Fe se muestran en la tabla 8.9 y los resultados de la absorbancia a distintas longitudes de onda (según Ec. 1) se muestran en la tabla 8.10 junto con el cálculo del color (Ec.1).

**Tabla 8.9. Medición de DQO y Hierro al finalizar el 4º ensayo de coagulación-floculación.**

Muestra	[FeCl <sub>3</sub> ] (ppm)	[PACl] (ppm)	[PA/18] (ppm)	[AT/811] (ppm)	DQO (ppm)	Hierro (ppm)
0*	-	-	-	-	678	1.3
1.2	150	0.5	-	-	538	20
2.1	-	-	150	1	523	1

0: Agua residual textil modelo

**Tabla 8.10. Medición de la absorbancia y resultado del color al finalizar el 4º ensayo de coagulación-floculación.**

Muestra	A ( $\lambda=436$ nm)	A ( $\lambda=525$ nm)	A ( $\lambda=620$ nm)	Color
0*	0.318	0.234	0.064	0.260
1.2	0.896	0.394	0.172	0.676
2.1	0.068	0.038	0.022	0.051

0: Agua residual textil modelo

1.2: Agua residual textil modelo con FeCl<sub>3</sub> + PACl

2.1: Agua residual textil modelo con PA/18 + AT/811

De la tabla 8.9 se observa que **ambos tratamientos disminuyeron la DQO en más de 100 ppm** lo que demuestra que ha disminuido la materia orgánica oxidable con la aplicación del tratamiento físico-químico. En cuanto al valor de la concentración de hierro, inicialmente es mínimo y se mantiene casi igual para el caso del tratamiento con PA/18 y AT/811, aumenta cuando se usa FeCl<sub>3</sub> lo cual es lógico debido a que el coagulante contiene hierro, pero no aumenta a valores demasiados altos lo que quiere decir que mucha cantidad de hierro que se agrega al agua residual modelo se encuentra en el fango generado en el tratamiento físico-químico. Por otro lado, la cantidad de color del agua residual modelo es pequeño, y se reduce

a valores próximos al 0 cuando se utiliza PA/18 como coagulante y AT/811 como floculante. Cuando se utiliza  $\text{FeCl}_3$  como coagulante y PACI como floculante el color aumenta más del doble con respecto al valor inicial, esto se debe a que el cloruro de hierro presenta un color amarillento característico y el PA/18 es de color transparente.

Debido a que el tratamiento físico-químico se hace con el fin de eliminar la mayor cantidad de sólidos suspendidos. Se elige como coagulante al cloruro férrico y como floculante al policloruro de aluminio ya que, tras finalizar el proceso, el agua residual presenta un valor de DQO menor al de entrada y muy similar al obtenido con el otro coagulante y floculante. Además, se demuestra en la tabla 8.5 que con el cloruro férrico se obtiene la menor turbidez, por lo que se deduce que **el cloruro férrico otorga mejores resultados como coagulante para el agua residual textil ensayada**. Por otro lado, debido a que posteriormente se aplica un tratamiento de eliminación de color con el proceso de oxidación avanzada, el color amarillo que genera el cloruro férrico no supone ningún problema ya que será eliminado. Desde el punto de vista económico, es muy importante remarcar que el cloruro férrico es mucho más barato que el PA/18.

Es importante calcular el rendimiento de eliminación de contaminante que se ha conseguido tras finalizar el tratamiento físico-químico, utilizando el valor de DQO inicial y el valor de DQO final del agua residual.

$$\eta_{\text{DQO}} = \frac{\text{DQO}_i - \text{DQO}_f}{\text{DQO}_i} \cdot 100 = \frac{678 - 538}{678} \cdot 100 = 20.65\%$$

Se alcanza un 20.65% de rendimiento de eliminación de contaminante con el tratamiento físico-químico aplicado, lo cual significa que una parte de la materia suspendida ha sido degradada. Sin embargo, se observa que el agua residual resultante del tratamiento físico-químico no puede ser vertida directamente a alcantarillado de Valencia ya que no cumple con alguno de los parámetros recogidos en la *Ordenanza municipal de vertidos de Valencia*, como la DQO, concentración de hierro y color. Ver tabla 13.1 en el anexo.

Finalizado el tratamiento físico-químico se aplica el tratamiento de oxidación avanzada, variando la concentración de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso según el diseño de experimentos. Para la realización de este ensayo se utiliza como alimento el agua residual de la semana 4, por lo que es necesario previamente al ensayo de oxidación avanzada, aplicar el tratamiento físico-químico en las condiciones óptimas (150 ppm de  $\text{FeCl}_3$  más 0.5 ppm de PACI). Los resultados del tratamiento físico-químico óptimo se muestran en la tabla 8.11.

**Tabla 8.11. Resultados del ensayo de coagulación-floculación.  $\text{FeCl}_3$  como coagulante. PACI como floculante. Previo al ensayo de oxidación avanzada.**

Muestra	[ $\text{FeCl}_3$ ] (ppm)	[PACI] (ppm)	Conductividad (mS/cm)	pH	$V_{30}$ (mL/L)	Turbidez (NTU)
1	150	0.5	3.13	6.90	48	2.95

Es importante mencionar que finalizado el tratamiento físico-químico fue necesario separar, usando papel filtro, los fangos generados, que pasan al verter el sobrenadante del cono Imhoff en los vasos de precipitados. A este sobrenadante se le mide la DQO la concentración de hierro y el color para posteriormente calcular los rendimientos del tratamiento físico-químico. Los resultados de la medición de DQO y Fe se muestran en la tabla 8.12 y los resultados de la absorbancia a distintas longitudes de onda (según Ec. 1) se muestran en la tabla 8.13 junto con el cálculo del color (Ec.1). En la figura 8.11 se muestra el aspecto del sobrenadante obtenido al finalizar el tratamiento físico-químico.



Figura 8.11. Sobrenadante del tratamiento físico-químico ( $\text{FeCl}_3$ +PACI).

Tabla 8.12. Medición de DQO y Hierro tras finalizar el tratamiento físico-químico.

Muestra	[ $\text{FeCl}_3$ ] (ppm)	[PACI] (ppm)	DQO (ppm)	Hierro (ppm)
0*	-	-	630	1.0
1	150	0.5	439	0.6

0: Agua residual textil modelo

Tabla 8.13. Medición de la absorbancia y resultado del color tras finalizar el tratamiento físico-químico,

Muestra	A ( $\lambda=436$ nm)	A ( $\lambda=525$ nm)	A ( $\lambda=620$ nm)	Color
0*	0.225	0.170	0.056	0.183
1	0.143	0.043	0.004	0.117

0: Agua residual textil modelo

1: Agua residual textil modelo con  $\text{FeCl}_3$  + PACI

### 8.3. RESULTADOS OXIDACIÓN AVANZADA

Una vez obtenido el sobrenadante con las características que se recogen en las tablas 8.12 y 8.13 se realiza el ensayo de oxidación avanzada. Las condiciones del experimento fueron comentadas previamente en el apartado 7.1.3. Finalizado el ensayo de oxidación avanzada se mide la DQO y la concentración de hierro total únicamente a las muestras que presentan las mejores condiciones de turbidez y color. Las medidas de absorbancia de las muestras se encuentran en la tabla 8.13. La caracterización de las muestras, que incluye turbidez, DQO, concentración de Hierro II y Hierro III, se encuentran en la tabla 8.14.

**Tabla 8.14. Medición de la absorbancia al finalizar el ensayo de oxidación avanzada.**

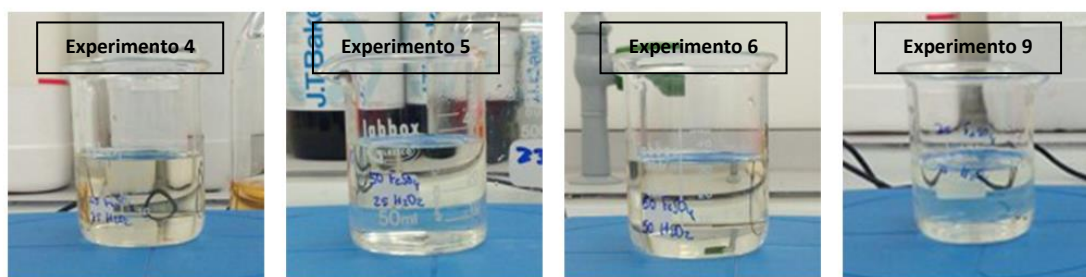
Experimento	[FeSO <sub>4</sub> ] (ppm)	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] (ppm)	A (λ=436 nm)	A (λ=525 nm)	A (λ=620 nm)
1	25	25	0.034	0.006	0.001
2	25	50	0.053	0.015	0.006
3	25	75	0.029	0.006	0.001
4	50	25	0.009	0.001	0
5	50	50	0.007	0	0
6	50	75	0.015	0.003	0.001
7	75	25	0.031	0.011	0.007
8	75	50	0.035	0.013	0.007
9	75	75	0.016	0.003	0.002

**Tabla 8.14. Resultados del ensayo de oxidación avanzada. Parámetros de caracterización.**

Experimento	[FeSO <sub>4</sub> ] (ppm)	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] (ppm)	Turbidez (NTU)	DQO (ppm)	Hierro (ppm)	Color
1	25	25	0.384	-	-	0.029
2	25	50	0.951	-	-	0.041
3	25	75	0.406	394	0.5	0.024
4	50	25	0.914	416	0.6	0.008
5	50	50	0.512	402	0.9	0.007
6	50	75	0.384	-	-	0.012
7	75	25	0.282	-	-	0.023
8	75	50	0.254	-	-	0.026
9	75	75	0.512	374	1.2	0.013

Como se observa en la tabla 8.14, los experimentos 4, 5, 6 y 9 presentan valores bajo de color, este factor influye en la calidad del agua. Es importante que el agua residual tenga un valor próximo al 0 de color, ya que supone un agua más clara. El experimento que presenta el mejor resultado de color es el número 5 con una concentración de 50 ppm de FeSO<sub>4</sub> y 50 ppm de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Por otro lado, **los valores de turbidez obtenidos son menores de 1 NTU** para todos los experimentos, lo que quiere decir que prácticamente no hay materia en suspensión en las muestras.

Al observar los valores de DQO, **el experimento 9 presenta el valor más bajo de DQO**, esto quiere decir que para concentraciones de 75 ppm de  $\text{FeSO}_4$  y 75 ppm de  $\text{H}_2\text{O}_2$  se obtiene el mayor rendimiento de eliminación del contaminante, el valor de DQO del experimento 4 no es elevado, sin embargo, no ha disminuido mucho del valor de DQO en el que se encontraba el agua residual antes del tratamiento de oxidación avanzada el cual era 439 mg/L. Ahora si se observa la concentración de hierro total, para los experimentos a los que se hizo la medición, los valores que presentan son bajos ya que al finalizar el ensayo de oxidación avanzada se genera un fango que contiene gran parte del hierro utilizado en el proceso Fenton. A continuación, en la figura 8.12 se muestra el aspecto del clarificado obtenido en los experimentos 4, 5, 6 y 9.



**Figura 8.12. Clarificado del tratamiento de oxidación avanzada ( $\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ ).**

En la figura 8.12 se observa como el agua residual ha perdido el color amarillo que poseía antes de que se le realizase el tratamiento de oxidación avanzada, el color final del agua es inapreciable, prácticamente transparente. Esto quiere decir que los compuestos que daban color al agua han sido eliminados casi en su totalidad. Se pasa a calcular los rendimientos del tratamiento de oxidación avanzada en términos de DQO, turbidez y color. No se calcula el rendimiento de eliminación de hierro ya que la concentración de hierro es muy baja en el agua residual sin tratar y en el agua residual al finalizar cada uno de los tratamientos. Como se comentó anteriormente esto significa que el hierro que se introduce al agua se elimina casi en su totalidad en el fango que se genera en el tratamiento físico-químico y en el fango que se genera en el tratamiento de oxidación avanzada.

Los valores de los parámetros de caracterización del agua residual en todas las etapas: inicial, tratamiento físico-químico y tratamiento de oxidación avanzada se recogen en la tabla 8.15.

**Tabla 8.15. Parámetros de caracterización del agua residual en todas las etapas del proceso de depuración.**

Muestra	[FeCl <sub>3</sub> ] (ppm)	[PACl] (ppm)	[FeSO <sub>4</sub> ] (ppm)	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] (ppm)	Turbidez (NTU)	DQO (ppm)	Hierro (ppm)	Color
0*	-	-	-	-	10.640	630	1.0	0.183
1	150	0.5	-	-	2.950	439	0.6	0.117
2.1	150	0.5	25	75	0.406	394	0.5	0.024
2.2	150	0.5	50	25	0.914	416	0.6	0.008
2.3	150	0.5	50	50	0.512	402	0.9	0.007
2.4	150	0.5	75	75	0.512	374	1.2	0.013

0: Agua residual textil modelo

1: Tratamiento físico-químico

2: Tratamiento de oxidación avanzada

### Rendimientos del tratamiento de oxidación avanzada

2.1: [FeSO<sub>4</sub>]=25 ppm + [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=75 ppm

$$\eta_{DQO} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \cdot 100 = \frac{439 - 394}{439} \cdot 100 = 10.25\%$$

$$\eta_{Turbidez} = \frac{Turbidez_i - Turbidez_f}{Turbidez_i} \cdot 100 = \frac{2.950 - 0.406}{2.950} \cdot 100 = 86.24\%$$

$$\eta_{Color} = \frac{Color_i - Color_f}{Color_i} \cdot 100 = \frac{0.117 - 0.024}{0.117} \cdot 100 = 79.49\%$$

2.2: [FeSO<sub>4</sub>]=50 ppm + [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=25 ppm

$$\eta_{DQO} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \cdot 100 = \frac{439 - 416}{439} \cdot 100 = 5.24\%$$

$$\eta_{Turbidez} = \frac{Turbidez_i - Turbidez_f}{Turbidez_i} \cdot 100 = \frac{2.950 - 0.914}{2.950} \cdot 100 = 69.02\%$$

$$\eta_{Color} = \frac{Color_i - Color_f}{Color_i} \cdot 100 = \frac{0.117 - 0.008}{0.117} \cdot 100 = 93.16\%$$

2.3: [FeSO<sub>4</sub>]=50 ppm + [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=50 ppm

$$\eta_{DQO} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \cdot 100 = \frac{439 - 402}{439} \cdot 100 = 8.43\%$$

$$\eta_{Turbidez} = \frac{Turbidez_i - Turbidez_f}{Turbidez_i} \cdot 100 = \frac{2.950 - 0.512}{2.950} \cdot 100 = 82.64\%$$

$$\eta_{\text{Color}} = \frac{\text{Color}_i - \text{Color}_f}{\text{Color}_i} \cdot 100 = \frac{0.117 - 0.007}{0.117} \cdot 100 = 94.02\%$$

2.4:  $[\text{FeSO}_4]=75 \text{ ppm} + [\text{H}_2\text{O}_2]=75 \text{ ppm}$

$$\eta_{\text{DQO}} = \frac{\text{DQO}_i - \text{DQO}_f}{\text{DQO}_i} \cdot 100 = \frac{439 - 374}{439} \cdot 100 = 14.81\%$$

$$\eta_{\text{Turbidez}} = \frac{\text{Turbidez}_i - \text{Turbidez}_f}{\text{Turbidez}_i} \cdot 100 = \frac{2.950 - 0.512}{2.950} \cdot 100 = 82.64\%$$

$$\eta_{\text{Color}} = \frac{\text{Color}_i - \text{Color}_f}{\text{Color}_i} \cdot 100 = \frac{0.117 - 0.013}{0.117} \cdot 100 = 88.89\%$$

Si se analiza los rendimientos del proceso de oxidación avanzada, el mayor porcentaje de eliminación de contaminante se logra cuando la concentración de  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  es de 75 ppm con un valor del 14.81%. Todos los experimentos alcanzaron valores altos de rendimiento en la eliminación de color, el mayor porcentaje fue de 94.02% que se alcanza cuando la concentración de  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  es de 50 ppm. Así mismo todos los experimentos alcanzaron valores altos de rendimiento para la disminución de la turbidez, el mayor porcentaje fue de 86.24% que se alcanza cuando la concentración de  $\text{FeSO}_4$  es de 25 ppm y la de  $\text{H}_2\text{O}_2$  es de 75 ppm.

Se debe mencionar que **las 4 muestras de agua residual obtenidas de los experimentos** de oxidación avanzada, **llegarían a cumplir la Ordenanza Municipal de Valencia**, dado que el valor de DQO se encuentra por debajo de los 500 ppm, las concentraciones de hierro están por debajo de 5 ppm, el color de las muestras es inapreciable y la cantidad de materia sedimentable es menor a los 15 mL/L, además de cumplir con otros parámetros. (Ver tabla 13.1 en el anexo). En el caso del pH cabe indicar que se encontraría entre 5.5-9, utilizando NaOH. De este modo el agua residual tratada podría ser vertida a la red de alcantarillado.

### Análisis estadístico

A continuación, se muestran los resultados del estudio estadístico del diseño de experimento factorial a tres niveles, con el objetivo de hallar las condiciones de operación óptimas del tratamiento de oxidación avanzada. **Se analizan dos variables significativas del proceso, la turbidez y el color de las muestras en función de las concentraciones de  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ .**

En la figura 8.13, se muestra la influencia de los factores, concentración de  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , sobre la turbidez de las muestras. En la figura 8.14, se muestra un gráfico 3D que representa la superficie de respuesta de la turbidez de las muestras en función de la concentración de  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ . También se incluye el análisis de la varianza para la turbidez en la tabla 8.16.

Tabla 8.16. Análisis de la varianza para la turbidez.

Factor	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: FeSO <sub>4</sub>	0.0613991	1	0.0613991	0.47	0.5183
B: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.1769530	1	0.1769530	1.36	0.2883
AA	0.0882191	1	0.0882191	0.68	0.4423
AB	0.2320870	1	0.2320870	1.78	0.2306
BB	0.0469764	1	0.0469764	0.36	0.5704
Error total	0.7826530	6	0.1304420		
Total (corr.)	13.902400	11			

Gl: Grados de libertad

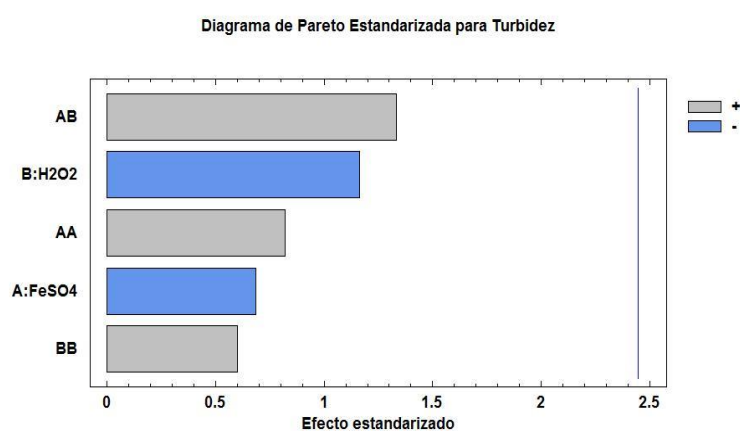


Figura 8.13. Diagrama de Pareto para la variable turbidez al aplicar el tratamiento de oxidación avanzada.

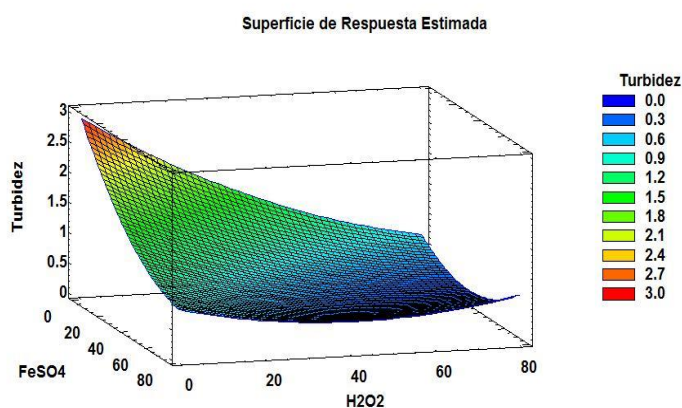


Figura 8.14. Superficie de respuesta para la variable turbidez al aplicar el tratamiento de oxidación avanzada.



En primer lugar, al analiza el ANOVA (tabla 8.16), se observa que **no existen diferencias significativas en la turbidez** de las muestras **respecto a la concentración de FeSO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**. Esto indica que ninguno de los reactivos tiene un efecto significativo sobre la turbidez, aunque si se observa el valor-p de la interacción de la concentración de FeSO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, corresponde al valor más bajo lo cual puede indicar que ambos reactivos en conjunto sí que tienen un efecto sobre la turbidez, aunque no sea significativo (valor-p <0.05).

En la figura 8.13 correspondiente al diagrama de Pareto, se observa que **la adición de FeSO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tiene un efecto negativo sobre la turbidez**, esto es lógico ya que el tratamiento de oxidación avanzada además de eliminar el color del agua residual, elimina materia orgánica, que está relacionada con la turbidez.

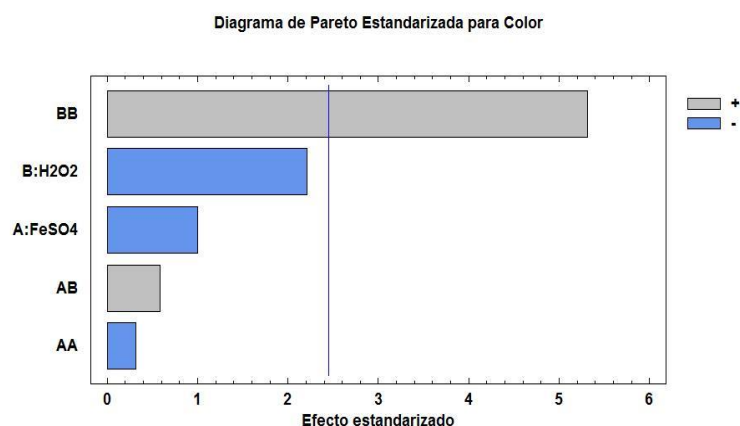
En la figura 8.14 correspondiente a la superficie de respuesta estimada, se observa un máximo de turbidez el cual corresponde al agua residual sin aplicar el tratamiento de oxidación avanzada, además se observan valores bajos de turbidez para todos los rangos de concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y para concentraciones de FeSO<sub>4</sub> mayores a 60 ppm. Otro aspecto importante es que **la superficie de respuesta es casi plana lo que indica que la turbidez disminuye de forma proporcional cuando se agregan los reactivos de forma estequiométrica (1:1)**.

Realizando un análisis similar, se pasa a analizar la variable color. En la figura 8.15, se muestra la influencia de los factores, concentración de FeSO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, sobre el color de las muestras. En la figura 8.16, se muestra un gráfico 3D que representa la superficie de respuesta del color de las muestras en función de la concentración de FeSO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. También se incluye el análisis de la varianza para el color en la tabla 8.17.

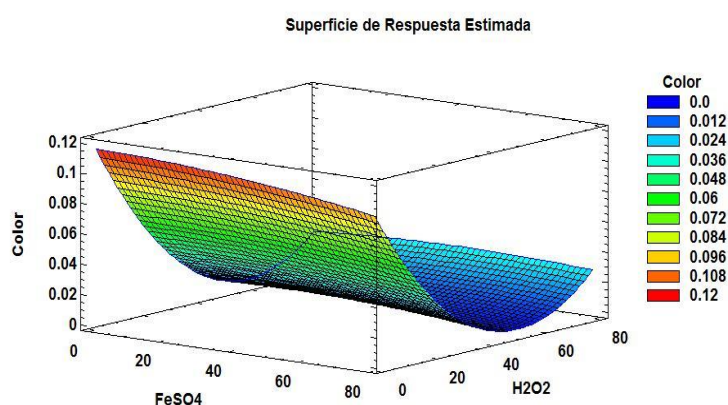
**Tabla 8.17. Análisis de la varianza para el color.**

Factor	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: FeSO <sub>4</sub>	0.00005131730	1	0.00005131730	0.99	0.3578
B: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.00025316700	1	0.00025316700	4.89	<b>0.0690</b>
AA	0.00000531592	1	0.00000531592	0.10	0.7595
AB	0.00001791310	1	0.00001791310	0.35	0.5778
BB	0.00146416000	1	0.00146416000	28.29	<b>0.0018</b>
Error total	0.00031058100	6	0.00005176350		
Total (corr.)	0.02203300000	11			

GI: Grados de libertad



**Figura 8.15. Diagrama de Pareto para la variable color al aplicar el tratamiento de oxidación avanzada.**



**Figura 8.16. Superficie de respuesta para la variable color al aplicar el tratamiento de oxidación avanzada.**

Al analizar el ANOVA (tabla 8.17), se observa que **existen diferencias significativas en el color** de las muestras **respecto a la concentración de  $H_2O_2$**  (valor-p =0.07). Esto indica que el agua oxigenada es el compuesto que influye en la eliminación de color de las muestras y se debe agregar controladamente para que de esta forma libere radicales hidroxilo capaces de oxidar los contaminantes que dan color al agua residual.

En la figura 8.15 correspondiente al diagrama de Pareto, se observa que **la adición de  $FeSO_4$  y  $H_2O_2$  tiene un efecto negativo sobre el color**, es decir que lo eliminan, además se observa que la interacción cuadrática de la concentración de  $H_2O_2$  consigo mismo resulta muy significativa.

En la figura 8.16 correspondiente a la superficie de respuesta estimada, se observa al igual que la anterior superficie de respuesta un máximo de color el cual corresponde al agua residual sin aplicar el tratamiento de oxidación avanzada además **se observa un mínimo en la curva cuando la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es aproximadamente de 40 ppm**. Se aprecia también que la concentración de FeSO<sub>4</sub> no influye en la disminución del color cuando la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es menor a 20 ppm, debido a que **el peróxido de hidrogeno es el factor que ejerce un efecto mucho mayor en la disminución de color**.

Hecho el análisis estadístico de las variables turbidez y color y además de haber obtenido los porcentajes de los rendimientos del tratamiento de oxidación avanzada, se elige una concentración de **50 ppm como concentración óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub>**. Dado que cuando se trabaja con concentraciones mayores de 40 ppm de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y cuando la reacción se lleva a cabo de forma estequiométrica se obtienen los mayores porcentajes de eliminación de color, de disminución de la turbidez y valores más bajos de DQO. También podría servir una concentración de 75 ppm de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub>, ya que se obtiene porcentajes muy altos de rendimientos.

Obtenido las condiciones óptimas del tratamiento físico-químico y de oxidación avanzada, se calculan los rendimientos obtenidos en todo el proceso de depuración, a partir de los valores de los parámetros de caracterización de las muestras que se encuentran en la tabla 8.15.

#### Rendimientos de todo el proceso de depuración

$$\eta_{DQO} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \cdot 100 = \frac{630 - 402}{630} \cdot 100 = 36.19\%$$

$$\eta_{Turbidez} = \frac{Turbidez_i - Turbidez_f}{Turbidez_i} \cdot 100 = \frac{10.640 - 0.512}{10.640} \cdot 100 = 95.19\%$$

$$\eta_{Color} = \frac{Color_i - Color_f}{Color_i} \cdot 100 = \frac{0.183 - 0.007}{0.183} \cdot 100 = 96.18\%$$

Como se puede observar se alcanza porcentajes altos de rendimientos aplicando el tratamiento físico-químico más oxidación avanzada, eliminando en su totalidad el color y la turbidez del agua. Se debe remarcar que el agua tratada también podría ser reutilizada en algún proceso industrial, acorde a los requerimientos de calidad requeridos en la industria textil, como por ejemplo, la etapa de desencolado.

## 9. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se presentan los cálculos que definen el diseño de la instalación para tratar un caudal de agua residual de  $100 \text{ m}^3/\text{d}$ , los elementos que componen la instalación y las dimensiones de cada uno. El diagrama del proceso se muestra en el plano nº 1.

La instalación propuesta está formada por las siguientes partes:

- Tanque de homogeneización
- Tratamiento físico-químico: ajuste de pH, coagulación, floculación y sedimentación.
- Tratamiento de oxidación avanzada: ajuste de pH, proceso Fenton, ajuste de pH y sedimentación.
- Recogida de agua tratada
- Dosificación de reactivos químicos

### 9.1. CÁLCULOS DE LA INSTALACIÓN

#### 9.1.1. Tanque de homogeneización

El tanque sirve para el almacenamiento del agua residual y homogeneizar las características del agua residual provenientes del proceso de tintura.

La corriente de entrada al tanque de homogeneización es el caudal de agua residual a tratar ( $Q_{A.R} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ ). El modo de funcionamiento al día de la planta es en continuo (24 h/d).

Con los datos anteriores, se calcula el volumen del tanque de homogeneización:

$$V = Q_{A.R} \cdot t = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 24 \text{ h} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} = 100 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10%, el tanque se dimensiona a  $110 \text{ m}^3$ . Se opta por un tanque pre-fabricado de  $118 \text{ m}^3$ .

#### 9.1.2. Tratamiento físico-químico

##### Ajuste de pH (1)

Para ajustar el pH se adiciona una **disolución de NaOH concentrada**. Dependiendo de las características del agua residual de la etapa de tintura, el volumen de NaOH que se debe agregar para aumentar el pH puede variar. En los ensayos experimentales se utilizó un

volumen aproximado de 10 mL de NaOH 1 M para un litro de agua residual. Dado que a nivel industrial se trabaja a altas concentraciones se toma una concentración 4 M y se estima que el volumen para tratar un litro de agua residual es de 2.5 mL.

Con los datos anteriores, se calcula el caudal de NaOH 4 M ( $Q_{\text{NaOH}}$ ) para regular el pH del agua residual ( $Q_{\text{A.R.}} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

$$Q_{\text{NaOH}} = Q_{\text{A.R.}} \cdot V_{\text{NaOH}_{\text{laboratorio}}} = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 2.5 \frac{\text{mL}}{\text{L}} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 0.25 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Se considera que el caudal de NaOH es despreciable ya que el caudal de agua residual es mucho mayor.

El caudal de agua residual debe ser ajustado a un pH = 8.5 y en un tiempo estimado de 10 minutos.

Con los datos anteriores, se calcula el volumen del tanque de ajuste de pH:

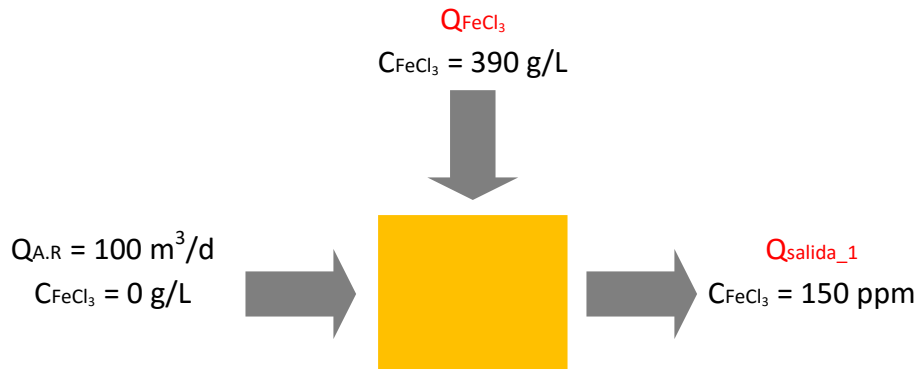
$$V = Q_{\text{A.R.}} \cdot t = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0.69 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10%, el volumen del tanque es de  $0.76 \text{ m}^3$ . Se opta por un tanque industrial pre-fabricado de  $0.76 \text{ m}^3$ .

## Coagulación

La coagulación se realiza en un tanque agitado, donde se mezclan 2 corrientes de entrada y se obtiene una corriente de salida como se muestra en la figura 9.1. Las corrientes de entrada son el caudal de agua residual a tratar ( $Q_{\text{A.R.}} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ ) y el caudal de coagulante ( $Q_{\text{FeCl}_3}$ ) y la corriente de salida es la suma de ambos caudales ( $Q_{\text{salida}_1}$ ).

El caudal de agua residual a tratar no posee coagulante, la concentración de partida de coagulante es la suministrada por la casa comercial Panreac (30% sol. Acuosa; densidad relativa: 1.31), con una concentración másica de 390 g/L, la concentración de salida de coagulante es la misma que hay dentro del tanque y la óptima que se obtuvo en los ensayos de coagulación (150 ppm).



**Figura 9.1. Balance de materia en la etapa de coagulación.**

Se plantea un balance general en la etapa de coagulación (Ec. 2) y un balance al coagulante (Ec. 3), para calcular el caudal de coagulante que entra al tanque ( $Q_{FeCl_3}$ ) y el caudal de salida del tanque ( $Q_{salida_1}$ ).

$$100 \frac{m^3}{d} + Q_{FeCl_3} = Q_{salida_1} \quad \text{Ec. 2}$$

$$100 \frac{m^3}{d} \cdot 0 + Q_{FeCl_3} \cdot 390 \cdot 10^3 \text{ ppm} = Q_{salida_1} \cdot 150 \text{ ppm} \quad \text{Ec. 3}$$

De esto modo se resuelve el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas obteniendo los siguientes resultados  $Q_{FeCl_3} = 0.0385 \text{ m}^3/d$ ;  $Q_{salida_1} = 100.0385 \text{ m}^3/d$ . El caudal de coagulante es despreciable y se puede considerar que el caudal de entrada será prácticamente el de salida ( $Q_{salida_1} = Q_{A.R.}$ ).

La etapa de coagulación tiene una duración de 5 minutos, el volumen del tanque se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = Q_{A.R.} \cdot t = 100 \frac{m^3}{d} \cdot 5 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0.35 \text{ m}^3$$

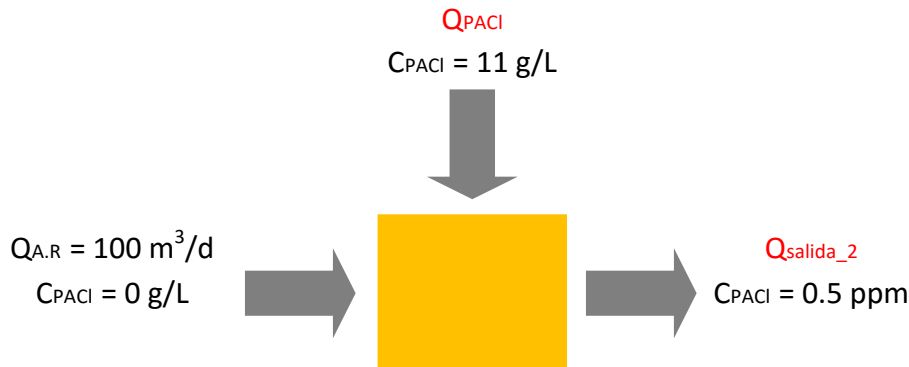
Con un factor de seguridad del 10%, el volumen del tanque es de  $0.38 \text{ m}^3$ .

## Floculación

La floculación al igual que la coagulación se realiza en un tanque agitado, donde se mezclan la corriente de salida de la etapa de coagulación ( $Q_{A.R} = 100 \text{ m}^3/d$ ) y la corriente de entrada de floculante ( $Q_{PACl}$ ) y se obtiene una corriente de salida como la suma de ambos caudales ( $Q_{salida_1}$ ) como se muestra en la figura 9.2.

El caudal de agua residual a tratar no posee floculante, la concentración de partida de floculante es la suministrada por la casa comercial Simar S.A (1 % sol. Acuosa; densidad relativa 1.08), con una concentración másica de 11 g/L, la concentración de salida de floculante es la

misma que hay dentro del tanque y la óptima que se obtuvo en los ensayos de floculación (0.5 ppm).



**Figura 9.2. Balance de materia en la etapa de floculación.**

Se plantea un balance general en la etapa de floculación (Ec. 4) y un balance al floculante (Ec. 5), para calcular el caudal de floculante que entra al tanque ( $Q_{PACI}$ ) y el caudal de salida del tanque ( $Q_{salida_2}$ ).

$$100 \frac{m^3}{d} + Q_{PACI} = Q_{salida_2} \quad \text{Ec. 4}$$

$$100 \frac{m^3}{d} \cdot 0 + Q_{PACI} \cdot 11 \cdot 10^3 \text{ ppm} = Q_{salida_2} \cdot 0.5 \text{ ppm} \quad \text{Ec. 5}$$

De esto modo se resuelve el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas obteniendo los siguientes resultados  $Q_{PACI} = 4.546 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{salida_2} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ . El caudal de floculante es despreciable y se puede considerar que el caudal de entrada será prácticamente el de salida ( $Q_{salida_2} = Q_{A.R}$ ).

La etapa de floculación tiene una duración de 30 minutos ( $t = 30 \text{ min}$ ), el volumen del tanque se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = Q_{A.R} \cdot t = 100 \frac{m^3}{d} \cdot 30 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 2.08 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10%, el volumen del tanque es de  $2.29 \text{ m}^3$ .

### **✚ Sedimentación (1)**

Para el diseño del sedimentador se ha de tener en cuenta la velocidad ascensional de las partículas. Para este caso se supone  $v = 1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  de velocidad ascensional. La corriente de entrada al sedimentador es el caudal de salida de la etapa de floculación, que es la mismo a la salida de la etapa de coagulación ( $Q_{A.R} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

Con los datos anteriores, se calcula el área superficial del sedimentador:

$$A_{\text{sup}} = \frac{Q_{\text{A.R}}}{v} = \frac{100 \text{ m}^3/\text{d}}{1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} = 4.17 \text{ m}^2$$

Con un factor de seguridad del 10%, el área superficial del sedimentador es de 4.58 m<sup>2</sup>.

Se escoge como unidad de tratamiento un equipo que incluye tanque de coagulación, tanque de floculación y decantador lamelar. Esta unidad de tratamiento se fabrica acorde a los volúmenes y superficies calculados previamente, con un caudal nominal de 100 m<sup>3</sup>/d.

### 9.1.3. Tratamiento de oxidación avanzada

#### Ajuste de pH (2)

Al finalizar la etapa de sedimentación anterior, se supone que el caudal de fango generado es el 2% del caudal de entrada al sedimentador ( $Q_{\text{A.R}} = 100 \text{ m}^3/\text{d}$ ). Por lo tanto, el caudal de entrada en la etapa de oxidación avanzada es:

$$Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{A.R}} \cdot 98\% = 98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Para ajustar el pH del agua a 3 se adiciona ácido sulfúrico. La cantidad de ácido sulfúrico que se añadió en el ensayo de oxidación avanzada fue muy pequeña, un par de gotas fueron suficiente para disminuir el pH del sobrenadante del tratamiento físico-químico. El volumen aproximado de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 M para disminuir el pH de 50 mL de sobrenadante fue de aproximadamente 1 mL. Dado que a nivel industrial se trabaja a altas concentraciones se toma una concentración 4 M y se estima que el volumen para tratar 50 mL de sobrenadante es de 0.25 mL.

Con los datos anteriores, se estima el caudal de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4 M para regular el pH del sobrenadante del tratamiento físico-químico ( $Q_{\text{entrada}} = 98 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

$$Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = Q_{\text{entrada}} \cdot V_{\text{H}_2\text{SO}_4\text{-laboratorio}} = 98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 0.25 \frac{\text{mL}}{50 \text{ mL}} = 0.49 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Se considera que el caudal de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es despreciable ya que el caudal del sobrenadante del tratamiento físico-químico es mucho mayor.

El caudal de sobrenadante debe ser ajustado a un pH = 3 y en un tiempo estimado de 10 minutos.

Con los datos anteriores, se calcula el volumen del tanque de ajuste de pH:

$$V = Q_{\text{entrada}} \cdot t = 98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0.68 \text{ m}^3$$

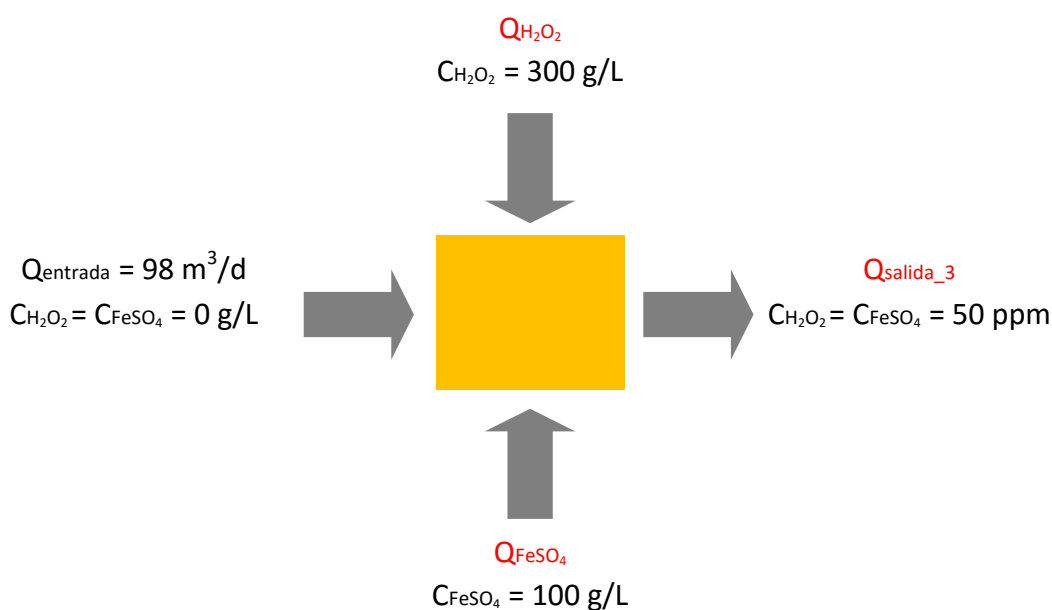


Con un factor de seguridad del 10%, el volumen del tanque es de 0.75 m<sup>3</sup>. Se opta por un tanque industrial pre-fabricado de 0.76 m<sup>3</sup>.

### ✚ Proceso Fenton

El proceso de oxidación se realiza en un tanque agitado, donde se mezclan 3 corrientes de entrada y se obtiene una corriente de salida como se muestra en la figura 9.3. Las corrientes de entrada son el caudal de agua sobrenadante que sale del tanque de ajuste de pH anterior ( $Q_{\text{entrada}} = 98 \text{ m}^3/\text{d}$ ), el caudal de agente oxidante ( $Q_{\text{H}_2\text{O}_2}$ ), el caudal de catalizador ( $Q_{\text{FeSO}_4}$ ) y la corriente de salida es la suma de los 3 caudales ( $Q_{\text{salida}_3}$ ).

El caudal de agua de sobrenadante a tratar no posee ninguno de los dos reactivos mencionados, las concentraciones de partida de agente oxidante y catalizador son las suministradas por la casa comercial Panreac, peróxido de hidrógeno 100 vol., con una concentración másica de 300 g/L, y sulfato ferroso con una concentración de 100 g/L la concentración de salida de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso son las mismas que hay dentro del tanque y las óptimas que se obtuvieron en los ensayos de oxidación avanzada (para ambos reactivos, 50 ppm).



**Figura 9.3. Balance de materia en el proceso Fenton.**

Se plantea un balance general en el tanque (Ec. 6) un balance al peróxido de hidrógeno (Ec. 7) y un balance al sulfato ferroso (Ec. 8) para poder calcular los caudales de entrada de cada reactivo ( $Q_{\text{H}_2\text{O}_2}$ ,  $Q_{\text{FeSO}_4}$ ) y el caudal de salida del tanque ( $Q_{\text{salida}_3}$ ).

$$98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} + Q_{\text{H}_2\text{O}_2} + Q_{\text{FeSO}_4} = Q_{\text{salida}_3} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 0 + Q_{\text{H}_2\text{O}_2} \cdot 300 \cdot 10^3 \text{ppm} = Q_{\text{salida}_3} \cdot 50 \text{ppm} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 0 + Q_{\text{FeSO}_4} \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ppm} = Q_{\text{salida}_3} \cdot 50 \quad (\text{Ec. 8})$$

De esto modo se resuelve el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas obteniendo los siguientes resultados  $Q_{\text{H}_2\text{O}_2} = 0.0163 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{\text{FeSO}_4} = 0.049 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{\text{salida}_3} = 98.065 \text{ m}^3/\text{d}$ . Los caudales de agente oxidante y catalizador son despreciables y se puede considerar que el caudal de entrada será prácticamente el de salida ( $Q_{\text{salida}_3} = Q_{\text{entrada}}$ ).

El proceso de oxidación avanzada tiene una duración de 15 minutos ( $t = 15 \text{ min}$ ), el volumen del tanque se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = Q_{\text{entrada}} \cdot t = 98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 1.02 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10%, el volumen del tanque es de  $1.12 \text{ m}^3$ .

### Ajuste de pH (3)

Al finalizar el proceso Fenton se ajusta el pH a 7, mediante la adición de NaOH 4 M se estima que el caudal necesario para ajustar el pH es el mismo que se calculó en el apartado 9.1.2. ( $Q_{\text{NaOH}} = 0.25 \text{ m}^3/\text{d}$ ) y por tanto es despreciable con respecto al caudal de entrada ( $Q_{\text{entrada}} = 98 \text{ m}^3/\text{d}$ ). El tiempo para ajustar el pH es de 10 minutos.

Con los datos anteriores, se calcula el volumen del tanque de ajuste de pH:

$$V = Q_{\text{entrada}} \cdot t = 98 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0.68 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10%, el volumen del tanque es de  $0.75 \text{ m}^3$ .

### Sedimentación (2)

Es necesario incluir un sedimentador debido al fango que se genera en el proceso de oxidación avanzada. Estas partículas sedimentan más rápido que las partículas que sedimentan en el tratamiento de coagulación-floculación. Para este caso se supone una velocidad ascensional más alta ( $v = 1.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ). La corriente de entrada al sedimentador es el caudal de salida del tanque de ajuste de pH anterior ( $Q_{\text{entrada}} = 98 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

Con los datos anteriores, se calcula el área superficial del sedimentador:

$$A_{\text{sup}} = \frac{Q_{\text{entrada}}}{v} = \frac{98 \text{ m}^3/\text{d}}{1.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} = 3.40 \text{ m}^2$$

Con un factor de seguridad del 10%, el área superficial del sedimentador es de  $3.74 \text{ m}^2$ .

Se escoge como unidad de tratamiento un equipo que incluye tanque de proceso Fenton, tanque de ajuste de pH y decantador lamelar. Esta unidad de tratamiento se fabrica acorde a los volúmenes y superficies calculados previamente, con un caudal nominal de 100 m<sup>3</sup>/d.

#### 9.1.4. Recogida de agua tratada

Al finalizar la etapa de sedimentación anterior, se supone que el caudal de fango generado es del 1% del caudal de entrada al sedimentador ( $Q_{\text{entrada}} = 98 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

Por lo tanto, el caudal de agua depurada que entra es:

$$Q_{A.D} = Q_{\text{entrada}} \cdot 99\% = 97.02 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

El modo de funcionamiento al día de la planta es en continuo (24 h/d).

Con los datos anteriores, se calcula el volumen del tanque de recogida de agua tratada:

$$V = Q_{A.D} \cdot t = 97.02 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 24 \text{ h} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} = 97.02 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10%, el tanque se dimensiona a 106.72 m<sup>3</sup>. Se opta por un tanque pre-fabricado de 118 m<sup>3</sup>.

#### 9.1.4. Dosificación de reactivos químicos

Cada reactivo debe ser almacenado en un depósito propio, dependiendo de las características químicas, pudiendo estar fabricado de un material u otro. Los reactivos necesarios para el proceso de depuración son: NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, FeCl<sub>3</sub>, PACl, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub>.

##### NaOH

El volumen del depósito de almacenamiento de NaOH 4 M dependerá de lo frecuente que sea necesario rellenarlo. Si se pretende que el depósito contenga NaOH durante una semana, se toma como tiempo dicho valor y se calcula el volumen a partir del caudal de NaOH **4 M** calculado en el apartado 9.1.2. ( $Q_{\text{NaOH}} = 0.25 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

$$V_{\text{NaOH}} = Q_{\text{NaOH}} \cdot t = 0.25 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 7 \text{ d} = 1.75 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10% el depósito se dimensiona a 1.93 m<sup>3</sup>. Se opta por un depósito pre-fabricado de 2 m<sup>3</sup>. La casa comercial Panreac es proveedor de este producto químico disponible en la concentración requerida.

#### H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

El volumen del depósito de almacenamiento de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4 M dependerá de lo frecuente que sea necesario rellenarlo. Si se pretende que el depósito contenga H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> durante una semana, se toma como tiempo dicho valor y se calcula el volumen a partir del caudal de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> **4 M** calculado en el apartado 9.1.3. ( $Q_{H_2SO_4} = 0.49 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

$$V_{H_2SO_4} = Q_{H_2SO_4} \cdot t = 0.49 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 7 \text{ d} = 3.43 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10% el depósito se dimensiona a 3.43 m<sup>3</sup> y se opta por un depósito pre-fabricados de 3.43 m<sup>3</sup>. La casa comercial Panreac es proveedor de este producto químico disponible en la concentración requerida.

#### FeCl<sub>3</sub>

El volumen de coagulante a dosificar a la semana se calcula teniendo en cuenta la concentración de partida (390 g/L) y el caudal de FeCl<sub>3</sub> ( $Q_{FeCl_3} = 0.0385 \text{ m}^3/\text{d}$ ), calculado en el apartado 9.1.2.

$$V_{FeCl_3} = Q_{FeCl_3} \cdot t = 0.0385 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 7 \text{ d} = 0.27 \text{ m}^3$$

El depósito que contiene la cantidad de coagulante a dosificar durante una semana se dimensiona con un factor de seguridad del 10% a 0.3 m<sup>3</sup>. Se opta por un depósito pre-fabricado de 0.3 m<sup>3</sup>.

#### PACI

El volumen de floculante a dosificar en cuenta la concentración de partida (11 g/L) y el caudal de PACI ( $Q_{PACI} = 4.546 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{d}$ ), calculado en el apartado 9.1.2.

$$V_{PACI} = Q_{PACI} \cdot t = 4.546 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 7 \text{ d} = 0.032 \text{ m}^3 = 32 \text{ L}$$

El volumen de floculante que se debe dosificar a la semana es muy pequeño, esto se debe a que en cada tratamiento de floculación la concentración requerida en el tanque es de 0.5 ppm. Para calcular el volumen del depósito de almacenamiento se toma como tiempo un valor de 1 meses (30 días).

$$V_{\text{PACl}} = Q_{\text{PACl}} \cdot t = 4.546 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 30 \text{ d} = 0.14 \text{ m}^3$$

Con un factor de seguridad del 10% el depósito se dimensiona a 0.15 m<sup>3</sup>. Se opta por depósito pre-fabricado de 0.15 m<sup>3</sup>.

#### FeSO<sub>4</sub>

El volumen de catalizador a dosificar a la semana se calcula teniendo en cuenta la concentración de partida (100 g/L) y el caudal de FeSO<sub>4</sub> (Q<sub>FeSO<sub>4</sub></sub> = 0.049 m<sup>3</sup>/d), calculado en el apartado 9.1.3.

$$V_{\text{FeSO}_4} = Q_{\text{FeSO}_4} \cdot t = 0.049 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 7 \text{ d} = 0.34 \text{ m}^3$$

El depósito que contiene la cantidad de catalizador a dosificar durante una semana se dimensiona con un factor de seguridad del 10% a 0.37 m<sup>3</sup>. Se opta por un depósito pre-fabricado de 0.37 m<sup>3</sup>.

#### H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

El volumen de agente oxidante a dosificar a la semana se calcula teniendo en cuenta la concentración de partida (100 vol.) y el caudal de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Q<sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub> = 0.0163 m<sup>3</sup>/d), calculado en el apartado 9.1.3.

$$V_{\text{H}_2\text{O}_2} = Q_{\text{H}_2\text{O}_2} \cdot t = 0.0163 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 7 \text{ d} = 0.11 \text{ m}^3$$

El depósito que contiene la cantidad de agente oxidante a dosificar durante una semana se dimensiona con un factor de seguridad del 10% a 0.12 m<sup>3</sup>. Se opta por un depósito pre-fabricado de 0.12 m<sup>3</sup>.

## 9.2. ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN

### 9.2.1. Equipos principales

#### Depósitos para almacenamiento de productos químicos

Para almacenar el hidróxido sódico, el ácido sulfúrico, el cloruro férrico, el policloruro de aluminio, el sulfato ferroso y el peróxido de hidrógeno se seleccionan 6 depósitos de 2, 3.45, 0.3, 0.15, 0.4 y 0.12 metros cúbicos, respectivamente. Cada depósito cuenta con cubeto de

retención y sensor de nivel, fabricados en polietileno de alta densidad (PEAD) por AIQSA modelo APQ-006 (figura 9.4).



Figura 9.4. Depósito para almacenamiento de productos químicos. ([www.aiqsa.com](http://www.aiqsa.com))

#### Tanques metálicos para almacenamiento de agua

Para el tanque de homogeneización y recogida de agua tratada se seleccionan 2 tanques metálicos de 118 metros cúbicos formados por chapas de acero ondulado (Z-600) y suelo de hormigón armado, fabricados por Agrohispánia (figura 9.5).



Figura 9.5. Tanque para almacenamiento de agua. ([www.agrohispania.com](http://www.agrohispania.com))

#### Tanque de ajuste de pH

Se seleccionan tanques individuales para llevar a cabo el ajuste de pH (1) y (2). Para el ajuste de pH con hidróxido sódico previo a la coagulación-floculación se seleccionan un tanque

de 0.76 metros cúbicos y para el ajuste con ácido sulfúrico previo al proceso Fenton se selecciona un tanque igual al anterior de 0.76 metros cúbicos, ambos fabricados en polietileno de alta densidad (PEAD) por AIQSA (figura 9.6).



Figura 9.6. Tanque de proceso. ([www.aiqsa.com](http://www.aiqsa.com))

#### ✚ Unidad de tratamiento físico-químico

En la figura 9.7 se muestra un ejemplo del aspecto que tendría la unidad de tratamiento físico-químico por la que se ha optado. Esta unidad integra el tanque de coagulación, tanque de floculación y la sedimentación lamelar. La unidad está fabricada en plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) por Toro Equipment.



Figura 9.7. Unidad de tratamiento físico-químico. ([toroequipment.com](http://toroequipment.com))

### ✚ Unidad de tratamiento de oxidación avanzada

En la figura 9.7 se muestra un ejemplo del aspecto que tendría la unidad de tratamiento para la oxidación avanzada por la que se ha optado. Como se puede observar, la unidad es similar a la del tratamiento físico-químico, pero, en este caso, integra los tanques de adición de reactivos y la sedimentación lamelar.

#### 9.2.2. Equipos secundarios

### ✚ Agitadores

Aseguran una mezcla homogénea de los fluidos en los tanques de proceso y el tanque de homogenización. Se seleccionan 6 agitadores de hélice y 1 de paleta correspondientes a la SERIE NRE-3000 fabricados en acero inoxidable por Flow Control y distribuidos por Indostra (figura 9.8).



Figura 9.8. (A) Agitador de hélice; (B) Agitador de paleta. ([www.indostra.com](http://www.indostra.com))

### ✚ Bombas

Aseguran el transporte de fluidos de un punto a otro. Se seleccionan 5 bombas industriales modelo 2R de la SERIE-2 fabricadas en acero inoxidable por Liquiflo (figura 9.9) para las líneas de las etapas del proceso y 7 bombas dosificadoras modelo Dostec TEKDOS FP fabricadas en politetrafluoroetileno (PTFE) y acero inoxidable por ITC. Capaces de dosificar de 0.2 L/h a 940 L/h, para la dosificación de los reactivos químicos (figura 9.10).



Figura 9.9. Bomba industrial. ([www.liquiflo.com](http://www.liquiflo.com))





Figura 9.10. Bomba dosificadora. (www.itc.es)

#### ✚ Boyas de nivel

Para prevenir reboses o que no haya líquido para bombear en las etapas del proceso se seleccionan 2 boyas de nivel para los tanques de homogeneización y recogida de agua fabricados por Salvador Escoda S.A (figura 9.11).



Figura 9.11. Boya de nivel. (www.salvadorescoda.com)

#### ✚ Sensores de nivel

Para conocer la altura del líquido almacenado es necesario 2 sensores de nivel por cada tanque. Se seleccionan 8 sensores de nivel modelo LD362-M12 fabricados por Icos Sensores SL (figura 9.12).



Figura 9.12. Sensor de nivel. (www.icossensores.es)

### ✚ Sensores de pH

Para conocer el pH del agua se seleccionan en total de 5 sensores de pH modelo SMARTSENS pH 2390 fabricado por Krohne (figura 9.13).



Figura 9.13. Sensor de pH. ([smartpat.krohne.com](http://smartpat.krohne.com))

### ✚ Válvulas

Permiten el paso de los líquidos por las líneas del proceso. Se seleccionan 7 válvulas de compuerta para las líneas de dosificación de reactivos químicos y 5 válvulas de mariposa para las líneas de las etapas del proceso. Válvulas de compuerta modelo EKO plus y válvulas de mariposa modelo CEREX 300-W fabricadas por VAG (figura 9.14).

Para la extracción de determinadas muestras de agua al finalizar los tratamientos físico-químico y de oxidación avanzada se seleccionan 2 válvulas de toma muestra modelo BVP-R/EPOS fabricadas por BVALVE (figura 9.15).



Figura 9.14. (A) Válvula de compuerta; (B) Válvula de mariposa. ([www.vag-armaturen.com](http://www.vag-armaturen.com))



Figura 9.15. Válvula de toma muestra ([www.bvalve.es](http://www.bvalve.es))

### Caudalímetros

Permiten conocer cuánto líquido circula por las líneas de proceso. Se seleccionan 2 caudalímetros magnético Rosemount 8750W fabricados por Emerson Process Management (figura 9.16) y se colocan en las entradas de los tratamientos físico-químico y de oxidación avanzada.



**Figura 9.16. Caudalímetro. ([www2.emersonprocess.com](http://www2.emersonprocess.com))**

## 10. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

En este apartado se describe la instalación diseñada para el tratamiento de las aguas residuales procedentes de la industria textil, que tiene como fin alcanzar el grado de depuración necesario, hasta cumplir los límites fijados por la *Directiva del Consejo de la Unión Europea 91/271/CEE* de 21 de mayo de 1991, sobre Tratamiento de Aguas Residuales, donde se establece como objetivo principal la protección del medio ambiente de los efectos negativos de los vertidos de las aguas residuales urbanas y de los sectores industriales.

La instalación está diseñada para tratar un caudal punta de 100 m<sup>3</sup>/d. El agua residual textil es conducida a un tanque de homogeneización, para ser posteriormente impulsada hacia la etapa de tratamiento físico-químico. El tanque es circular y estático con un diámetro de 11.46 metros y una altura cilíndrica de 1.14 metros, con un volumen de 118 metros cúbicos formado por chapas de acero ondulado. El agua que se almacena en el tanque está en contacto con el aire las 24 horas del día. El tanque dispone de un agitador de hélice sumergido, de la serie NRE- 300.

El agua procedente del tanque de homogeneización llega al tanque de ajuste de pH, donde se dosifica hidróxido sódico ( $Q_{\text{NaOH}} = 10.42 \text{ L/h}$ , 4 M) para aumentar el pH del agua a 8.5. El tanque tiene un diámetro de 0.9 metros y una altura de 1.2 metros, con un volumen de 0.76 metros cúbicos. El tiempo de residencia es de 10 minutos. Este tanque cuenta con un agitador vertical de hélice, de la serie NRE-3000.

A continuación, el agua residual pasa a una unidad de tratamiento físico-químico, donde se dosifica en el primer compartimiento cloruro férrico ( $Q_{\text{FeCl}_3} = 1.60 \text{ L/h}$ , 390 g/L) para que se produzca la coagulación. El volumen de este compartimiento es de 0.38 metros cúbicos. El tiempo de retención hidráulica es de 5 minutos. Se opta por un agitador de hélice en posición vertical, de la serie NRE-3000 para que produzca una mezcla rápida.

Finalizada la coagulación, el agua residual pasa al siguiente compartimiento ( $V = 2.29 \text{ m}^3$ ), donde se dosifica policloruro de aluminio ( $Q_{\text{PACl}} = 3.16 \text{ mL/min}$ , 11 g/L) para que se produzca la floculación. El tiempo de retención hidráulica en este compartimiento es de 30 minutos. Se opta por un agitador de paletas de la serie NRE-3000 en lugar de hélices para que produzca una mezcla lenta que no rompa los flóculos formados.

Finalmente, el agua pasa al compartimiento donde se lleva a cabo la sedimentación de los flóculos formados ( $\text{Área} = 4.58 \text{ m}^2$ ). El sedimentador es de tipo lamelar. El sobrenadante es recogido a lo largo de la cámara de separación y luego pasa a la cámara de salida para posteriormente ser evacuado mediante tubería. Al final de la etapa de sedimentación del tratamiento físico-químico se coloca una válvula de toma muestra para evaluar los parámetros de caracterización del agua tratada. El fango que se extrae por la parte inferior del sedimentador supone aproximadamente un 2% del caudal de entrada al sedimentador. El material de esta unidad es de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV)

El sobrenadante obtenido de la unidad de tratamiento físico-químico es bombeado hacia el tanque de ajuste de pH con el objetivo de disminuir el pH con ácido sulfúrico ( $Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 20.42$

L/h, 4 M) hasta un valor de 3. El tanque tiene un volumen de 0.76 metros cúbicos. A continuación, el agua pasa a la unidad de tratamiento de oxidación avanzada. En el primer compartimiento ( $V = 1.12 \text{ m}^3$ ) se dosifica peróxido de hidrógeno ( $Q_{\text{H}_2\text{O}_2} = 11.32 \text{ mL/min}$ , 300 g/L) y sulfato ferroso ( $Q_{\text{FeSO}_4} = 2.04 \text{ L/h}$ , 100 g/L), el agua permanece un tiempo de residencia de 15 minutos. Se opta por agitadores de hélice de la serie NRE-300 en posición vertical que produzcan una mezcla rápida.

En el último compartimiento de esta unidad se lleva a cabo la sedimentación lamelar (Área =  $3.74 \text{ m}^2$ ). El sobrenadante es almacenado en un tanque circular y estático que posee las siguientes dimensiones: un diámetro de 11.46 metros y una altura cilíndrica de 1.14 metros, con un volumen aproximado de 118 metros cúbicos. El fango que se extrae por la parte inferior del sedimentador supone aproximadamente un 1% del caudal de entrada al sedimentador.

Los reactivos químicos son almacenados en depósitos cilíndricos de 2 metros cúbicos para el hidróxido sódico, 3.45 metros cúbicos para el ácido sulfúrico, 0.3 metros cúbicos para el cloruro férrico, 0.15 metros cúbicos para el policloruro de aluminio, 0.4 metros cúbicos para el sulfato ferroso y 0.12 metros cúbicos para el peróxido de hidrógeno.

## 11. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el diseño de la instalación y analizados los resultados experimentales se obtienen una serie de conclusiones acerca del TFG realizado.

- La caracterización de las aguas residuales ha servido como punto de partida para calcular los rendimientos de los tratamientos utilizados.
- El tratamiento físico-químico resulta más eficiente cuando se emplea en la coagulación una dosis de 150 ppm de  $\text{FeCl}_3$  y en la floculación una dosis de 0.5 ppm de PACI, ya que los parámetros de caracterización como la turbidez y la  $V_{30}$  obtenidos son menores.
- Las concentraciones óptimas de agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y catalizador ( $\text{FeSO}_4$ ) obtenidas en el proceso de oxidación avanzada fueron de 50 ppm para ambos productos, obteniendo un valor de turbidez de 0.512 NTU, un valor de color de 0.007, un valor de DQO de 402 ppm y una concentración total de hierro de 0.9 ppm.
- Los rendimientos de los procesos de depuración aplicados, tratamiento físico-químico y oxidación avanzada, fueron del 36.19% para la disminución de la DQO, 90.19% para la disminución de la turbidez y 96.18% para la disminución del color, con lo que queda comprobada la eficiencia de ambos tratamientos.
- Las características finales del agua tratada cumplen con la *Ordenanza municipal de vertidos de Valencia*. Por otro lado, el agua tratada cumple también con el *régimen jurídico de reutilización de aguas depuradas*. Esto supone que la industria podría aprovechar el agua para alguno de sus procesos.
- Con los resultados experimentales obtenidos ha sido posible diseñar una instalación para tratar aguas residuales de la industria textil combinando tratamiento físico-químico y oxidación avanzada.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Depuración de aguas residuales. Tedagua. En [www.tedagua.com](http://www.tedagua.com)
- [2] Historia sobre el tratamiento del agua potable. Condorchem Envitech. En [blog.condorchem.com](http://blog.condorchem.com)
- [3] González, J. Los inicios de la preocupación por la calidad de las aguas de abastecimiento y por la depuración de las aguas residuales en el canal de Isabel II. I Congreso de ingeniería civil, territorio y medio ambiente. Fundación canal de Isabel II.
- [4] M. Crespi, J.A Huertas. (1987). Industria textil: ¿Depuración biológica o físico-química?, *Boletín Intexter*. 1987(92), 75-90.
- [5] Definición de textil. Definición ABC. En [www.definicionabc.com](http://www.definicionabc.com)
- [6] Minimización de residuos en la industria textil. Del Águila Blog. En [aguaymascosas.blogspot.com.es](http://aguaymascosas.blogspot.com.es)
- [7] El tratamiento de textiles y sus repercusiones ambientales. Greenpeace. En [www.greenpeace.org/espana/es](http://www.greenpeace.org/espana/es)
- [8] Textiles and clothing industries. European Comission. Available at [ec.europa.eu](http://ec.europa.eu)
- [9] Sector textil y confección. Ministerio de industria, energía y turismo de España. En [minetur.gob.es](http://minetur.gob.es)
- [10] Industria textil. Lenntech. En [www.lenntech.com](http://www.lenntech.com)
- [11] L. Cánepa de Vargas, V. Maldonado, M. Aurazo de Zumaeta. (2004). CEPIS/OPS. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: teoría. Tomo I. Lima, Perú. CEPIS.
- [12] A. Rodríguez, P. Letón, R. Rosal, M. Dorado, S. Villar, J. M. Sanz. (2006). CITME. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid, España. Elecé Industria Gráfica.
- [13] Coagulación y floculación. Sedapal. En [www.sedapal.com.pe](http://www.sedapal.com.pe)
- [14] Procesos de oxidación avanzada. Invesquia. En [www.iqdinvesquia.com](http://www.iqdinvesquia.com)
- [15] García, J. C. (2014). Procesos Fenton y Foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico empleando Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soportado en nanotubos de carbono. Tesis. Pontificia Universidad Javeriana.
- [16] B. Lodha, S. Chaudhari. (2007). Optimization of Fenton-biological treatment scheme for the treatment of aqueous dye solutions. *J. Hazard. Mater.* 148(1-2),459-466.
- [17] M. Işık, D. T. Sponza. (2007). Anaerobic/aerobic treatment of a simulated textile wastewater. *Sep. Purif Technol.* 60(1), 64-72.

- [18] A. Aouni, C. Fersi, B. Cuartas Uribe, A. Bes Piá, M. I. Alcaina Miranda, M. Dhahbi. (2011). Study of membrane fouling using synthetic model solutions in UF and NF processes. *Chem. Eng. J.* 175(1), 192-200.
- [19] Metcalf & Eddy. (1998). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Ed. Mc. Graw-Hill.
- [20] García J. (2012). Estudio, control y mantenimiento de una EDARI. Proyecto final de carrera. Escuela Universitaria de ingeniería técnica industrial de Zaragoza.
- [21] M. J. Muñoz, J. García, J. L. Guiñón. (2002). UPV. Técnicas analíticas del medio ambiente. Valencia, España. Editorial UPV.
- [22] S. Clesceri, A. E. Greenberg, R. Rodhes. (1989). Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales 17ª edición. Madrid, España. Editorial Díaz de Santos, S.A.
- [23] A. Rubio-Clemente, E. L. Chica, G. A. Peñuela. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Rev. Ing y Comp.* 16(2), 211-223.



## 13. ANEXO

**Tabla 13.1. Parámetros de caracterización de aguas residuales, recogidos en la Ordenanza municipal de vertidos de Valencia.**

Parámetro	Valor Límite
pH	5.5-9
Sólidos en suspensión	500 mg/l
Materias sedimentables	15 ml/l
Sólidos gruesos	Ausentes
DBO5	500 mg/l
DQO	1.000 mg/l
Temperatura	40 °C
Color	Inapreciable
Aluminio	10 mg/l
Arsénico	1 mg/l
Bario	20 mg/l
Boro	3 mg/l
Cadmio	0,5 mg/l
Cromo III	3 mg/l
Cromo VI	0,5 mg/l
Hierro	5 mg/l
Manganeso	5 mg/l
Níquel	5 mg/l
Mercurio	0,1 mg/l
Plomo	1 mg/l
Selenio	0,5 mg/l
Estaño	10 mg/l
Cobre	1 mg/l
Zinc	5 mg/l
Cianuros	0,5 mg/l
Cloruros	2.000 mg/l
Sulfuros	2 mg/l
Sulfitos	-
Sulfatos	1.000 mg/l
Fluoruros	12 mg/l
Fósforo total	15 mg/l
Amoniaco	25 mg/l
Nitrógeno nítrico	20 mg/l
Aceites y grasas	100 mg/l
Fenoles	2 mg/l
Aldehídos	2 mg/l
Detergentes	6 mg/l
Pesticidas	0,05 mg/l
Toxicidad	30 equitox/m <sup>3</sup>



# DOCUMENTO 2:

## PLANO

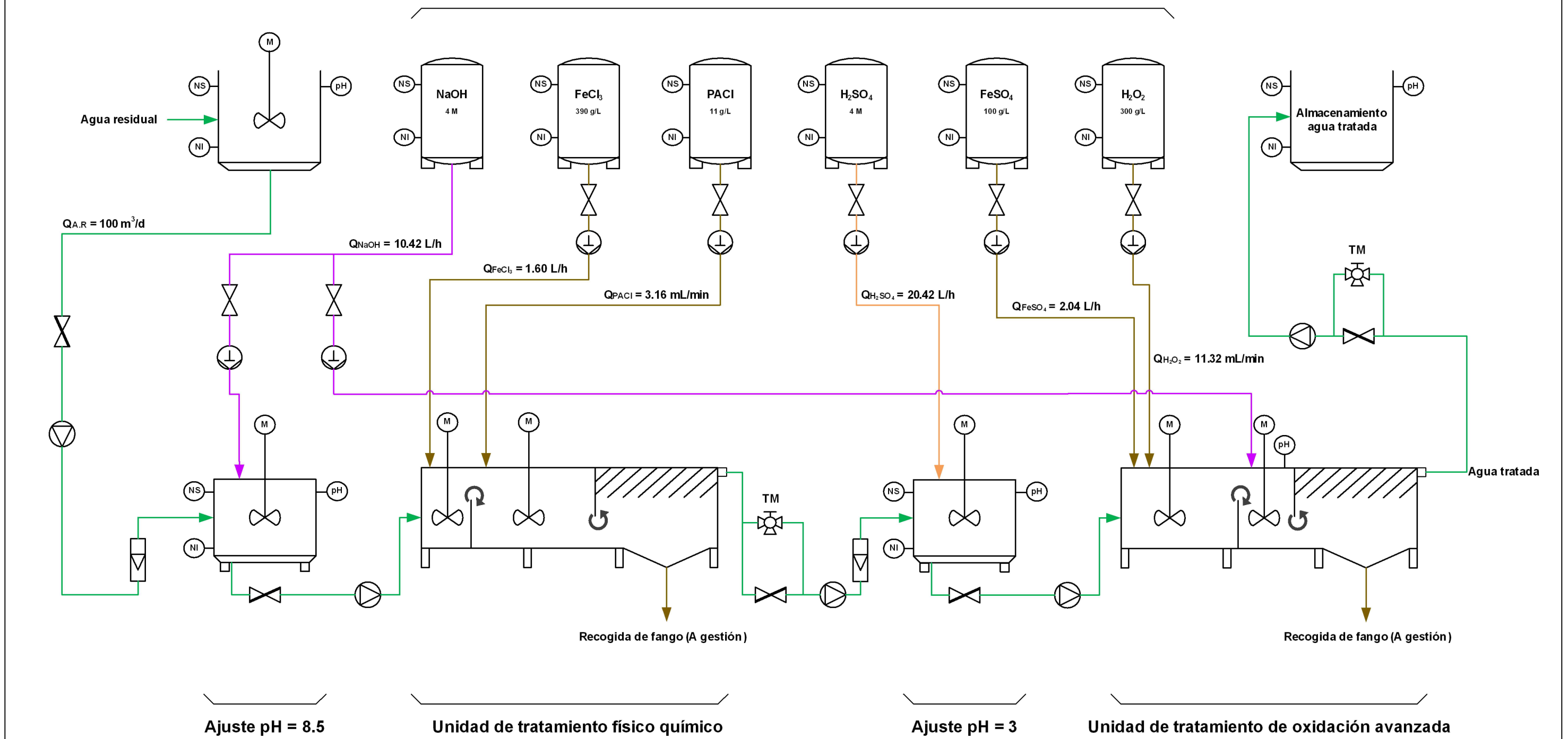


**INDICE DEL PLANO**

DIAGRAMA DE FLUJO ..... PLANO 1



Zona de dosificación de reactivos



Ajuste pH = 8.5

Unidad de tratamiento físico químico

Ajuste pH = 3

Unidad de tratamiento de oxidación avanzada

Recogida de fango (A gestión)

Recogida de fango (A gestión)

Válvula de mariposa	Válvula de compuerta	Válvula de toma de muestras	Bomba Industrial	Bomba dosificadora	Agitador mecánico
Sensor de pH	Nivel superior	Nivel inferior	Motor	Caudalímetro	





# **DOCUMENTO 3:**

## **PRESUPUESTO**

## PRESUPUESTO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

## INDICE DEL PRESUPUESTO

1. PRESUPUESTO PARCIAL.....	1
1.1. MANO DE OBRA .....	1
1.2. EQUIPOS PRINCIPALES .....	1
1.3. EQUIPOS SECUNDARIOS.....	2
2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL .....	4
3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA .....	4
4. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN .....	4



## 1. PRESUPUESTO PARCIAL

En este apartado se estima el presupuesto parcial correspondiente a cada unidad de la instalación diseñada que se muestra en el plano nº 1. No se han considerado costes indirectos en ninguna unidad de obra.

### 1.1. MANO DE OBRA

Este apartado corresponde al pago de nómina de trabajadores. Se estima que el tiempo necesario para llevar a cabo la instalación es de 10 días.

Unidad	Descripción	Cantidad	Coste Unitario [€]	Importe [€]
h	Peón	80	12.77	1021.60
h	Oficial de primera	80	13.42	1073.60
h	Jefe de montaje	80	14.26	1140.80
h	Ingeniero Químico	300	15.63	4689.00
<b>Total</b>				<b>7925.00</b>

El coste total de mano de obra necesaria para llevar a cabo la instalación requiere un importe de 7925.00€.

### 1.2. EQUIPOS PRINCIPALES

Este apartado corresponde a los depósitos, tanques de proceso y decantadores prefabricados que componen la instalación diseñada.

PRESUPUESTO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Unidad	Descripción	Cantidad	Coste Unitario [€]	Importe [€]
Ud.	Depósito de hidróxido sódico de 2 m <sup>3</sup>	1	247.20	247.20
Ud.	Depósito de ácidos sulfúrico de 3.45 m <sup>3</sup>	1	426.42	426.42
Ud.	Depósito de cloruro férrico de 0.3 m <sup>3</sup>	1	37.08	37.08
Ud.	Depósito de policloruro de aluminio 0.15 m <sup>3</sup>	1	18.54	18.54
Ud.	Depósito de sulfato ferroso de 0.4 m <sup>3</sup>	1	49.44	49.44
Ud.	Depósito de peróxido de hidrógeno 0.12 m <sup>3</sup>	1	14.83	14.83
Ud.	Tanque de agua de 118 m <sup>3</sup>	2	12000.86	24001.72
Ud.	Tanque de ajuste de pH de 0.76 m <sup>3</sup>	2	95.76	191.52
Ud.	Unidad de tratamiento físico-químico	1	14450.12	14450.12
Ud.	Unidad de tratamiento de oxidación avanzada	1	12090.00	12090.00
<b>Total</b>				<b>51526.87</b>

El coste total asociado a los equipos principales necesarios para tratar el agua es de 51526.87€.

### 1.3. EQUIPOS SECUNDARIOS

Este apartado corresponde a los dispositivos de control de cada proceso asociado a la instalación diseñada.

## PRESUPUESTO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Unidad	Descripción	Cantidad	Coste Unitario [€]	Importe [€]
Ud.	Bomba industrial	5	1545.00	7725.00
Ud.	Bomba dosificadora	7	1287.50	9012.50
Ud.	Agitador de helice	6	1201.03	7206.18
Ud.	Agitador de paleta	1	1201.03	1201.03
Ud.	Boya de nivel	2	67.00	134.00
Ud.	Sensor de nivel	8	34.00	272.00
Ud.	Sensor de pH	5	99.00	495.00
Ud.	Valvula de compuerta	7	118.00	826.00
Ud.	Valvula de mariposa	5	119.00	595.00
Ud.	Valvula de toma muestra	2	185.00	370.00
Ud.	Caudalímetro	2	320.00	640.00
<b>Total</b>				<b>28476.71</b>

El coste total asociado a los equipos secundarios necesarios en la instalación es de 28476.71€.

## 2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL

Unidad de obra	Descripción	Importe [€]
1.1	Mano de obra	7925.00
1.2	Equipos principales	51526.87
1.3	Equipos secundarios	28476.71
<b>Total</b>		<b>87928.58</b>

## 3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

Para calcular el presupuesto de ejecución por contrata se considera un porcentaje de 13% asociado a gastos generales (electricidad, agua, gas...etc.). Además, se considera un beneficio industrial del 6%.

Descripción	Importe [€]
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL	87928.58
Gastos generales (13%)	11430.72
Beneficio industrial (6%)	5275.71
<b>Total</b>	<b>104635.01</b>

## 4. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN

Para calcular el presupuesto total del proyecto asociado al diseño de la instalación se incluye un 21% correspondiente al IVA.



PRESUPUESTO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Descripción	Importe [€]
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	104635.01
IVA (21%)	21973.35
<b>Total</b>	<b>126608.37</b>

El presupuesto de base de licitación asciende a la expresada cantidad de **CIENTO VEINTISÉIS MIL SEISCIENTOS OCHO EUROS CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS.**