



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Estudio del efecto de la temperatura en el regeneración de
carbón activado saturado empleando el proceso Fenton

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Navarro Almodóvar, Nieves

Tutor/a: Santos-Juanes Jordá, Lucas

Cotutor/a externo: AREVALO AGUADO, JORDI

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Resumen

En este trabajo se ha estudiado el efecto de la temperatura en la regeneración del carbón activo saturado, mediante el proceso Fenton. Se sabe que el efecto de la temperatura es beneficioso para el proceso Fenton y, además favorece la desorción en el carbón activo, por lo que se ha pensado que a nivel industrial sería beneficioso económica y sosteniblemente. Para la comprobación de este efecto, en primer lugar, se ha saturado carbón activo con un colorante llamado Cibacron Brilliant Red 3B-A, para observar sus isothermas de adsorción a diferentes temperaturas, observando así que efecto tiene la temperatura en la adsorción. Por otro lado, se ha saturado y regenerado con procesos tipo Fenton el carbón activo, de forma cíclica, para observar qué efecto tenía la temperatura en la regeneración, estimando así que tiempo era necesario para la regeneración. Después de realizar todos estos procesos, se ha visto que a 30 °C es la temperatura óptima para el proceso, ya que a temperatura ambiental el tiempo de operación es el doble y a 40 °C, el tiempo de operación es un poco mayor que el óptimo, además de aumentar el consumo de energía necesaria. Se ha realizado un escalado suponiendo una columna de adsorción industrial, junto con sus respectivos equipos necesarios para el proceso, y finalmente haciendo una estimación del coste total del proyecto y comparándolo con otro tipo de regeneración resulta ser más económico.

Palabras clave: Carbón Activo; Regeneración; Proceso Fenton; Temperatura.

Abstract

In this work, the effect of temperature on the regeneration of saturated activated carbon has been studied, using the Fenton process. It is known that the effect of temperature is beneficial for the Fenton process and also favors desorption in activated carbon, so it has been thought that at an industrial level it would be economically and sustainably beneficial. To verify this effect, firstly, activated carbon has been saturated with a dye called Cibacron Brilliant Red 3B-A, to observe its adsorption isotherms at different temperatures, thus observing the effect temperature has on adsorption. On the other hand, activated

carbon has been saturated and regenerated with Fenton-type processes, in a cyclical way, to observe what effect temperature had on regeneration, thus estimating the time required for regeneration. After carrying out all these processes, it has been seen that a 30 °C is the optimal temperature for the process, since at room temperature the operating time is double and at 40 °C, the operation time is a little longer than optimal, in addition to increasing the consumption of necessary energy. An scaling has been carried out assuming an industrial adsorption column, together with its respective equipment necessary for the process, and finally making an estimate of the total cost of the project and comparing it with another type of regeneration turns out to be more economical.

Keywords: Activated carbon; Regeneration; Fenton Process; Temperature.

Resum

En aquest treball s'ha estudiat l'efecte de la temperatura en la regeneració del carbó actiu saturat, mitjançant el procés *Fenton. Se sap que l'efecte de la temperatura és beneficiós per al procés *Fenton i, a més afavoreix la desorció en el carbó actiu, per la qual cosa s'ha pensat que a nivell industrial seria beneficiós econòmic i sosteniblement. Per a la comprovació d'aquest efecte, en primer lloc, s'ha saturat carbó actiu amb un colorant anomenat *Cibacron *Brilliant Xarxa 3B-A, per a observar les seues isoterms d'adsorció a diferents temperatures, observant així que efecte té la temperatura en l'adsorció. D'altra banda, s'ha saturat i regenerat amb processos tipus *Fenton el carbó actiu, de manera cíclica, per a observar quin efecte tenia la temperatura en la regeneració, estimant així que temps era necessari per a la regeneració. Després de realitzar tots aquests processos, s'ha vist que a 30 celsius és la temperatura òptima per al procés, ja que a temperatura ambiental el temps d'operació és el doble i a 40 celsius, el temps d'operació és una mica major que l'òptim, a més d'augmentar el consum d'energia necessària. S'ha realitzat un escalat suposant una columna d'adsorció industrial, juntament amb els seus respectius equips necessaris per al procés, i finalment fent una estimació del cost total del projecte i comparant-lo amb una altra mena de regeneració resulta ser més econòmic.

Paraules clau: Carbó actiu; Regeneració; Procés Fenton; Temperatura.

Índice general

Resumen	I
Índice general	IV
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
1. Introducción	1
1.1. Importancia del tratamiento y reutilización del agua.	1
1.2. Tratamientos habituales de las aguas contaminadas.	6
1.3. Empleo Carbón Activo en el tratamiento de aguas.	7
1.4. Efecto de la Temperatura en la adsorción.	12
1.5. Regeneración del Carbón Activo.	13
1.6. Regeneración por procesos tipo Fenton.	17
1.7. Efecto de la temperatura en el proceso Fenton.	20
2. Objetivos	23
3. Procedimiento Experimental	25
3.1. Material Empleado.	25
3.2. Equipos Empleados.	30
3.3. Caracterización del contaminante.	33
3.4. Recta de calibrado del colorante.	34

3.5. Regeneración a diferentes temperaturas.	34
4. Resultados	36
4.1. Determinación de longitud de onda de trabajo.	36
4.2. Recta de calibrado.	37
4.3. Caracterización del carbón activo.	38
4.4. Resultados de la regeneración a diferentes temperaturas.	40
4.5. Comparación de todos los ensayos.	51
4.6. Resultado óptimo.	52
5. Dimensionado a nivel industrial	56
5.1. Cálculos.	56
5.2. Diagrama de flujo.	58
6. Estudio económico y presupuesto	61
6.1. Gastos de Inversión.	61
6.2. Gastos de Explotación.	63
6.3. Costes Totales.	69
6.4. Costes regeneración térmica.	70
7. Conclusiones	71
8. Anexos	73
8.1. Anexo I. Cálculos para saber qué cantidad de H_2O_2 se necesita.	73
8.2. Anexo II. Cálculos para saber que cantidad de hierro se necesita.	75
8.3. Anexo III. Cálculo de la cantidad de H_2SO_4 necesario para llegar a un $pH = 3$	75
8.4. Anexo IV. Cálculo de la potencia necesaria para calentar el depósito a $30^\circ C$ en 1 hora.	76
8.5. Anexo V. Elección de resistencias.	77
8.6. Anexo VI. Cálculo de los gastos energéticos de cada equipo.	78
8.7. Anexo VII. Fichas técnicas de los equipos seleccionados.	79
Bibliografía	82

Índice de figuras

1.1. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Fuente:[23]	2
1.2. Objetivos que se ven afectados de forma directa por este trabajo. Fuente:[28],[24],[25]	4
1.3. Objetivos que se ven afectados de forma indirecta en este trabajo. Fuente: [26], [27].	4
1.4. Usos del agua a nivel mundial. Fuente:[13]	5
1.5. Tratamientos de aguas residuales. Fuente: [4]	6
1.6. Adsorción física Fuente: [12].	8
1.7. Isoterma de Freundlich. Fuente: [17]	10
1.8. Isoterma Freundlich Linealizada. Fuente:[17]	10
1.9. Isoterma Langmuir. Fuente:[17]	11
1.10. Isoterma Langmuir Linealizada. Fuente: [17]	12
1.11. Isotermas de adsorción a diferentes temperaturas. Fuente: [22]	13
1.12. Diagrama de flujo para regeneración térmica del carbón activo. Fuente: [9].	15
1.13. Esquema de la regeneración biológica del carbón activo. Fuente: [10]	16
1.14. Diagrama de flujo de la regeneración del carbón activo por procesos Fenton. Fuente: Propia.	18
3.1. Colorante <i>Cibacron Brilliant Red 3B-A</i>	26
3.2. Carbón activo.	26
3.3. Peróxido de Hidrógeno. H_2O_2 .	27
3.4. Sulfato de hierro (II)	28
3.5. Tiras reactivas de peróxido	29
3.6. Metavanadato de amonio.	29
3.7. Espectrofotómetro UH5300 HITACHI.	31

3.8. Placa Calefactora C-MAG HS 7	32
3.9. Bomba peristáltica SEKO PR7	33
3.10. Montaje experimental regeneración con tiras de peróxido	35
4.1. Longitud de onda vs Absorbancia	37
4.2. Recta Calibrado	37
4.3. Comparación isothermas adsorción a diferentes temperaturas	39
4.4. Valores de la constante K_F de las isothermas a diferentes temperaturas.	39
4.5. 1º Regeneración a T_{amb}	42
4.6. 2º Regeneración a T_{amb}	44
4.7. 3º Regeneración a T_{amb}	45
4.8. 1º Regeneración a 30 °C	46
4.9. 2º Regeneración a 30 °C	47
4.10. 3º Regeneración a 30 °C	48
4.11. 1º Regeneración a 40 °C	49
4.12. 2º Regeneración a 40 °C	50
4.13. 3º Regeneración a 40 °C	51
4.14. Comparación del tiempo frente temperatura de regeneración.	52
4.15. Montaje experimental del ensayo óptimo	53
4.16. 1º Regeneración a 30 °C a temperatura óptima	54
4.17. 2º Regeneración a 30 °C a temperatura óptima	55
5.1. Diagrama de flujo de la planta industrial.	60
8.1. Ficha técnica bomba dosificadora de 0,12 kW	80
8.2. Ficha técnica de bomba centrífuga de 11 kW	81

Índice de tablas

4.1. Tabla resumen de los resultados	41
4.2. Tabla datos 1º regeneración a T_{amb}	42
4.3. Tabla datos 2º regeneración a T_{amb}	43
4.4. Tabla datos 3º regeneración a T_{amb}	44
4.5. Tabla datos 1º regeneración a 30 °C	45
4.6. Tabla datos 2º regeneración a 30 °C	46
4.7. Tabla datos 3º regeneración a 30 °C	47
4.8. Tabla datos 1º regeneración a 40 °C	48
4.9. Tabla datos 2º regeneración a 40 °C	49
4.10. Tabla datos 3º regeneración a 40 °C	50
4.11. Tabla datos 1º regeneración a temperatura óptima	54
4.12. Tabla datos 2º regeneración a temperatura óptima	55
6.1. Tabla resumen del equipo necesario.	63
6.2. Tabla del salario laboral del empleado.	66
6.3. Cantidad y precio de los productos químicos necesarios.	67
6.4. Tabla resumen de gastos de operación	70

1 Introducción

Este capítulo pretende ser la guía de los apartados futuros. Antes que nada, se presentará el contexto del proyecto y se explicará de forma breve en qué consiste. El siguiente paso será introducir los puntos de teoría que engloban el proyecto, como pueden ser los tratamientos que se utilizan para el agua contaminada, la adsorción de los contaminantes del agua, el empleo del carbón activo en la adsorción, la regeneración con carbón activo y el efecto de la temperatura durante la regeneración.

1.1 Importancia del tratamiento y reutilización del agua.

Se define el desarrollo sostenible como el desarrollo calificado para remediar las presentes necesidades sin implicar las capacidades de las generaciones futuras para cubrir sus propias necesidades. Para conseguir el desarrollo, es primordial amortizar tres elementos básicos, crecimiento económico, inclusión social y por último protección del medio ambiente, para ello se han desarrollado los objetivos de desarrollo sostenible. Los objetivos de desarrollo sostenible también llamados ODS, convocan a la sociedad mundial para poner en práctica esta agenda con 17 objetivos relacionados con la salud de las personas y la protección del planeta. Esta agenda se aprobó en 2015 por las Naciones Unidas con una fecha límite en 2030. Dado que durante estos años se ha ido progresando, pero sin resultados visibles, en 2020 se inició la llamada década de acción, donde, los líderes mundiales instaron en planificar una década de acción, en el cual se promoviera la financiación y la aplicación de estos objetivos. El secretario general de las Naciones Unidas hizo una petición para que todos los sectores se convocaran a favor de la década en tres niveles. Primeramente,

acción a nivel mundial, para asegurar un mayor liderazgo y más soluciones con respecto a los objetivos. Por otro lado, acción a nivel local, introduciendo transiciones en políticas, presupuestos, instituciones, entre otros. Por último, se realizó una acción por parte de las personas, en el que se incluye a la sociedad civil, medios de comunicación, sector privado, sindicatos, círculos académicos y demás. En aspectos generales, para lograr estos objetivos se necesitan todavía muchos avances a gran escala, pero con una perspectiva de 10 años atrás, los avances pueden ser bastante visibles [23].



Figura 1.1: Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Fuente:[23]

Como se puede observar en los objetivos de desarrollo sostenible, figura 1.1, los temas vinculados a la contaminación y a la disponibilidad de agua de calidad, están directa o indirectamente involucrados en muchos de estos objetivos, por ejemplo, el *Objetivo 6. Agua limpia y saneamiento*, Asegurar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Se ha conseguido progresar de manera positiva a la hora de la ampliación de acceso a agua potable, pero todavía 3 de cada 10 personas siguen precisando de servicios de agua potable, y 6 de cada 10 personas les sigue faltando acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura. Como bien nos indica el manifiesto de la pandemia del Covid-19, el saneamiento de aguas y la higiene son de importancia vital. Algunas de las metas de este objetivo son que de aquí a 2030, primero, se consiga el acceso universal a agua potable de forma económica, otra meta es alcanzar el acceso a servicios de saneamiento e higiene de forma adecuada [28]. Otro punto es el *Objetivo 14. La vida submarina*, implica la conservación y utilización sostenible de los

océanos, mares y recursos marinos. El océano fomenta los sistemas mundiales que hacen que la tierra sea un lugar habitable. Los mares y océanos nos proporcionan gran parte de la comida y oxígeno que respiramos. El tratamiento de aguas afecta a este objetivo porque, la contaminación de los recursos hídricos puede llegar a hacer que los lagos, ríos y mares no tengan las condiciones adecuadas provocando que, millones de personas que dependen de la biodiversidad marina, puesto que es la mayor fuente de proteínas del mundo, se vea incapacitada para poder usarla. También, los océanos absorben el 30 % del CO_2 producido por la humanidad aminorando así los impactos del calentamiento global. Y, por tanto, algunas metas para la protección de nuestros océanos y mares son, prevención y reducción de la contaminación marina, rebajar y plantear los efectos de la acidificación de los océanos, etcétera [24].

Otro objetivo que afecta de manera directa al tratamiento de aguas es el *Objetivo 15. vida en ecosistemas terrestres*, este objetivo está relacionado con el anterior propósito, consiste en la gestión sostenible de los bosques, ambos objetivos tienen en común evitar la pérdida de la biodiversidad. En 2016, el programa de las naciones unidas para el medio ambiente, llamado también (PNUMA), advirtió del aumento mundial de epidemias debido a la salud de los ecosistemas. En cuanto a los bosques podemos decir que millones de personas precisan de ellos para su soporte. Hospedan a todas las especies terrestres animales, plantas e insectos. Por otro lado, la desertificación, la tierra para la agricultura se ve duramente afectada por la degeneración del suelo. Algunas de las metas que se quieren alcanzar con este objetivo son, cuidado y conservación y uso sostenible de los ecosistemas terrestres. La aprobación de medidas urgentes para la reducción de la degeneración de los hábitats terrestres [25].

Por lo que se refiere a los objetivos que están relacionados de manera indirecta, podemos destacar el *Objetivo 2. Hambre cero*. Poner fin al hambre, es uno de los objetivos que no está bien encaminado, ya que para 2030 no se podrá conseguir dicho objetivo. Este objetivo se ve afectado al tratamiento de aguas, debido a la agricultura, ya que se necesita agua saneada para su utilización [26]. Relacionando este último propósito con el *Objetivo 3. salud y bienestar*. Asegurar una vida sana, además de apoyar el bienestar para todos. En fechas anteriores a la pandemia se obtuvieron grandes avances en el aumento de es-



(a) Agua limpia y saneamiento



(b) Vida submarina



(c) Vida de ecosistemas terrestres

Figura 1.2: Objetivos que se ven afectados de forma directa por este trabajo.

Fuente: [28], [24], [25]

peranza de vida, reduciendo algunas causas de muerte. Este objetivo se ve implicado en el tratamiento de aguas, porque debido a la poca saneación del agua en algunas partes del mundo, ha conllevado a la impulsión de ciertas enfermedades que se consideraban erradicadas [27].



(a) Hambre cero



(b) Salud y Bienestar

Figura 1.3: Objetivos que se ven afectados de forma indirecta en este trabajo.

Fuente: [26], [27].

Tanto la reducción de la contaminación como la descontaminación del agua es realmente importante, cabe decir que la eliminación de los contaminantes es un proceso complicado de alcanzar, de ahí que se dediquen tantos esfuerzos en la investigación del tratamiento del agua. Este es uno de los principales temas medioambientales, ya que afecta a muchos objetivos del desarrollo sostenible [29]. La importancia de la descontaminación del agua se debe a que, como se puede observar en la gráfica 1.4, tanto la agricultura como la industria necesitan como materia prima básica el agua, utilizándose en grandes cantidades y con

buena calidad. No importa la aplicación para la que se utilice el agua, ésta probablemente quede contaminada y no pueda utilizarse para otros usos [13].

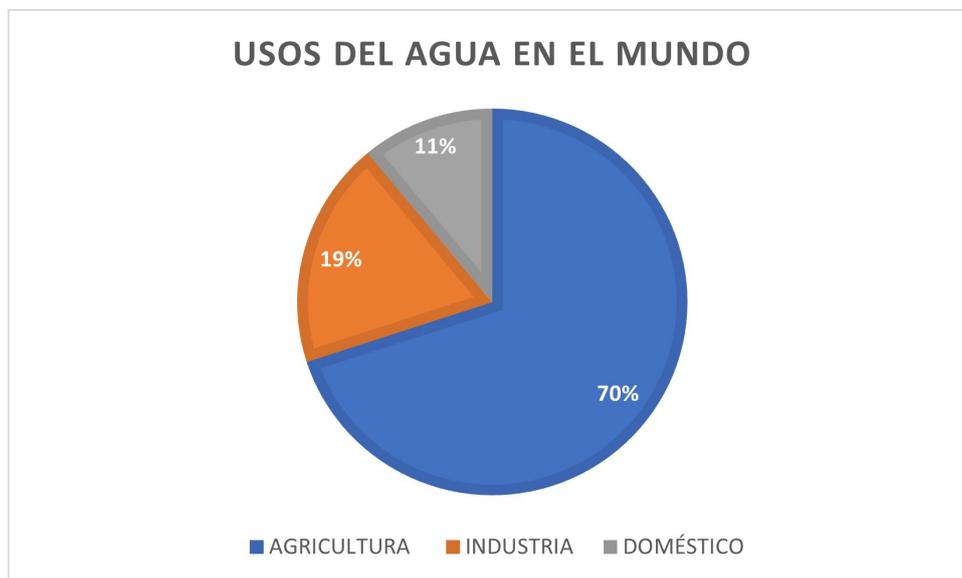


Figura 1.4: Usos del agua a nivel mundial.

Fuente:[13]

Los mares, ríos y lagos recogen los residuos producidos por la actividad humana. El ciclo natural de las aguas tiene una gran capacidad de purificación, pero no se logran eliminar los contaminantes que se arrojan a ella. Según la IUPAC, un contaminante es, cualquier materia sólida, líquida y gaseosa indeseable vigente en el medio ambiente [4]. Por ende, la política de agua en Europa está asentada en una serie de directivas, entre ellas, se encuentra la normativa que normaliza el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales. La Directiva Marco del agua (WFD) 2000/60/EC tiene como finalidad principal alcanzar un buen estado de todas las aguas, donde todos los estados tienen el compromiso de reducir de manera progresiva los contaminantes. Los resultados de esta normativa se han observado notables reducciones en el vertido de algunas sustancias peligrosas como, por ejemplo, metales pesados, plaguicidas, entre otros. Con consecuentes mejoras en la calidad del agua. Pero aun habiendo mejoras, los contaminantes siguen en pequeñas cantidades en el ambiente, produciendo efectos crónicos [6].

1.2 Tratamientos habituales de las aguas contaminadas.

Hay muchos tratamientos que se aplican a las aguas residuales, en función del tipo de contaminante que se va a eliminar. Se clasifican contemplando varios criterios. En una de las clasificaciones se sopesa el tipo de proceso que sufre el compuesto, tienen lugar los tratamientos físicos, los cuales el compuesto no experimenta un cambio en su estructura, y por otro lado los tratamientos químicos, en los que si se produce un cambio en la estructura [19]. La gran parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales utiliza los tratamientos convencionales; estos son, tratamiento primario, tratamiento secundario y en ocasiones, tratamiento terciario. Los tratamientos citados se pueden observar en el siguiente esquema 1.5 [4].

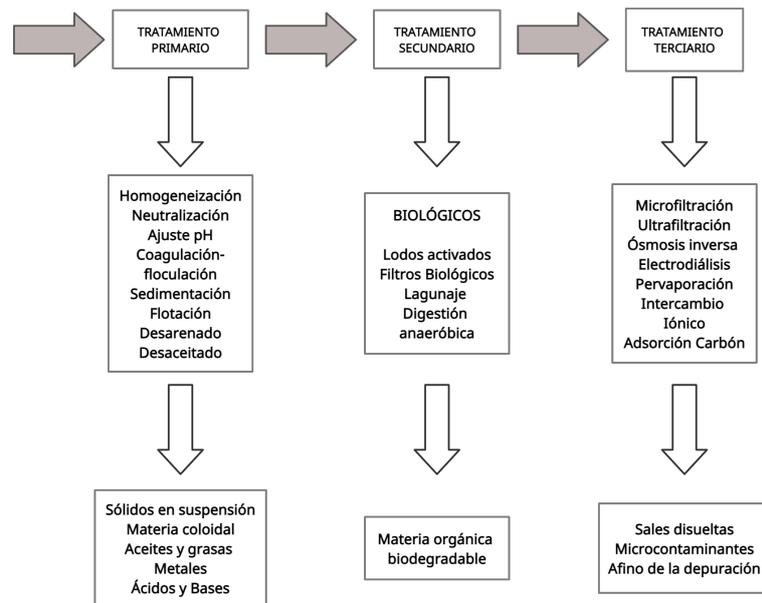


Figura 1.5: Tratamientos de aguas residuales.

Fuente: [4]

Como podemos observar en la figura 1.5, se aplican varios tipos de tratamientos a las aguas residuales. El tratamiento primario, llamado también tratamiento físico-químico, tiene como objetivo eliminar por medios físicos todas aquellas sustancias capaces de ser separadas, bien por su agrupamiento en el fondo del reactor o bien en la superficie, además, también es capaz de remover una parte importante de la carga orgánica. Por otro lado, el tratamiento secundario, convierte la materia orgánica en sólidos sedimentables que podrán

separarse por sedimentación, además, es el encargado de eliminar la materia orgánica biodegradable, mediante procesos biológicos. Por último, el tratamiento terciario, este tratamiento se encargará de eliminar los compuestos que no han sido capaces de eliminar los tratamientos anteriores, aniones, cationes y compuestos no biodegradables, para que pueda ser utilizada para diferentes usos como recargar acuíferos, entre otros. En este proyecto nos centraremos en este tercer tratamiento, específicamente en la adsorción con carbón activo [33], [4].

1.3 Empleo Carbón Activo en el tratamiento de aguas.

Se les llama carbón activado a los productos derivados de materiales carbonosos. El carbón activado, tanto en forma de polvo como en grano, son absorbentes típicos, teniendo una estructura altamente desordenada, similar a la del grafito y una área superficial excesivamente alta. Una de las propiedades del carbón activo, es su estructura porosa, la cual contiene pequeñas cantidades de oxígeno e hidrógeno, aparte de carbono. Probablemente esta estructura porosa sea una de las propiedades físicas más importantes del material [18].

Hay una gran diferencia entre el significado de adsorción y absorción. La adsorción es la captación o unión de moléculas en la superficie del adsorbente, siendo ésta uno de los recursos más efectivos para la eliminación de contaminantes. Mientras que la absorción, es el proceso por el cual el soluto pasa a través de una membrana o se incorpora en una estructura [1]. La adsorción es un proceso donde las fuerzas de atracción integran un soluto, también llamado adsorbato, a la superficie de un adsorbente, consiguiendo llegar al equilibrio en la concentración del adsorbato. La adsorción se explica como la composición de una capa de adsorbato en la superficie del adsorbente, esta se forma mediante la atracción de las fuerzas de Van Der Waals. En este caso, se utilizará un adsorbente con un área superficial alta y mucha porosidad. El proceso de adsorción tiene diferentes fases. Difusión externa, consiste en una expansión de las moléculas desde el periodo masivo hacia el espacio interfacial. Otra fase sería, la difusión interna, es la expansión de las moléculas dentro de los poros. Después, se encuentra la etapa de difusión superficial, en esta etapa se produce la expansión de las moléculas en la fase superficial. Y también se

encuentran los procesos de adsorción-desorción. Hay dos tipos de adsorción, física, llamada también fisiosorción y química (quimiosorción). La adsorción física es la consecuencia de las fuerzas atractivas electroestáticas débiles y de corto alcance (Van Der Waals). En cuanto a la adsorción química, ésta incluye la formación de enlaces entre el adsorbato y el adsorbente.

Por otro lado, la cinética de adsorción explica la efectividad del proceso de adsorción. Esta cinética se describe como la velocidad a la que un soluto es adsorbido, además de ser el tiempo de residencia de los adsorbatos en la interfase sólido-líquido. La velocidad depende del número de partículas que son adsorbidas en la superficie del adsorbente por segundo, y también la cantidad de choques de partículas en la unidad de área por segundo [22].

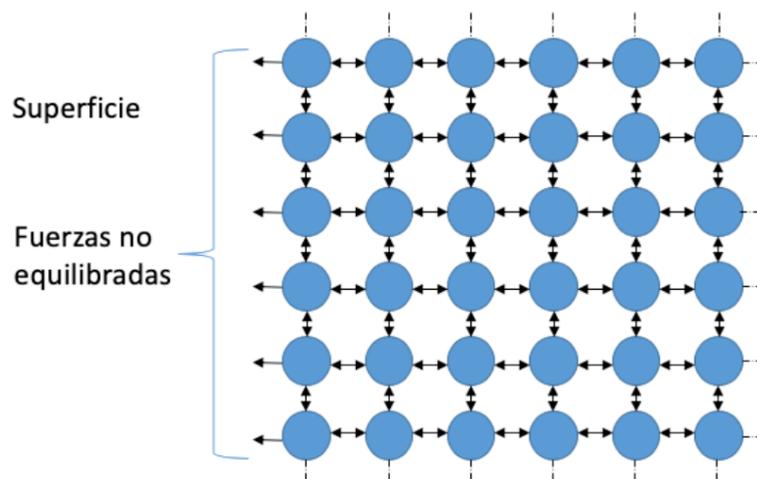


Figura 1.6: Adsorción física

Fuente: [12].

Para explicar la interacción entre el adsorbato y el adsorbente, se encuentran las isothermas de adsorción. Éstas ejercen un papel muy importante en la determinación de la capacidad de adsorción óptima. Las isothermas proporcionan información sobre la estabilidad de las interacciones, además de la afinidad de adsorción de las moléculas. [22].

Como se ha mencionado anteriormente cada isoterma tiene su propia metodología, éstas se dividen en adsorción física y química. Nos centraremos en la adsorción química, debido a que son las isothermas más empleadas en adsorción de compuestos en aguas, en este

grupo pertenecen las isothermas de Freundlich y la de Langmuir [15]. En este estudio experimental, nos centraremos en la isoterma de Freundlich que se orienta en la adsorción en fluidos, la isoterma de Langmuir se explicará de una manera breve, pero no se entrará en detalles.

Isoterma de Freundlich. Se utiliza principalmente para detallar la adsorción de soluciones de medio acuoso. Esta isoterma se maneja en concentraciones intermedias, ya que si se opera en intervalos lineales de concentraciones muy bajas o muy altas, no puede definirse [15].

La Isoterma de Freundlich es un modelo de dos parámetros, cuya ecuación es la siguiente [22].

$$q_e = K_F C^{\frac{1}{n}} \quad (1.1)$$

Los parámetros en (1.1) son:

q_e . Cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio.

C . Es la concentración de equilibrio.

K_F . Es una de las constantes de Freundlich. Este es el coeficiente de adsorción que determina la fuerza de adsorción. A mayor es el valor de K_F , mayor será la carga adsorbente que se puede conseguir.

n . Es una constante relacionada con la eficiencia de adsorción y la energía de adsorción [22].

La isoterma de Freundlich tiene una representación gráfica como la figura 1.7. En el eje de las abcisas se representará la cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio, q_e , y en el eje de las ordenadas se interpreta la concentración de equilibrio, C_e [17].

Para linealizar la isoterma, se utilizan logaritmos, de esta forma, se definirán los parámetros característicos de la isoterma [22].

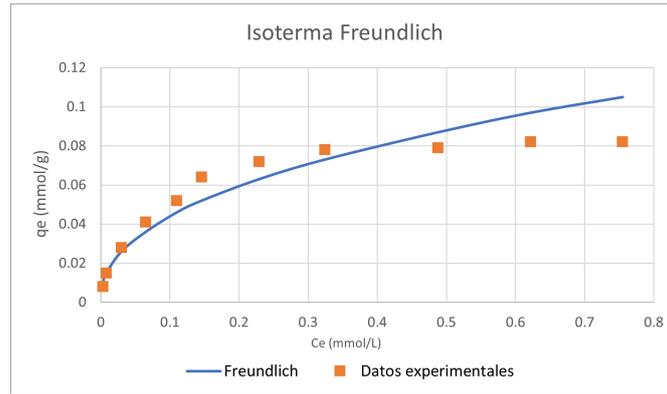


Figura 1.7: Isoterma de Freundlich.

Fuente: [17]

$$\log(q_e) = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log(C) \quad (1.2)$$

Cuando se representa esta ecuación, figura 1.8, se podrán obtener los parámetros n y k . Parámetros propios de la naturaleza del adsorbente y del adsorbato puestos en contacto, a temperatura constante. La pendiente de la línea recta es el parámetro n , a partir de la ordenada en el origen se obtendrá k [32].

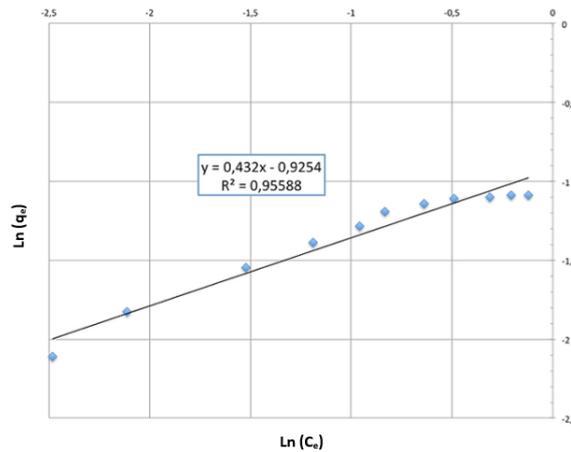


Figura 1.8: Isoterma Freundlich Linealizada.

Fuente:[17]

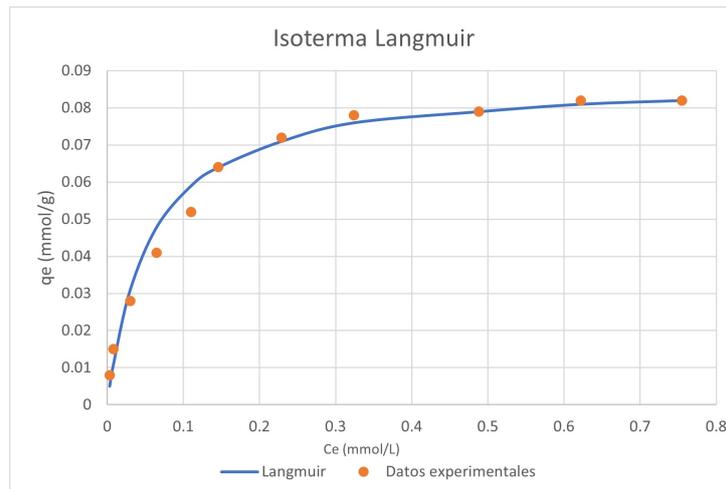


Figura 1.9: Isoterma Langmuir.

Fuente:[17]

Isoterma de Langmuir. El modelo de adsorción de Langmuir se basa en las suposiciones de que:

1. Toda la superficie del adsorbente posee la misma afinidad por el adsorbato.
2. Las interacciones entre las moléculas de adsorbato se consideran insignificantes.
3. La adsorción ocurre al formarse una sola capa del adsorbato en la superficie del adsorbente. [14].

Utilizando la figura (1.3). En la figura 1.9, podemos observar que su representación es muy similar a la representación de la isoterma de Freundlich en la figura 1.7

$$q_e = \frac{b \cdot C_e \cdot Q^\circ}{1 + b \cdot C_e} \quad (1.3)$$

q_e . Cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio.

Q° . Constante relacionada con la capacidad de adsorción de una sola capa.

C_e . Es la concentración de equilibrio.

b . es la constante que mide la energía superficial del proceso de adsorción.[22].

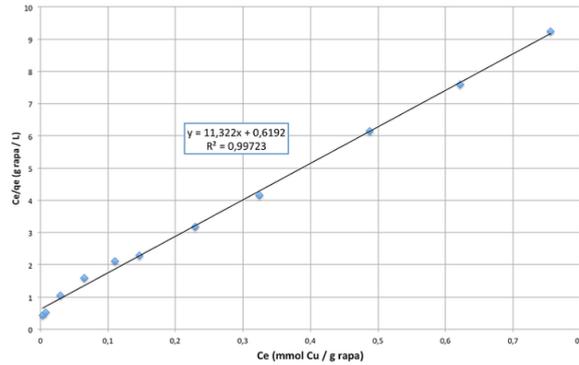


Figura 1.10: Isoterma Langmuir Linealizada.

Fuente: [17]

Para linealizar la isoterma, se utilizan logaritmos, de esta forma, se definirán los parámetros característicos de la isoterma. [22]

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q^{\circ}} + \frac{1}{b \cdot Q^{\circ}} \frac{1}{C_e} \quad (1.4)$$

Como se ha explicado con la isoterma de Freundlich, cuando se representa la ecuación linealizada (1.4), podemos ver que en la gráfica 1.10 se representan los parámetros propios de la isoterma.

1.4 Efecto de la Temperatura en la adsorción.

El proceso de adsorción es complejo y algunos de los factores de los que dependen son las propiedades de la solución, entre ellas la temperatura. Estos factores determinan la naturaleza de los mecanismos de unión, la extensión y la fuerza del proceso de adsorción. El efecto de la temperatura sobre la adsorción es de gran interés, dado que la adsorción de sustancias depende de su solubilidad con el medio y esta característica depende de la temperatura [16]. Como se puede observar en la figura 1.11, a mayor temperatura menor es la adsorción.

Se han expuesto varias explicaciones acerca del comportamiento de los sistemas de adsorción que indican la naturaleza exotérmica o endotérmica del proceso [16]. Según algunos estudios, esta discrepancia surge debido a que la adsorción de un sistema de dos compo-

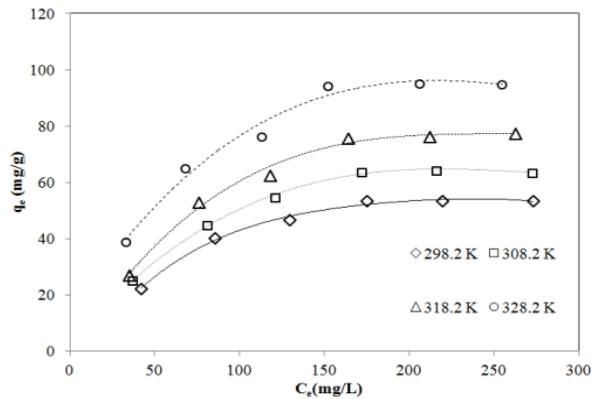


Figura 1.11: Isotermas de adsorción a diferentes temperaturas.

Fuente: [22]

entes está respaldada tanto por interacciones adsorbato-adsorbente, como interacciones adsorbato-agua, dando así la adsorción de distintas especies a diferentes temperaturas [3]. El aspecto más importante es que el efecto de la química de la superficie del carbono sobre la adsorción de compuestos orgánicos disminuye con el aumento de la temperatura. En consecuencia, parece evidente que las diferencias en los mecanismos de adsorción observados, se deben a la dependencia de la energía de las interacciones intermoleculares con la temperatura. Las fuerzas de dispersión son independientes de la temperatura, mientras que las interacciones electrostáticas entre los dipolos de las moléculas adsorbidas (y el disolvente), los grupos polares superficiales, generalmente disminuyen con el aumento de la temperatura. Esta dependencia de la temperatura la han atribuido a la quimisorción. Y dado que la quimisorción es pequeña (para todos los carbonos estudiados), la dependencia de la temperatura de la adsorción se debe principalmente a una disminución en el número de moléculas que interactúan electrostáticamente con grupos superficiales ubicados en las entradas a pequeños microporos [36].

1.5 Regeneración del Carbón Activo.

Como se ha explicado en el apartado anterior, la adsorción es un fenómeno superficial que incluye a un adsorbente y un adsorbato, esto se debe a que aparecen fuerzas de interacción entre los dos [35]. Este método tiene como finalidad devolver la capacidad de adsorción que tenía el adsorbente en el estado inicial, retirando los compuestos adsorbidos y evitar que

se pierdan las propiedades que tenía el material inicialmente [30]. El mismo fundamento teórico que se ha visto anteriormente para la adsorción del carbón activo se puede aplicar para la regeneración del mismo, ya que la regeneración consiste en el proceso inverso a la adsorción. La adsorción es un proceso que se favorece con la disminución de la temperatura y por tanto la regeneración se beneficiará por el aumento de la temperatura. Ciertos procesos se alcanzarán al reducir también los contaminantes, bien sea por descomposición térmica, degradación por microorganismos, entre otros [35].

La capacidad de adsorción de los carbones se deteriora gradualmente con el uso. Una vez el carbono se ha saturado, debe regenerarse, reactivarse o bien eliminarse. Debido a la necesidad de regeneración del carbón, el coste del proceso aumenta, representando éste aproximadamente el 75 % del coste total de operación y mantenimiento para un lecho fijo, tanto si es un proceso por lotes, también llamado tipo batch, como un proceso continuo, en columnas, ya que la parte más difícil es la regeneración. La regeneración, supone eliminar los contaminantes del carbón, sin destruir los contaminantes. En cambio, la reactivación, es la destrucción de los contaminantes que intervienen, además de la reactivación del carbón, ocurriendo generalmente a elevadas temperaturas. Por otro lado, el carbón deberá desecharse si está irreversiblemente contaminado [8].

Para este proceso de recuperación, se utilizarán temperaturas elevadas y presiones bajas, todo lo contrario que en el tratamiento de adsorción, donde se utilizan temperaturas bajas [35]. El gran uso del carbón activo, se ha visto asociado al desarrollo y la aplicación más amplia de una variedad de procesos nuevos de regeneración. Siendo los más conocidos: [8].

Regeneración Térmica. Se calienta el carbón, en un intervalo de (600 - 1000 °C). Este método es el más reversible, llegando a ser efectivo para eliminar mezclas de compuestos orgánicos complejos. Siendo así, el más utilizado a nivel industrial. Pero este tipo de regeneración también tiene algunos inconvenientes [30].

Primeramente, para regenerarlo se debe retirar de la columna, para transportarlo al horno donde se producirá el proceso, y posteriormente volverlo a inyectar en la columna. Esto, implica la constante manipulación del material [30]. Alrededor del 5 al 10 % del carbón,

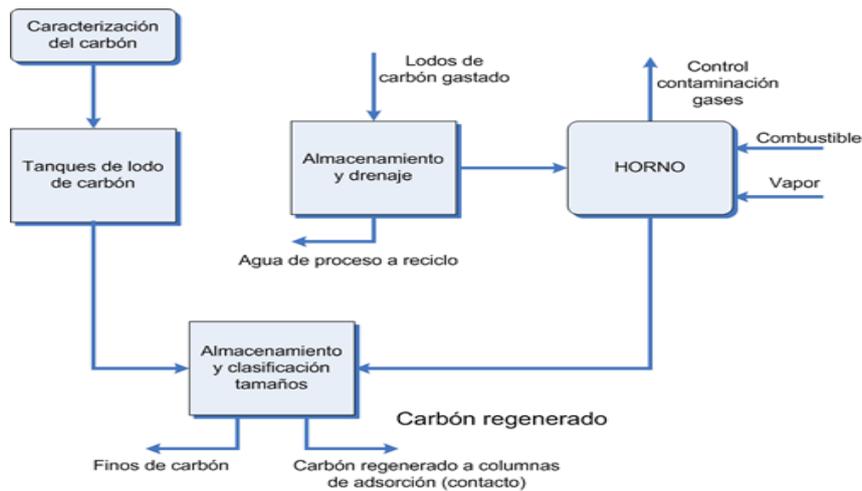


Figura 1.12: Diagrama de flujo para regeneración térmica del carbón activo.

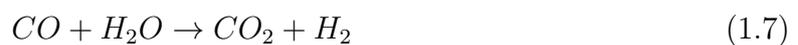
Fuente: [9].

se destruye durante el proceso de regeneración o bien se pierde durante el transporte, este deberá de reemplazarse con carbono virgen [8].

Las reacciones necesarias para que se produzca la regeneración son [9]:



Tanto la reacción (1.5), como la reacción (1.6), son reacciones endotérmicas. Por tanto, al superar los 760°C, se produce reacciones directas, de ese modo, la fase gas llega al equilibrio conforme a la siguiente reacción, donde el valor de la constante de equilibrio es $K = 1,0$ a 870°C [9].



Dos de los principales inconvenientes de este método son, primero, este tratamiento tiene la inviabilidad de poder recuperar la materia adsorbida, por otro lado, el segundo inconveniente sería el elevado consumo de energía de este proceso [30]. En la siguiente figura, 1.12, podemos observar el diagrama de flujo de lo que ocurre en una regeneración térmica del carbón activo [9].

Regeneración Biológica. Otro tipo de regeneración es la regeneración de forma biológica, para eliminar la materia biodegradable adsorbida durante el proceso, se van a emplear microorganismos, anaerobios, aerobios o una mezcla de los dos. Este método tendrá los siguientes pasos [30].

En primer lugar, el carbón se pone en contacto con el disolvente, éste también incluye microorganismos. A continuación, los compuestos son desorbidos por difusión, desde los poros a la solución donde los microorganismos asimilan los compuestos, cambiando a sustancias no tóxicas. Por ende, para facilitar la desorción del adsorbato, se mantiene una concentración de soluto baja. Si se compara este método con la regeneración térmica, éste tiene un consumo de energía mucho menor, esto es debido a que se opera a bajas temperaturas. En cambio, los principales inconvenientes de este método es que tanto la temperatura, como la concentración de soluto, como el pH, deben estar bajo unos límites estrictos [18]. Otra inconveniencia en el tratamiento biológico es que no es posible cuando los contaminantes se encuentran en niveles tóxicos para el lodo activo o son no biodegradables [35].

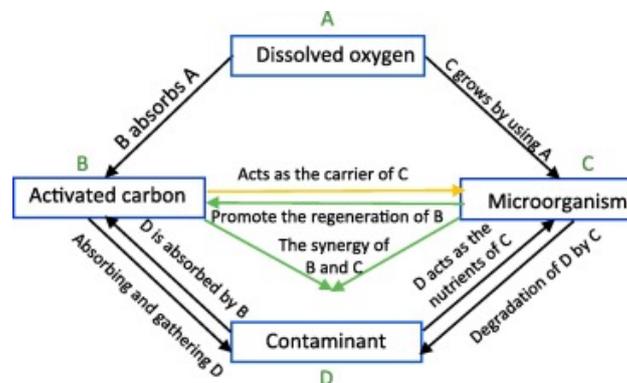


Figura 1.13: Esquema de la regeneración biológica del carbón activo.

Fuente: [10]

Regeneración por gases calientes. Se utilizará este método cuando el adsorbato es un compuesto orgánico que tiene un bajo punto de ebullición. La diferencia fundamental que hay con respecto a la regeneración térmica son las temperaturas bajas de operación [18], [30].

Tan pronto como el carbón esté saturado comienza el proceso de regeneración donde un flujo de vapor pasa a través del lecho de carbón [18]. Para este flujo de vapor se utilizará,

dióxido de carbono, agua, aire, entre otros [30]. La corriente de vapor atravesará el lecho de carbón saturado, comúnmente de forma contraria al flujo que saturó anteriormente el carbón. Debido al elevado calor que emite el vapor, éste desorbe el adsorbato del carbón, sacándolo del recipiente del adsorbedor a un intercambiador de calor, en el cuál la mezcla se condensa. Con este método se proporciona la recuperación del adsorbato. No obstante, cuando se trata de un compuesto soluble en agua, se necesitan procesos adicionales, tanto para separar el disolvente de la mezcla de disolvente y agua, como para poder secar el disolvente recuperado [18].

Regeneración con disolventes. Este método es viable en la regeneración de carbones activos que han tratado efluentes residuales que incluyen ácidos aromáticos, ácido acético, fenoles, entre otros. Este tipo de regeneración se lleva a cabo mediante la introducción de una corriente de solvente por medio de un lecho que contiene el carbón saturado [18]. Generalmente, este proceso tiene un coste elevado, por lo que, el solvente se deberá recuperar [30]. Los métodos de recuperación utilizados son mediante destilación o precipitación, permitiendo así también, la recuperación de compuestos a priori adsorbidos en el carbón.

Regeneración química. Para este tratamiento es necesaria la reacción del material adsorbido con un regenerante que lo elimina del carbón activo. Emplear ácidos fuertes para regenerar el carbón es más eficaz que la incineración, ya que durante ese proceso se producen compuestos más tóxicos que los compuestos inorgánicos pertinentes. Un inconveniente es que la capacidad de adsorción del carbón regenerado es menor que el carbón utilizado inicialmente, por lo tanto, hay que sustituirlo tras varios ciclos, y esto conlleva a ciertas pérdidas de carbón, pero este porcentaje es mucho menor que las pérdidas obtenidas durante el proceso de regeneración térmica [30].

1.6 Regeneración por procesos tipo Fenton.

En este trabajo se estudiará la aplicabilidad de regenerar carbón activo mediante los procesos tipo Fenton, teniendo en cuenta los efectos de la temperatura. El proceso tipo Fenton, es una combinación del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y una sal de hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}), utilizada como catalizador, generando así especies altamente oxidantes, ra-

dicales hidroxilo entre otros. Estos radicales tienen un potencial oxidante muy elevado, además de ser muy reactivos. Estas reacciones son alternativas beneficiosas y económicas, a la hora de generar especies oxidantes que sirvan para tratar desechos químicos [11].

Las principales condiciones para los procesos tipo Fenton son, principalmente el pH al que se encuentre la disolución. A pH 3 la degradación de materia orgánica es más efectiva [37]. El proceso Fenton, bajo radiación UV-vis, llamado proceso foto-Fenton, conlleva la misma reacción Fenton, generando así, radicales hidroxilo, además de tener una mejora gracias a la luz, donde se regenerará de manera foto-catalítica el Fe^{+3} a Fe^{+2} [31].

Algunos autores concuerdan con que el rendimiento del proceso Fenton depende de algunos parámetros influyentes como, la concentración del agente oxidante y catalítico, como podemos esperar, la velocidad de degradación es mayor conforme aumentan las concentraciones de peróxido y de hierro, a pesar de ello, con una mayor cantidad de peróxido y hierro puede llegar a delimitar el porcentaje de degradación ya que se benefician las reacciones secundarias. Otro de los factores es el pH, como hemos mencionado anteriormente a pH ácido, que se encuentra entre un rango de (2.5 - 4), la degradación de la materia es más efectiva, por otro lado, se encuentra el tiempo de reacción, como se ha podido comprobar con un tiempo de residencia menor se obtiene un nivel de degradación bastante adecuado además de ser los tiempos cortos más económicos. Temperatura, en este trabajo nos focalizaremos en éste último parámetro, ya que se estudiará cómo afecta la temperatura a la regeneración. De igual manera, la naturaleza del contaminante está estrechamente relacionada con la eficiencia del proceso [34].

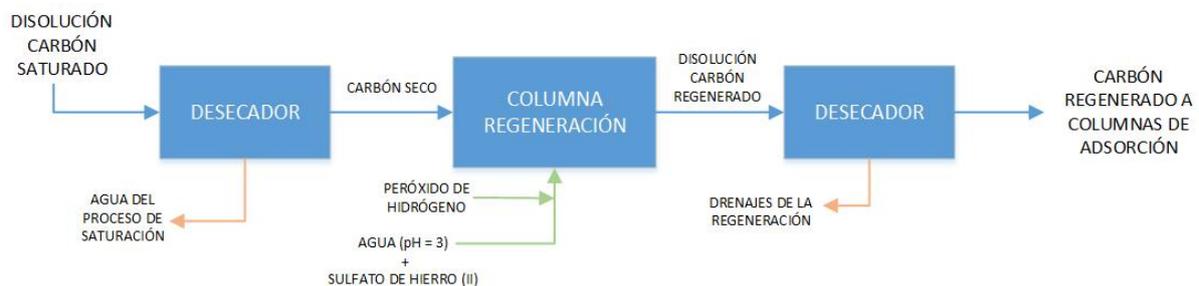


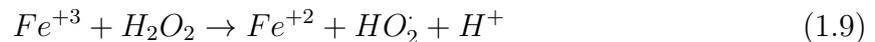
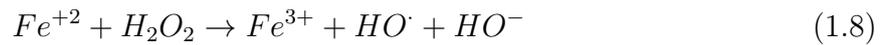
Figura 1.14: Diagrama de flujo de la regeneración del carbón activo por procesos Fenton.

Fuente: Propia.

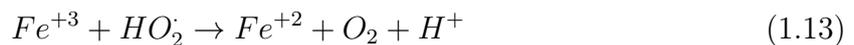
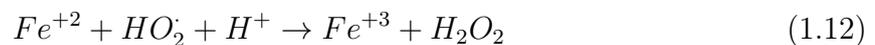
1.6.1 Reactivo Fenton.

Las soluciones que incluyen una combinación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), y sales de Fe^{2+} , se le denomina “Reactivo Fenton” [4]. Esta mezcla produce principalmente radicales hidroxilo, estos son altamente oxidantes sobre los compuestos orgánicos. Esta reacción se basa en una transferencia de electrones entre ambos, donde el Fe^{+2} actúa como catalizador [37].

Los radicales hidroxilo ($OH\cdot$) pueden teóricamente convertir finalmente los contaminantes en sales inorgánicas, CO_2 y agua [37]. Uno de los mecanismos más aprobados es el denominado mecanismo “Clásico” o “de radical libre” cuyas ecuaciones son, (1.8) - (1.14), nos centraremos en las dos primeras ecuaciones ((1.8)-(1.9)), ya que, de forma simplificada con estas dos reacciones se puede expresar la reacción de Fenton [4].

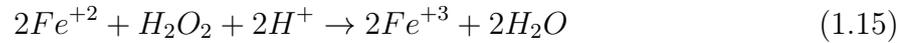


Aunque se conocen muchas más ecuaciones secundarias involucradas durante el proceso, en este trabajo no tienen mucha relevancia, algunas están expresadas a continuación, como podemos ver desde la ecuación (1.10) hasta la (1.15).



En la ecuación (1.8), observamos la generación de radicales hidroxilo, esta reacción es muy rápida. También se puede definir la ecuación global incluyendo desde la ecuación (1.8) hasta la ecuación (1.14), como la descomposición del H_2O_2 en presencia del catali-

zador. La ecuación (1.15), en condiciones ácidas se completa, esto quiere decir que para la descomposición del H_2O_2 se necesita la existencia de iones H^+ [37].



En las ecuaciones anteriores, ((1.8) - (1.14)), se puede contemplar que es un proceso cíclico en el se puede empezar tanto con Fe^{+2} como con Fe^{+3} , únicamente hay una pequeña diferencia en el arranque del proceso [4]. Los radicales hidroxilo que se producen en el proceso, destruyen de manera oxidativa las sustancias orgánicas (RH), produciendo asimismo, radicales orgánicos reactivos (R), teniendo la posibilidad de oxidarse más. El tratamiento Fenton se realiza en cuatro fases, ajuste del pH, reacción de oxidación, neutralización-coagulación y precipitación. Una vez finalizada la sedimentación, se hace un análisis de la DQO, (demanda química de oxígeno), del sobrenadante. Este análisis se utilizará para medir el rendimiento del proceso. Esta medida da la aportación de la coagulación/floculación a la eliminación de materia orgánica [37].

1.7 Efecto de la temperatura en el proceso Fenton.

La obligación de desarrollar soluciones técnicas capaces de cumplir con los límites de vertido de aguas residuales industriales o permitir el reciclaje o la reutilización del agua, impulsa los esfuerzos de investigación hacia la implementación de nuevos tratamientos o la intensificación de los ya disponibles. El tratamiento de Fenton ha mostrado algunas ventajas significativas con respecto a otros procesos, como el hecho de que el hierro es un elemento ampliamente disponible, además de ser no tóxico, por otro lado, el peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y el exceso se descompone en productos ambientalmente seguros [38].

Conforme aumenta la temperatura durante el proceso, la velocidad del proceso mejora, haciendo así que este aumento aporte un consumo de peróxido mucho más eficiente, esto se debe a que hay una mayor descomposición del H_2O_2 , pero a partir de cierta temperatura, la mejora no es muy significativa, convirtiéndose así en una desventaja ya que el peróxido

es un material muy inestable y conforme aumenta la temperatura tiende más rápidamente a descomponerse en H_2O y O_2 , y por tanto, no llega a regenerarse bien el carbón activo [38].

Esta velocidad que asume la reacción, se debe a la cinética que adapta la reacción, ya que la constante de velocidad, k , aumenta. Esto puede explicarse con la ecuación de Arrhenius. Ecuación (1.16). Proporcionando así una relación de forma cuantitativa entre la energía de activación y la velocidad de la reacción [21].

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (1.16)$$

En esta ecuación los parámetros son:

- **A.** Factor de frecuencia, es la periodicidad con la que se realizan las colisiones, tiene las mismas unidades que la constante de velocidad.
- **k.** Constante de velocidad.
- **E_a .** Energía de activación.
- **R.** Constante de gases ideales.

El cociente de colisiones con energía para reaccionar viene expresado por la ecuación (1.17). Conforme va aumentando la temperatura, el cociente se incrementa a causa del signo negativo del exponente. Llamado Factor de Boltzman [5].

$$e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (1.17)$$

Así, se evaluó el papel de la temperatura, en el rango de 25 a 70 °C , utilizando aguas residuales de la industria. Obteniendo como resultado que, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la carga eliminada. En compensación, otros estudios reportaron que las mayores conversiones de carga orgánica se lograron en condiciones templadas, alrededor de 50 °C, con escasas mejoras más allá de esa temperatura [7].

Como conclusión, se ha observado que el carbón activo es muy común en el tratamiento de aguas, ya que capta los contaminantes de ella. Por otro lado, se ha explicado que el proceso Fenton puede regenerar el carbón activo. Ambos se ven afectados por la temperatura. Dado que el carbón activo en presencia de temperatura libera los contaminantes, es decir que, cuando aumenta la temperatura durante la adsorción menos contaminantes se retienen, en consecuencia, el aumento de temperatura hace que se desorban los contaminantes. Por otro lado, la temperatura en el proceso Fenton acelera el tiempo de reacción.

Por ese motivo, el efecto de la temperatura afectará de manera positiva para la regeneración del carbón activo, porque, por un lado, ésta facilitará la liberación de los contaminantes hacia la disolución y por otro lado, la reacción de regeneración será más rápida. Esto es en lo que se basa el objetivo principal de este proyecto.

2 Objetivos

En este capítulo de la memoria se procura explicar los distintos objetivos de este proyecto. Además, se indicarán los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que afectan de manera directa e indirecta a la materia de este trabajo de fin de grado.

Como **objetivo principal** de este trabajo, se ha estudiado el efecto de la temperatura en la regeneración del carbón activo saturado empleando procesos tipo Fenton. Para ello se ha saturado una cierta cantidad de carbón activo y se ha aplicado el proceso Fenton a diferentes temperaturas para regenerarlo.

Otros **objetivos específicos** de este trabajo, se enumerarán a continuación.

- Caracterización de la capacidad de adsorción del carbón activo en función de la temperatura.
- Alcanzar la saturación del carbón activo empleando un colorante como contaminante modelo.
- Estudiar el efecto de la temperatura en el tiempo de regeneración aplicando el proceso de Fenton.
- Seleccionar las condiciones que impliquen menor tiempo de tratamiento y regeneración completa.
- Dimensionado del proceso de regeneración del carbón activo para la aplicación industrial en las condiciones seleccionadas.

- Estimación de costes de este tratamiento y comparación entre dos condiciones de proceso.

Por otro lado, hay que mencionar el alcance y el papel que tiene el proyecto en lo que se refiere a objetivos de desarrollo sostenible, tanto de manera directa como indirecta. Para empezar, de manera directa, este proyecto afecta al *ODS 6. 'Agua limpia y saneamiento'*, debido a que una de las mayores preocupaciones a nivel industrial es como tratar el agua residual para posteriormente verterla al medio. Por ende, este trabajo es una manera de poder tratar el agua antes de verterla, evitando que los contaminantes industriales entren en contacto. Otro de los objetivos a los que afecta de manera directa es *ODS 14. 'La vida submarina'*, este objetivo también está relacionado con el anterior, ya que al introducir agua contaminada al mar las especies marinas se ven muy afectadas, en cambio, si se trata el agua de manera correcta antes de desecharla se reduce de manera notoria la extinción de las especies. Finalmente, el *ODS 15. 'Vida en ecosistemas terrestres'*, éste es especialmente importante, ya que para el crecimiento y el desarrollo de la vida en la tierra es fundamental el agua, por tanto, si el agua está contaminada probablemente acabe llegando al interior por muchos puntos, como por ejemplo, la precipitación.

A continuación, mencionaremos los objetivos a los que afecta de manera indirecta, empezando por el *ODS 2. 'Hambre cero'*, teniendo en cuenta que, para poder cumplir con este objetivo, se necesita agua limpia para el riego, para su posterior consumo. Relacionando éste último propósito con el *ODS 3. 'Salud y bienestar'*, el agua contaminada al ingerirla puede provocar una disminución bastante significativa de la salud, por otro lado, este objetivo se ve implicado en el tratamiento del agua porque debido a la poca saneación del agua en algunas partes del mundo conllevan a impulsar ciertas enfermedades que se consideraban ya erradicadas. Además, si tenemos en cuenta que las actuales alternativas de regeneración involucran el transporte y el uso de altas temperaturas, se puede decir también que de forma indirecta afectan a varios ODS, como el *ODS 7. 'Energía asequible y no contaminante.'*, ya que, al no utilizar temperaturas elevadas se reducirá el consumo energético. Por otro lado, podemos mencionar que el *ODS 11. 'Ciudades y comunidades sostenibles'*. afecta también de manera indirecta a este proyecto porque como se evitará el transporte del carbón activo para la regeneración, se fomentarán las ciudades sostenibles reduciendo la contaminación.

3 Procedimiento Experimental

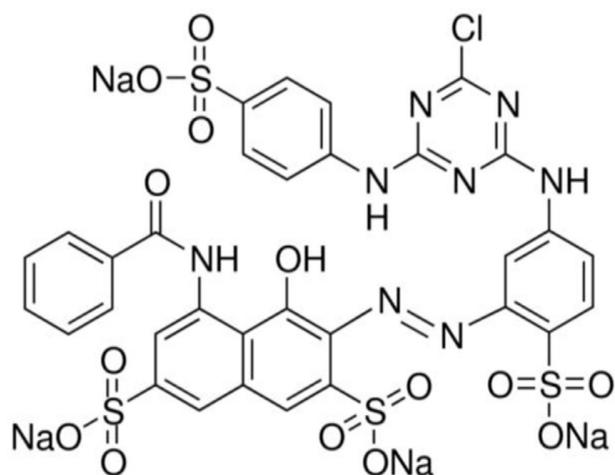
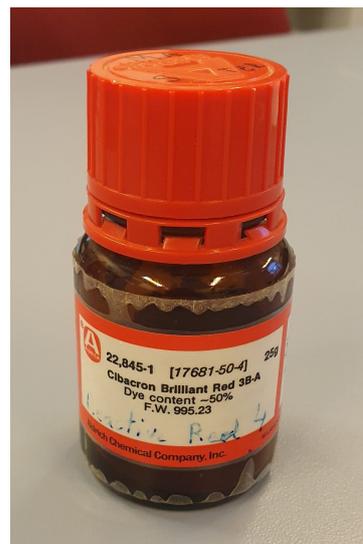
En este capítulo se describirán las propiedades de los reactivos empleados, el equipo empleado, además, se explicará de manera detallada los pasos a seguir durante la preparación para que se pueda replicar posteriormente.

3.1 Material Empleado.

El material utilizado para realizar los ensayos son:

Cibacron Brilliant Red 3B-A El colorante es uno de los principales materiales que se van a utilizar en los ensayos, ya que, actuará como contaminante y con el carbón activo se tratará de eliminar. Para este proyecto se utilizará en concreto el colorante llamado, *Cibacron Brilliant Red 3B-A*. Cuya fórmula es, $C_{32}H_{23}ClN_8O_{14}S_4$, podemos observar la correspondiente fórmula en la figura 3.1a. Éste tiene un peso molecular de $995,21 \text{ g mol}^{-1}$, y con un contenido de tinte del 50%. Suministrado por la empresa, *Aldrich Chemical Company, Inc.*. El colorante utilizado podrá observarse en la figura 3.1b.

A los efectos de analizar este caso en particular, se busca la optimización del tiempo de regeneración del carbón activo variando la temperatura. Para ello, se ha utilizado este colorante puesto que, de esta forma, podremos observar mediante la espectrofotometría la cantidad de contaminante que se adsorbe con mayor facilidad, por otro lado, se ha elegido este colorante debido a que no reacciona de manera indicativa al variar su pH. Podemos ver en la 3.1a que el colorante está compuesto por dos anillos aromáticos y un grupo *-azo*, absorbiendo de esta forma radiación electromagnética en el espectro visible, dando así su

(a) Fórmula del colorante *Cibacron Brilliant Red 3B-A*

(b) Colorante

Figura 3.1: Colorante *Cibacron Brilliant Red 3B-A*

coloración. Por este motivo, los grupos *-azos* son muy utilizados en la industria textil, papelera, entre otras.

Carbón Activo. El carbón activo, figura 3.2b, es el principal elemento de estudio, sobre él se desarrollará el proyecto, puesto que éste será el encargado de eliminar el contaminante mencionado anteriormente, figura 3.1a, y a su vez el carbón, se regenerará mediante el proceso Fenton, sección 1.6 para volverlo a utilizar. Para este estudio se seleccionó un carbón microporoso comercial obtenido por activación con vapor de cáscara de coco. El tamaño de partícula del carbono oscila entre 0,40 y 0,75 mm.



(a)



(b)

Figura 3.2: Carbón activo.

Peróxido de Hidrógeno. Para la regeneración con el proceso Fenton, sección 1.6, se utilizarán principalmente dos reactivos, el primero será el peróxido de hidrógeno, Este se presenta en estado líquido, debe de conservarse a bajas temperaturas, siendo su fórmula molecular, H_2O_2 . Este producto tiene una masa molar de $34,01 \text{ g mol}^{-1}$. Con una riqueza del 33 %. Fue distribuido por la empresa *PanReac AppliChem*.

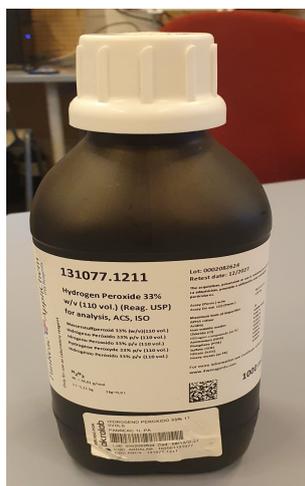


Figura 3.3: Peróxido de Hidrógeno. H_2O_2 .

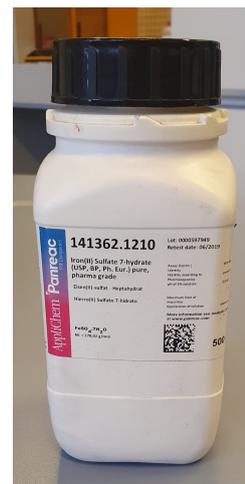
Sulfato de hierro (II) heptahidratado. Éste es el segundo reactivo principal que se utilizará para la regeneración del carbón activo. Como podemos ver en la figura 3.4a, el reactivo se presenta como cristales de color verde. Según la etiqueta del reactivo, en la figura 3.4b. La fórmula molecular de este reactivo es, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Con una masa molar de $278,02 \text{ g mol}^{-1}$, y una riqueza del 100 %. Al igual que el reactivo anterior, fue distribuido por la empresa *PanReac AppliChem*.

Ácido Sulfúrico y Hidróxido Sódico. Estos reactivos se utilizarán para modificar el pH del agua, ésta será utilizada para la regeneración del carbón. Esto se debe a que el pH del agua debe encontrarse en un rango alrededor de 3. En ambos reactivos se harán diluciones al 0,01 M, para poder controlar mejor las subidas y bajadas de pH. La empresa que proporcionará ambos materiales será la misma mencionada en los reactivos anteriores, *PanReac AppliChem*.

Ácido Sulfúrico. Como podemos ver en la etiqueta de la botella en la imagen 3.5a. Tiene una riqueza mínima de 95 %, y una masa molar de $98,08 \text{ g mol}^{-1}$. Cuya fórmula molecular es H_2SO_4 .



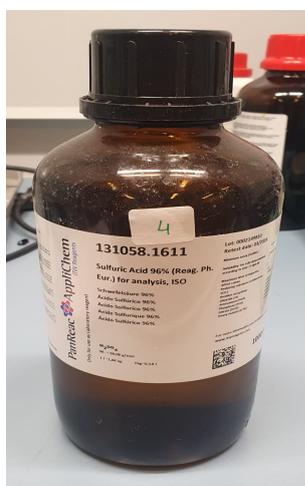
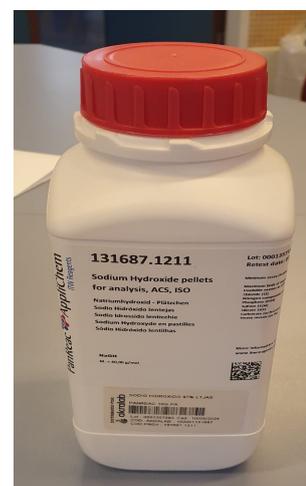
(a)



(b)

Figura 3.4: Sulfato de hierro (II)

Hidróxido Sódico. Por otro lado, tenemos el hidróxido sódico haciendo el efecto contrario al ácido sulfúrico, como podemos ver en la imagen 3.5b, tiene una riqueza mínima de 98 %, y una masa molar de 40 g mol^{-1} . La fórmula molecular es NaOH.

(a) H_2SO_4 

(b) NaOH

Tiras reactivas de peróxido Las tiras reactivas, se utilizan como método de detección de la cantidad de peróxido que tiene una disolución, en función de la cantidad de peróxido, estas tiras desarrollarán unas intensidades de color diferentes, como podemos ver en la siguiente figura 3.5c. Estas bandas reactivas conceden de manera inmediata resultados, permitiéndonos poder tomar decisiones en el momento. Con estas tiras se ahorra tiempo. La forma de utilizarlo consiste en introducir la tira dentro de la disolución, por la parte

impregnada de reactivo, este al instante cambia de color indicando la cantidad de H_2O_2 que hay en la disolución. En este caso se ha utilizado un rango de entre (0-100 ppm), cuanto más intenso sea el color azul mayor cantidad de peróxido lleva.

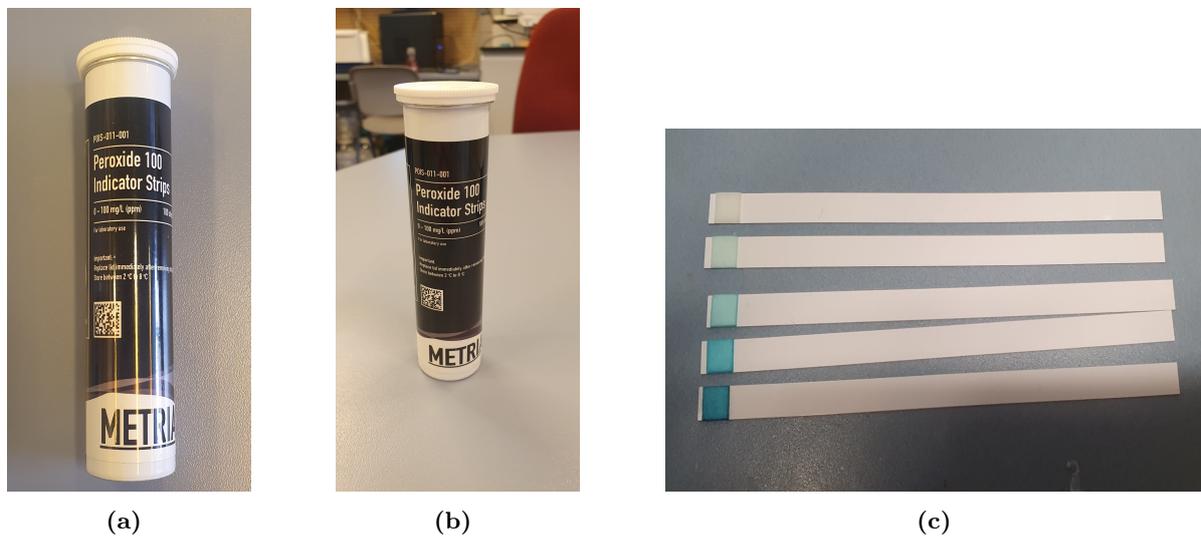


Figura 3.5: Tiras reactivas de peróxido

Metavanadato de amonio Como se puede ver en la figura 3.6, su fórmula es NH_4VO_3 , tiene un peso molecular de $116,98 \text{ g mol}^{-1}$. Es un polvo de color amarillento. Con este reactivo se realizará una disolución con ácido sulfúrico 3.5a, de 0.06 M de NH_4VO_3 y 0.36 M de H_2SO_4 . Este reactivo fue proporcionado por la empresa UCB.



Figura 3.6: Metavanadato de amonio.

3.2 Equipos Empleados.

El principal equipo empleado para el estudio de la adsorción y regeneración del carbón a partir del proceso Fenton cambiando la temperatura de regeneración, se describe seguidamente.

Espectrofotómetro.

El equipo empleado es un espectrofotómetro UH5300 HITACHI, éste está provisto de un sistema óptico de doble haz con una lámpara flash de xenón. El sistema de doble haz concede una elevada resolución y precisión a la hora de tomar los datos. Asimismo, la longitud de la onda viene determinada por la disgregación de un rayo de luz que ofrece un prisma. Seguidamente, la luz se hace pasar por una hendidura que establecerá la intensidad del haz, volviéndose a medir esta intensidad, una vez la luz traspasa la cubeta con la muestra, ésta permite obtener la medida de luz absorbida.

El espectrofotómetro, que podemos observar en la imagen 3.7, es un instrumento utilizado en el análisis químico que ofrece información de la naturaleza de una muestra. Ésta es obtenida por la proyección de un haz de luz monocromática, donde se obtienen los resultados a partir de la cantidad de luz absorbida por la muestra. La luz absorbida se encuentra dentro del rango ultravioleta y visible.

Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Se utiliza este equipo para saber la demanda química de oxígeno, también llamado (DQO), principalmente se utiliza mucho en el tratamiento de aguas, para averiguar su calidad, pero en este caso se utilizará para ver cuanta cantidad de peróxido de hidrógeno se necesita para que se produzca la desorción total del carbón activo.

El procedimiento a seguir para determinar la DQO de la muestra será, primero, añadir 3 mL de la muestra en el kit, dicho kit será un kit específico para DQO, con un rango de (10 - 150 mg L⁻¹), este kit contiene una solución sulfúrica de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Seguidamente se cerrará y agitará vigorosamente, produciéndose



Figura 3.7: Espectrofotómetro UH5300 HITACHI.

una reacción exotérmica. Una vez hecho eso, se introducirá en el termo-reactor MERCK cuyo modelo es TR 620, como podemos ver en la figura 3.8a , y se calentará durante 2 horas a 148 °C.

Una vez pasadas las 2 horas se dejará enfriar el tubo de ensayo a temperatura ambiente. Y se procederá a analizar los resultados obtenidos en el fotómetro, que en este caso será un SPECTROQUANT PHOTOMETER NOVA 60, como podemos ver en la figura 3.8b. Este fotómetro mide las absorbancias, expresando los resultados en mg O₂/L de forma directa.



(a) Termo-reactor MERCK TR 620



(b) Spectroquant photometer nova 60

Placa Calefactora.

El equipo empleado es una placa calefactora C-MAG HS 7, como podemos ver en la figura 3.8, se trata de un agitador magnético con calefacción. La potencia que puede suministrar el motor es de 1,5 W, por otro lado, puede llegar a calentar hasta 500 °C. Este equipo se ha utilizado tanto para agitar la disolución como para calentarla cuando se ha necesitado temperatura. Este equipo fue suministrado por la empresa IKA.



Figura 3.8: Placa Calefactora C-MAG HS 7

Bomba Peristáltica.

El equipo empleado es una bomba peristáltica SEKO PR7, como se puede ver en la figura 3.9 ésta puede llegar a suministrar un caudal de 7 L h⁻¹, tiene una potencia de 5 W, y una presión de 0,1 bar. Este equipo fue suministrado por la empresa SEKO.



Figura 3.9: Bomba peristáltica SEKO PR7

3.3 Caracterización del contaminante.

Gran parte de los contaminantes vertidos afectan al color de las aguas, especialmente si provienen de industrias, como por ejemplo la industria agrícola, donde se vierten pesticidas y plaguicidas. Llegando al medio por diferentes rutas, como por ejemplo evaporación y posterior precipitación, entre otros [5].

Con el fin de este estudio, se elaborará una batería de cinco disoluciones a diferentes concentraciones, siendo la concentración máxima utilizada para un volumen de 250 mL de 20 mg L^{-1} , dado que a mayores concentraciones no se apreciará con claridad la cantidad de colorante adsorbido, puesto que se utilizarán en todos los ensayos un 1 g de carbón activo. Con respecto a la longitud de onda que se va a utilizar durante el resto del proyecto, se procederá a hacer un barrido con longitudes de onda del colorante, este barrido se observará en la figura 4.1, y a partir de ahí se elegirá una longitud de onda determinada.

Una vez se han hecho las disoluciones se midió primeramente la absorbancia inicial a una longitud de onda determinada posteriormente se introdujo el gramo de carbón activo, y se dejó en agitación hasta que la saturación llegó a un equilibrio. Una vez se ha dejado durante un tiempo llegar al equilibrio, se ha medido la absorbancia final y finalmente se ha filtrado y se ha dejado secar.

3.4 Recta de calibrado del colorante.

Por otra parte, se han determinado los parámetros para la regeneración del carbón activo a diferentes temperaturas, pero primeramente, se ha realizado una recta de calibrado obteniendo así una ecuación lineal que posteriormente se ha utilizado para la obtención de la cantidad de colorante adsorbido. Para hacer esta gráfica se ha realizado una batería de disoluciones a diferentes concentraciones, y con el espectrofotómetro se han medido las absorbancias iniciales obtenidas.

3.5 Regeneración a diferentes temperaturas.

Para este ensayo, se ha preparado una disolución de agua con colorante, manteniendo la relación que se utilizó en la recta de calibrado, por lo tanto, esta relación ha sido de 20 mg L^{-1} de colorante. Como en este caso se ha utilizado un volumen de 250 mL, se utilizó 5 mg de colorante. Por otro lado, se ha utilizado 1 gramo de carbón activo, esta cantidad como la de colorante se han repetido durante todos los ensayos ejecutados. Antes de mezclar ambos reactivos, colorante y carbón, se ha medido la absorbancia inicial de la disolución. Ésta, se ha medido con el espectrofotómetro a la longitud de onda de 520 nm. Posteriormente se mezclaron ambos reactivos y se dejó a temperatura del laboratorio durante un par de días para que el carbón adsorbiera el contaminante llegando al equilibrio, donde el carbón se encontró completamente saturado. Posteriormente, se medirá la absorbancia final. Más tarde, se separaron ambos reactivos y se dejó el carbón en el desecador para poder regenerarlo posteriormente.

Para la parte de la regeneración, se ha utilizado un volumen de 100 mL de agua, se acidificó hasta obtener un pH de 3, porque como se ha visto en el inicio la regeneración Fenton térmica es mucho más efectiva a un pH ácido. En cuanto a uno de los reactivos necesarios para la regeneración tipo Fenton, el hierro, como se ha podido observar en el anexo 8.1, se utilizarán 5 mg cada 100 mL de agua. Una vez se que se añadió al agua se esperó unos minutos a que se disolviese y posteriormente se introdujo el carbón. Finalmente, con las expresiones matemáticas que nos indica el anexo 8.1, se han realizado los cálculos para obtener la cantidad necesaria de peróxido que se deberá añadir para

regenerar completamente el carbón activo. Con el cálculo matemático explicado en los anexos (8.1 - 8.2), se evaluó la cantidad de peróxido y hierro necesarios para cada ensayo.

Por último, una vez se ha visto que cantidad de reactivos se necesitan para la regeneración, se ha procedido a empezar el ensayo introduciendo el peróxido en la disolución y iniciando el cronómetro, cada cierto tiempo se ha introducido una tira indicadora, para medir el peróxido. Éste se paró cuando las tiras de reactivo utilizadas advirtieron que no quedaba nada de peróxido en la disolución. El montaje experimental para esta parte del ensayo será el mostrado en la figura 3.10



Figura 3.10: Montaje experimental regeneración con tiras de peróxido

4 Resultados

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos durante los ensayos, también se analizarán estos resultados indicando cuál de todos es el óptimo para la regeneración a nivel industrial.

4.1 Determinación de longitud de onda de trabajo.

Este estudio se ha realizado para determinar a qué longitud de onda se han medido las absorbancias durante todo el trabajo. Como podemos observar en la figura 4.1, se ven varios picos de absorción pero, únicamente se ve uno dentro del rango del espectro de luz visible, entre $[400 - 700 \text{ nm}]$, el pico más alto de absorción, abarca un rango desde $[490 - 550 \text{ nm}]$, los otros picos de absorción se encuentran dentro del rango de luz ultravioleta, por tanto, se podría realizar, pero no se sabría con certeza si realmente se está midiendo la adsorción del colorante o los aditivos que contiene el reactivo, ya que no tiene una pureza del 100%. Por tanto, se utilizó el rango del pico que se encuentra dentro del visible, particularmente, se utilizó una longitud de onda de 520 nm, para todo el experimento, se ha elegido este valor, porque se encuentra entre los valores intermedios de este rango.

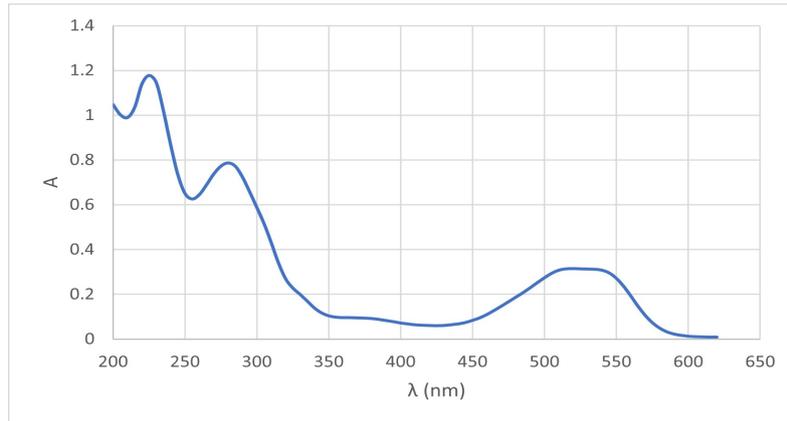


Figura 4.1: Longitud de onda vs Absorbancia

4.2 Recta de calibrado.

Como podemos observar en la figura 4.2, se ha representado, una batería de varias disoluciones a diferentes concentraciones, éstas se encuentran en un rango entre 0–20 mg L⁻¹, se midió su absorbancia a temperatura ambiente, y a 520 nm como hemos mencionado anteriormente, obteniéndose así la recta de calibrado (4.1) que nos permitirá posteriormente calcular la cantidad de contaminante que ha sido adsorbido por el carbón durante el ensayo en mg/L.

$$y = 0,015 \cdot x + 0,0164 \quad (4.1)$$

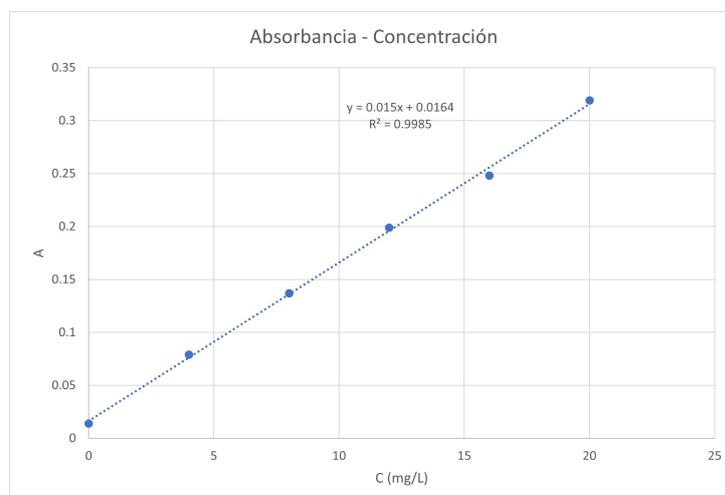


Figura 4.2: Recta Calibrado

Una vez hecha esta recta de colorimetría, se calculó la cantidad necesaria de peróxido de hidrógeno para la regeneración en el proceso Fenton, en función de los mg/L de contaminante adsorbidos por el carbón. Para empezar, se preparó una DQO para la disolución con mayor concentración, es decir, 20 mg L^{-1} . Indicando así, la cantidad de oxígeno que se necesita en mg para oxidar 20 mg de contaminante en un litro. Por otro lado, sabiendo la reacción que origina el peróxido de hidrógeno, reacción (4.2), podemos calcular el volumen de peróxido industrial que se necesita para regenerar el carbón activo, contemplando en el anexo 8.1, los cálculos completos de la obtención de reactivos necesarios para la regeneración. Si se observa la reacción 4.2, podemos ver que el peróxido se descompone en una molécula de agua y media de oxígeno, por lo cual, se necesitó el doble de peróxido para poder alcanzar la completa oxidación del contaminante.



4.3 Caracterización del carbón activo.

Como se ha mencionado antes, se ha hecho la suposición de que la temperatura hace que los compuestos se adsorban en menor cantidad. Por ello, una vez saturado a temperatura ambiente, el aumento de la temperatura debería facilitar la desorción facilitándonos así el tratamiento. Por ese motivo, se ha realizado una caracterización ejemplo con el contaminante para obtener las correspondientes isothermas. Para ello, se ha hecho un estudio de una batería de disoluciones a diferentes concentraciones entre un rango de $2,5\text{--}20 \text{ mg L}^{-1}$, donde se ha variado la temperatura de la adsorción, para observar cual es el efecto que tiene la temperatura sobre ellos.

Con la ecuación de la isoterma de Freundlich, mencionada anteriormente, (1.1), y los datos obtenidos experimentalmente, podemos observar en la figura 4.3, que durante la adsorción, la disolución que se encuentra a temperatura ambiente, la concentración final llega a desaparecer en las disoluciones más diluidas, esto nos indica que todo el contaminante ha sido adsorbido, en cambio, en las disoluciones tratadas con mayor temperatura comprobamos que la capacidad de adsorción es mucho menor. Si también nos fijamos en

la concentración adsorbida por gramo de carbón activo, se puede verificar que a mayor temperatura menor es la concentración adsorbida por gramo de carbón, estos resultados nos confirman que la temperatura afecta a la capacidad de adsorción, siendo ésta, menor conforme aumenta la temperatura.

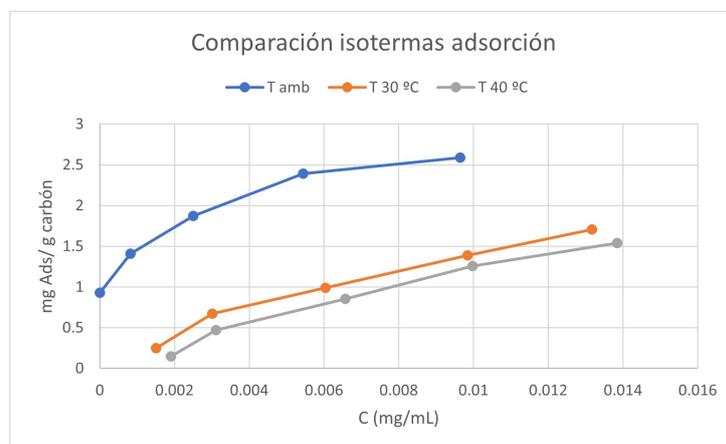


Figura 4.3: Comparación isotermas adsorción a diferentes temperaturas

Por otro lado, en la figura 4.4, se mostrarán los valores de las pendientes de la recta de las isotermas a diferentes temperaturas. Como se puede observar en la figura 4.4, las constantes a 30 °C y 40 °C, tienen prácticamente el mismo valor, por lo que no hay diferencia en trabajar entre una temperatura u otra. En cambio, si observamos la constante que resulta en la isoterma de 20 °C, es el doble del valor de la isoterma de 30 °C, por lo que se puede observar que hay un gran cambio en la diferencia de temperatura. Con esta tabla comprobamos lo explicado en la teoría anteriormente, a mayor temperatura menor es la carga de adsorbente, es decir, a mayor temperatura menor es la capacidad de adsorción. Confirmando así que la temperatura ayuda de forma favorable la regeneración.

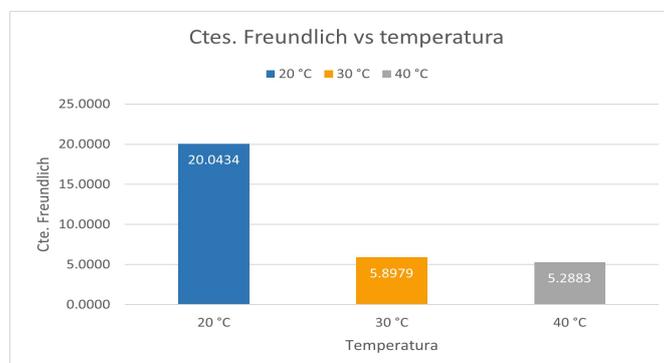
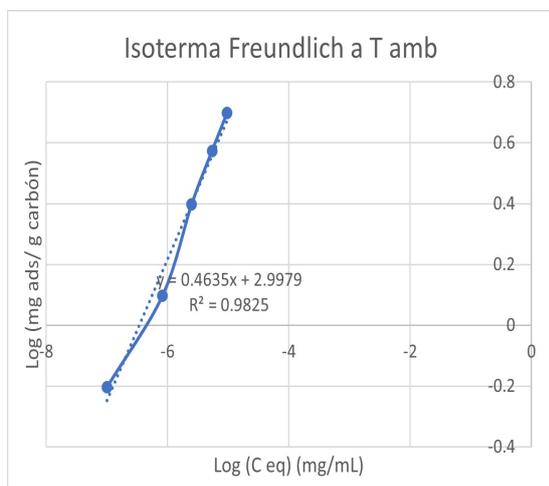
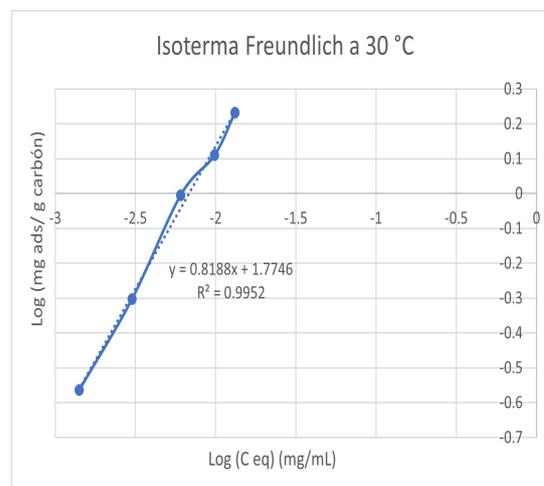


Figura 4.4: Valores de la constante K_F de las isotermas a diferentes temperaturas.

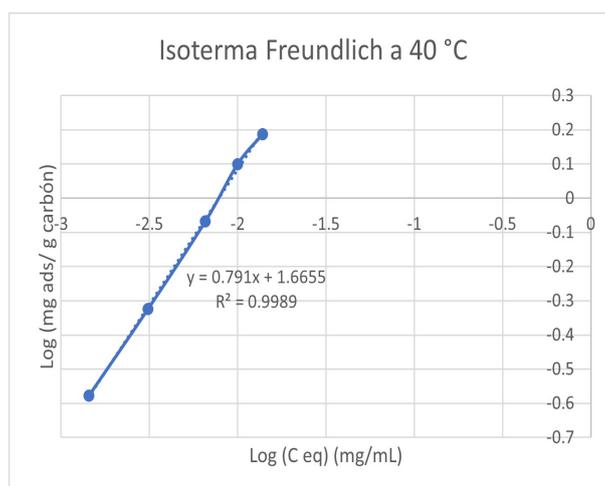
Por otro lado, se podrá observar representada la isoterma de Freundlich linealizada en las figuras [4.5a - 4.5c] a diferentes temperaturas. Como se puede observar tienen la misma tendencia pero con diferentes valores.



(a) Isoterma Freundlich linealizada a T amb



(b) Isoterma Freundlich linealizada a 30 °C



(c) Isoterma Freundlich linealizada a 40 °C

4.4 Resultados de la regeneración a diferentes temperaturas.

En este apartado, se han expuesto todos los resultados obtenidos durante la regeneración del carbón activo saturado empleando procesos Fenton a diferentes temperaturas. Para que sea más práctico, primeramente, mostrará una tabla resumen en la que se podrá acceder a cualquier ensayo.

Tabla 4.1: Tabla resumen de los resultados

	T_{amb}	30 °C	40 °C
1º ciclo	4.4.1	4.4.4	4.4.7
2º ciclo	4.4.2	4.4.5	4.4.8
3º ciclo	4.4.3	4.4.6	4.4.9

4.4.1 *Ensayo 1: Regeneración del carbón a temperatura ambiente, primer ciclo.*

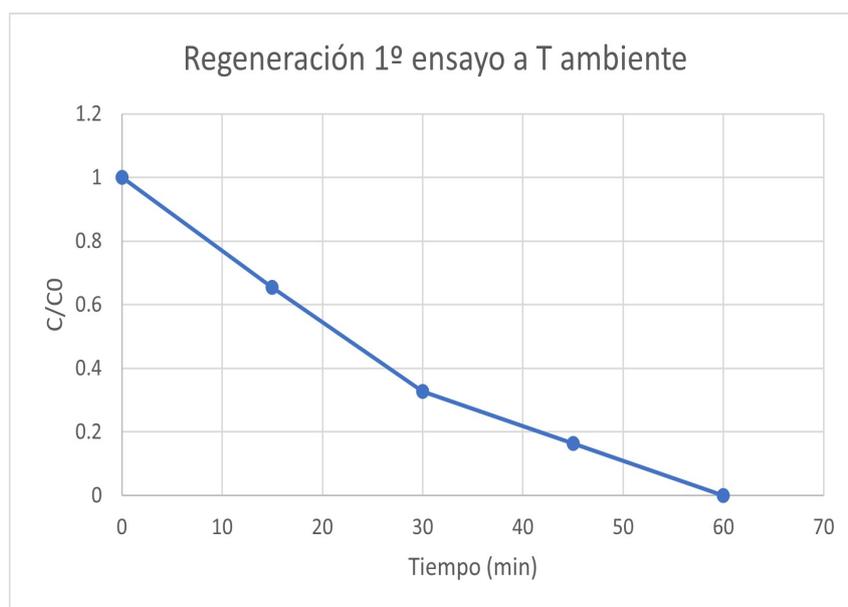
Como se ha dicho en la sección 3.5, se procederá a regenerarse aplicando el método explicado. Pero antes que nada, se explicará como se ha calculado qué cantidad de peróxido es necesaria para la regeneración, en el anexo 8.1, en los cálculos se tendrá en cuenta la cantidad de oxígeno necesaria en la muestra contaminada a partir de la DQO, para poder añadir ese medio de oxígeno para poder degradar la materia, siendo este medio el peróxido. Por tanto, el principal objetivo de este ensayo fue calcular en cuanto tiempo el peróxido de hidrógeno se consumía, ya que una vez que éste se consuma será indicativo de que se ha producido la oxidación completa y se habrá regenerado el carbón. En los cálculos se obtuvo que a cierto volumen de H_2O_2 , el carbón se regeneraba por completo, pero para evitar una regeneración parcial se añadió el doble de reactivo asegurándonos así, que el carbón se encontraba totalmente regenerado. Este ensayo se realizó a temperatura ambiente. En la tabla 4.2, se han expuesto los datos necesarios para los cálculos referidos a la cantidad de peróxido necesario en esa disolución.

Tras haber mostrado los datos necesarios, se procederá a mostrar los resultados obtenidos, utilizando los cálculos que se indican en los anexos (8.1 y 8.2). Estos resultados se podrán ver en la gráfica 4.5, como las tiras reactivas tienen una lista de rangos, los valores intermedios se hará un promedio, por otro lado, el valor inicial se obtendrá a partir de los cálculos realizados previamente.

Tabla 4.2: Tabla datos 1º regeneración a T_{amb}

Abs_{in}	0,340	Abs_f	0,263	V_1	250 mL
v	100 mL	% en peso	33 %	ρ	1,11 g/mL
DQO	$\frac{20 \text{ (mg/L)}}{57 \text{ (mg O}_2\text{/L)}}$	O_2 (mg/mmol)	32	H_2O_2 (mg/mmol)	34

Como se puede ver en la gráfica 4.5, la primera regeneración a temperatura ambiente, tarda en torno a una hora. Estas gráficas también se harán para posteriormente poder comparar todos los ensayos, en estas gráficas se observará el tiempo de regeneración frente a los mg/L de peróxido disueltos en la disolución.

Figura 4.5: 1º Regeneración a T_{amb} .

4.4.2 Ensayo 2: Regeneración del carbón a temperatura ambiente, segundo ciclo.

Una vez se ha terminado de regenerar el carbón activo en el primer ensayo, 4.4.1, se filtrará y se secará en el desecador durante unos días, se preparará otra disolución de contaminante con las mismas medidas que en el ensayo 4.4.1, pero debido a la poca pureza del colorante, las absorbancias iniciales variarán. Posteriormente se volverá a saturar el mismo carbón

utilizado en el ensayo 4.4.1 y se tornará a medir la absorbancia final. A continuación, se realizará el mismo procedimiento mencionado anteriormente. Para el cálculo del peróxido en este ensayo, se utilizarán los mismos datos, pero cambiando las absorbancias, ya que se ha comentado que éstas varían. Siendo los resultados de éstas los que se muestran en la siguiente tabla, 4.3.

Tabla 4.3: Tabla datos 2^o regeneración a T_{amb}

Abs_{in}	0,292	Abs_f	0,228
------------	-------	---------	-------

Una vez expuestos los valores que son diferentes respecto a los del primer ensayo, se procederá a mostrar la gráfica 4.6, como podemos ver, los resultado obtenidos durante la segunda regeneración los valores se han estimado dependiendo del grado de color que mostraba la tirita, por lo que no hay mucha precisión. Pero, se verá la diferencia entre la primera vez que se regeneró el carbón activo y la segunda regeneración. Si se comparan ambos resultados podemos ver que la segunda regeneración ha sido menor, esto podría deberse a que como teóricamente hemos observado, conforme aumenta el número de veces que se satura el carbón mayor es la disminución de la propiedad adsorbente, y por este motivo, para la siguiente regeneración se necesitará menor cantidad de peróxido que la primera vez.

4.4.3 *Ensayo 3: Regeneración del carbón a temperatura ambiente, tercer ciclo.*

Este ensayo será el último regenerando a temperatura ambiente, se realizarán los mismos movimientos que en los ensayos anteriores y por tanto, lo que variará en este ensayo al igual que el anterior serán las absorbancias tanto inicial como final, como se muestra en la tabla 4.4, también cabe destacar que la diferencia de adsorción es diferente en cada ensayo debido a la temperatura del laboratorio, ya que como hemos visto en la sección 1.4, la temperatura afecta enormemente a la adsorción.

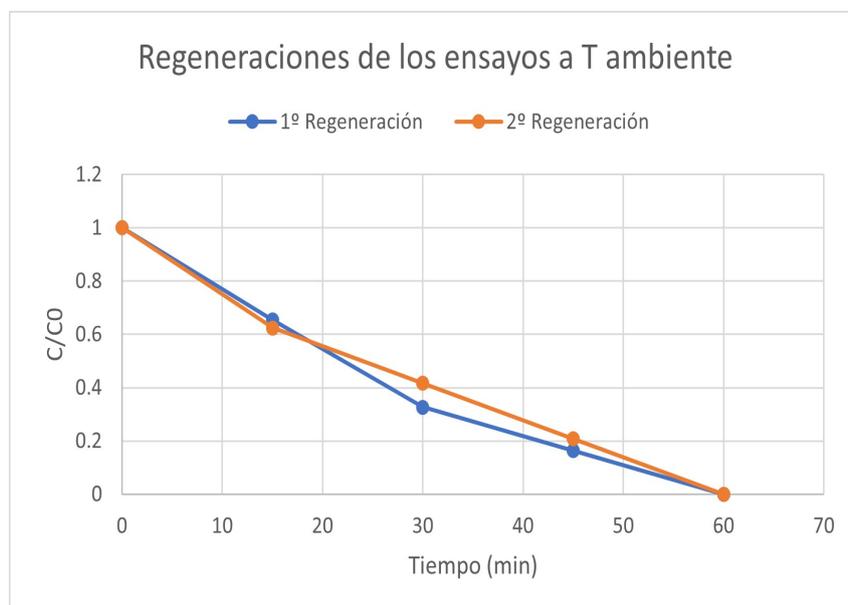


Figura 4.6: 2º Regeneración a T_{amb} .

Tabla 4.4: Tabla datos 3º regeneración a T_{amb}

Abs_{in}	0,306	Abs_f	0,239
------------	-------	---------	-------

Podemos observar en la gráfica 4.7, que tanto el volumen necesario de peróxido como la cantidad de oxígeno necesario por litro, son mayores que en el ciclo anterior. También se podrá observar que, en la tercera regeneración debido a la rotura del carbón activo, por la agitación, la adsorción es mayor que la segunda regeneración, pero sigue siendo menor que la primera y esto se debe a que como se ha mencionado anteriormente cuantas más veces se regenera dicho carbón menor es la capacidad de adsorción.

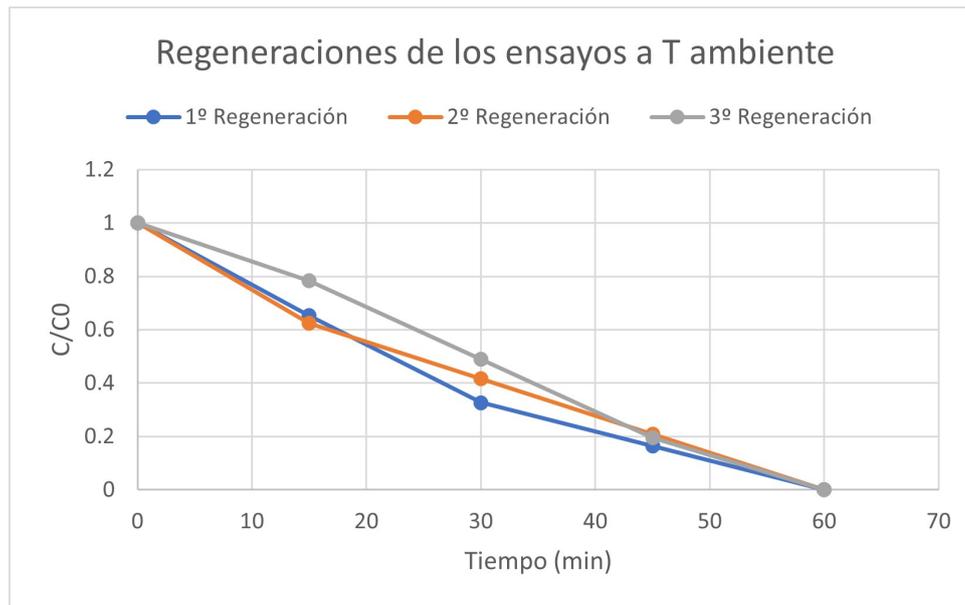


Figura 4.7: 3ª Regeneración a T_{amb} .

4.4.4 Ensayo 4: Regeneración del carbón a 30 °C, primer ciclo.

Durante este ensayo, la regeneración se realizará a una temperatura de 30 °C. En los siguientes ensayos, se saturará el carbón de la misma forma, pero a la hora de regenerar, la disolución se encontrará a dicha temperatura. En la tabla 4.5, podemos ver los datos que se diferencian a los demás ensayos.

Tabla 4.5: Tabla datos 1ª regeneración a 30 °C

Abs_{in}	0,339	Abs_f	0,270
------------	-------	---------	-------

Se procederá a realizar los mismos cálculos, explicados en los anexos 8.1 y 8.2. En la figura 4.8, los resultados en cuanto a tiempo son más cortos que los anteriores, además de su pendiente, que es más pronunciada.

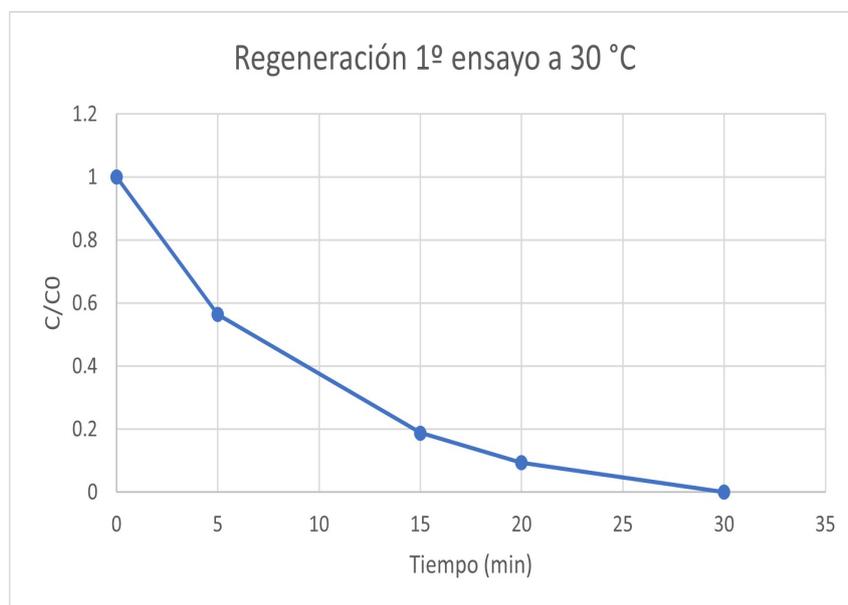


Figura 4.8: 1º Regeneración a 30 °C

4.4.5 Ensayo 5: Regeneración del carbón a 30 °C, segundo ciclo.

Este ensayo será la continuación del ensayo 4.4.4, ya que el carbón una vez se ha regenerado anteriormente, se volverá a saturar a temperatura ambiente, teniendo el mismo problema sobre el cambio de la temperatura del laboratorio mencionado anteriormente, además se le añade el inconveniente de que la pureza del reactivo es baja, por lo tanto las absorbancias serán diferentes mostrándose en la tabla 4.6, se secará y posteriormente se volverá a regenerar a 30 °C.

Tabla 4.6: Tabla datos 2º regeneración a 30 °C

Abs_{in}	0,288	Abs_f	0,236
------------	-------	---------	-------

Se obtendrán los resultados que se pueden ver en la gráfica 4.9, comparando ambas regeneraciones, podemos deducir que el carbón ha adsorbido menos cantidad de contaminante que en la primera saturación, pudiendo ser o bien porque en la primera regeneración no

llegó a regenerarse bien o porque como hemos mencionado en el ensayo 4.4.2, cuanto mayor es el número de veces que se satura el carbón y se regenera, menor cantidad de contaminante adsorbe con el tiempo.

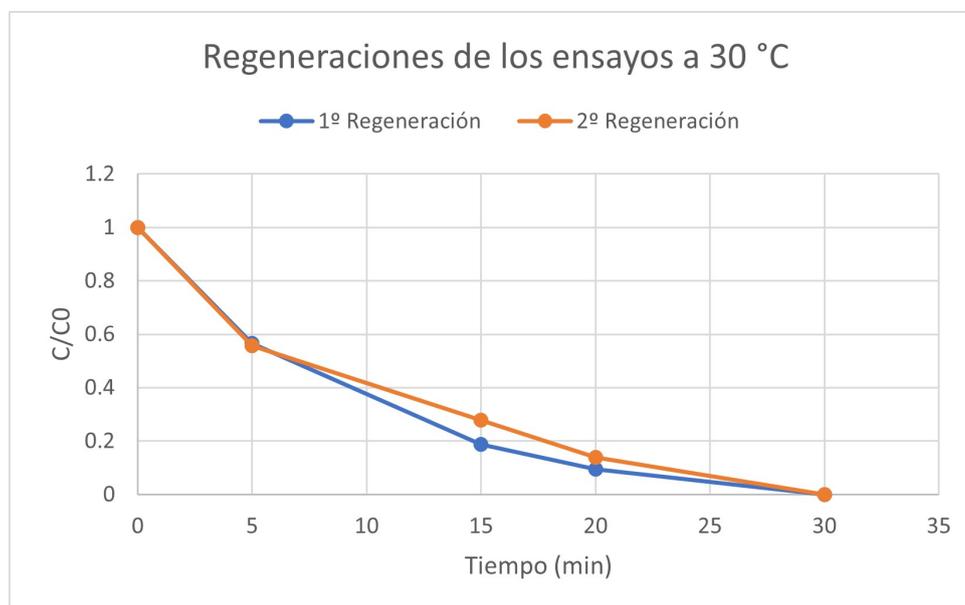


Figura 4.9: 2ª Regeneración a 30 °C

4.4.6 Ensayo 6: Regeneración del carbón a 30 °C, tercer ciclo.

Este ensayo será la última regeneración a la temperatura de 30 °C. Se volverá a saturar y regenerar como en el ensayo 4.4.5, cambiando los datos de las absorbancias, que se pueden ver en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Tabla datos 3ª regeneración a 30 °C

Abs_{in}	0,343	Abs_f	0,253
------------	-------	---------	-------

Comenzará el ensayo, y se obtendrán los siguientes resultados, gráfica 4.10. Como ha ocurrido anteriormente, la tira reactiva de peróxido en el minuto 5 se encontraba entre dos valores, por lo que se ha hecho el punto intermedio, tomando el valor inicial como el alcance máximo del rango y cogiendo de valor mínimo dado por las tiras reactivas. Como resultado de los tres ensayos a una temperatura de 30 °C, podemos ver la siguiente gráfica, 4.10, en esta podemos ver que los valores del primer y segundo ensayo son menores que

los del tercero, eso se debe a la rotura del carbón activo, mencionada anteriormente, esta rotura produce que se adsorba más contaminante, aumentando así la cantidad de peróxido necesaria para la regeneración.

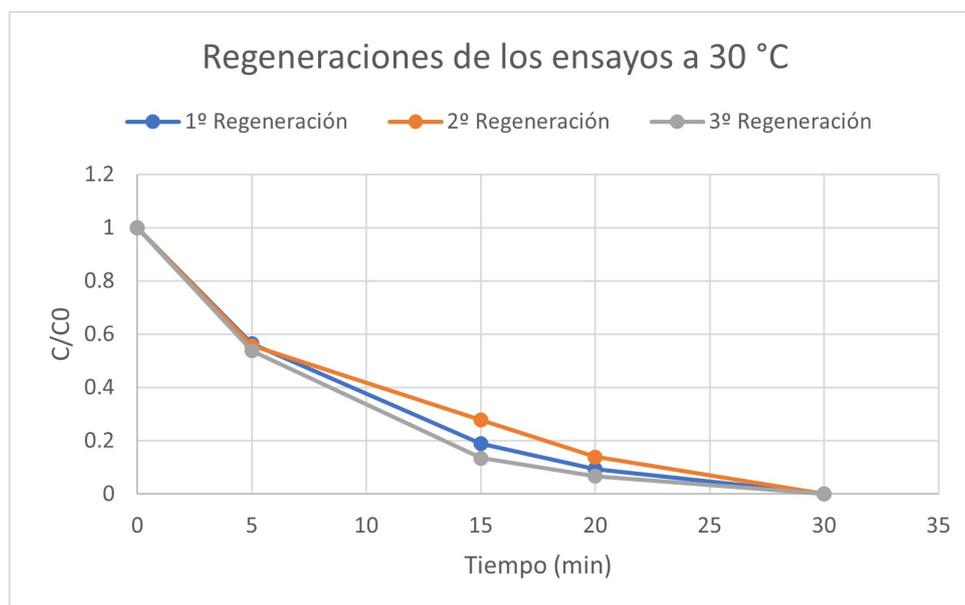


Figura 4.10: 3ª Regeneración a 30 °C

4.4.7 Ensayo 7: Regeneración del carbón a 40 °C, primer ciclo.

Durante los siguientes 3 ensayos se regenerará a una temperatura de 40 °C. Se aplicará el mismo procedimiento explicado en la sección 3.5, pero calentando la disolución durante la regeneración. En la tabla 4.8, podemos ver los datos que se diferencian a los demás ensayos.

Tabla 4.8: Tabla datos 1ª regeneración a 40 °C

Abs_{in}	0,330	Abs_f	0,187
------------	-------	---------	-------

Con respecto a los resultados del tiempo que ha durado la regeneración a 40 °C podemos observarlo de forma visual en la gráfica 4.11. Como podemos ver el volumen de peróxido necesario es mayor que en los dos ensayos iniciales anteriores, esto se debe a la temperatura del laboratorio cambia constantemente beneficiando en este caso la adsorción ya que es

mucho mayor. Podemos examinar, que los últimos valores son muy parecidos, por lo que, al final la eliminación del peróxido es muy lenta.

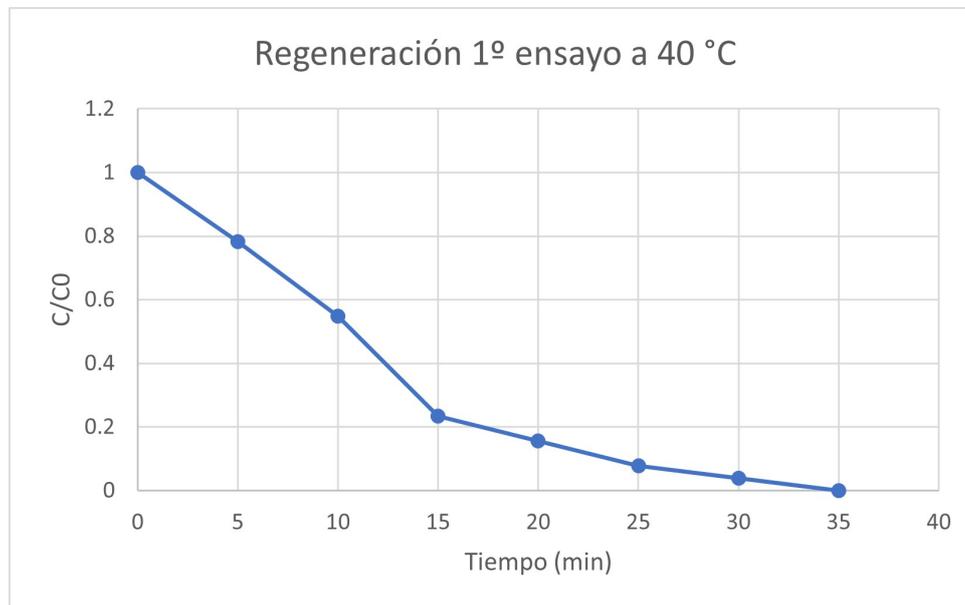


Figura 4.11: 1º Regeneración a 40 °C

4.4.8 Ensayo 8: Regeneración del carbón a 40 °C, segundo ciclo.

Para este ensayo se volverá a saturar el carbón utilizado en la sección 4.4.7 para a continuación regenerarlo, los diferentes datos respecto al ensayo anterior son los observados en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Tabla datos 2º regeneración a 40 °C

Abs_{in}	0,315	Abs_f	0,199
------------	-------	---------	-------

Después podemos observar los resultados en la gráfica 4.12, donde se podrán comparar los resultados de ambos ensayos a 40 °C. Estos resultados afirman que debido a que la cantidad de peróxido es menor, esto se puede deber a varios motivos, uno es la variación de la temperatura del laboratorio, que en este caso no ha beneficiado la adsorción, otro puede ser el caso teórico explicado anteriormente, de que cada vez que se regenera el

carbón menor es la capacidad de adsorción. Al ser la segunda vez que se regenera el carbón activo tiene menor capacidad de adsorción.

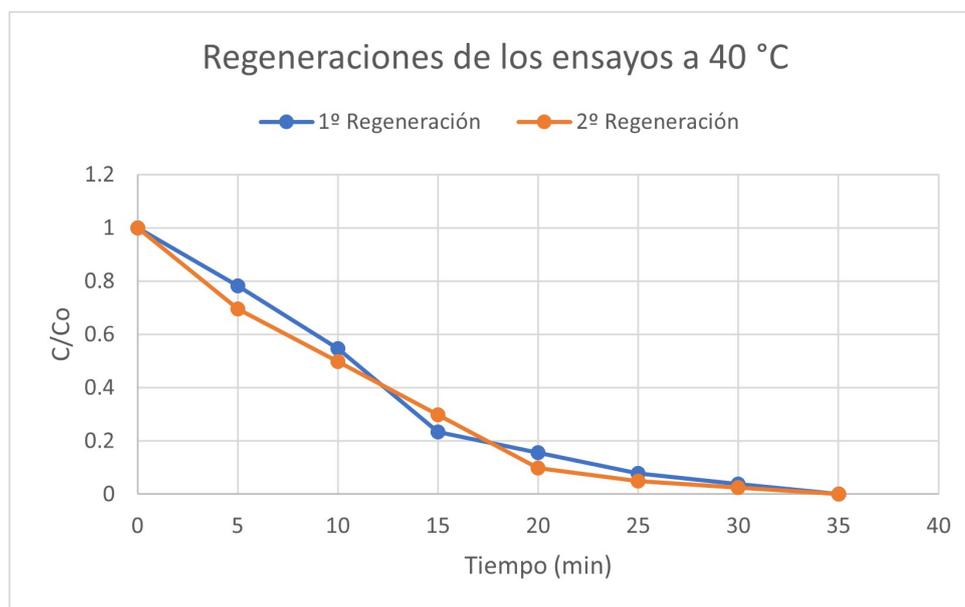


Figura 4.12: 2ª Regeneración a 40 °C

4.4.9 Ensayo 9: Regeneración del carbón a 40 °C, tercer ciclo.

Terminando con los ensayos, ésta será la última vez que se regenerará a una temperatura de 40 °C, mantendremos los mismos datos como en todos los ensayos a diferencia de las absorbancias inicial y final, se pueden ver los datos diferentes en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Tabla datos 3ª regeneración a 40 °C

Abs_{in}	0,386	Abs_f	0,175
------------	-------	---------	-------

En la gráfica 4.13 los resultados nos indican que, por diferentes razones la capacidad de adsorción es mucho mayor en el último ciclo. Estas razones podrían ser, principalmente la rotura del carbón durante la agitación, también puede ser debido a las diferentes temperaturas a las que se ha mantenido el laboratorio, ya que durante estos ensayos la temperatura ambiental fue muy variante. Finalmente, si comparamos los tres resultados obtenidos en una gráfica, como se puede apreciar en la figura 4.13, el tercer ciclo, como

se ha dicho anteriormente, se ha adsorbido mayor cantidad de contaminante que en los otros ensayos, y eso se debe a las variables a las que se ha hecho alusión previamente.

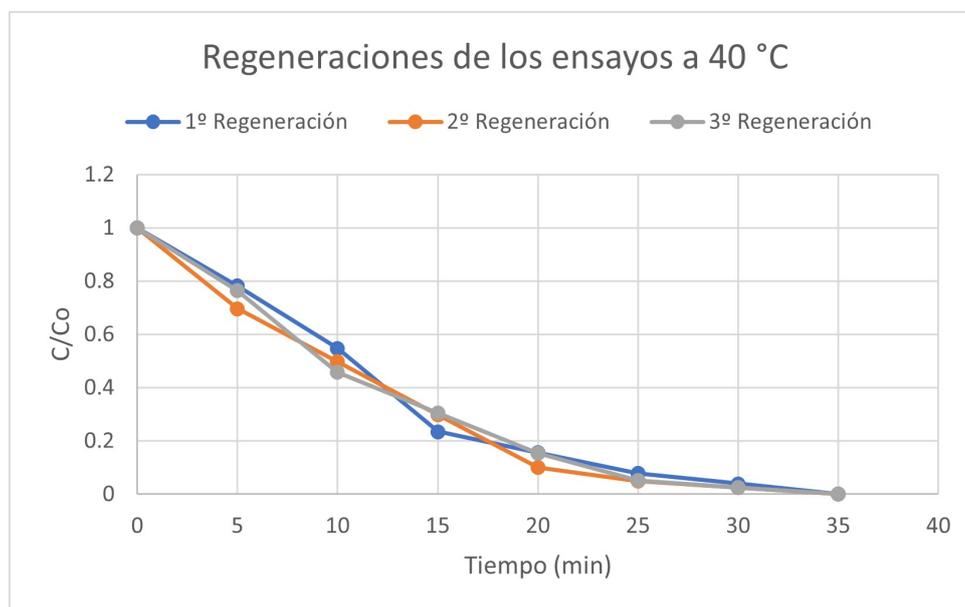


Figura 4.13: 3ª Regeneración a 40 °C

4.5 Comparación de todos los ensayos.

En esta sección, como se puede ver en la figura 4.14, se han comparado las temperaturas a las que se han hecho los ensayos frente al tiempo promedio de los ensayos. Observando los resultados comprobamos que a mayor temperatura más rápida es la regeneración, pero que si se aumenta mucho la temperatura el beneficio que se obtiene respecto al tiempo disminuye poco a poco. Por consiguiente, en cuanto a diferencia de tiempo podemos decir que a mayor temperatura se produce una mejora en el proceso. Pero en cuanto a consumo energético, comprobamos que a menor temperatura hay menos consumo. A 20 °C vemos que no hay gasto energético ya que no habrá que calentar la disolución Fenton, pero en cuanto a velocidad de regeneración, tarda aproximadamente en regenerarse por completo 1 hora. Por otro lado, a 30 °C, respecto a la temperatura de los ensayos anteriores se obtiene en cuanto a tiempo una mejora bastante elevada ya que durante estos ensayos se tardó aproximadamente 30 minutos en conseguir una regeneración total. En cuanto a consumo energético aumentó, ya que había que calentar la disolución Fenton. Por último, a 40 °C vemos que en comparación con los ensayos a 20 °C si hay un gran cambio respecto

al tiempo y al consumo ya que habrá que calentarlo a bastante temperatura, en cambio, si se compara con los ensayos a 30 °C, vemos que la diferencia de tiempo es muy parecida, además, vemos que al aumentar la temperatura 10 °C, el tiempo de regeneración también aumenta y con respecto al consumo en los últimos ensayos es mayor, si volvemos a fijarnos en la figura 4.4, podemos observar que la diferencia de las constantes es muy pequeña. En conclusión, los ensayos a 30 °C, son la mejor opción, ya que son mucho más rápidos que los primeros ensayos, y no se lleva apenas diferencia con la temperatura de 40 °C, además, ya que no hay una gran diferencia entre ambas, se ahorrará más energía eligiendo la temperatura de 30 °C, ya que también, la diferencia de tiempo en ambos ensayos es mínima, por tanto, se ahorra tiempo y energía.

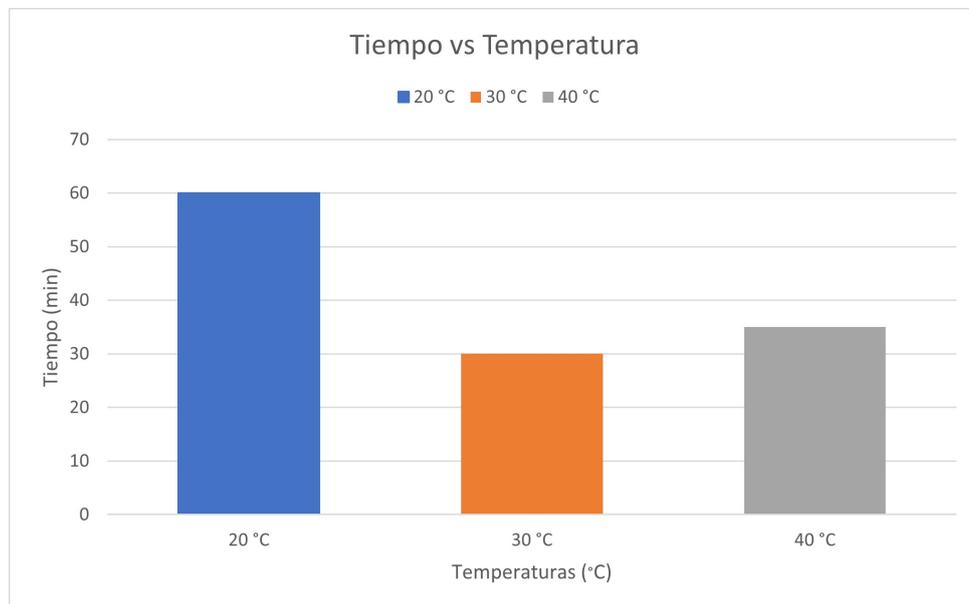


Figura 4.14: Comparación del tiempo frente temperatura de regeneración.

4.6 Resultado óptimo.

En la sección 4.5, se ha explicado el motivo de cuál es la temperatura óptima, esta es de 30 °C, tanto el dimensionado como el estudio económico se realizarán a esta temperatura. Para obtener un cálculo más preciso de la regeneración del carbón activo a 30 °C, se procederá a hacer el mismo método mencionado en la sección 3.5, pero en vez de utilizar el método de las tiras reactivas se utilizará el espectrofotómetro, aquí se obtendrán las medidas exactas. Para ello, se medirá a una longitud de onda de 480 nm, y para medirlos,

se realizará un blanco, que será una mezcla de 10 mL agua destilada y 1,05 mL de metavanadato de amonio. Para las muestras a medir, se realizará una mezcla de 1,05 mL de metavanadato de amonio, 6 mL de agua destilada y 4 mL de muestra. Estas muestras se obtendrán cada 5 minutos. También se realizará un montaje experimental de cómo sería a nivel industrial, éste se puede ver en la figura 4.15. Como se puede ver en la figura, se necesita una bomba peristáltica, esta bomba tendrá un caudal para un volumen de 0,1 L de $1,68 \text{ L h}^{-1}$. Para esta muestra, se utilizará el mismo volumen de disolución Fenton que en los ensayos anteriores, pero cambiando la cantidad de carbón a regenerar, en este caso serán 6 gramos.



Figura 4.15: Montaje experimental del ensayo óptimo

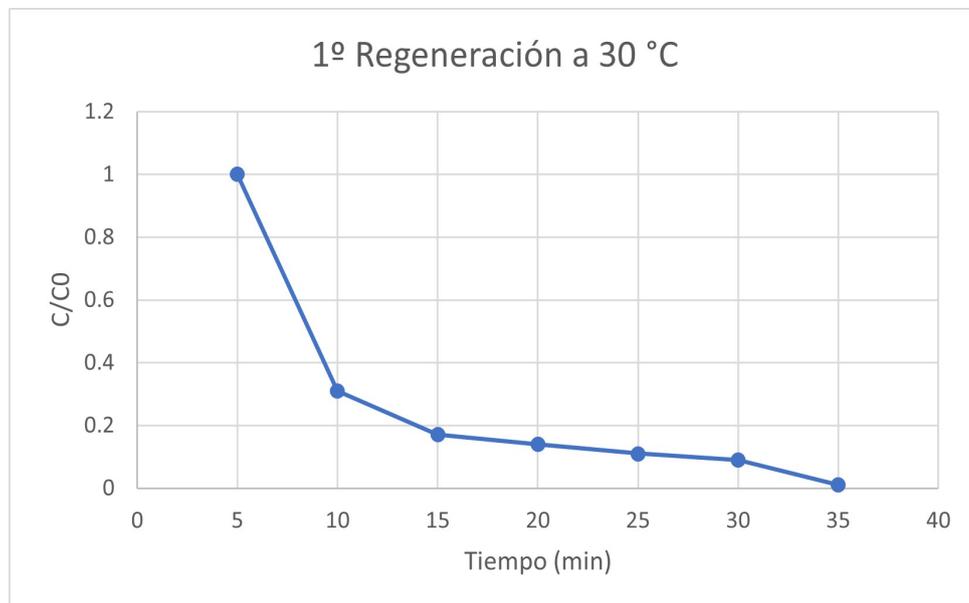
4.6.1 *1^o Regeneración del carbón. Temperatura óptima.*

Para esta regeneración, se utilizarán los mismos datos que se han observado anteriormente en la tabla 4.2, pero cambiando el valor de las absorbancias tanto inicial como final, ya que como se ha mencionado en los ensayos anteriores debido a la baja riqueza del colorante, las absorbancias varían. Las absorbancias de esta disolución se podrán ver en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Tabla datos 1º regeneración a temperatura óptima

Abs_{in}	0,308	Abs_f	0,123
------------	-------	---------	-------

Como podemos observar en la gráfica 4.16, la concentración de peróxido desaparece prácticamente en los primeros 10 minutos, esto nos indica que la temperatura ha tenido el efecto que buscábamos y ha acelerado el proceso de regeneración, después de los 10 minutos continua regenerándose pero poco a poco, hasta que llega a 35 minutos, donde se completa la regeneración.

**Figura 4.16:** 1º Regeneración a 30 °C a temperatura óptima

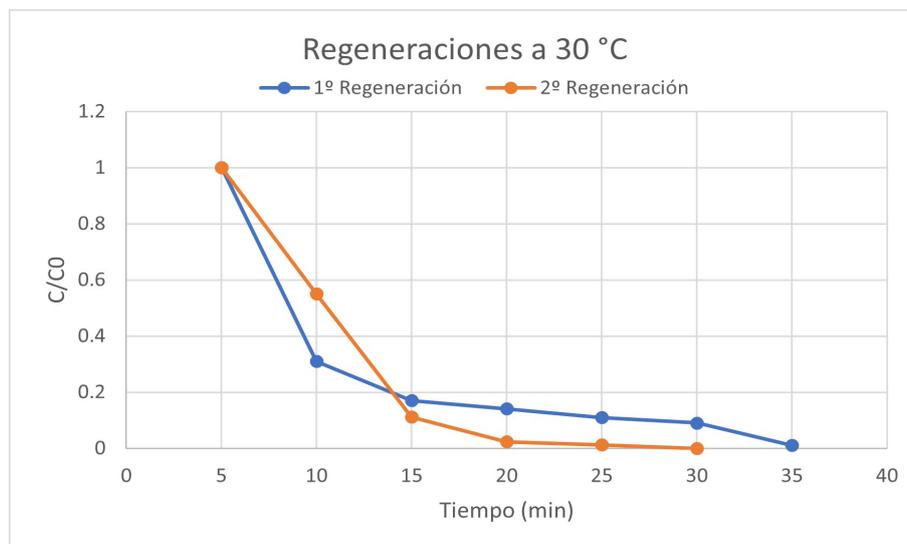
4.6.2 2º Regeneración del carbón. Temperatura óptima.

Como en la primera regeneración, en la tabla 4.12, se podrán observar los valores de las absorbancias inicial y final, ya que estos valores serán los únicos valores distintos. Si hacemos la diferencia entre las absorbancias final e inicial, en ambos ciclos podemos observar que tienen el mismo valor, por lo que podemos decir que la temperatura ambiental fue prácticamente la misma en ambos ensayos, por lo que la temperatura no fue un inconveniente durante la adsorción.

Tabla 4.12: Tabla datos 2^o regeneración a temperatura óptima

Abs_{in}	0,319	Abs_f	0,134
------------	-------	---------	-------

Como se puede observar en la gráfica 4.17, podemos observar ambos ensayos, en la segunda regeneración la primera pendiente donde se elimina prácticamente todo el peróxido vemos que es más lineal que en la primera regeneración, esto nos indica que en la segunda regeneración la eliminación de peróxido es mucho más rápida que en la primera, pero también podemos ver que en el segundo ciclo esta regeneración llega a 0 antes que la primera, ya que ésta tarda media hora exacta, como habíamos comprobado en los ensayos anteriores (4.4.4 - 4.4.7). Esta variación de tiempo entre ambas regeneraciones puede deberse a que el carbón activo en el segundo ciclo estaba menos compacto que el primero, dejando pasar con mayor facilidad la disolución Fenton.

**Figura 4.17:** 2^o Regeneración a 30 °C a temperatura óptima

5 Dimensionado a nivel industrial

Una vez estudiado el comportamiento a escala de laboratorio, así como elegida la temperatura óptima de operación, en este apartado se procederá a escalar los datos obtenidos en el procedimiento experimental a una planta capaz de tratar 408 kg al día. Para el diseño de esta planta se utilizará el mismo montaje que para el experimental ya que así se observará una dinámica igual a la estudiada.

5.1 Cálculos.

El volumen utilizado en el laboratorio es de 22 mL, cuya altura es de 3,6 cm y su diámetro es de 2,8 cm. También se han utilizado 6 g de carbón activo para este ensayo. La relación altura diámetro queda como se muestra en la siguiente ecuación (5.1). Se utilizó un caudal de $1,16 \text{ mL s}^{-1}$. Para aplicarlo a nivel industrial es muy complicado ajustarlo de manera exacta con una columna que ya está en el mercado, por lo que se ha elegido una que tiene una relación parecida y se ha desarrollado el estudio a partir de ahí.

$$\frac{H}{D} = \frac{3,6 \text{ cm}}{2,8 \text{ cm}} = 1,29 \quad (5.1)$$

La columna elegida a nivel industrial tiene un volumen de $2,4 \text{ m}^3$, con una altura de 1,83 m y un diámetro de 1,22 m, en esta columna se utilizarán 408 kg de carbón activo granulado, y tendrá un caudal máximo de $76,38 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Ésta será suministrada por la empresa FilterWater, y será el modelo *CQE-CO-GAC-02058*. En cuanto a los kilos de

carbón que se estudiarán, serán los que vienen ya dados en la información de la columna industrial. Estos es de 408 kg.

Por otro lado, se necesitará un depósito, éste deberá tener la capacidad necesaria para toda la disolución Fenton que se necesitará durante el proceso de regeneración. Para ello primeramente se calculará el volumen necesario, éste será de 7 m^3 , por ello se utilizará un depósito con un volumen de 8 m^3 , el elegido tiene una altura de 3,121 m y un diámetro de 2,11 m. Este depósito fue suministrado por la empresa PPA. Tendrá un sensor de nivel de tipo boya, para llegar al nivel de agua requerido para el proceso. Lo suministrará la empresa Gesa. Continuando con los sensores, se utilizará un sensor de temperatura y pH, para comprobar que el proceso se encuentra a condiciones óptimas. Proporcionado por la empresa WTW, siendo el modelo *SensoLyt 700 IQ (SW)*.

La disolución deberá encontrarse a una temperatura de 30°C , por lo que se necesitará un intercambiador de calor, en el anexo 8.4, se observar que se necesitan 81,35 kW para calentar en una hora el depósito, para ello se han planteado dos posibilidades. En primer lugar, será utilizar una resistencia con un consumo de 12 kW, proporcionada por la empresa Oomvarmer, además para que esta bomba de calor llegue a calentar el depósito completo se necesitan 7 horas, por lo que se pondrá un programador horario digital para que se conecte 7 horas antes de comenzar el proceso, de esa forma se ahorrará en personal. El proveedor de este programador será Selec. Por otro lado, la otra opción será utilizar 4 resistencias de 12 kW cada una, para calentar el depósito en 2 horas, dependiendo del precio de la energía estudiado en el estudio económico se decidirá cuál de las dos opciones es más conveniente, si ahorrar en energía y gastarlo en tiempo o bien si ahorrar en tiempo y consumir más energía.

Por otro lado, se encuentra las instalaciones que dosifican el ácido sulfúrico y el peróxido de hidrógeno, por separado, pero ambos tendrán la misma instalación, esta se constituirá por un depósito con un volumen de $1,5 \text{ m}^3$, teniendo una altura total de 1,5 m y un diámetro de 1,20 m. Ambos depósitos serán proporcionados por el proveedor mencionado anteriormente PPA. Para dosificar los reactivos se utilizará una bomba dosificadora, con un caudal de $21,6 \text{ L h}^{-1}$ y una potencia de 0,12 kW. El proveedor de estas bombas será Milton Roy. Por último, se utilizará una bomba centrífuga que tenga una altura manométrica de al menos

2 m, la bomba seleccionada tiene un caudal máximo de $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Tiene una potencia de 11 kW. La bomba seleccionada se suministrará por la empresa Tecnum.

En cuanto a los reactivos utilizados, se necesitará H_2SO_4 para bajar el pH del agua a 3, para tratar un volumen de 7 m^3 se necesitará saber qué cantidad de ácido sulfúrico se necesita, se podrán ver los cálculos realizados en el anexo 8.3, donde se observa que, para 7 m^3 se necesitarán 7 mol para cada ciclo. Como el H_2SO_4 que se ha seleccionado tiene una riqueza del 98 %, se necesitará una cantidad de 672,28 g en cada ciclo. Este reactivo será facilitado por la empresa Quisaba. Por otro lado, La cantidad necesaria de FeSO_4 con los cálculos realizados en el anexo 8.2, se puede ver que se necesitan, 350 g por cada ciclo. Este reactivo será proporcionado por la empresa Vadequímica. Por último, el peróxido de hidrógeno, este será provisionado también por la empresa Vadequímica, al tener una riqueza del 50 % se necesitarán 1,72 L de reactivo.

Una vez expuestos todos los equipos dimensionados, se calculará el tiempo total del cada ciclo de regeneración. Teniendo en cuenta que el horario laboral de un operario es de 8 h d^{-1} y el tiempo de reacción de cada regeneración es de 30 min, a eso se le añade que el tiempo de preparación para el tratamiento es de aproximadamente 30 min, ya que el operario tendrá que abrir la llave del agua, no hará falta que este pendiente del agua, porque llevará un sensor de nivel que se activará cuando llegue a el nivel requerido, una vez hecho esto se cerrará la llave de paso hasta el próximo ciclo y se deberá introducir el FeSO_4 . En total por cada ciclo son 60 min.

5.2 Diagrama de flujo.

En este apartado se mostrará el diagrama de flujo de la planta, donde se especifican los equipos utilizados y las corrientes de flujo. En el diagrama de flujo 5.1, se pueden observar las siguientes corrientes de flujo y equipos.

1. Entrada de disolución Fenton a la bomba.
2. Entrada de disolución Fenton a columna.
3. Salida desde la columna hacia el depósito.

4. Entrada de agua al depósito.
5. Salida de agua.
6. Entrada de reactivo FeSO_4 .
7. Entrada de H_2O_2 .
8. Entrada de H_2SO_4 .
 - a. Columna de carbón activo.
 - b. Depósito.
 - c. Resistencias.
 - d. Sensor de nivel.
 - e. Bombas dosificadoras de reactivos.
 - f. Depósito de H_2O_2 .
 - g. Depósito de H_2SO_4 .
 - h. Bomba de impulsión hacia columna.
 - i. Sensores de pH y temperatura.

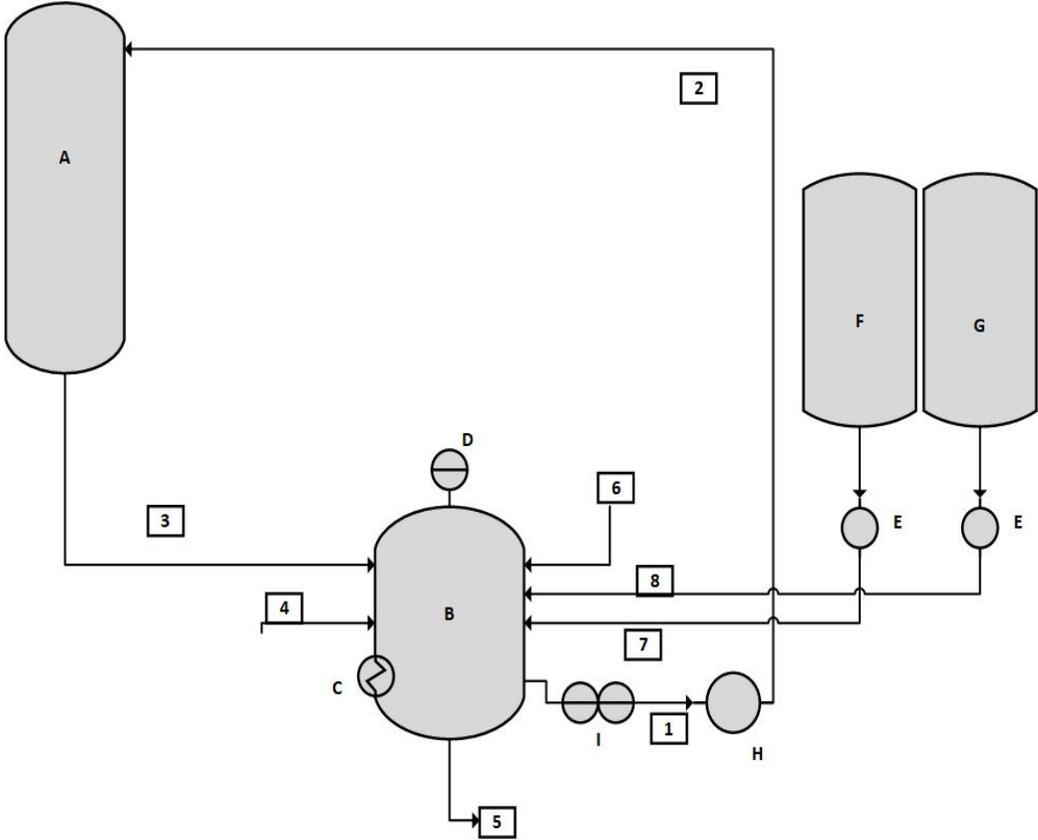


Figura 5.1: Diagrama de flujo de la planta industrial.

6 Estudio económico y presupuesto

Una vez se ha hecho el dimensionado a nivel industrial, en este apartado se hará una estimación aproximada del coste que tendría este proceso de regeneración y se comparará con uno de los procesos de regeneración que hay hoy en día.

6.1 Gastos de Inversión.

Los gastos de inversión son aquellos gastos que se han destinado a la construcción de la infraestructura del proceso, para posteriormente ponerla en marcha. En este apartado se encuentran todos los bienes que se aportan con anterioridad a la puesta en marcha.

Teniéndose en cuenta todos los elementos necesarios para montar la planta, a excepción en este caso de la columna de adsorción, ya que se supondrá que ya se ha montado en la planta anteriormente para el proceso de adsorción.

Empezando con la reacción se necesitará un depósito cilíndrico con una capacidad de 8 m^3 , en el cual, se realizará la mezcla de reactivos para la producción de la disolución Fenton, este depósito tendrá un sensor de nivel de tipo boya, ya que el volumen necesario de la disolución será de 7 m^3 . Éste será proporcionado por la empresa Gesa. También llevará incorporado un sensor de temperatura y pH. distribuido por la empresa WTW, éste servirá para saber qué medidas tiene la disolución, ya que debe de estar a una temperatura de 30°C y un pH de 3. Para recircular la disolución Fenton se utilizará una bomba centrífuga, proporcionada por la empresa Tecnum, modelo *BHCKK-5.16*. Esta bomba deberá alcanzar como mínimo una altura de 2,78 m, por lo que se utilizará una con una

potencia de 11 kW y con un caudal de $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, se podrá observar con más detalle las especificaciones técnicas en el anexo 8.7.

Para la dosificación de los reactivos se necesitarán dos depósitos cilíndricos con un volumen de $1,5 \text{ m}^3$, en estos depósitos estarán los reactivos H_2SO_4 y H_2O_2 , todos los depósitos serán proporcionados por la empresa PPA. Para la dosificación de los reactivos se necesitarán dos bombas dosificadoras, con una potencia de 0,12 kW cada una y un caudal de $21,6 \text{ L h}^{-1}$, son bombas de membrana pudiéndose observar las características con mayor detalle en la ficha técnica en el anexo 8.7. Ambas bombas las proporciona la empresa Milton Roy, siendo el modelo *MS5622*.

Por último, para calentar el tanque de disolución, en el dimensionado se han planteado dos opciones, la primera será la utilización de una resistencia de 12 kW, tardando unas 7 horas aproximadamente de calentamiento. Por otro lado, la posibilidad de utilizar 4 resistencias de 12 kW cada una, tardando en calentar el depósito unas 2 horas. Cada resistencia tiene un valor de 41.90 €. Haciendo unos cálculos aproximados de la diferencia que supondría utilizar 4 resistencias a utilizar 1, que se pueden observar en el anexo 8.5, podemos ver que no hay gran diferencia entre ambas, por lo que se utilizarán 4 resistencias ya que en cuanto a tiempo si hay una gran diferencia, tardando así 2 horas en calentar el depósito.

En la tabla 6.1, se encontrará un resumen del equipo necesario junto con su coste. En este resumen no se podrá contemplar el precio de la resistencia ya que no ha sido posible encontrar un precio real.

Una vez sabemos el coste de la inversión inicial, se podrá conocer el valor de los gastos de inversión, suponiendo que la maquinaria presentará un correcto funcionamiento durante 15 años. Los gastos de inversión se podrán calcular con la ecuación (6.1), donde:

- *G.I*: Son los gastos de inversión. (€/año).
- *I*: Inversión inicial. (€).
- *V*: Vida útil del correcto funcionamiento de la maquinaria. (Años).

Tabla 6.1: Tabla resumen del equipo necesario.

Concepto	Coste (€)
Depósito de 8 m ³	4,293.00
Depósitos reactivos de 1,5 m ³	6,609.60
Bombas dosificadoras	3,280.50
Sensor Temperatura y pH	1,275.80
Sensor de nivel	189.09
Bomba impulsión Fenton	2,916.00
4 Resistencias eléctrica (12 kW)	167.60
Total	18,731.59

$$G.I = \frac{I}{V} \quad (6.1)$$

El resultado de los gastos de inversión serán de 1,248.77 € (€/año).

6.2 Gastos de Explotación.

Los gastos de explotación son los gastos que se prevén para que el proceso esté en funcionamiento. Estos gastos serán una aproximación ya que no se podrán saber con exactitud hasta que el proceso no esté en marcha.

6.2.1 Costes Fijos.

Son los costes que son independientes de la producción, estos costes serán regulares durante todo el periodo de tiempo estudiado.

Amortización.

Los gastos de amortización, son los gastos calculados una vez el bien se ha adquirido, éste debe ser usado por un periodo de tiempo. En este caso se seguirá el sistema de amortización constante, por lo que la ecuación será la siguiente, (6.2).

$$A = \frac{G.I}{C} \quad (6.2)$$

Donde:

- *A.* Amortización de la instalación. (€/m³)
- *G.I.* Gastos de inversión. (€/año)
- *C.* Cantidad de carbón regenerado.(kg/año)

En este estudio, se van a comparar los gastos que se necesitarían para regenerar un kg de carbón, por lo que finalmente, los gastos de amortización serán de 3.06 €/kg.

Mantenimiento.

Los gastos de mantenimiento, estos se nombrarán con el símbolo (M). Estos hacen referencia a los gastos que la empresa asume para mantener en perfectas condiciones todas las maquinarias necesarias en el proceso. Dentro de estos gastos no se tendrán en cuenta los gastos de fábrica, ya que estos los cubren las garantías de las máquinas.

Estos gastos corresponden al 2 % de los gastos de amortización por kg, por lo que el valor de estos gastos será de 0.06 €/kg.

Personal.

En este apartado, se mostrarán los gastos de personal, que estos se nombrarán con el símbolo (P), que se necesitarán para la puesta en marcha del proceso. Únicamente se tendrán en cuenta las horas que el personal se encuentre trabajando en el proceso de regeneración, las demás horas del horario laboral no se tendrán en cuenta para este estudio.

Las tareas que se deberán realizar en el puesto de trabajo serán, abrir el agua hasta que el sensor de nivel llegue al máximo establecido, una vez esté en el máximo el operario deberá cerrar la toma de agua hasta el próximo ciclo, e introducirá el FeSO_4 necesario en el depósito, una vez el pH y la temperatura lleguen a los puntos asignados, este trabajo le llevará al operario en total, 30 min durante cada ciclo.

Atendiendo al Boletín oficial de la provincia de Alicante, publicado el 14 de abril del 2023 por la excma. diputación provincial de alicante, se podrán observar los salarios establecidos, [2]. En este caso se le asignará el puesto de trabajo a un grupo de personal 2, nivel B, por lo que su salario base anual durante su jornada laboral de 40 horas semanales será de 20,831.08 €. Este valor representa el salario bruto del empleado, también, además de esto, la empresa deberá hacer frente al coste de la seguridad social.

Consultando el BOE publicado el 31 de enero del 2023, [20], a este salario base, se tendrán en cuenta los siguientes pagos adicionales:

- Contingencias comunes. (23.60 %).
- Cotización por desempleo. (5.5 %).
- Fondo de garantía salarial. (0.2 %).
- Fondo de formación profesional. (0.6 %).
- Mecanismo de equidad intergeneracional (MEI). (0.5 %).

En la tabla 6.2, se observarán los gastos a los que tendrá que hacer frente la empresa en cuanto a gastos de personal. En esta tabla se mostrarán los gastos durante la jornada semanal de 40 horas, y la parte del salario que irá dirigido al proceso de regeneración, ya

que el operario utilizará 30 minutos de su jornada en este proceso. Ya que el año tiene 52 semanas, se mostrará el salario bruto por semana.

Tabla 6.2: Tabla del salario laboral del empleado.

Concepto	Coste 40 H (€)	Coste 30 min. (€)
Salario base	400.60	5.00
Contingencias comunes	94.54	1.18
Cotización por desempleo	22.03	0.28
Fondo de garantía salarial	0.80	0.01
Fondo de formación profesional	2.40	0.03
MEI	2.00	0.025
Total	522.37	6.53

Finalmente, podemos decir que 6.53 € por ciclo, del salario del operario, serán destinados para el proceso de regeneración.

6.2.2 Costes Variables.

Son los costes que hacen referencia a aquellos elementos que cambian de forma proporcional a la cantidad de producto tratado. Aumentando o disminuyendo de forma directa a la cantidad de carbón tratado.

Material y productos químicos.

En este apartado se encuentran los costes de reactivos necesarios para la regeneración del carbón activo. Para calcular estos gastos será necesario saber qué cantidad de carbón se va a tratar en cada ciclo.

Primeramente, se necesitará H_2SO_4 , para la regulación del pH del agua, ya que este tiene que encontrarse a un $\text{pH} = 3$. Este producto puede encontrarse a nivel industrial, siendo así más barato. Para este producto se ha elegido como proveedor el grupo Quisaba. Se utilizará un H_2SO_4 con una riqueza del 98 %, y un precio de 0.26 € por kg, los 25 kg costarán unos 6.50 €. Luego, el reactivo FeSO_4 , será suministrado por el proveedor Vadequímica, con un precio de 28.80 € los 25 kg. Por último, el peróxido de hidrógeno será aprovisionado por la empresa Letslab, este reactivo se venderá en bidones de 1000 L con un precio de 2,400 €. En la tabla 6.3, se observará un resumen de la cantidad de material necesario y su coste.

Tabla 6.3: Cantidad y precio de los productos químicos necesarios.

Material	Cantidad por unidad	Precio (€/Ud.)	Cantidad necesaria (1 ciclo)	Precio (€/ciclo)
H_2SO_4	1 kg	0.26 €	0,686 kg	0.18 €
FeSO_4	25 kg	28.80 €	0,350 kg	0.40 €
H_2O_2	1000 L	2,400.00 €	1,72 L	4.12 €

Por lo tanto, teniendo en cuenta todos los materiales utilizados en el ciclo, cada ciclo tendrá un coste de 4.7 €/ciclo, siendo al final 0.0115 €/kg.

Energéticos.

Los gastos energéticos, apuntan al coste de energía necesario para que tenga lugar el proceso. Será necesario conocer la potencia total de la planta, para ello se necesitará la ecuación del gasto energético (6.3), en esta ecuación se tendrá en cuenta el tiempo que usa el proceso por ciclo, los ciclos y la cantidad de carbón a tratar. Para este ensayo, se estudiará para un ciclo ya que queremos saber que cuesta la energía para regenerar un kg.

$$E = \frac{C_w \cdot W \cdot D \cdot t_D}{C} \quad (6.3)$$

Donde:

- E . El gasto energético de la planta ($\text{€}/\text{Kg}$).
- C_w . Coste de potencia ($\text{€}/\text{kWh}$).
- W . Potencia de la planta (kW).
- D . Ciclos que el proceso está en funcionamiento (Ciclos).
- t_D . Tiempo que funciona el proceso (h/ciclo).
- C . Cantidad de carbón (Kg).

El coste de la potencia será facilitado por la empresa (ENDESA) para empresas, así se obtendrá cuanto vale el kW, siendo su precio $0,2990 \text{ €}/\text{kWh}$, durante todos los tramos horarios, que serán 6. Para saber la potencia de la planta, tendremos que tener en cuenta, la bomba centrífuga que recircula la disolución Fenton a la columna, esa tendrá una potencia de 11 kW . Por otro lado, la potencia de las resistencias utilizadas que serán de 4, siendo éstas de 12 kW , cada una. La potencia utilizada tanto en los sensores, como en las bombas dosificadoras, son prácticamente despreciables por lo que no se tendrán en cuenta.

En cuanto al tiempo diario que estarán en marcha, la bomba de recirculación únicamente se utilizará cuando el proceso comience a realizarse, sabemos que 1 ciclo tiene una duración de 30 minutos. Por otro lado, las resistencias se pondrán en marcha durante dos horas antes del comienzo del ciclo. Para finalizar se conoce que la planta trabajará durante 248 días, que son los días laborales durante un año, pero depende de la cantidad de veces que se quiera regenerar el carbón, por lo que se calcularán los gastos de energía en 1 ciclo. Y la cantidad de carbón tratado será de 408 kg cada vez.

Para saber que gasto energético tiene cada aparato, se ha utilizado la ecuación (6.3), planteándose los datos en el anexo 8.6, como se puede observar, la bomba de recirculación tiene un consumo de $0.004 \text{ €}/\text{kg}$, en cuanto a las 4 resistencias tendrán un gasto de $0.070 \text{ €}/\text{kg}$.

Siendo el coste total la suma de todos, $0.074 \text{ €}/\text{kg}$.

6.3 Costes Totales.

Por último, se obtendrá el coste total de la planta, en este apartado se sumarán los gastos de inversión del proceso, junto con los costes de operación, estos costes serán la suma de todos los costes de explotación, por lo que los costes de operación se podrán calcular en la ecuación (6.4) Donde las incógnitas son:

- Gastos de personal (G_P).
- Gastos de mantenimiento (G_M).
- Gastos Materiales y productos químicos (G_Q).
- Energéticos (G_E).

$$C_{OP} = G_P + G_M + G_Q + G_E \quad (6.4)$$

Los gastos serán los siguientes:

- G_P serán de 6.53 €/ciclo.
- G_E serán de 0.074 €/kg.
- G_M serán de 0.061 €/kg.
- G_Q serán de 0.0115 €/kg

Éstos se encuentran en unidades diferentes, por lo que los gastos de personal serán los gastos en los que el operario trabajará durante un ciclo, para tener una idea aproximada de que cuesta el kg regenerado, el coste personal se dividirá por los kg de la columna que en este caso son de 408 kg. En la siguiente tabla se podrá observar un resumen de los gastos de operación obtenidos en un 1 kg de carbón regenerado.

Siendo los valores de costes de operación totales iguales a 0.16 €/kg. Cuando se han obtenido los costes de operación y sabiendo los gastos de inversión son de 1,248.77 €/año,

Concepto	Valor (€/kg)
Gastos Personal	0.016
Gastos Energía	0.074
Gastos Mantenimiento	0.061
Gastos Reactivos	0.0115

Tabla 6.4: Tabla resumen de gastos de operación

siendo los gastos de inversión por kg de 3.06 €. En total serán unos gastos totales para tratar 1 kg de carbón activo de 3.22 €.

6.4 Costes regeneración térmica.

Por otro lado, se calculará cuánto dinero cuesta mandar el carbón activo a una planta de regeneración, para ver si nuestro estudio es favorable a nivel económico, para ello se ha calculado que precio tiene mandar el carbón usado a otra empresa, la más cercana es la empresa ChiemVall, localizada en Castalbisbal, Barcelona, a 526 km. Se supondrá que en la planta hay 8 filtros de carbón activo, por lo que se llevarán a regenerar 4 mientras que los otros 4, están en funcionamiento, cada filtro tiene 408 kg de carbón activo. Para el transporte de 1,632 kg únicamente el transporte cuesta 460.00 €, es decir, 0.28 €/kg. Sin contar con el proceso de regeneración.

Sin contar con los gastos de operación de la regeneración térmica, el precio del transporte únicamente, supera el valor de los gastos de operación de la regeneración estudiada. Por lo que, se puede decir que sale mucho más económico a largo plazo regenerar el carbón activo en la misma planta, sin tener que transportarlo. Además, como se ha mencionado en la sección 1.5, al tener que sacar el carbón y volverlo a inyectar una vez está regenerado, se pierde cantidad de carbón activo, éste deberá sustituirse por carbón virgen, por lo que el coste de esta regeneración aumentará.

7 Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados experimentales, el dimensionado a escala industrial y el estudio económico de dicha planta, se observan las siguientes conclusiones acerca de este proyecto.

- En este estudio se ha demostrado el efecto positivo que tiene el aumento de la temperatura en la regeneración de carbón activo mediante el proceso Fenton.
- La capacidad de adsorción del contaminante se ve afectada de forma negativa a la hora de aumentar la temperatura, ya que conforme ésta aumenta la capacidad de adsorción disminuye.
- En este estudio también se ha comprobado que al aumentar la temperatura durante regeneración utilizando el proceso Fenton, el tiempo ha sido menor. Por lo que, se puede decir que, a mayor temperatura mayor es la velocidad de regeneración.
- Se ha comprobado que la regeneración a 30 °C, tiene una mejor respuesta en cuanto a tiempo de operación, ya que tarda la mitad de tiempo que a temperatura ambiente en llegar a regenerarse. Por lo que, la temperatura óptima para la regeneración se ha comprobado que es en torno a 30 °C.
- Se ha escalado el proceso de regeneración suponiendo columnas de carbón activo comerciales de unos 400 kg de capacidad y se han calculado los reactivos y equipos necesarios para dicho proceso.

- En cuanto al estudio económico realizado, es mucho más rentable la regeneración in situ que trasladar el carbón hasta otra empresa para su regeneración, ya que solo el precio del traslado cuesta el doble que el precio de operación en la misma planta.

8 Anexos

8.1 Anexo I. Cálculos para saber qué cantidad de H₂O₂ se necesita.

Se procederá a explicar los cálculos de la cantidad de peróxido necesario de manera general, para posteriormente poder aplicarlos en cada ensayo. Estos cálculos se realizarán durante todos los ensayos en cada regeneración del carbón activo, dependiendo de la cantidad de colorante absorbido por el carbón, la cantidad de peróxido en cada regeneración será diferente.

Primeramente, tendremos unos datos iniciales que se habrán obtenido previamente durante la preparación experimental. Como es el caso de la absorbancia inicial, (Abs_{in}), absorbancia final, (Abs_f), ecuación obtenida con la recta de calibración, explicada en la sección 4.2, esta será la ecuación (4.1). El procedimiento matemático será el siguiente, primero se calculará la diferencia de las absorbancias obtenidas.

$$Abs_{in} - Abs_f = Dif \tag{8.1}$$

A partir de la ecuación de calibrado, (4.1), sabiendo que la incógnita (y), será el valor de la diferencia de absorbancias, (8.1), se podrá sacar la concentración que habrá adsorbido el carbón activo durante la saturación en (mg/L).

$$Dif = 0,015 \cdot x + 0,0164$$

$$x = \frac{Dif - 0,0164}{0,015} \quad (8.2)$$

Además se hará una conversión para obtener la concentración real que tiene el volumen donde se ha saturado el carbón activo, a la incógnita del volumen se le llamará V_1 , en cuanto a la de la concentración se le llamará j .

$$\frac{x \text{ (mg)}}{1 \text{ (L)}} = \frac{j \text{ (mg)}}{V_1 \text{ (L)}} \quad (8.3)$$

$$j = \frac{x \text{ (mg)} \cdot V_1 \text{ (L)}}{1 \text{ (L)}} \quad (8.4)$$

Previamente, como se ha explicado en los resultados obtenidos, se realizó una DQO para averiguar cuántos $\frac{\text{mg O}_2}{\text{L}}$ se necesitan para regenerar una disolución de $20 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$. Por tanto, para una concentración (j), se realizará la siguiente conversión. Se le llamará a la cantidad de mg de oxígeno para la concentración (j), z . Posteriormente, el valor de z , se pasará a $\frac{\text{mmol O}_2}{\text{L}}$ utilizando la masa molar del oxígeno.

$$\frac{20 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{57 \left(\frac{\text{mg O}_2}{\text{L}}\right)} = \frac{j \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{z \left(\frac{\text{mg O}_2}{\text{L}}\right)} \quad (8.5)$$

$$z \left(\frac{\text{mg O}_2}{\text{L}}\right) = \frac{57 \left(\frac{\text{mg O}_2}{\text{L}}\right) \cdot j \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{20 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} \quad (8.6)$$

Una vez hecho esto, sabemos por la ecuación del peróxido (8.7), que para formar una molécula de H_2O_2 se necesitan dos moléculas de oxígeno, por ende, pasamos los mmoles de oxígeno por litro a mmoles de peróxido por litro, para más adelante pasarlos a mg de peróxido por litro, a partir de la masa molar del H_2O_2 .



Utilizando el dato del volumen que se aplicará para la regeneración podremos sacar los mg de peróxido necesarios y se pasarán a gramos, siendo la incógnita m . Como el peróxido se encuentra en estado líquido, el siguiente paso será sacar el volumen necesario que habrá que coger de la botella de reactivo. Esto lo deduciremos a partir de la densidad del reactivo, que en este caso es igual a $\rho = 1,11 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$, y con la fórmula de la densidad.

$$\rho = \frac{m(\text{g})}{v(\text{mL})} \quad (8.8)$$

En cuanto al peróxido que hay en el laboratorio no es puro, éste tiene un porcentaje en peso del 33 %. Por tanto, se calculará el volumen que se necesita de la botella y finalmente se añadirá el doble para evitar que no se realice la regeneración completa, mostrando el resultado final con la variable, V_f , expresado en μL .

8.2 Anexo II. Cálculos para saber que cantidad de hierro se necesita.

Primero, se cogerá el peso molecular del hierro que es de $55,85 \text{ mg L}^{-1}$, y el peso molecular de la sal de hierro utilizada, que es de $278,02 \text{ mg L}^{-1}$, para poder calcular que porcentaje de hierro puro tiene esta sal, siendo este de un 20 %. Como se sabe que el 20 % es una quinta parte del producto, se multiplicará por 5 por cada 10 litros de disolución. Si hacemos una conversión sabremos que para 100 mL de disolución se necesitarán 5 mg de sal de hierro.

8.3 Anexo III. Cálculo de la cantidad de H_2SO_4 necesario para llegar a un $\text{pH} = 3$

Para saber que cantidad de ácido sulfúrico es necesaria para que un litro de agua tenga un pH de 3, se necesita saber que concentración de H^+ hacen falta. Para ello se utilizará la ecuación (8.9). Como sabemos que el pH tiene que ser 3, se despejará la concentración de protones. Se puede observar que se necesita 1 mmol por cada litro de agua.

$$\begin{aligned} \text{pH} &= -\log [\text{H}^+] \\ [\text{H}^+] &= 1 \cdot 10^{-3} \\ [\text{H}^+] &= 0,001\text{M} \end{aligned} \tag{8.9}$$

8.4 Anexo IV. Cálculo de la potencia necesaria para calentar el depósito a 30 °C en 1 hora.

La ecuación del calor específico, se puede observar en la ecuación (8.10), donde los parámetros serán:

- m : Masa de fluido del depósito. (kg).
- c_P : Calor específico del agua. (J/kgK).
- ΔT : Incremento de temperatura. (K).

$$Q = m \cdot c_P \cdot \Delta T \tag{8.10}$$

Siendo el resultado del calor específico de:

$$\begin{aligned} Q &= 7,000,00\text{kg} \cdot 4,184,00 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot [303 - 293] (\text{K}) \\ Q &= 292880000\text{J} = 292880\text{kJ} \end{aligned} \tag{8.11}$$

Por lo tanto, sabemos que 3600 kJ son 1 kW h. Por lo que con una conversión obtenemos que se necesitan 81,35 kW en una hora para alcanzar los 30 °C.

8.5 Anexo V. Elección de resistencias.

Como se ha mencionado en la sección del dimensionado, hay dos planteamientos para el calentamiento del tanque.

Calentar durante 7 horas con una resistencia de 12 kW. En este planteamiento, teóricamente se ahorrará en costes de instalación y energía, pero se perderá tiempo ya que tarda 7 horas en calentarse, para cada ciclo.

En cuanto a gastos energéticos, con la ecuación (6.3) se obtendrá cuánto cuesta mantener una única resistencia. Se sabe que son 7 horas porque se hace una conversión con la potencia de la resistencia y la potencia necesaria para calentar el tanque en una hora.

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{C_w \cdot W \cdot D \cdot t_D}{C} \\
 E &= \frac{0,2990 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 7}{408} \\
 E &= 0,0616 \text{ €/kg}
 \end{aligned}
 \tag{8.12}$$

El coste de instalación de una sola resistencia será de 41.90 €. Siendo un total de costes de instalación de 18,605.89 €.

Calentar durante 2 horas con cuatro resistencias de 12 kW. En este planteamiento, se ahorrará en tiempo ya que tarda 2 horas en calentarse, pero se perderá en costes de instalación y energía.

En cuanto a gastos energéticos, con la ecuación (6.3) se obtendrá cuánto cuesta mantener cuatro resistencias. Se sabe que son 2 horas porque se hace una conversión con la potencia de la resistencia y la potencia necesaria para calentar el tanque en una hora.

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{C_w \cdot W \cdot D \cdot t_D}{C} \\
 E &= \frac{0,2990 \cdot 48 \cdot 1 \cdot 2}{408} \\
 E &= 0,07 \text{ €/kg}
 \end{aligned}
 \tag{8.13}$$

El coste de instalación de las 4 resistencias será de 167.6 €. Siendo un total de costes de instalación de 18,731.59 €.

Por tanto, si observamos los costes energéticos, no hay mucha diferencia entre ambos, y en cuanto a instalación sólo se diferencian por 125.7 €. Por lo que será preciso introducir las 4 resistencias, ya que los costes no varían entre ambos, pero el tiempo entre ellos si.

8.6 Anexo VI. Cálculo de los gastos energéticos de cada equipo.

La ecuación que se utilizará será la explicada anteriormente, (6.3), donde C_w , es el coste de la potencia, W , es la potencia del equipo, D , será el número de ciclos que se utilizaría el equipo, y por último t_D , es el tiempo que estaría en funcionamiento el equipo.

Bomba de recirculación. Esta bomba se utilizará cuando el proceso de regeneración se ponga en marcha, este proceso tarda 30 minutos, donde el coste de la potencia será de 0.2990 €/kWh.

La potencia del equipo (W) será de 11 kW, y se utilizará durante 30 minutos (t_D), y 1 ciclo (D).

$$E = \frac{C_w \cdot W \cdot D \cdot t_D}{C}$$

$$E = \frac{0,2990 \cdot 11 \cdot 1 \cdot 0,5}{408} \quad (8.14)$$

$$E = 0,004 e/kg$$

Resistencia. Para esta bomba el coste energético se encontrará en dos tramos distintos pero con el mismo precio, con un coste de 0.2990 €/kWh, en el anexo anterior, se ha calculado que el tanque tarda en calentarse 2 horas, que será el tiempo que estén las resistencias en funcionamiento.

La potencia de la bomba (W) será de 12 kW cada resistencia, por lo que como se utilizarán 4, la potencia será de 48 kW, durante un ciclo y un tiempo de 2 horas.

$$E = \frac{C_w \cdot W \cdot D \cdot t_D}{C}$$
$$E = \frac{0,2990 \cdot 48 \cdot 1 \cdot 2}{408} \quad (8.15)$$
$$E = 0,070\text{€}/\text{kg}$$

8.7 Anexo VII. Fichas técnicas de los equipos seleccionados.

 <p>10 Grande Rue – 27 360 Pont-Saint-Pierre – France BP 8313 – 27 166 Val de Reuil Cedex – France Tel : +33 (0)2 32 68 20 00 nr14.contact@miltonroy.com</p>		PV DE CONTRÔLE TEST CERTIFICATE	
Pompe doseuse Dosing pump		N° Affaire/ligne Sales order/Line	19000910/004
Code produit Product code		Type	GA25D4T325LPH@12BARWITHMOTOR
N° cde. client Customer order n°		N° de série Serial n°.	201901230015
PC190032/A		N° repère Tag n°.	-
CARACTERISTIQUES Characteristics			
Débit nominal Rated capacity	21.60 l/h	à	12.0 bar g
Marque Brand	LAMBERT	Type Type	MS5622
No. de série Serial n°.	180807525	Tension Voltage	380 V
Puissance Power	0.12 kW	Fréquence Frequency	50 Hz
Vitesse Speed	3250 tr/mn	Intensité(maxi.) Current value (max.)	0.45 A
CONDITIONS D'ESSAI Test conditions			
Intensité absorbée Absorbed Current	0.31 A	à	400V-50HZ
Réf. banc d'essais Test bench ref.	Poste 01	Position vernier Vernier setting	100 %
Type d'essai Test Type	A1		
Valeur mesurée Measured value		Instrument de mesure Measurement instrument	
Intensité / Intensity		INTENSITE0012G	
Pression / Pressure		CP0016G	
Débit / Flow		BAL0022G	
Pression de refoulement Discharge pressure	12.0 bar g		
Débit mesuré Measured delivery	21.96 l/h		
Tarage de soupape interne Internal valve setting	0.0 bar g		
Essai d'étanchéité Leak test	13.8 bar g		
Relevés conformes aux spécifications. Measurements are conform with specifications.			
Observations Remarks		Essayé à PONT-SAINT-PIERRE le Tested in PONT-SAINT-PIERRE on	08/02/20 9
		Contrôleur Controller	Damiens Christophe
A été testé conformément à IT/10/202 Tested in accordance with			
Version imprimée/numérique valide sans signature Computer print out valid without signature		AQFORMOP007-Page 1/1	

Figura 8.1: Ficha técnica bomba dosificadora de 0,12kW

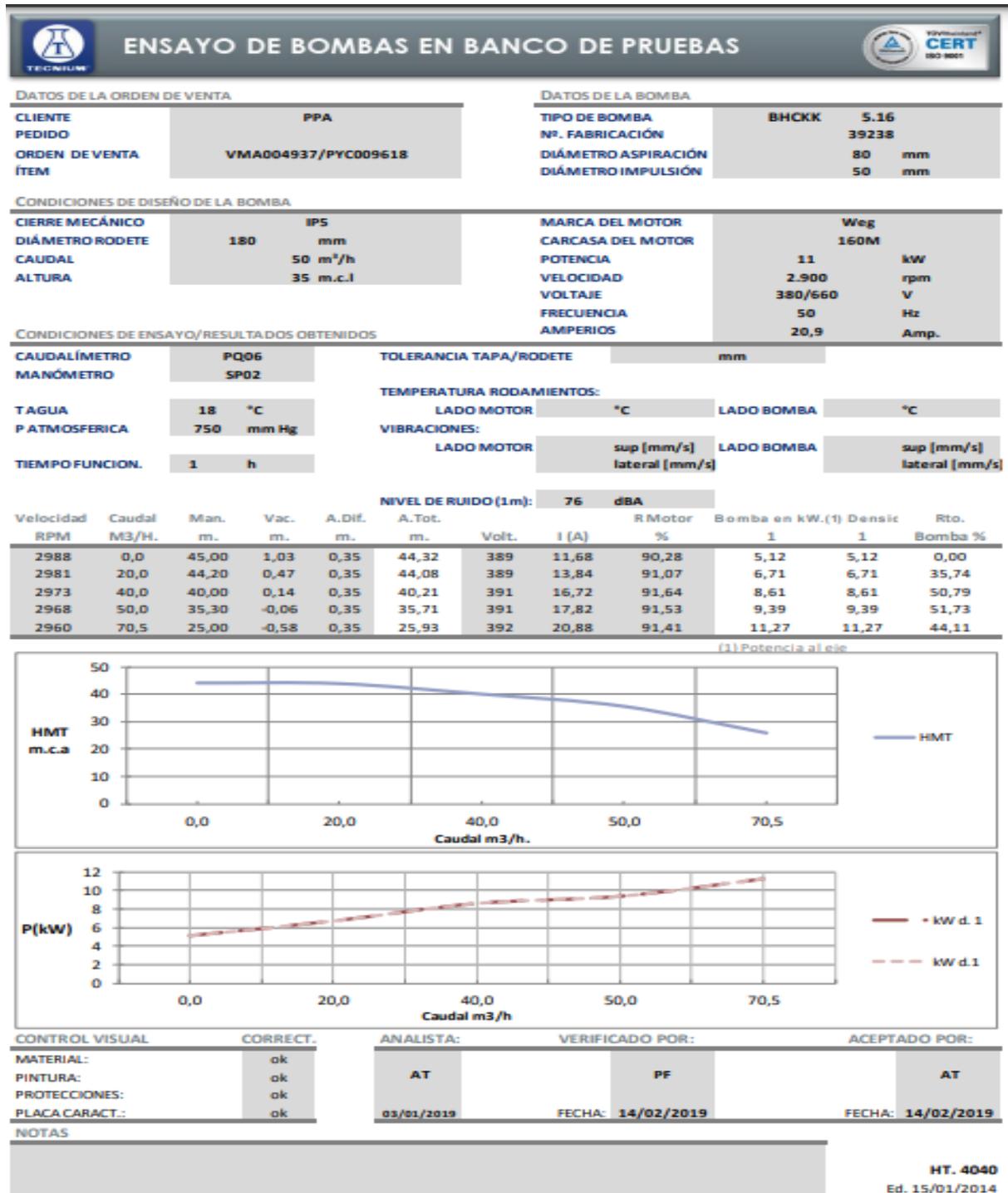


Figura 8.2: Ficha técnica de bomba centrífuga de 11kW

Bibliografía

- [1] F. T. Ademiluyi y J. C. Nze. «Sorption characteristics for multiple adsorptions of heavy metal ions using activated carbon from Nigerian bamboo.» En: *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* 4 (2016), págs. 39-48 (vid. pág. 7).
- [2] excma. diputación provincial de alicante. «DIRECCIÓN TERRITORIAL DE ECONOMÍA SOSTENIBLE, SEC. PRODUCT., COMERCIO Y TRABAJO». En: 73 (2023) (vid. pág. 65).
- [3] M Ángeles Fontecha-Cámara et al. «Temperature dependence of herbicide adsorption from aqueous solutions on activated carbon fiber and cloth». En: *Langmuir* 22.23 (2006), págs. 9586-9590 (vid. pág. 13).
- [4] Antonio Arques Sanz et al. *Procesos químicos y fotoquímicos ambientalmente benignos para la degradación de efluentes acuosos industriales*. Marfil, 2009 (vid. págs. 5-7, 19, 20).
- [5] Lissette Orta Arrazcaeta. «Contaminación de las aguas por plaguicidas químicos». En: *Fitosanidad* 6.3 (2002), págs. 55-62 (vid. págs. 21, 33).
- [6] Damià Barceló y Mira Petrovic. «Emerging contaminants in wastewaters». En: *Trends in Analytical Chemistry* 11.26 (2007), pág. 1019 (vid. pág. 5).

- [7] J Carbajo et al. «Increasing photo-Fenton process efficiency: the effect of high temperatures». En: *Separation and Purification Technology* 271 (2021), pág. 118876 (vid. pág. 21).
- [8] Ö. Cecen F. & Aktas. *Activated carbon for water and wastewater treatment: Integration of adsorption and biological treatment*. John Wiley & Sons, Incorporated., 2011 (vid. págs. 14, 15).
- [9] Textos científicos. *REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO*. <https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/regeneracion-carbon-activo> (vid. pág. 15).
- [10] Maisa El Gamal et al. «Bio-regeneration of activated carbon: A comprehensive review». En: *Separation and Purification Technology* 197 (2018), págs. 345-359 (vid. pág. 16).
- [11] V Escalante-Pozos y ER Bandala. «Calidad del agua y su relación con alimentos: aplicación de procesos Fenton y tipo Fenton en la eliminación de contaminantes en agua». En: *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 8.1 (2014), págs. 34-47 (vid. pág. 18).
- [12] Vicent Fombuena Borràs e Iván Domínguez Candela. «GUIÓN DE PRÁCTICAS EN EXPERIMENTACIÓN EN INGENIERÍA QUÍMICA II». En: (2020) (vid. pág. 8).
- [13] Interempresas. *Alarma por el agua: solo la agricultura digital evitará el colapso agrícola por el consumo excesivo de agua*. <https://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/265040-Alarma-agua-solo-agricultura-digital-avoidara-colapso-agricola-consumo-excesivo-agua.html>. 2018 (vid. pág. 5).
- [14] Milan Králik. «Adsorption, chemisorption, and catalysis». En: *Chemical Papers* 68.12 (2014), págs. 1625-1638 (vid. pág. 11).
- [15] Jeisson Javier Landeta Tapia. «Análisis bibliográfico de tipos de isoterma de adsorción Freundlich, Langmuir y Brunauer, Emmett, Teller en zeolita para la recuperación

- ción de suelos agrícolas de la provincia de Cotopaxi en el periodo 2020.» B.S. thesis. Ecuador, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi UTC., 2020 (vid. pág. 9).
- [16] Adam W Marczewski et al. «Adsorption equilibrium and kinetics of selected phenoxyacid pesticides on activated carbon: effect of temperature». En: *Adsorption* 22 (2016), págs. 777-790 (vid. pág. 12).
- [17] María Martínez Martínez. *Reutilización del raspo de uva para la eliminación de aguas que contienen cobre*. <https://grupo3p2.wixsite.com/proyecto2/anlisis-y-resultados>. 2015 (vid. págs. 9-12).
- [18] JA Menéndez-Díaz e I Martín-Gullón. «Types of carbon adsorbents and their production». En: *Interface science and technology*. Vol. 7. Elsevier, 2006, págs. 1-47 (vid. págs. 7, 16, 17).
- [19] María Mestanza Mateos. «Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes». En: (2012) (vid. pág. 6).
- [20] Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática Ministerio de la Presidencia. *Orden PCM/74/2023, de 30 de enero, por la que se desarrollan las normas legales de cotización a la Seguridad Social, desempleo, protección por cese de actividad, Fondo de Garantía Salarial y formación profesional para el ejercicio 2023*. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-2472. 2023 (vid. pág. 65).
- [21] Sergi Beñat Morais Ezquerro y María Julia Atienza Boronat. «Efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción: Ley de Arrhenius». En: (2019) (vid. pág. 21).
- [22] Monday Musah et al. «Adsorption kinetics and isotherm models: a review». En: *CaJoST* 4.1 (2022), págs. 20-26 (vid. págs. 8, 9, 11-13).
- [23] Organización de las Naciones Unidas. *17 Objetivos para las personas y para el planeta*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>. 2023 (vid. pág. 2).

- [24] Organización de las Naciones Unidas. *Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>. 2023 (vid. págs. 3, 4).
- [25] Organización de las Naciones Unidas. *Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>. 2023 (vid. págs. 3, 4).
- [26] Organización de las Naciones Unidas. *Objetivo 2: Poner fin al hambre*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>. 2023 (vid. págs. 3, 4).
- [27] Organización de las Naciones Unidas. *Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>. 2023 (vid. pág. 4).
- [28] Organización de las Naciones Unidas. *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>. 2023 (vid. págs. 2, 4).
- [29] Roger Iván Méndez Novelo et al. «Tratamiento de lixiviados con carbón activado». En: *Ingeniería* 6.3 (2002), págs. 19-27 (vid. pág. 4).
- [30] María Concepción Ovín Ania. «Depuración de Efluentes Industriales con Carbón Activo. Adsorción de contaminantes y regeneración del adsorbente». En: (2011) (vid. págs. 14-17).
- [31] A Cabrera Reina et al. «Modelling the photo-Fenton oxidation of the pharmaceutical paracetamol in water including the effect of photon absorption (VRPA)». En: *Applied Catalysis B: Environmental* 166 (2015), págs. 295-301 (vid. pág. 18).
- [32] Carlos F Rivas et al. «Isotherma de langmuir y freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃». En: *Saber* 26.1 (2014), págs. 43-49 (vid. pág. 10).

- [33] Ricardo Rojas. «Sistemas de tratamiento de aguas residuales». En: *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales* 1.1 (2002), págs. 8-15 (vid. pág. 7).
- [34] Ainhoa Rubio-Clemente, Edwin L Chica y Gustavo A Peñuela. «Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater». En: *Ingeniería y competitividad* 16.2 (2014), págs. 211-223 (vid. pág. 18).
- [35] JL Sotelo et al. «Eliminación de compuestos organoclorados para potabilización de aguas mediante un proceso de adsorción-regeneración en carbón activado». En: *Univ. Complutense de Madrid, España* (1999) (vid. págs. 13, 14, 16).
- [36] Artur P Terzyk. «Molecular properties and intermolecular forces—factors balancing the effect of carbon surface chemistry in adsorption of organics from dilute aqueous solutions». En: *Journal of Colloid and Interface Science* 275.1 (2004), págs. 9-29 (vid. pág. 13).
- [37] Muhammad Umar, Hamidi Abdul Aziz y Mohd Suffian Yusoff. «Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate». En: *Waste management* 30.11 (2010), págs. 2113-2121 (vid. págs. 18-20).
- [38] Juan A Zazo et al. «Intensification of the Fenton process by increasing the temperature». En: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50.2 (2011), págs. 866-870 (vid. págs. 20, 21).