



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

[EMPLEO DEL PROCESO FENTON PARA LA REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO SATURADO CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS]

MEMORIA PRESENTADA POR:
[Francesca Julià Sala]

TUTORES/AS:
[Lucas Santos-Juanes Jordá; Vanesa G. Lo Iacono Ferreira]

GRADO DE [INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL]

Convocatoria de defensa: [Julio 2021]

Agradecimientos

Mis agradecimientos al profesorado de la UPV,
y a mi familia por su confianza y apoyo.

Gracias.

Agraïments

El meus agraïments al professorat de la UPV,
i a la meua família per la seua confiança i suport

Gràcies.

Resumen

El carbón activado es un adsorbente de mucho interés actualmente en nuestra industria por sus grandes capacidades de adsorción debido a su grande porosidad. Este se utiliza en ámbitos como la extracción de metales, la purificación de agua potable, en medicina veterinaria y humana para casos de intoxicación, en el tratamiento de agua residuales entre muchas otras cosas.

Este adsorbente se limita a su máxima adsorción, cuando se llega a este punto se puede volver a comprar carbón virgen o se reactiva el carbón para recuperar aproximadamente el 95% de su capacidad para adsorber.

El método más utilizado actualmente de reactivación es el térmico mediante hornos a 800°C, esta reactivación tiene como principal problema su alto coste de energía necearía y el coste de transporte ya que hay pocas empresas en el mundo encargadas de la regeneración del carbón activado por vía térmica y es necesario transportar el carbón saturado a una de estas industrias. En este proyecto se va a estudiar una alternativa que es la regeneración del carbón activado por una reacción Fenton. Además, se estudiará si realmente este método es más rentable que el más utilizado actualmente en la industria.

Palabras clave: Carbón activado, Reactivación, reacción Fenton, Rentabilidad

Resum

El carbó activat és un adsorbent de molt d'interés actualment en la nostra indústria per les seues grans capacitats d'adsorció a causa de la seua gran porositat. Aquest s'utilitza en àmbits com l'extracció de metalls, la purificació d'aigua potable, en medicina veterinària i humana per a casos d'intoxicació, en el tractament d'aigua residuals entre moltes altres coses.

Aquest adsorbent es limita a la seua màxima adsorció, quan s'arriba a aquest punt es pot tornar a comprar carbó verge o es reactiva el carbó per a recuperar aproximadament el 95% de la seua capacitat per adsorbir.

El mètode més utilitzat actualment de reactivació és el tèrmic mitjançant forns a 800 °C, aquesta reactivació té com a principal problema el seu alt cost d'energia necessària i el cost de transport ja que hi ha poques empreses en el món encarregades de la regeneració del carbó activat per via tèrmica i és necessari transportar el carbó saturat a una d'aquestes indústries.

En aquest projecte s'estudiarà una alternativa que és la regeneració del carbó activat per una reacció fento. A més s'estudiara si realment aquest mètode és més rendible que el més utilitzat actualment en la indústria.

Paraules clau: Carbó activat, Reactivació, Reacció Fenton, Rendibilitat

Summary

Activated carbon is an adsorbent of great interest today in our industry due to its great adsorption capacities due to its great porosity. This is used in areas such as the extraction of metals, the purification of drinking water, in veterinary and human medicine for cases of poisoning, in the treatment of waste water among many other things.

This adsorbent is limited to its maximum adsorption, when this point is reached, virgin carbon can be bought again or the carbon is reactivated to recover approximately 95% of its adsorption capacity.

The most used method of reactivation at the moment is the thermal one by means of furnaces at 800°C, this reactivation has as its main problem its high cost of energy required and the cost of transport since there are few companies in the world in charge of regenerating activated carbon by thermal means and it is necessary to transport the saturated coal to one of these industries.

In this project, an alternative will be studied, which is the regeneration of activated carbon by a Fenton reaction. In addition, it will be studied whether this method is actually more profitable than the one currently used in the industry.

Keywords: Activated carbon, Reactivation, Fenton reaction, Profitability

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	19
1.1 CARBÓN ACTIVADO	19
1.2 ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO	21
1.3 USO DEL CARBÓN ACTIVADO EN LA INDUSTRIA.....	23
1.3.1 Separación en fase líquida	23
1.3.2 Separación en fase gas.....	24
1.4 REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	25
1.5 TIPOS DE REACTIVACIÓN	25
1.5.1 Reactivación con ácido	25
1.5.2 Reactivación con vapor de agua.....	26
1.5.3 Reactivación térmica	26
1.5.4 Reactivación mediante la modificación del pH en solución acuosa.....	26
1.5.5 Reactivación biológica.....	27
1.6 REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO VÍA TÉRMICA.....	27
1.7 OXIDACIÓN AVANZADA	29
1.8 PROCESOS FENTON.....	29
1.8.1 Fenton.....	29
1.8.2 Fenton-like	30
1.8.3 Proceso foto-Fenton	31
1.9 HUELLA DE CARBONO.....	32
1.9.1 Ventajas que aporta el cálculo de la huella de carbono.....	34
2.OBJETIVOS.....	35
3. EXPERIMENTAL	36
3.1 CÁLCULOS PREVIOS.....	36
3.1.1 Calibrado de la bomba	36
3.1.2 Espectro UV-vis del colorante.....	36
3.1.3 Recta calibrado	37
3.1.4 Cálculo del Fe^{+3}	37
3.2 EQUIPOS UTILIZADOS Y MATERIAL UTILIZADO.	37
3.2.1 Montaje experimental.....	37

3.2.2 Espectrofotometro	38
3.2.3 pH-metro.....	39
3.2.4 Material utilizado.....	39
3.3 PROCEDIMIENTO.....	41
3.3.1 Procedimiento con el primer método con una concentración de 80mg/L.....	41
3.3.2 Procedimiento con el primer método con una concentración de 60mg/L.....	44
3.3.3 Procedimiento con el segundo método con una concentración de 80mg/L.....	44
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	47
4.1 RESULTADOS CALIBRADO DE LA BOMBA	47
4.2 ESPECTRO UV-VIS DEL COLORANTE.....	47
4.3 RECTA CALIBRADO.....	48
4.4 PROCEDIMIENTO 2.....	48
5. ESCALADO	50
5.1 NIVELES DE ESCALADO INDUSTRIAL	50
5.1.1 Laboratorio.....	50
5.1.2 Banco.....	50
5.1.3 Piloto	51
5.1.4 Semi-industrial.....	51
5.1.5 Industrial.....	51
5.2 TEORÍA DE SIMILITUD	51
5.3 CÁLCULOS DES ESCALADO.....	52
5.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO.....	53
6. CÁLCULO HUELLA DE CARBONO PARA LA REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVO MEDIANTE LA REACCIÓN FENTON	55
6.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE	56
6.1.1 Objetivo	56
6.1.2 Alcance	56
6.2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA.....	57
6.2.1 Recopilación de datos.....	58
6.3 EVALUACIÓN DE IMPACTO DE LA HCP.....	59
6.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	59

CONCLUSIONES62

BIBLIOGRAFIA.....63

ANEXOS.....65

INDÍCE DE FIGURAS

FIGURA 1: ESTRUCTURA CARBÓN ACTIVADO (FUENTE: CARBOTECNICA,2021)	19
FIGURA 2: INDUSTRIA CARBÓN ACTIVADO (FUENTE: GREENPOWE, 2010-1018)	21
FIGURA 3: SEPARACIÓN EN FASE LÍQUIDA(FUENTE :CAPITULO 3. PRINCIPALES APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO)	24
FIGURA 4: SEPARACIÓN EN FASE GAS(FUENTE :CAPITULO 3. PRINCIPALES APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO)	25
FIGURA 5: RELACIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN PARA LA FORMACIÓN DEL VAPO (FUENTE:VAPOR, 2018)	26
FIGURA 6: DIAGRAMA PROCESO DE LA REACTIVACIÓN TÉRMICA (FUENTE: TEXTOS CIENTÍFICOS, 2006).....	28
FIGURA 7: MECANISMO AUTO CATALÍTICO DEL PROCESO FOTO-FENTON (FUENTE: OXIDACIÓN AVANZADA AGUA CONTAMINADA,2016).....	31
FIGURA 8: EMISIONES DE CO ₂ EN EL MUNDO (FUENTE: EL ORDEN MUNDIAL,2021)	33
FIGURA 9: GRÁFICO DE LOS DIFERENTES ALCANCES (FUENTE: MAPAMA, 2015).	34
FIGURA 10: MONTAJE EXPERIMENTAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	37
FIGURA 11:BOMBA (ELABORACIÓN PROPIA).....	38
FIGURA 12: ESPECTOFOTOMETRO (ELABORACIÓN PROPIA).....	38
FIGURA 13: PH METRO (ELABORACIÓN PROPIA)	39
FIGURA 14: COLORANTE UTILIZADO (ELABORACIÓN PROPIA).....	40
FIGURA 15: SAL DE HIERRO UTILIZADA (ELABORACIÓN PROPIA).....	40
FIGURA 16: PERÓXIDO UTILIZADO (ELABORACIÓN PROPIA)	40
FIGURA 17: CARBÓN UTILIZADO (ELABORACIÓN PROPIA)	41
FIGURA 18: DISOLUCIÓN CON EL COLORANTE (ELABORACIÓN PROPIA).....	41
FIGURA 19: IMAGEN DEL CARTUCHO CON 5G DE CARBÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	42
FIGURA 20: IMAGEN DE LA DISOLUCIÓN DE HIERRO (ELABORACIÓN PROPIA).....	43
FIGURA 21: GRÁFICA CALIBRADO DE LA BOMBA (ELABORACIÓN PROPIA)	47
FIGURA 22: GRÁFICA DEL BARRIDO DE LA ABSORBANCIA (ELABORACIÓN PROPIA).....	47
FIGURA 23: RECTA DE CALIBRADO (ELABORACIÓN PROPIA).....	48
FIGURA 24: GRAFICA ABSORBANCIA SEGUNDO MÉTODO PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 80MG/L (ELABORACIÓN PROPIA).....	49
FIGURA 25: DIAGRAMA DEL PROCESO (ELABORACIÓN PROPIA)	54
FIGURA 26: ETAPAS CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO (FUENTE: INSTITUTO SUPERIOR DEL MEDIO AMBIENTE,2013)	55
FIGURA 27: MAPA PROCESO REGENERACIÓN MEDIANTE REACCIÓN FENTON (ELABORACIÓN PROPIA)	57
FIGURA 28: APORTE % DE EMISIONES (ELABORACIÓN PROPIA).....	59

FIGURA 29: MAPA PROCESO REGENERACIÓN TÉRMICA (ELABORACIÓN PROPIA).....60

INDÍCE DE TABLAS

<i>TABLA 1: APLICACIONES DE LOS CARBONES ACTIVADOS CON DISTINTAS MATERIAS PRIMAS (FUENTE: CARBOTECNICA,2021)</i>	20
<i>TABLA 2: COMPUESTOS QUE EL CARBÓN ELIMINA CON FACILIDAD (FUENTE: LENNTECH,2018)</i>	23
<i>TABLA 3: TABLA DE CAUDALES A DISTINTAS VELOCIDADES (ELABORACIÓN PROPIA)</i>	36
<i>TABLA 4: ABSORBANCIA DEL PRIMER MÉTODO DE 80MG/L (ELABORACIÓN PROPIA)</i>	43
<i>TABLA 5: ABSORBANCIA CON EL PRIMER MÉTODO DE 60MG/L (ELABORACIÓN PROPIA)</i>	44
<i>TABLA 6: ABSORBANCIA SEGUNDO MÉTODO DE 80MG/L (ELABORACIÓN PROPIA)</i>	46
<i>TABLA 7: TABLA RESUMEN DATOS ALCANCE 1(ELABORACIÓN PROPIA)</i>	58
<i>TABLA 8: TABLA RESULTADO CALCULO HUELLA DE CARBONO (ELABORACIÓN PROPIA)</i>	59

ABREBIATURAS

CAG	Carbón activado granular
OD	Oxígeno disuelto
DQO	Demanda química de oxígeno
DBO	Demanda biológica d oxígeno
HCP	Huella de carbono del producto
GEI	Gas efecto invernadero

1.INTRODUCCIÓN

En este apartado se van a introducir los conceptos básicos para entender el proceso que se va a realizar posteriormente. En primer lugar, se va a definir el concepto de carbón activado, como funciona su capacidad de adsorción y sus aplicaciones a nivel industrial. Seguidamente se va a explicar la regeneración del carbón activado y los distintos tipos de reactivación que existen. También se va a definir el proceso Fenton y por último la importancia del cálculo de la huella de carbón.

1.1 Carbón activado

Los átomos que forman un sólido que denominamos “carbón” se ligan mediante uniones tipo covalentes, cada átomo comparte un electrón con cuatro átomos de carbono más. Los átomos que no están en la superficie, distribuyen sus cuatro uniones en todas las direcciones, pero los átomos que, si están en la superficie, aunque estén obligados a estar ligados con cuatro átomos, lo hacen con menos espacio y se crea entre ellos un desequilibrio de fuerzas, esto lleva atrapar una molécula del fluido que rodea el carbón. Estos átomos están unidos mediante la “Fuerza de London”, esta fuerza es lo suficiente para atraer al adsorbato pero no para mantenerlo, esto permite que no se haga una estructura nueva irreversible, por lo que podemos decir que el carbón activado puede reactivarse para utilizarlo de nuevo [1,2].

Todas las partículas de carbón tienen la capacidad de adsorber. Esta función hace del carbón un buen eliminador de olores, por ejemplo, en refrigeradores [1,2].

Con este fin, el carbón puede activarse para aumentar su porosidad. Existen varios tratamientos para la activación química o física del carbón. Los materiales lignocelulósicos, son muy utilizados en el proceso de activación por su bajo coste y su gran abundancia; aunque su principal ventaja es la capacidad de adquirir carbones activados con diferentes tamaños de porosidad. Los tamaños varían según el método de preparación permitiendo una gran diversidad de carbones activados [1,2].

La estructura del carbón activado se muestra en la *Figura 1*.

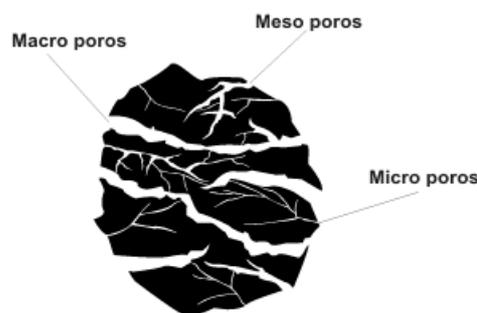


Figura 1: Estructura carbón activado (Fuente: Carbotecnica,2021)

El carbón se puede producir en polvo, en forma de gránulos o en forma de pellets cilíndricos. La forma de carbón activado le concede diferentes funciones. Por ejemplo, para la purificación de líquidos, se utiliza el carbón activado en forma de polvo. Para purificar un líquido con carbón activado, éste se introduce en un tanque con el líquido a purificar y, seguidamente, se separa el líquido mediante unos filtros específicos [2].

La forma granulada tiene el añadido de la variante por tamaño de partícula. En este formato, se pueden utilizar para la purificación de líquidos o para la purificación de gases [2].

Los pellets se aplican en el tratamiento de gases debido a que su forma cilíndrica produce una caída de presión menor [2].

Los carbones se clasifican según su estructura de más a menos ordenada. Existen carbones con estructuras muy ordenadas, esto complica la eliminación de algunos átomos y generar poros.

Las materias primas que se suelen utilizar para generar carbón activado son maderas poco duras, carbones minerales y cáscaras o huesos de vegetales. En la *Tabla 1* se hace un resumen de las aplicaciones generales:

MATERIAS PRIMAS	APLICACIÓN
Carbones activados de maderas poco duras	Declaración de líquidos
Carbones activados de minerales	Retienen compuestos de distintos tamaños
Carbones activados de cáscaras o huesos	Tratamiento de gases o potabilización de agua que provienen de pozos

Tabla 1: Aplicaciones de los carbones activados con distintas materias primas (Fuente: *Carbotecnica, 2021*)

Los colores que se encuentran en los líquidos son moléculas de tamaño grande y estas moléculas se adsorben mediante poros de gran tamaño.

Dentro de la amplia gama de carbones, el de madera es uno de los carbones con el poro más grande. El problema en estos carbones es que son poco duros, por esta razón se tiene que aplicar en forma de polvo. Cuando es necesario utilizar carbón en forma de grano, la opción más adecuada es el carbón de lignita, carbón mineral de mayor macroporosidad [2].

Este producto tiene una amplia aplicación en la industria, pero tiene un coste elevado por esta razón se ha buscado la opción de regenerarlo y poder volver hacer uso de él.

En la *Figura 2* se va a mostrar los distintos equipos necesarios para realizar una activación del carbón.

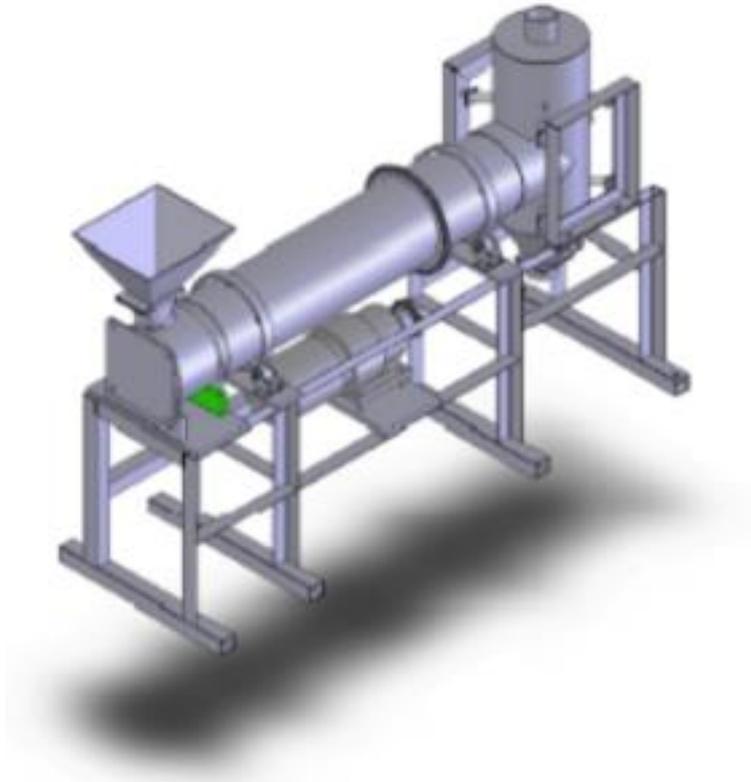


Figura 2: Industria carbón activado (Fuente: GreenPowe, 2010-1018)

1.2 Adsorción con carbón activado

La adsorción es un método donde un sólido o un líquido atrae y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.

Como se ha dicho en el apartado anterior, el carbón activado se hace especialmente para aumentar su estructura interna y así tener más capacidad de adsorción. Las principales sustancias solubles por adsorción son la adsorción por sustancias no polares, la adsorción de sustancias halogenadas, el olor, el sabor, las levaduras, varios productos de fermentación y las sustancias no polares [3].

El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos, en primer lugar, el macro transporte que es el movimiento de la materia orgánica a través del sistema macro-poroso, en segundo lugar el micro transporte que es el mismo movimiento pero a través de un sistema micro-poroso y por último la adsorción que es la adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activado en los meso-poros y micro-poros del carbón activado. La efectividad de la adsorción depende de la concentración de la sustancia en el agua, de la temperatura y sobretodo de la polaridad de la sustancia, ya que si la sustancia es polar no se elimina tanto como las sustancias no polares. Cada carbón viene representado por una isoterma de adsorción y esa viene definida por a función de Freundlich [3].

$$\frac{x}{m} = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

Dónde:

x/m = sustancia adsorbida por gramo de carbón activo

C_e = diferencia de concentración

K_f, n = constantes específicas

Los principales factores que influyen en la adsorción de compuestos en el agua son, en primer lugar, el tipo de compuesto que se quiere eliminar y, en segundo lugar, la concentración del compuesto que se quiere eliminar. Hay que tener en cuenta la presencia de otros compuestos orgánicos y el pH del agua.

Los factores que influyen en la adsorción de compuestos presentes en el aire son: el tipo de compuesto que se quiere eliminar, la concentración, la temperatura, la presión y la humedad.

En la *Tabla 2* se muestran los compuestos con muy alta probabilidad de ser eliminados por al carbón activado.

COMPUESTOS CON ALTA PROBABILIDAD DE SER ELIMINADOS POR CARBÓN ACTIVADO		
2,4-D	Deisopropiltatracina	Linuron
Alacloro	Desetilatraccina	Malation
Aldrin	Demeton-O	MCPA
Antraceno	Di-n-butilftalato	Mecoprop
Atraccina	1,2-Diclorobenceno	Metazaclor
Azinfos-etil	1,3-Diclorobenceno	2-Metil bencenamina
Bentazona	1,4-Diclorobenceno	Metil naftaleno
Bifenil	2,4-Diclorocresol	2-Metilbutano
2,2-Bipiridina	2,5-Diclorofenol	Monuron
Bis(2-Etilhexil) Ftalato	3,6-Diclorofenol	Naftaleno
Bromacil	2,4-Diclorofenoxi	Nitrobenceno
Bromodiclorometano	Dieldrin	m-Nitrofenol
p-Bromofenol	Dietilftalato	o-Nitrofenol
Butilbenceno	2,4-Dinitrocresol	p-Nitrofenol
Hipoclorito de calcio	2,4-Dinitrotolueno	Ozono
Carbofurano	2,6-Dinitrotolueno	Paration

COMPUESTOS CON ALTA PROBABILIDAD DE SER ELIMINADOS POR CARBÓN ACTIVADO		
Cloro	Diuron	Pentaclorofenol
Dióxido de cloro	Endosulfan	Propacina
Clorobenceno	Endrin	Simacina
4-Cloro-2-nitrotolueno	Etilbenceno	Terbutrin
2-Clorofenol	Hezaclorobenceno	Tetracloroetileno
Clorotolueno	Hezaclorobutadieno	Triclopir

Tabla 2: Compuestos que el carbón elimina con facilidad (Fuente: Lenntech,2018)

1.3 Uso del carbón activado en la industria

El uso del carbón activado en la industria se clasifica según la fase en la que se va a separar el compuesto, líquida o gas.

1.3.1 Separación en fase líquida

En fase líquida se utiliza, generalmente, el carbón activado en forma de polvo o granular.

Algunas de las aplicaciones de este producto en fase líquida son [4]:

- Eliminación de compuestos que generara espuma la cual afecta a los procesos de evaporación, agitación o aireación.
- Compuestos orgánicos tóxicos y metales.
- Impurezas que causan turbidez.
- Compuestos no aceptables en materias primas.
- Como catalizador, el carbón activado aporta su gran área y su resistencia tanto a la temperatura como a la presión.
- Cloro, que se elimina mediante una reacción química en la superficie del carbón activado.
- Impurezas que causan color, olor y sabor en agua potable, líquidos de procesos alimenticios y líquidos de procesos químicos.
- Trazas de iones metálicos, que se utilizan como absorbente una vez reaccionan con un reactivo orgánico.
- También se puede utilizar como base de un catalizador se impregna sobre la superficie del carbón.

Seguidamente en la *Figura 3* se van a mostrar dos ejemplos de la separación en fase líquida



Figura 3: Separación en fase líquida(Fuente :Capítulo 3. Principales aplicaciones del carbón activado)

1.3.2 Separación en fase gas

Las aplicaciones en fase gas se basan en la eliminación de [4]:

- Olores en habitaciones, generados en procesos industriales o plantas de tratamientos industriales o en bodegas y transportes.
- Compuestos orgánicos en aire o gases de escape.
- Gases radioactivos.
- Contaminantes generados en procesos industriales.
- Etileno generado en algunos alimentos.
- Vapores de ácidos, esto se consigue gracias a que se impregna el carbón un compuesto que reaccione al contaminante que se quiere adsorber.

En la *Figura 4* se muestran 3 ejemplos de la superación en fase gas.





Figura 4: Separación en fase gas(Fuente :Capítulo 3. Principales aplicaciones del carbón activado)

1.4 Regeneración del carbón activado

Los contaminantes se quedan en el carbón activado granular (CAG) mediante la adsorción física, esta es reversible, por lo que se puede llegar a lograr la desorción consiguiendo casi el 90% de rendimiento del CAG.

El CAG tienen una estructura muy estable por lo que se puede someter a condiciones distintas y no se verá afectado. Es resistente a temperaturas elevadas, no se ve afectado por ácidos. Basado en estas propiedades, existen métodos de reactivación o regeneración con los que se elimina la mayor parte de adsorbatos y sustancias orgánicas e inorgánicas retenidas en la superficie del carbón [5].

1.5 Tipos de reactivación

Existen diferentes procesos para reactivar el carbón, los cuales se van a explicar en los siguientes apartados. La reactivación más utilizada en la actualidad es la reactivación por vía térmica.

1.5.1 Reactivación con ácido

Cuando las partículas están contaminadas con carbonato o con hidroxilo de calcio la reactivación térmica no es capaz de eliminar estos compuestos, por esta razón se hace un lavado en una solución ácida. El ácido que más se utiliza para este lavado es el clorhídrico. Se prepara una solución al 5% y se le añade el carbón [5]. La eliminación de los compuestos puede durar entre 10 y 40 horas pero se puede agilizar el proceso si se calienta la solución a unos 60° C. Antes de la reactivación, es decir, cuando el carbón está contaminado, el carbón presenta un color entre blanco y gris pero cuando le hacemos la reactivación el carbón vuelve a su color negro inicial.

1.5.2 Reactivación con vapor de agua

Para la reactivación con vapor de agua, se hace circular vapor de agua a través del carbón sin que este se condense. Se desorben moléculas orgánicas con una volatilidad menor o igual a la del agua y que habían sido retenidas por adsorción física. La reactivación con vapor de agua, en el tratamiento de agua, se practica cuando el contaminante sea de olor o un compuesto de bajo peso molecular. En el caso de contaminantes de color, no es una buena opción porque los óxidos generados están muy fuertemente ligados. A mayor presión del vapor que se utiliza, mayor temperatura y mejor eficacia, como se puede apreciar en la *Figura 5* [5].

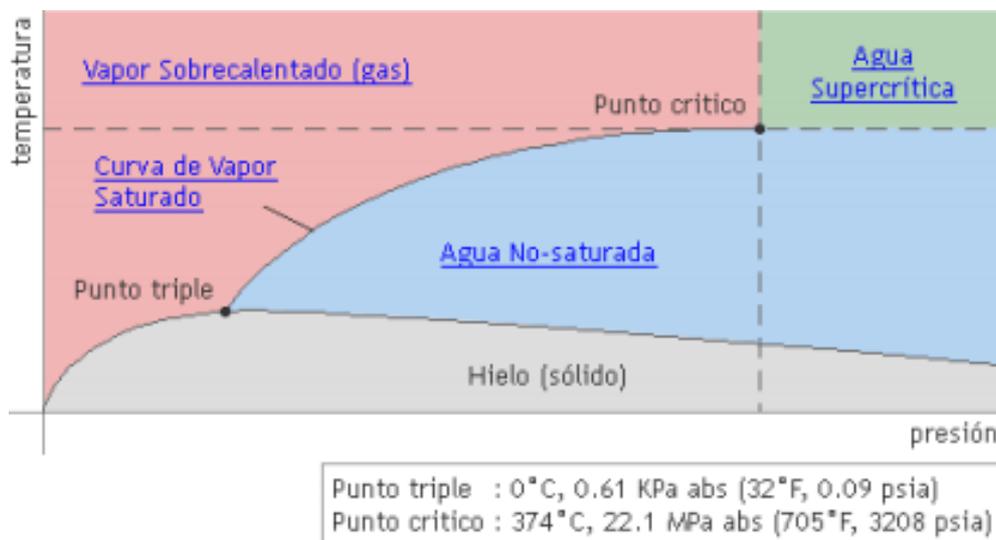


Figura 5: Relación de la temperatura y presión para la formación del vapor (Fuente: vapor, 2018)

1.5.3 Reactivación térmica

Es el método más utilizado ya que elimina la mayoría de los contaminantes orgánicos, remueve algunos compuestos inorgánicos y además destruye óxidos y grupos superficiales. En el apartado "1.6 Regeneración del carbón activado vía térmica" se explica con más dedicación este método.

1.5.4 Reactivación mediante la modificación del pH en solución acuosa

Para la reactivación, se puede aprovechar que la capacidad de retención del adsorbato específico dependa del valor del pH para reactivar el carbón. Cuando el CAG retiene un compuesto que se adsorbe en cantidades relativamente altas a valores de pH bajos y viceversa se lava con una solución al 4% de sosa [5].

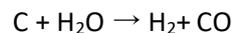
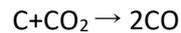
1.5.5 Reactivación biológica

La reactivación biológica se utiliza en el tratamiento de agua ya que las bacterias que se generan en la superficie se alimenta de materia biodegradable que se adsorbe. El carbón está en una columna donde circula una solución rica de nutrientes. Este método logra el 80% de eficacia de carbón en 96 horas, pero de momento no es un método muy utilizado [5].

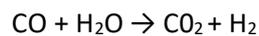
1.6 Regeneración del carbón activado vía térmica

La regeneración por vía térmica es el principal método de regeneración del carbón activado. Este proceso necesita una elevada inversión ya que es necesaria la instalación de hornos de pisos múltiples de tipo rotatorio o de lecho fluidizado. En los hornos de tipo rotatorios, el carbón va a contracorriente con una mezcla de gases de combustión y vapor sobrecalentado. Mediante este horno se puede llegar a recuperar un 90% del material. En el horno de cámara múltiple, el carbón se calienta a una temperatura muy elevada, de esta manera se recupera del 90 al 95% del material.

Las reacciones para la regeneración se presentan a continuación [6]:



Son reacciones endotérmicas por encima de cierta temperatura y de esta manera tienen lugar en el sentido señalado. La composición gaseosa cambia hasta alcanzar el equilibrio de acuerdo con la reacción:



Donde las constantes de equilibrio son:

$$K = 1,0 (870^\circ C); K = 0,7 (980^\circ C)$$

También se tiene que tener en cuenta el oxígeno dentro del reactor, minimizando la oxidación directa del carbón a CO_2 mediante una reacción exotérmica.

Seguidamente en la *Figura 6*, se muestra un esquema simplificado de una instalación de regeneración del carbón activado[6].

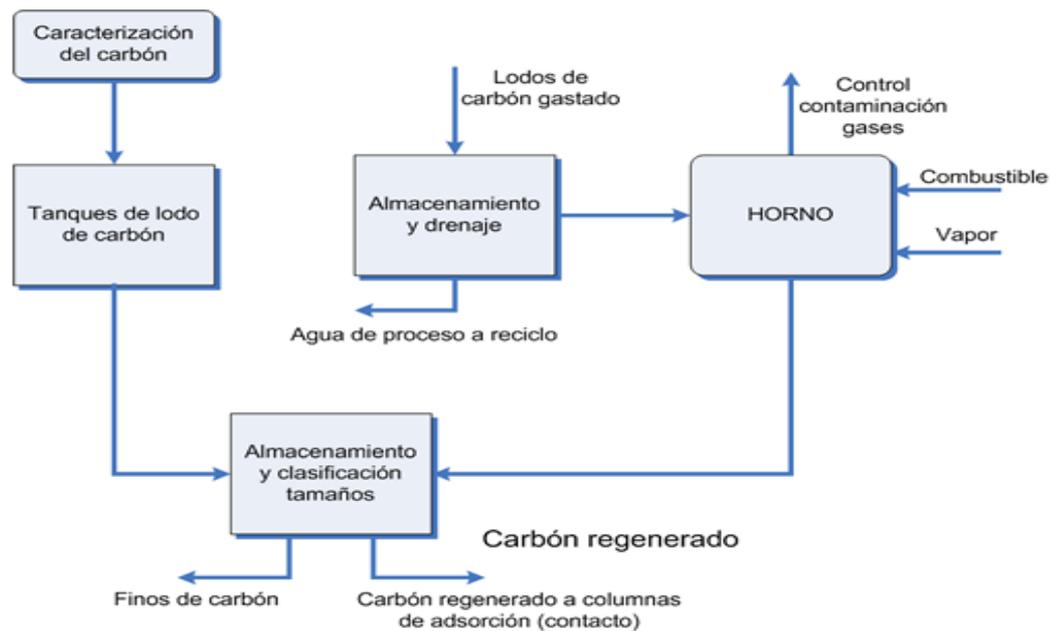


Figura 6: Diagrama proceso de la reactivación térmica (Fuente: Textos científicos, 2006)

Otra alternativa es la regeneración del carbón en polvo mediante hornos infrarrojos. El proceso es muy parecido, pero se varían algunos parámetros para obtener una buena regeneración.

Existen tres etapas principales dentro del horno. En la primera etapa el carbón, ya secado con anterioridad, aumenta su temperatura para eliminar los compuestos más volátiles y el agua. En la segunda etapa el carbón se sigue calentado hasta llegar a los 400°C, a esta temperatura se desorben las moléculas orgánicas menos volátiles. Los compuestos orgánicos que no se han desorbido se descomponen. En la última etapa, la temperatura sigue aumentando para superar los 500° C[6] . El carbón amorfo que se quedó de la etapa anterior reacciona con el vapor de agua, el oxígeno, el monóxido y el dióxido de carbono de la corriente de gases. Como resultado se forman moléculas de vapor de agua, de monóxido y dióxido de carbono.

Se intenta buscar que el carbón a la salida del horno tenga la misma densidad que tenía antes de ser utilizado.

El horno puede generar algunas dificultades en el proceso. En el caso de que el carbón esté contaminado por carbonato cálcico se le tiene que hacer un lavado con ácido para que este compuesto no entre en el horno, ya que a cierta temperatura actúa como catalizador de la reacción de gasificación del carbón gráfico. Por otro lado, se pueden formar incrustaciones, debido a la presencia de sodio y potasio y a los cambios bruscos de temperatura en el horno, estas incrustaciones van aumentando hasta que se tiene que parar el horno para quitarla manualmente, esto produce un coste adicional muy elevado [6].

Unos de los principales problemas de este método es que hay pocas industrias dónde se hace este tratamiento por lo que se tiene un alto coste del transporte del carbón.

1.7 Oxidación avanzada

Estos procesos usan oxidantes para reducir los niveles DQO/DBO y para separar ambos componentes orgánicos y los componentes inorgánicos oxidables. Los procesos de oxidación avanzada más comunes son los que se usan peróxido de hidrógeno, ozono, hipoclorito, reactivo de Fenton, oxidación con radiación ultra violeta, oxidación húmeda y oxidación húmeda catalítica.

Los procesos de oxidación avanzada son particularmente apropiados para aguas residuales que contienen recalcitrantes tóxicos o materiales no-biodegradables. Este proceso tiene un costo elevado [7].

1.8 Procesos Fenton

Unos de los procesos de oxidación avanzada son las reacciones de Fenton. En este proceso la carga contaminante se elimina con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso a presión atmosférica y a una temperatura ambiente o algo sobre-elevada (unos 40°C) [8]. Seguidamente se añade el reactivo Fenton en condiciones ácidas y temperaturas adecuadas, el proceso puede alcanzar una degradación significativa de los contaminantes orgánicos, comprendiendo en:

- Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un tratamiento biológico posterior.
- Una oxidación parcial que redunde en una disminución de la toxicidad del efluente.
- Una oxidación total de los compuestas orgánicos en sustancias inocuas.

También se utiliza para reducir la demanda química de oxígeno (DQO), reducir la toxicidad de la muestra a tratar, aumentar su biodegradabilidad, etc.

En el proceso llamado generalmente Fenton se diferencian tres reacciones:

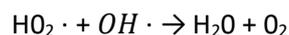
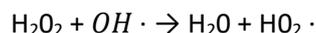
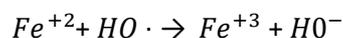
- Fenton
- Fenton like
- Foto-Fenton

1.8.1 Fenton

Las tecnologías aplicadas hoy en día para la separación de contaminantes orgánicos, refractarios y tóxicos no son lo suficiente eficaces por lo que se busca una alternativa para mejorar el tratamiento de aguas residuales, este proceso es la oxidación de Fenton.

Este consiste en la adición de sales de hierro en presencia de H_2O_2 , en medio ácido, para la formación de radicales $\cdot OH$.

Además, se forman radicales perhidroxilo, los cuales inician una reacción de oxidación en cadena para eliminar la materia oxidable. El mecanismo es el siguiente [9]:



La reacción Fenton es muy efectiva para degradar contaminantes ya que genera radicales hidroxilos, pero hay que tener en cuenta que un exceso de iones Fe^{+3} o un exceso de peróxido de hidrógeno, favorece las reacciones que consumen los radicales hidroxilos, evitando así, que estos radicales reaccionen con el contaminante a degradar [9].

➤ Ventajas

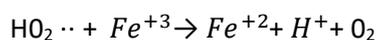
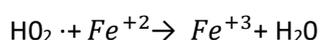
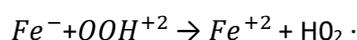
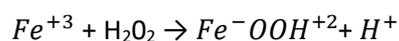
- El hierro es un elemento muy abundante porque lo que es muy fácil de encontrar.
- Tiene una baja toxicidad.
- Presenta una alta reactividad
- Como es un compuesto tan abundante en la industria, presenta un bajo coste.

➤ Desventajas

- Su reactividad depende del pH (ácido).
- Se forma hidróxido de hierro, a partir de Fe^{+3} cuando el pH es superior 3,5 siempre que estemos en ausencia de agentes complejantes.

1.8.2 Fenton-like

Una de las principales diferencias entre el Fenton clásico y el Fenton Like es el inicio de la reacción ya que una inicia con el Fe^{+2} y la otra con el Fe^{+3} . El mecanismo de reacción son bastante similares, además las dos especies podrán encontrarse simultáneamente en el transcurso de las distintas reacciones. A continuación, se muestra el mecanismo del proceso Fenton like [9]:

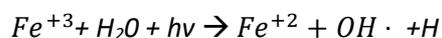


La eficiencia y la velocidad inicial de mineralización son mayores cuando parte de Fe^{+2} . En cambio, las sales Fe^{+2} producen una concentración estacionaria Fe^{+2} .

1.8.3 Proceso foto-Fenton

Foto-Fenton es una tecnología avanzada de oxidación fotoquímica utilizada cada vez con más frecuencia. Ha mostrado ser un proceso muy eficiente. Esto es debido a que los ferro-hidroxiolos solubles y los complejos orgánicos ácidos de hierro, no sólo absorben la radiación ultravioleta sino parte del espectro visible.

La tecnología foto-Fenton es usualmente utilizada cuando se requiere una alta reducción de Demanda Química de Oxígeno. En este proceso el reactivo de Fe^{+2} se oxida a Fe^{+3} descomponiendo el peróxido de hidrógeno para formar radicales hidroxilo. El empleo de la radiación UV-Vis incrementa el poder de oxidación principalmente por la foto-reducción de Fe^{+3} a Fe^{+2} , la cual produce más radicales hidroxilo. De esta forma se establece un ciclo en el reactivo de Fenton y se producen los radicales hidroxilo para la oxidación de compuestos orgánicos; adicionalmente es posible usar la radiación solar, lo que eliminaría el costo de la radiación UV. El mecanismo es el siguiente [9]:



En la siguiente *Figura 7* se muestra el mecanismo de acción para sistema autocatalítico del proceso Foto-Fenton.

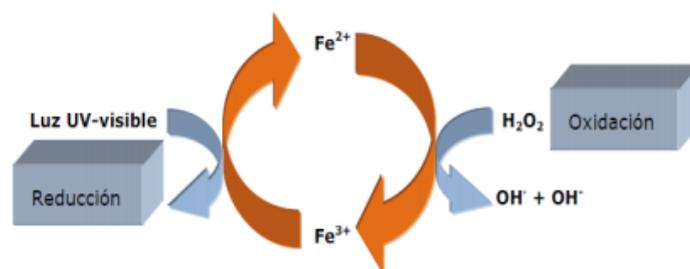


Figura 7: Mecanismo auto catalítico del proceso foto-Fenton (Fuente: oxidación avanzada agua contaminada,2016)

Se representan por un lado la reducción mediante luz UV-visible del Fe^{+3} a Fe^{+2} y por el otro lado la oxidación mediante peróxido de hidrógeno del Fe^{+2} a Fe^{+3} . Así, el ion ferroso regenerado vuelve a reaccionar con peróxido de hidrógeno para dar radicales hidroxilo en un ciclo continuo.

Para que una reacción Foto-Fenton tenga el máximo rendimiento posible se debe cumplir las siguientes condiciones [10]:

- **pH:** El pH más adecuado para la reacción es entre 2 y 3, un pH inferior frena la reacción, mientras un pH superior puede precipitar hidróxido férrico (en ausencia de quelantes) y también puede descomponerse el reactivo peróxido de hidrógeno.
- **Temperatura:** La reacción de oxidación Fenton es exotérmica, la velocidad de oxidación aumenta con la temperatura.
A presión atmosférica es recomendable no sobrepasar los 50°C, ya que si los sobrepasa se pronuncia una descomposición acelerada del peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua. Operando a 3 atmósferas se puede alcanzar temperaturas superiores a los 100°C.
- **Luz:** La presencia de luz favorece la velocidad de reacción y es posible afirmar que el proceso foto-Fenton ofrece mejores resultados que el proceso Fenton. Además, el tipo de luz utilizada también puede influir en los resultados, siendo la de mayor energía la más favorable para el proceso de oxidación.

Se puede decir que el proceso Fenton con sus modificaciones se puede probar como método de destrucción de contaminantes, por lo que puede ser una buena alternativa a la regeneración convencional descrita anteriormente.

1.9 Huella de carbono

La contaminación en el mundo es un problema muy importante generando en nuestro planeta. El CO_2 es una de las principales causas de este problema generado en mayor parte por el humano. Seguidamente se muestra, en la *Figura 8*, un mapa donde se refleja la cantidad de CO_2 en el mundo y dónde aparecen los países con más emisiones de CO_2 .

Emisiones de CO₂ per cápita

Toneladas anuales de CO₂ por habitante

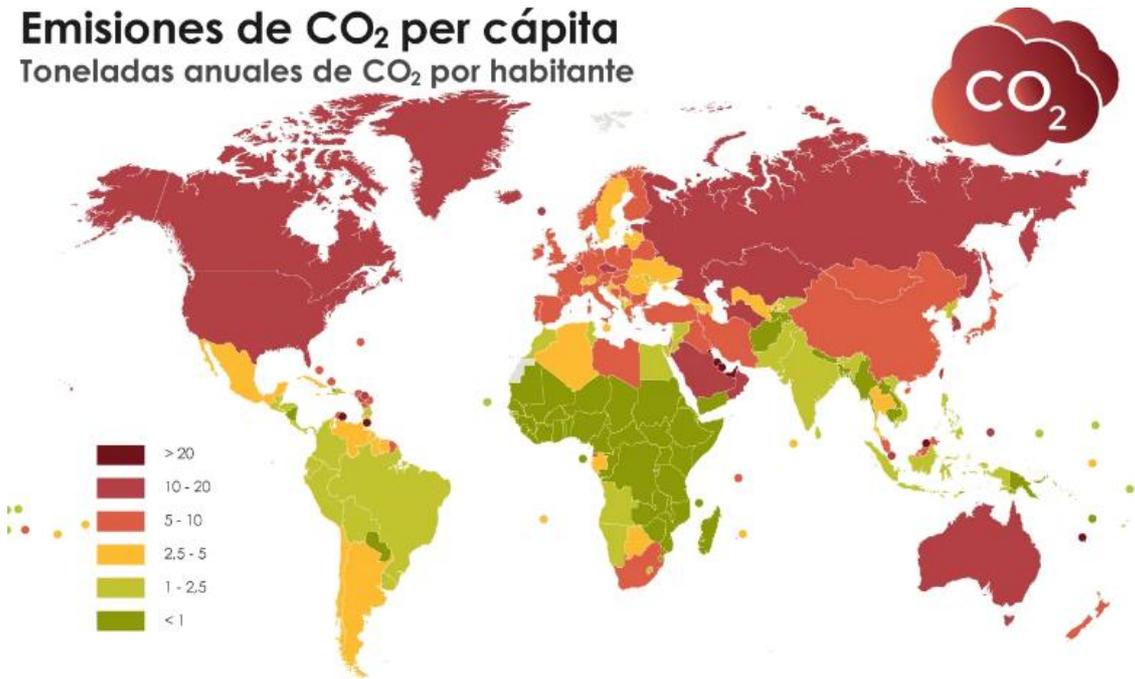


Figura 8: Emisiones de CO₂ en el mundo (Fuente: El orden mundial, 2021)

En España es uno de los países donde más se generan estas emisiones y por eso se debe hacer un estudio de estas e intentar reducirlas.

La huella de carbono es un indicador que cuantifica la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) que se emiten en un proceso.

Estas emisiones se clasifican en emisiones directas de GEI y emisiones indirectas de GEI. Las emisiones directas son aquellas que están controladas por la propia empresa por ejemplo el sistema de calefacción o de aire acondicionado. Las emisiones indirectas son a consecuencia de las actividades de la organización pero que están controladas por otra empresa.

Para facilitar la detección de estas, se definen tres alcances [11]:

- **Alcance 1:** emisiones directas. Por ejemplo, emisiones al producirse la combustión en las calderas o de los gases refrigerantes para el aire acondicionado.
- **Alcance 2:** emisiones indirectas. Estas son las que se generan debido a la electricidad que se consume en la empresa.
- **Alcance 3:** emisiones indirectas. Por ejemplo, el transporte de materias primas hasta la planta de producción.

La siguiente *Figura 9* muestra dichos alcances de una manera más visual:

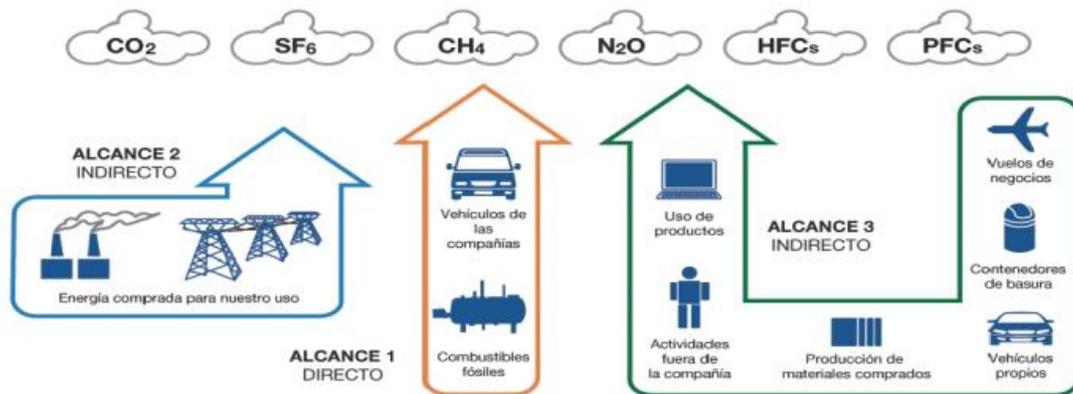


Figura 9: Gráfico de los diferentes alcances (Fuente: Mapama, 2015).

1.9.1 Ventajas que aporta el cálculo de la huella de carbono

La ventaja más significativa de este indicador es obtener información, clara y directa, que permita tomar decisiones para reducir las emisiones de GEI contribuyendo a una mejora en la concienciación medioambiental. Otras ventajas del cálculo de la huella de carbono son las siguientes:

- Baja del coste de fabricación del producto ya que si bajamos las emisiones de GEI baja el consumo eléctrico y por lo tanto también el coste.
- Si se intenta minimizar las emisiones de estos gases se consigue una mejor reputación de la organización

Una vez se realiza el cálculo de huella de carbono se podrá realizar un plan de mejora si es necesario para reducir el las emisiones de CO_2 .

2.OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es el estudio de la regeneración de carbón activo mediante el uso del proceso Fenton, para que el carbón puede ser empleado de nuevo y los contaminantes sean destruidos por oxidación química.

Objetivos específicos:

- Demostrar la viabilidad del proceso de Fenton en la regeneración de carbón activo
- Comprobar que las propiedades adsorbentes del CA se mantienen tras varias regeneraciones
- Comprobar el impacto ambiental de este método de regeneración frente al tradicional método térmico

3. EXPERIMENTAL

En esta parte se va a comprobar experimentalmente si a nivel de laboratorio nuestro proceso da un buen resultado. Además, se va a comprobar los problemas que se pueden generar y su posible solución antes de hacer el escalado a nivel industrial.

3.1 Cálculos previos

En primer lugar, se van hacer unos cálculos previos para determinar las condiciones a las que tienen que estar los equipos que se van a utilizar. Además, se calculará la cantidad de mg necesarios de sal de hierro comercial para alcanzar la cantidad de iones de hierro deseada en la disolución.

3.1.1 Calibrado de la bomba

En primer lugar, hacemos un calibrado de la bomba que vamos a utilizar para saber el caudal en el que vamos a trabajar. En la *Tabla 3* se muestran los diferentes caudales a los que puede trabajar la bomba del laboratorio.

Velocidad de la bomba	Caudal(ml/min)
Posición 1	20
Posición 2	23,26
Posición 3	29,15
Posición 4	32,05
Posición 5	41,15
Posición 6	46,20
Posición 7	66,23
Posición 8	82,64
Posición 9	100
Posición 10	217,39

Tabla 3: Tabla de caudales a distintas velocidades (Elaboración propia)

3.1.2 Espectro UV-vis del colorante.

Se trata de un compuesto orgánico y además es muy fácil trabajar en el laboratorio ya que podemos saber el nivel de absorbancia del carbón mediante el espectrofotómetro.

Para descubrir la capacidad de absorción de energía de una sustancia a distintas longitudes de onda es preciso hacer un barrido de longitudes de onda. Esto consiste en elegir una única solución de la sustancia problema a una determinada concentración. Después se mide su absorbancia en el espectrofotómetro a distintas longitudes de onda.

3.1.3 Recta calibrado

Seguidamente se hará una recta de calibrado con distintas concentraciones de la disolución con el colorante para verificar un correcto funcionamiento de los instrumentos analíticos, la recta de calibrado también se puede utilizar cuando se desconoce la concentración analítica.

De esta manera comprobamos que estamos dentro del rango de linealidad.

3.1.4 Cálculo del Fe^{+3}

Para que se produzca la reacción Fenton es necesario añadir la cantidad de Fe^{+2} apropiado y que se pueda producir la reacción decrita en el apartado "1.8.1 Fenton".

Se va a utilizar sulfato de hierro (II) heptahidratado, por lo que se harán los cálculos en base a esta sal para saber la cantidad de hierro que hay en la mezcla.

$$Mm(FeSO_4 \cdot 7H_2O) = 278,32 \left(\frac{g}{mol}\right) \quad (2)$$

$$\%Fe^{+3} = \frac{55,9 \cdot 100}{278,32} = 20\%$$

La sal utilizada tiene un 20 % de Fe^{+2} , la cantidad que necesitaremos de la sal comercial de hierro para 1L de disolución es la siguiente:

$$m = \frac{10 \cdot 100}{20} = 50 \text{ mg}$$

3.2 Equipos utilizados y material utilizado.

Seguidamente se van a describir los equipos utilizados en el laboratorio. En primer lugar, se muestra el montaje experimental del proceso y luego se va hacer una breve explicación de cada equipo utilizado.

3.2.1 Montaje experimental

En la *Figura 10* se muestra el montaje experimental que se ha decidido utilizar.



Figura 10: Montaje experimental (Elaboración propia)

El equipo más importante en este montaje es la bomba, que se aprecia en la *Figura 11*. Esta es una maquina generadora que transforma energía con la que es accionada en energía del fluido incompresible, este fluido puede ser un líquido o una mezcla de líquidos y sólidos.



Figura 11: Bomba (Elaboración propia)

Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli. En general una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión a otra de mayor presión [12].

3.2.2 Espectrofotometro

En la *Figura 12*, se puede observar el siguiente equipo el cual es un espectrofotómetro.

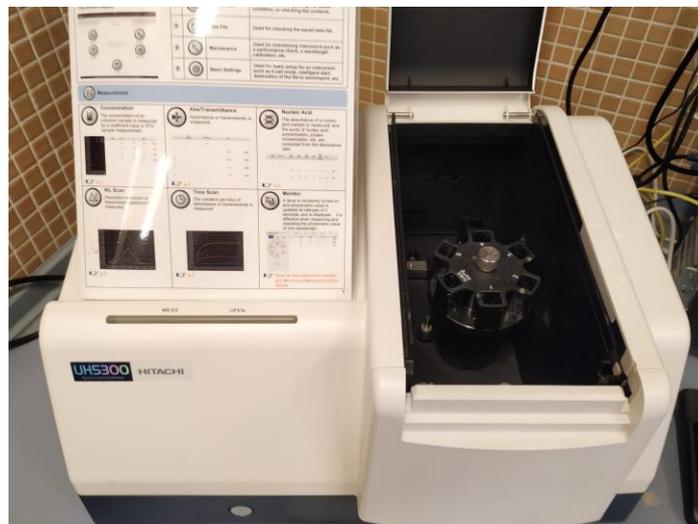


Figura 12: Espectrofotometro (Elaboración propia)

Un espectrofotómetro es un instrumento que tiene la capacidad de proyectar un haz de luz monocromática, en función de la longitud de onda, a través de una muestra y medir la cantidad de luz que es absorbida por dicha muestra. Esto nos da información sobre la naturaleza de la

sustancia en la muestra y nos indica indirectamente que cantidad de la sustancia que nos interesa está presente en la muestra [13].

Hay varios tipos de espectrofotómetros, puede ser de absorción atómica o espectrofotómetro de masa.

Los principales componentes de un espectrofotómetro son [13]:

- Cubetas de espectrofotometría.
- Fuente de luz.
- Monocromador.
- Comportamiento de muestra.
- Detector.
- Registrado.

3.2.3 pH-metro

Por último en la *Figura 13* aparece el pH-metro utilizado en el laboratorio.

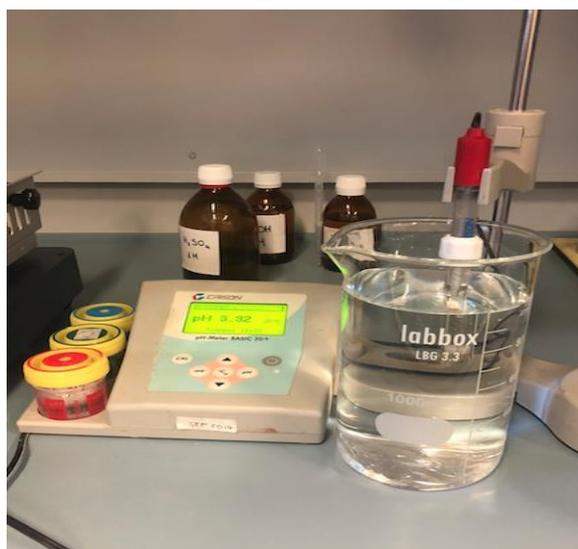


Figura 13: pH metro (Elaboración propia)

El pH-metro es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución. La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones [14].

3.2.4 Material utilizado

Se va a describir a continuación los productos utilizados para el procedimiento.

Colorante

El colorante que se va a utilizar es el cibarcron brilliant red 3B-A de adrich chemical company, que se muestra en la *Figura 14*. Tiene una riqueza del 50%.



Figura 14: Colorante utilizado (Elaboración propia)

Sal de hierro

La sal de hierro utilizada es la que se muestra en la *Figura 15*, de Applichem Panreac y tiene una riqueza de 99%.

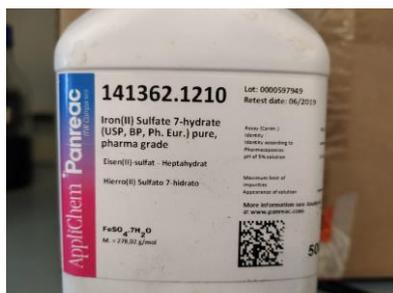


Figura 15: Sal de hierro utilizada (Elaboración propia)

Peróxido

Peróxido que se va a utilizar es el que aparece en la *Figura 16*, de Applichem Panreac y obtiene un 30% de peróxido.

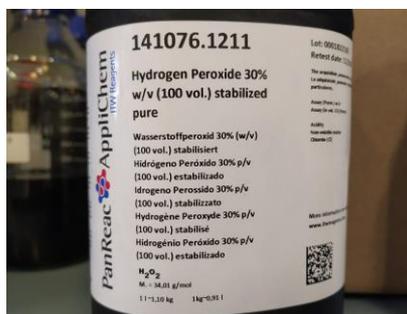


Figura 16: Peróxido utilizado (Elaboración propia)

Carbón

El carbón que se va a utilizar es el de tipo granular como se puede apreciar en la *Figura 17*, ya que la separación que se va a hacer es en fase líquida.



Figura 17: Carbón utilizado (Elaboración propia)

3.3 Procedimiento

En esta parte se va a describir con detalle el procedimiento que se realiza en el laboratorio para poder llegar a los resultados pertinentes y que se discutirán en el siguiente apartado.

3.3.1 Procedimiento con el primer método con una concentración de 80mg/L.

Saturación del carbón activado

Este procedimiento se va a hacer con distintas concentraciones del colorante para comprobar mejor la efectividad del experimento. El colorante elegido es el reactivo red, utilizado en gran parte en la industria textil. Se ha elegido este colorante por su facilidad a la hora de ser estudiada la absorbancia del carbón activado.

En primer lugar, se va a realizar el experimento con una concentración de agua contaminada del 80mg/L. Para preparar esta disolución se le añade 80 mg de colorante en 1L de agua destilada, como se muestra en la *Figura 18*.



Figura 18: Disolución con el colorante (Elaboración propia)

Seguidamente se va a simular una columna de carbón, como la que se muestra en la *Figura 19*, por dónde se hará pasar la disolución preparada anteriormente. Para eso se va a utilizar un cartucho de plástico con forma cilíndrica y añadiremos 5g de carbono. La cantidad de carbón tiene que ocupar más o menos la mitad del cartucho, ya que posteriormente se hace pasar una la disolución y si se añade mucho carbón puede sobresalirse el agua contaminada de colorante.



Figura 19: Imagen del cartucho con 5g de carbón (Elaboración propia)

Una vez se ha preparado el filtro de carbono se hace el montaje mostrado en la imagen del apartado “3.2.1 Montaje experimental” dónde el tercer factor importante es la elección de la bomba que se va a utilizar en el experimento y el caudal al que se va a trabajar “3.1.1 Calibrado de la bomba”.

Una vez hecho el montaje experimental, se mide la absorbancia de la disolución sin pasar por el carbón activado.

Durante dos horas se hace pasar el litro de disolución por el filtro del carbón activado. En estas 2 horas cada 15 min se mide la absorbancia del agua contaminada una vez pasa por el cartucho. Este proceso dura 1 hora, tiempo que necesita el carbón para saturar. Se sabe que el carbón está saturado cuando los datos de absorbancia se estabilizan ya que eso quiere decir que las partículas de colorante no se quedan en el carbón por lo tanto siguen en la disolución. Como se puede ver en la *Tabla 4*, la absorbancia se estabiliza muy rápidamente.

Tiempo (min)	Absorbancia
0	1,214
15	1,136
30	1,16
45	1,16
60	1,15

Tabla 4: Absorbancia del primer método de 80mg/L (Elaboración propia)

Cuando se satura el carbón se pasa hacer la regeneración mediante la reacción Fenton.

Regeneración del carbón activado mediante una reacción Fenton

Para hacer la regeneración del carbón activado, en primer lugar, se tiene que hacer una disolución con una concentración de cloruro de hierro (III) del 50mg/L. Esta concentración se calcula en el apartado “3.1.4 Cálculo del Fe^{+3} ”. Se añade 50 mg de sulfato de hierro (II) heptahidratado a un litro de agua destilada. Un requisito muy importante es que la disolución tenga un pH en torno a 3, por esta razón se añade H_2SO_4 si se quiere bajar el pH o NaOH si se quiere subir el pH. En este caso se añadió unas gotas de H_2SO_4 , para ajustar el pH a 3. En la *Figura 20* se puede ver la disolución de hierro preparada.

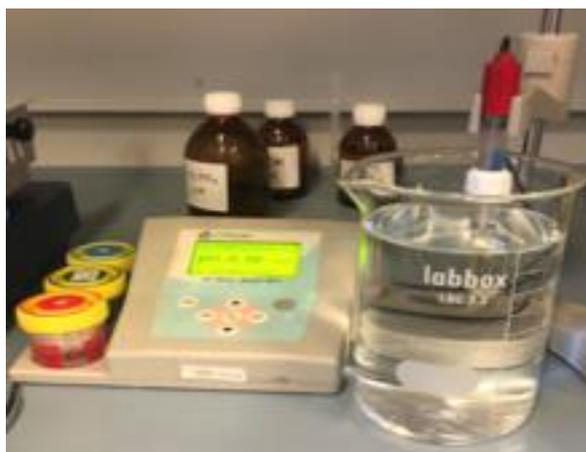
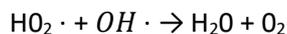
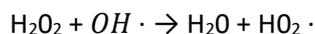
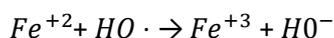


Figura 20: Imagen de la disolución de hierro (Elaboración propia)

Seguidamente se prepara un vaso de precipitado con 25 ml de esta disolución y se añade el carbón saturado, con 25 ml es suficiente, ya que solo se van a regenerar 5g de carbón y este volumen cubre estos gramos en el vaso de precipitado.

Para que la siguiente reacción puede existir es necesario la adición de peróxido en el vaso de recipiente.



Se introduce en la disolución 2ml de peróxido, se puede ajustar más la cantidad de peróxido necesaria pero debido al COVID-19 no se pudo hacer, se deja reaccionar durante 2 horas, se filtra el carbón y se seca. Cuando ya se obtiene el carbón reactivado se vuelve a saturar el carbón de la misma manera que se ha explicado anteriormente para comprobar qué % de capacidad de absorbancia se ha conseguido con este método de regeneración.

Por último, se repite el mismo procedimiento hasta 3 veces con la misma concentración.

3.3.2 Procedimiento con el primer método con una concentración de 60mg/L.

Se prepara una disolución con el mismo colorante que antes, se añade 60 mg del colorante en 1L de agua destilada, y con la misma metodología en el apartado anterior se mide la absorbancia durante 1 hora cada 15 min hasta que se estabiliza.

Como se puede ver en la *Tabla 5* el carbón se satura demasiado rápido y no se puede hacer el estudio correctamente, por ese se decide utilizar otra manera tanto de saturar como de regenerar el carbón activado.

Tiempo (min)	Absorbancia
0	1,12
15	0,88
30	0,87
45	0,79
60	0,79

Tabla 5: Absorbancia con el primer método de 60mg/L (Elaboración propia)

3.3.3 Procedimiento con el segundo método con una concentración de 80mg/L.

Cuando se hace el proceso con el primer método salen resultado de absorbancia muy estables en poco tiempo y no permite ver los resultados con claridad.

El principal problema es que hay demasiada agua contaminada para tan poco carbón, por esta razón se decide cambiar algunos puntos del procedimiento.

Saturación del carbón

En esta parte el principal problema es que el carbón se satura antes de que llega a pasar el litro de agua con el colorante, por lo que solo se ven reflejados los datos de la absorbancia cuando el agua tienen una concentración de 80mg/L. Si se hace pasar 100 ml de la misma concentración, el carbón se saturará más tarde y se pueden ver resultados de absorbancia a medida que el agua contenga menos concentración de colorante.

En primer lugar, se calcula cuantos mg de colorantes son necesarios en 100 ml de agua destilada:

$$80 \text{ mg} \rightarrow 1000 \text{ ml}$$

$$X \rightarrow 100 \text{ ml}$$

$$X = 8 \text{ mg}$$

Para preparar la disolución se añade 8 mg en 100 ml de agua destilada y seguidamente se satura el carbón de la misma manera que en el apartado "3.3.1 Procedimiento con el primer método con una concentración de 80mg/L."

Como se puede ver en la *Tabla 6* la absorbancia baja mucho más rápido, por este motivo se hacen mediciones de esta cada 5 min.

Tiempo (min)	Absorbancia
0	1,166
5	1,085
10	1,002
15	0,898
20	0,898
25	0,885
30	0,856
35	0,801
40	0,799
45	0,721
50	0,701
55	0,694
60	0,672
65	0,652
70	0,621
75	0,601
80	0,599

Tiempo (min)	Absorbancia
85	0,595
90	0,591
95	0,585
100	0,581
105	0,576
110	0,571
115	0,562
120	0,557
125	0,551
130	0,542

Tabla 6: Absorbancia segundo método de 80mg/L (Elaboración propia)

Regeneración del carbón activado

El principal cambio que se va hacer en este apartado es que no aplicaremos la disolución de hierro al carbón de manera estática, sino que se hará pasar de manera continua utilizando el mismo montaje que aparece en el apartado “ 3.2.1 Montaje experimental”.

Se hace pasar 50 ml de la disolución de hierro con 2 ml d peróxido por el cartucho donde está el carbono saturado durante 2 horas.

Una vez pasan las dos horas se seca el carbono y se vuelve hacer el mismo procedimiento tanto de saturación como de regeneración del carbono hasta 3 veces.

En un principio se iba a comprobar y contrastar estos datos con más concentraciones, pero debido al COVID-19 no se pudieron hacer más pruebas.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se van a discutir los resultados del calibrado de la bomba, el barrido de la absorbancia y por último los resultados del procedimiento experimental.

4.1 Resultados Calibrado de la bomba

Después de hacer el calibrado, que se muestra en la *Figura 21*, se decide trabajar con el caudal de 20ml/min ya que se tiene poca cantidad de carbón activado y si se trabaja a un caudal mayor el carbón no le da tiempo absorber la cantidad adecuada.

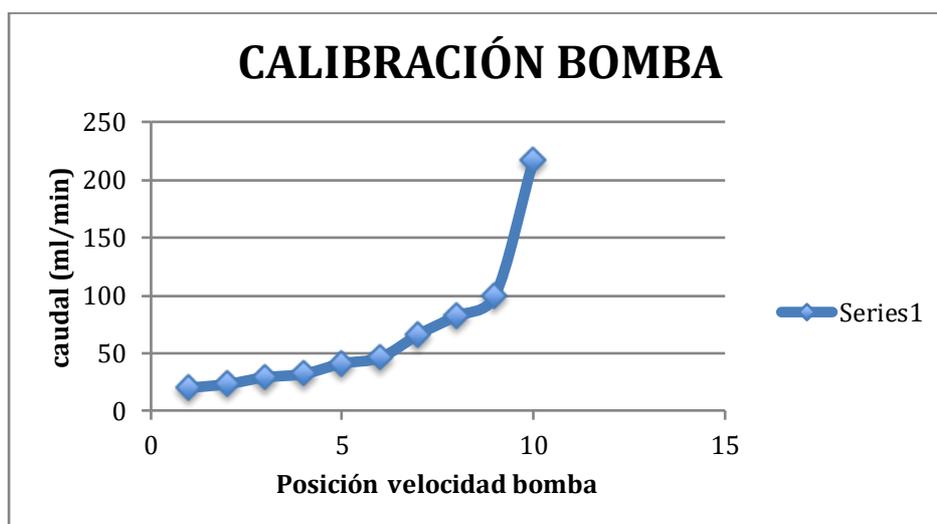


Figura 21: Gráfica calibrado de la bomba (Elaboración propia)

4.2 Espectro UV-vis del colorante.

En este caso se hace un barrido con el colorante a una concentración de 40mg/L, como se puede ver en la *Figura 22*.

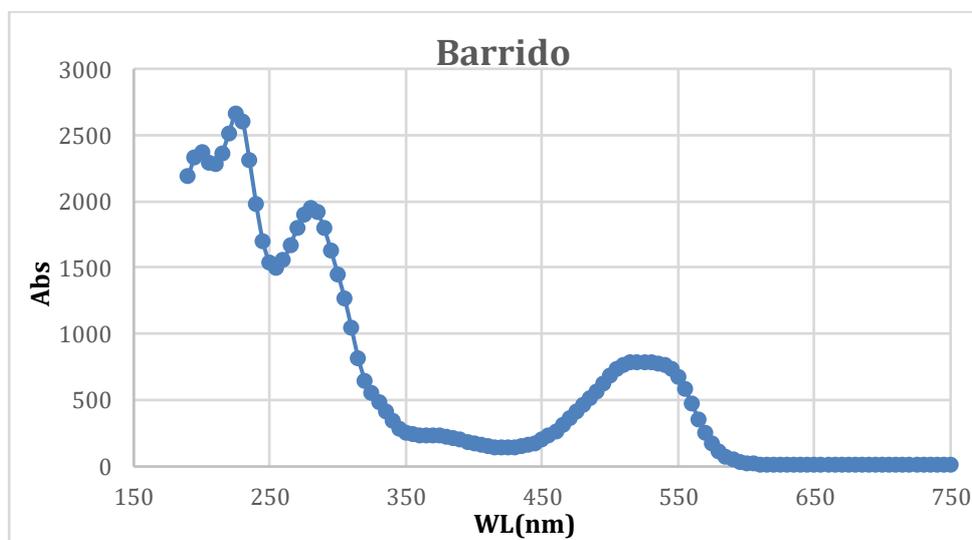


Figura 22: Gráfica del barrido de la absorbancia (Elaboración propia)

Una vez hecho el barrido se decide trabajar a una longitud de onda de 530 (nm) y con esta trabajaremos durante todo el estudio.

4.3 Recta calibrado

Una vez obtenemos la recta, que se muestra en la *Figura 23*, se comprueba que sí que se está dentro de la linealidad esperada.

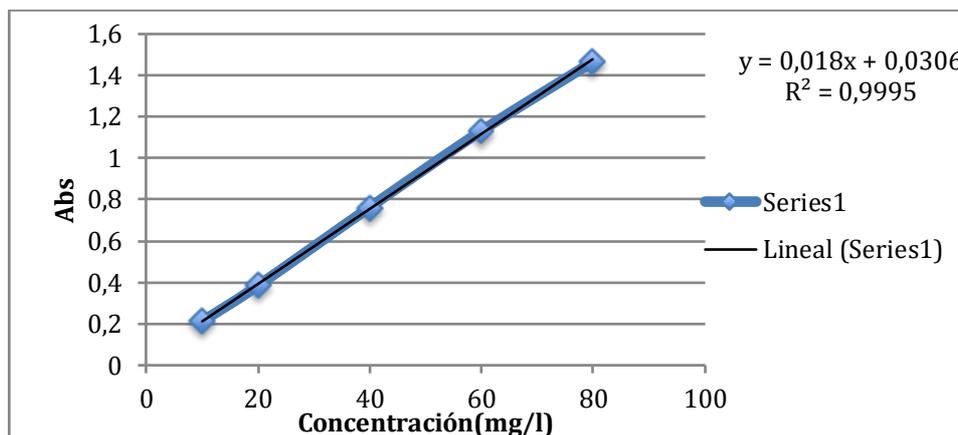


Figura 23: Recta de calibrado (Elaboración propia)

Después de realizar los ensayos pertinentes, se hace un estudio de los resultados donde representamos la absorbancia que se ha sacado experimentalmente frente al tiempo.

De esta manera lo que se va a comprobar es el nivel en el que el carbón está absorbiendo el colorante de la disolución y sabremos si a la hora de regenerarlo estaríamos aplicando correctamente el método estudiado, en este caso la reacción Fenton.

Una vez representados los resultados aplicando el primer procedimiento se ve que no dan datos coherentes ya que el carbón activado no es capaz de absorber lo esperado.

Uno de los motivos por los cuales la absorbancia da constante, es que, si introducimos un litro con una concentración tan alta de colorante, el carbón no va a ser capaz de absorber después de haber pasado por el litro de disolución. Por ese motivo se decide cambiar la manera de trabajar aplicando el procedentito 2 explicado en el apartado "3.3.3 Procedimiento con el segundo método con una concentración de 80mg/L."

4.4 Procedimiento 2

En este caso al no pasar un litro de disolución por el carbón y optar por pasar 100ml, el carbón es capaz de absorber a diferentes concentraciones y apreciar la diferencia de absorbancia.

Por otro lado, como se aprecia en la *Figura 24* las líneas se superponen casi perfectamente. Eso indica que una vez regenerado la primera y la segunda vez el carbón vuelve a trabajar correctamente y casi de la misma manera que sin regenerar. Por lo que se puede decir que la

reacción Fenton en este caso sí que funciona como método de regeneración para el carbón activo.

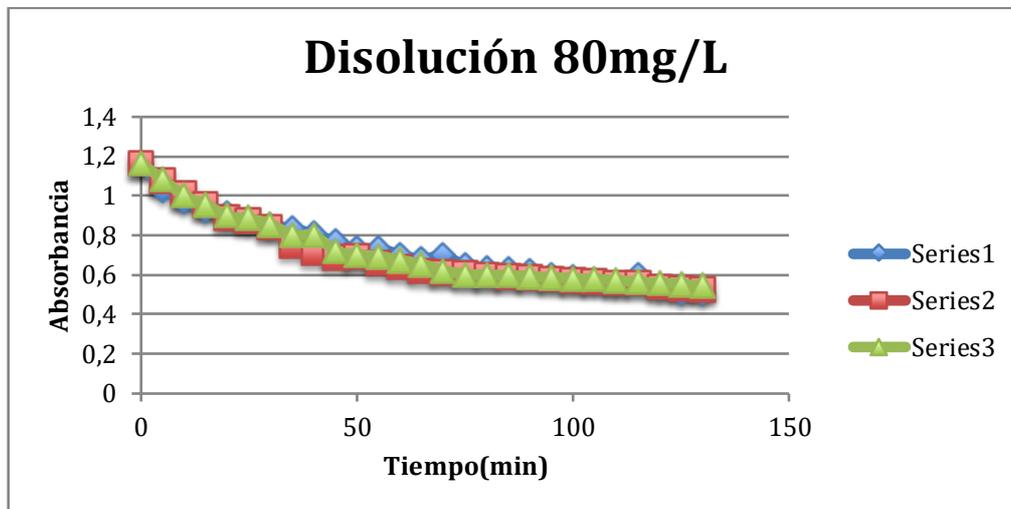


Figura 24: Grafica absorbancia segundo método para una concentración de 80mg/L
(Elaboración propia)

5. ESCALADO

En la industria química los procesos se basan en los estudios experimentales que se hacen en un laboratorio o en una planta piloto. El escalado es, los cambios mediante cálculos matemáticos que se van produciendo de manera progresiva hasta llegar a un nivel industrial.

Este es un procesos costoso y complicado ya que se tienen que tener en cuenta muchos factores, como los parámetros físicos y químicos están interconectados, las soluciones que se obtienen a nivel de laboratorio o de la planta piloto pueden no ser validas a nivel industrial ...etc, además es muy importante tener conocimiento previo del proceso.

En reactores químicos se suele utilizar un factor de escala de 50-80000 [15], para los reactores biológicos utilizados en las plantas de tratamiento biológico de aguas residuales suelen ser más altos.

5.1 Niveles de escalado industrial

En la actualidad se puede diferenciar cinco niveles de escalado, en algunos ámbitos estos niveles van marcados por un volumen determinado [15]. Pero en el campo de la ingeniería es mucho más complejo, ya que se tienen que tener en cuenta muchos más factores.

5.1.1 Laboratorio

Esta escala es una de las más importantes ya que se comprueba la teoría. El laboratorio es el primer paso para aceptar o rechazar el estudio previo al proyecto. También es la escala donde se ve las diferentes variables de perturbación que pueden afectar en el proceso, en resumen, se analizan los productos que se van a utilizar en el proceso [15].

Algunos ejemplos más:

- Conocer el rendimiento de algunas variables.
- Conocer la cinética del proceso.
- Optimización del proceso.
- Conocer las propiedades químicas y físicas del proceso.
- Influencia de los reactivos en los cambios de escala
- Conocer los residuos generados y la posible reutilización de estos.
- Evaluación económico inicial.

5.1.2 Banco

En este caso se posee de equipos y materiales más parecidos a los que utilizaríamos en la escala industrial y aquí es dónde se confirma los modelos matemáticos planteados en el laboratorio. Este nivel repercute directamente en las decisiones que se toman para la ejecución de la planta

piloto que sería el siguiente nivel. En esta etapa se verifican los modelos matemáticos propuestos y da información para el cálculo y diseño del proceso [15].

5.1.3 Piloto

En esta etapa se obtienen los datos necesarios para el diseño de la planta industrial, es muy importante que se aprovechen bien las etapas anteriores para que esta se pueda utilizar en algunos de los siguientes objetivos [15]:

- Saber la factibilidad del proceso.
- Obtener información para el diseño.
- Obtener cantidades de los productos utilizados.
- Obtener “know-how” del proceso
- Información para el tratamiento de residuales.
- Ensayos de materiales de construcción.
- Control de calidad.
- Entrenar al personal.
- Pruebas de seguridad.

5.1.4 Semi-industrial

Esta escala no se suele emplear ya que tiene un coste elevado y se hace una demostración del proceso. En muchas ocasiones ha servido para mejorar modelos de plantas industriales anteriores, también se puede probar las mejoras tecnológicas [15].

5.1.5 Industrial

Esta es la última etapa dónde se pueden probar las mejoras de equipos tecnológicos, así como la optimización total del proceso estudiado [15].

5.2 Teoría de similitud

La teoría de similitud se basa en la siguiente ecuación:

$$m' = k \cdot m \quad (3)$$

k es el factor que relaciona una variable en cada una de las escalas que se utilizan.

La similitud se clasifica en función de la naturaleza de las variables que obedecen la ecuación anterior [16].

- Similitud geométrica.
- Similitud dinámica.
- Similitud térmica.
- Similitud másica.
- Similitud bioquímica.

En muchas ocasiones en el cambio de escala, utilizando la teoría de similitud, se mantiene constante la proporcionalidad geométrica y en los reactores se mantienen constante la agitación el coeficiente volumétrico de transferencia de materia i el tiempo de residencia.

5.3 Cálculos des escalado.

En algunas depuradoras dentro del tratamiento terciario aparece la filtración mediante el carbón activado, generalmente para su posterior reutilización. Para hacer el escalado industrial en primer lugar se muestran los datos que se han utilizado en el laboratorio:

- Tubo Falcon → 15 ml de capacidad, el cual tiene 1cm de diámetro interno y 12cm de altura.
- 5g de carbón, los cuales ocupan 8ml
- Volumen específico → 1,6 ml/g
- Caudal → 20ml/min

Seguidamente se calcula el volumen total multiplicando el caudal por el tiempo que se necesita para cada experimento:

$$v_t = Q * t(\text{min}) = 20\text{ml}/\text{min} * 130\text{min} = 2600\text{ml} = 2,6\text{L} \quad (4)$$

$$\frac{g}{L} = \frac{5g}{2,6L} = 1,92 \frac{g}{L}$$

Suponiendo un caudal de entrada de $10\text{m}^3/\text{día}$ y que el carbón tiene un mes de vida, se calcula el volumen de agua a tratar para un mes.

- Se supone que un mes tiene 30 días

$$v_{\text{mes}} = 10 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 30 \text{ días} = 300\text{m}^3 = 300000\text{L} \quad (5)$$

$$\text{carbón}_{\text{mes}} = 1,92 \frac{g}{L} * 300000\text{L} = 576000g = 576\text{Kg}$$

Una vez se obtiene los gramos de carbón, se calcula el diámetro y la altura del tanque que se va a necesitar para hacer el tratamiento de regeneración.

Se empieza calculando el volumen que ocupan 576000g de carbón:

$$v = \frac{1,6\text{ml}}{g} * 576000g = 921600\text{ml} = 921,6\text{L}$$

A continuación, se calcula la capacidad necesaria que ha de tener el tanque para hacer el tratamiento de regeneración del carbón.

$$\frac{\text{ml que ocupan 5g de carbón}}{\text{ml de capacidad del tubo Falcon}} = \frac{8}{15} = 0,53 \quad (6)$$

$$\text{capacidad del tanque} = \frac{921,6\text{L}}{0,53} = 1738,87\text{L} = 1,74\text{m}^3$$

Mediante las siguientes ecuaciones se obtiene la altura y el diámetro del tanque:

$$H = 10 * d \quad (7)$$

$$V = \pi i * \left(\frac{d}{12}\right)^2 * H \quad (8)$$

$$d = 0,61m$$

$$H = 6,1m$$

V→capacidad tanque en m^3

H→Altura

D→Diámetro

En el siguiente paso se calculó la cantidad de reactivos que se van a utilizar.

En el laboratorio se utiliza 2ml de peróxido para 5g de carbón, se calcula la cantidad a nivel industrial:

$$2ml \rightarrow 5g$$

$$ml \text{ de peróxido} \rightarrow 576000g$$

$$ml \text{ de peróxido} = \frac{576000 * 2}{5} = 230400ml = 230,4L$$

La disolución de sal de hierro tiene una concentración de 50mg/L y se necesitan 25ml de esta en el laboratorio para regenerar el carbón por lo que a nivel industrial se necesita:

$$25ml \rightarrow 5g$$

$$\text{volumen necesaria para regeneración} \rightarrow 576000g$$

$$\text{volumen necesaria para regeneración} = \frac{25 * 576000}{5} = 2880000ml = 2880L$$

Preparamos el doble del volumen necesario con una concentración de 50mg/L.

$$50 \frac{mg}{L} * 5800L = 290000g = 290g$$

Por último se obtiene la cantidad de H_2SO_4 necesario. En el laboratorio se utilizan 3 o 4 gotas las cuales tiene un volumen de 0,005ml aproximadamente, por lo que se utiliza 0,02 ml de H_2SO_4 .

La cantidad añadida para 576000g de carbón es:

$$0,02ml \rightarrow 5g$$

$$H_2SO_4 \rightarrow 576000g$$

$$H_2SO_4 = 230ml = 2,3L$$

5.4 Diagrama de bloques del proceso

En la *Figura 25* se puede ver de una manera más visual el proceso. Se necesitan dos tanques, uno que contiene la disolución de agua con hierro que se irá añadiendo de manera constante a la columna y por otro lado el tanque de peróxido que también se añadirá en menos cantidad a la columna para que se puede producir la reacción del proceso.

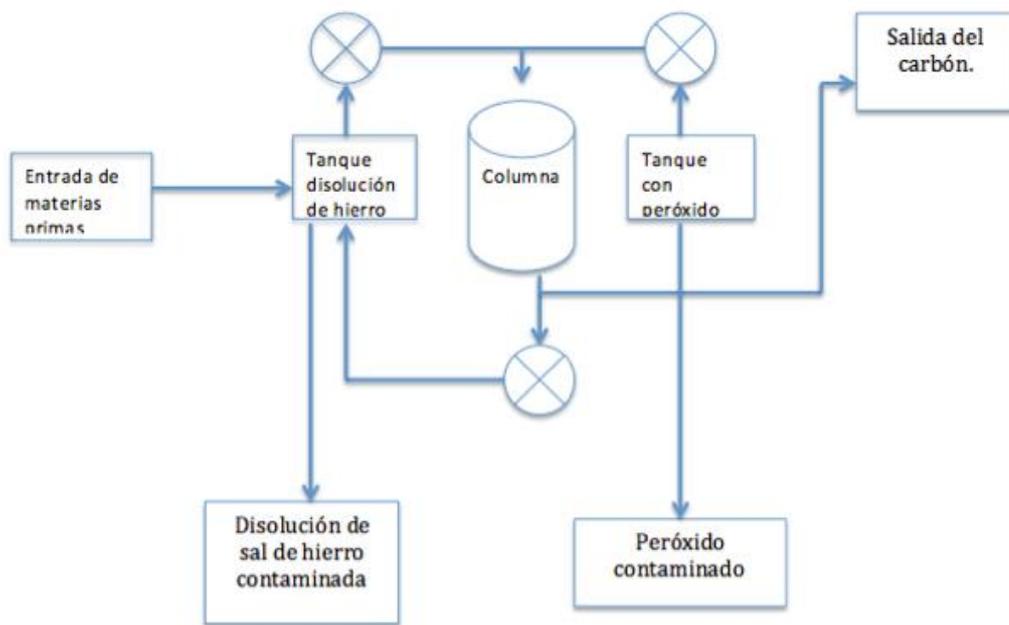


Figura 25: Diagrama del proceso (Elaboración propia)

6.CÁLCULO HUELLA DE CARBONO PARA LA REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVO MEDIANTE LA REACCIÓN FENTON

Para hacer una correcta recopilación de datos de los gases de efecto invernadero que posteriormente se van a estudiar hay que tener en cuenta una serie de requisitos que son los siguientes, basado en la norma ISO 14067:2018 [17]:

- Pertinencia: selección de datos y metodologías adecuadas para a evaluación de emisiones.
- Integridad: se consideran todas las emisiones que contribuyan a la HCP.
- Consistencia: los métodos y los datos se aplican de la misma manera a lo largo del estudio de la HCP.
- Coherencia: se van a utilizar documentos reconocidos internacionalmente y adoptados para las categorías de productos.
- Exactitud: se reduce el sesgo y la incertidumbre, en la medida de lo posible.
- Transparencia: se expone la información suficiente y apropiada relacionada con HCP, para que los usuarios tomen decisiones con confianza.
- Evitar la doble contabilidad: se evita la doble contabilidad de GEI dentro del sistema del producto estudiado.

La metodología que se va a emplear se basa en el estándar UNE-EN ISO 14067, Septiembre 2019.

Las fases determinadas por el estándar son [17]:

- Definición de objetivo y alcance
- Análisis de inventario del ciclo de vida
- Evaluación del impacto
- Interpretación de resultados.

En la Figura 26 se puede ver las 4 etapas del análisis del ciclo de vida del producto:



Figura 26: Etapas ciclo de vida del producto (Fuente: Instituto superior del medio ambiente,2013)

6.1 Definición de objetivo y alcance

Para una correcta interpretación de la huella de carbono en primer lugar se tiene que definir el objetivo y el alcance del sistema.

6.1.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es el carbón regenerado, en la industria textil, mediante una reacción Fenton. La unidad funcional elegida es de 576Kg de carbón regenerado mediante una reacción Fenton. Se ha elegido esta cantidad ya que es el carbón que se necesita en un mes dentro de la industria. La planta de regeneración se sitúa en la ciudad de Valencia. El principal fin de realizar este estudio es calcular las emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de regeneración de carbón activo mediante una reacción Fenton.

6.1.2 Alcance

Para definir el sistema se ha de determinar un alcance, es decir, que etapas se van a tener en cuenta en el cálculo de la huella de carbono del producto. En este caso se hace el estudio desde el trayecto de las materias primas a la empresa donde se va a regenerar el carbón, hasta la salida del carbón ya regenerado.

Seguidamente se va hacer una definición de los límites del sistema dónde se va a identificar las emisiones de GEI en la empresa, se debe contabilizar de una determinada manera según la norma UNE-ISO 14067:2019 [17]. Estas emisiones se clasifican en tres alcances:

Alcance 1

Son emisiones directas de fuentes que están controladas o son propiedad de la empresa, en el caso de este proceso las emisiones del alcance 1 son las siguientes:

- Se necesitan agua caliente para la correcta limpieza de las líneas internas de producción, estas emisiones son producidas por la combustión de gas natural.
- Transporte de materias y productos dentro de la planta. Estas emisiones se producen por la combustión de gasoil en fuentes móviles como las carretillas.
- Emisiones de gases refrigerantes debido al uso de equipos de refrigeración para mantener el peróxido y aire acondicionado.

Alcance 2

Las emisiones indirectas de GEI, son a causa de la empresa, pero ocurren en fuentes que no están controladas por la misma empresa, sino que están controladas por otra. En esta parte se habla de las emisiones que genera la electricidad.

El consumo de energía eléctrica en la planta es en gran parte procedente de la instalación de equipos en el proceso como puede ser las bombas o la instalación de la columna para la

regeneración. También se tiene en cuenta los equipos que mantendrán el peróxido en las condiciones de frío necesarias.

Alcance 3

En el alcance tres se va a tener en cuenta las emisiones que son externas a la empresa como pueden ser las siguientes:

- Transporte de materias primas a la empresa
- Transporte de carbón activada una vez regenerado para su posterior uso
- Transporte de la disolución de sal y peróxido ya contaminado

Exclusiones

Quedan excluidos del cálculo aquellos procesos que suponen una cantidad inferior al 5% del total. Dentro de esta categoría, se encuentran las emisiones producidas por el sistema de aire acondicionado en oficinas.

En este caso la huella de carbono se basará en los datos de una regeneración, tiempo que se emplea de la entrada de las materias primas a la empresa hasta obtener ya el carbón regenerado.

6.2 Análisis de inventario del ciclo de vida

La *Figura 27* muestra el mapa del proceso bajo estudio, dónde aparecen las etapas significativas del estudio.

En este mapa se puede visualizar los materiales, especificados en el apartado “3.2.4 Material utilizado”, actividades y procesos necesarios para la regeneración del carbón mediante una reacción Fenton, debe incluir todos los factores causantes de emisiones. El proceso se puede ver visualmente en la *Figura 25*.

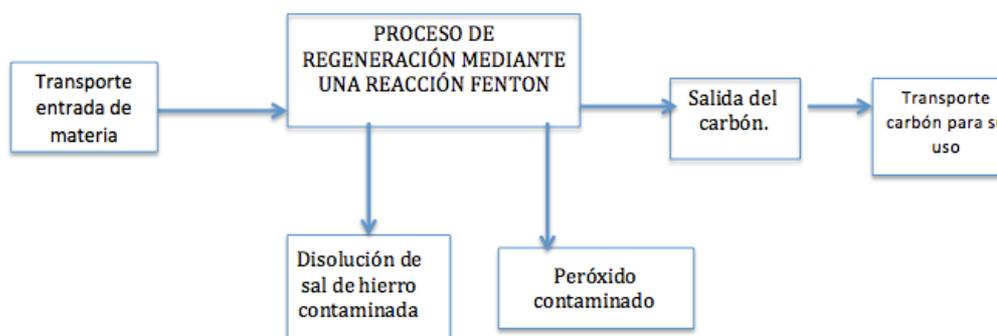


Figura 27: Mapa proceso regeneración mediante reacción Fenton (Elaboración propia)

6.2.1 Recopilación de datos

Para poder recopilar los datos necesarios, se tiene que saber cuáles son las fuentes de GEI. Se van a identificar en primer lugar las fuentes de emisiones de GEI dentro del alcance 1, seguidamente las de alcance 2 y por último las de alcance 3.

Alcance 1

En el estudio del laboratorio se necesitó 0,0001 m³ de agua para limpiar el montaje para 5 g de carbono, por lo que a nivel industrial se necesitara 0,0115m³ de agua caliente. Se necesitan 4,5 L de gas natural para calentar 1L de agua [18], para 12L de agua caliente se necesita 45L de gas natural, si se pasa a metros cúbicos, se necesita 0,045m³ de gas natural.

El consumo de diésel es de unos 30L cada 100km [19], se estima que la carretilla hará dos o 3 km para cada regeneración para el transporte de materias primas y para el transporte del carbón ya regenerado, por lo que se necesita 1L de gasoil.

Por último, se hace referencia a los gases refrigerantes para mantener el peróxido. El gas refrigerante para la nevera es el R404A [20]. Para que una nevera funcione se necesita que el gas este por encima de 10 psi [21], 1kg es igual a 14,5 psi, por lo que se necesita aproximadamente 1 kg de gas para que funcione. En la Tabla 7 se resume los datos explicados anteriormente.

Materia	Cantidad planta piloto	Cantidad planta industrial
Agua limpieza	0,0001m ³	0,0115m ³
Gas natural para calentar agua	0,0003913m ³	0,045m ³
Diesel carretilla	-	1L
Gases refrigerantes	1kg	1Kg

Tabla 7: Tabla resumen datos alcance 1 (Elaboración propia)

Alcance 2

Es necesario conocer el consumo total de los equipos que se utilizan. En este caso el consumo se basa en la potencia de las bombas las cuales funcionan 2h para cada regeneración, 100 kW.

Alcance 3

En este alcance se tiene en cuenta la compra de los productos químicos en PanReac Applichemi, su sede en España está en Barcelona y nuestra planta en Valencia, el trayecto se hace con un camión de combustible gasoil.

Además, se contabiliza el transporte de los residuos, dónde se contrata una empresa llamada recytrans situada en Alboraya. Esta empresa vine a recoger los residuos en un camión de combustible gasoil.

6.3 Evaluación de impacto de la HCP.

Para calcular la huella de carbono se debe hacer la siguiente operación:

$$DATO \text{ ACTIVIDAD} * FACTOR \text{ DE EMISIÓN} = HUELLA \text{ DE CARBONO} \quad (9)$$

- **Dato de actividad:** Entradas y salidas del proceso que producen emisiones o remociones de GEI [17]
- **Factor de emisión:** supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro de actividad [17]

En la *Tabla 8* aparecen los resultados obtenidos:

	Dato actividad	Cantidad	Factor de emisión[Anexo 1]	CO ₂ (Kg)
ALCANCE 1	Gas natural (primario)	0,0450m3	2,15(kg CO2/m3)	0,097
	Gasoil (primario)	0,00100m3	2,78(kg CO2/m3)	0,00278
	GAS R404A(primario)	1,00kg	3,92(kg CO2/Kg)	3,92
ALCANCE 2	Electricidad(secundario)	100kw	0,342(kg CO2/KW)	34,0
ALCANCE 3	Gasoil(secundario)	0,120m3	2,78(kg CO2/m3)	0,334
				38,4

Tabla 8: Tabla resultado calculo huella de carbono (Elaboración propia)

6.4 Interpretación de resultados.

La *Figura 28* muestra los aportes de cada alcance.

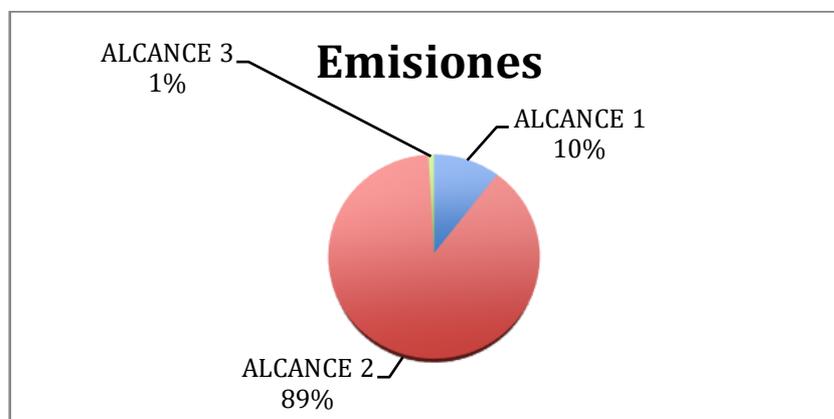


Figura 28: Aporte % de emisiones (Elaboración propia)

La *Figura 28* muestra que el alcance 2 es el más significativo. Puede considerarse una ventaja ya que existen numerosas actuaciones que ayudan a minimizar las emisiones en este alcance.

Un ejemplo de ello es la instalación de placas solares para la generación de electricidad.

El proceso de la generación de la energía eléctrica, generado por la bomba, necesaria es el principal foco de emisiones para el objetivo estudiado. Este consumo de energía está concentrado en la etapa de producción y uso energético del producto.

Además una de las tecnologías que más emisiones producen es el gas natural (ALCANCE 1) ya que emite CO_2 pero también emite CH_4 , y emitir 1kg de CH_4 equivale a 56 de CO_2 [22]. El gas natural se necesita en la etapa de producción del producto.

En la *Tabla 8*, aparece la cantidad de CO_2 equivalente emitido en kg. Es una cantidad bastante razonable, comparado con el tratamiento de regeneración térmico, aunque siempre se puede mejorar, ya que estas emisiones repercuten gravemente al mundo.

Para saber si el proceso que se ha estudiado ha mejorado en las emisiones de gases de efecto invernadero se va a describir las etapas más significativas que hacen que aumente estos gases con respecto al tratamiento convencional de regeneración que es el térmico que aparece en *Figura 29*. Para explicarlo de una manera más visual se va a realizar un mapa del proceso térmico y se puede ver en que etapas existe un aumento de emisiones.

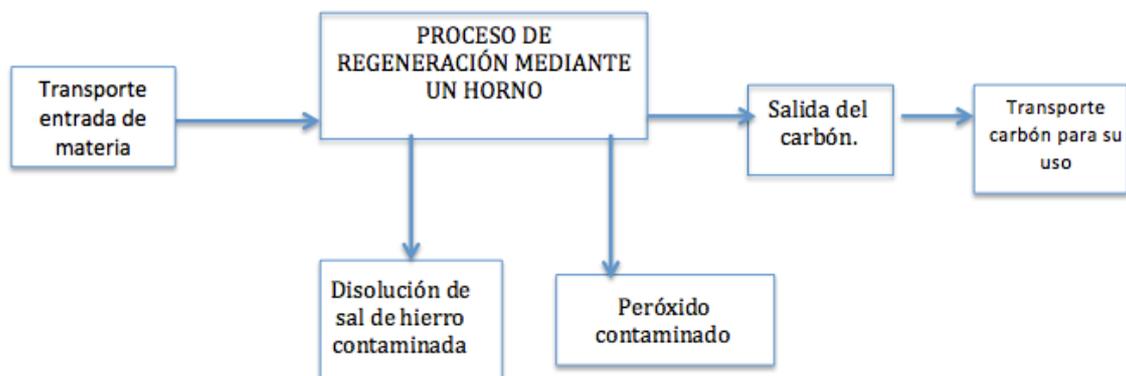


Figura 29: Mapa proceso regeneración térmica (Elaboración propia)

Como podemos ver uno de los principales cambios en este proceso es la necesidad de utilizar un horno de altas temperaturas (900^a). Estos hornos necesitan una potencia de 1kg/kW [23] por lo que aumentan mucho las emisiones tanto en el alcance 1, como en el alcance 2.

Entre las ventajas del proceso mediante reacción Fenton se destaca que la planta de regeneración se instala en la misma planta donde se utiliza el carbón, por eso motivo el transporte del carbón para su posterior uso es de 0km, mientras que en el tratamiento térmico

la central más cercana es en Barcelona por lo que se le debería añadir esos km al cálculo de la huella de carbono.

Por estos dos motivos se puede decir que el método de regeneración estudiado en este trabajo emite menos toneladas de emisiones que el método térmico.

CONCLUSIONES

El desarrollo de este TFG ha cumplido su objetivo. En particular, se destaca:

- Se ha podido demostrar que el proceso Fenton puede regenerar el carbón activo saturado que mantiene sus propiedades después de varios ciclos de saturación y regeneración.
- Se necesita de un volumen pequeño de agua que se recircula para realizar el tratamiento y el consumo de sales de hierro, ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.
- El tratamiento se puede realizar *in situ* y sin necesidad de incorporar nuevo equipamiento al proceso
- El estudio de huella de carbono indica que el consumo energético de las bombas para la recirculación del agua en la regeneración tiene el mayor impacto ambiental
- Cualquier proceso de regeneración térmica tendrá una huella de carbono mucho mayor dadas las temperaturas necesarias y el transporte del material a las plantas de regeneración

BIBLIOGRAFIA

- [1] CARRIAZO, J., SAAVEDRA, M., MOLINA, M. (2010) "Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo" en *Cómo se experimenta*. vol.21, ISSNE 1870-8404, p. 224-229.
- [2] CARBOTECNICA *El carbón activado*.
<<https://www.carbotecnica.info/encyclopedia/que-es-el-carbon-activado/>>[Consulta:7 de junio del 2020].
- [3] LENNTECH. *Adsorción/ carbón activado*. < <https://www.lenntech.es/adsorcion.htm>> [Consulta: 9 de junio del 2020].
- [4] PLAZA RECOBERT, M. (2015). *Evaluación de nuevos precursores y del proceso de activación con dióxido de carbono*. Tesis. Alicante: Universidad de alicante.
- [5] CARBOTECNICA. *Reactivación del carbón activado*.
< <http://www.carbotecnica.info/aprendizaje/carbon-activado/reactivacion-de-carbon-activado-granular/>>[Consulta:7 de junio del 2020].
- [6] TEXTOS CIENTIFICOS. *Regeneración del carbón activado*.
<<https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/regeneracion-carbon-activo>>[Consulta: 9 junio del 2020].
- [7] LENNTECH. *Oxidación avanzada*.
< <https://www.lenntech.es/oxidacion-avanzada.htm> > [Consulta: 9 de junio del 2020].
- [8] RUBIO CLEMENTE, A., CHICA, E., PEÑUELA, G. (2014). " Aplicación del proceso Fenton en el proceso de aguas residuales de origen petroquímico" en *Ingeniería y competitividad*. Vol.16, p. 211-233.
- [9] TERÁN SOLÍZ, M. (2016) *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada de aguas contaminadas*. Trabajo final de grado. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- [10] SANCHEZ RUIZ, C. (2015) "Reacciones Fenton" En *ficha técnica de etapas de procesos de plantas de tratamientos de aguas residuales de la industria textil*. p.1-31.
- [11] MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA. *Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización*.
< https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf >[Consulta: 1 de mayo del 2021].
- [12] FLUIDECO. " Que es una bomba centrífuga".< <https://fluideco.com/que-es-una-bomba-centrifuga/>>[Consulta: 11 de Noviembre del 2020].

- [13] MATERIALE DE LABORATORIO. “Espectrofotómetro”.
<<https://materialeslaboratorio.com/espectrofotometro/>>.[Consulta: 11 de noviembre del 2020]
- [14] OMEGA. “Medidor de ph”.< <https://es.omega.com/prodinfo/medidor-ph.html>>.[Consulta: 11 de noviembre del 2020]
- [15] GONZALEZ CHAVES, F.(2019) *Planteamiento metodológico para el diagnóstico del banco de reactores de la planta piloto de la fundación Universidad de América bajo las condiciones de diseño y operación establecida por el fabricante*. Tesis. Bogotá: Universidad de América.
- [16] MEJÍAS CHIMENO, J.(2005) *Estudio sobre la depuración de los lixividados de vertederos de RSU con cenizas volantes zeolitizadas.8. Escalado de la planta industrial*. Tesis.
- [17] AENOR (2018). *Gases de efecto invernadero Huella de carbono de productos Requisitos y directrices para cuantificación*. UNE –EN ISO 14067:2018. Madrid: AENOR
- [18] LENNTECH. *Calculadora del gasto energético y monetario necesario para calentar agua* . < <https://www.lenntech.es/calculadoras/energia/coste-energia-agua.htm> > [Consulta: 9 de Abril del 2021].
- [19] WEBFLEET SOLUTIONS. < https://www.webfleet.com/es_es/webfleet/blog/conoces-el-consumo-de-diesel-de-un-camion-por-km/>. [Consulta: 9 de Abril del 2021].
- [20] GASSERVEI. *R-404A*.< <https://gas-servei.com/productos/refrigerantes/refrigerantes-hfc/gasficha/r-404a/>>[Consulta: 9 de Abril del 2021].
- [21] NER. *Carga correcta* . < <https://refrigeracionner.com/carga-correcta/> >.[Consulta: 9 de Abril del 2021].
- [22] NOBBOT. *Tecnología para las personas*.< <https://www.nobbot.com/personas/cuanto-co2-produces/>>[Consulta: 9 de Abril del 2021].
- [23] GRIJALVA MENÉNDEZ , R. *Análisis de factibilidad económica de un horno de regeneración de carbón activado granular*. Trabajo final de grado. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

ANEXO

Tabla 1. Factores de emisión de CO₂ y poderes caloríficos por defecto

nutreco		FACTORES DE EMISIÓN									
Categoría	Subcategoría	UNIDAD 1						UNIDAD 2		UNIDAD 2	
		Factor de emisión de CO ₂ (tCO ₂ /TJ) (sin factor de oxidación)	Factor de oxidación	PCI (poder calorífico inferior) G/Munidad	Densidad (kg/l)	Factor emisión	Unidad de medida	Factor emisión	Unidad de medida	Factor emisión	Unidad de medida
Electricidad de la red	Mezcla de electricidad peninsular					0,3400	kg CO ₂ /kWh				
Consumo combustibles fósiles	Gas natural	56,3	0,995	38,35		2,1403	kg CO ₂ /Nm ³			0,2017	kg CO ₂ /kWh
	Gas propano	64,2	0,990	46,20	0,509	1,5225	kg CO ₂ /litro	50,2873	kg CO ₂ /bombona	0,2297	kg CO ₂ /kWh
	Gasoil	73,7	0,990	42,40	0,900	2,7943	kg CO ₂ /litro			0,2628	kg CO ₂ /kWh
	Fuel-oil	76,8	0,990	40,16	0,965	2,9480	kg CO ₂ /litro			0,2736	kg CO ₂ /kWh
Transporte carretera	GLP genérico	65,7	0,990	47,30	0,540	1,6613	kg CO ₂ /litro			0,2340	kg CO ₂ /kWh
	Gasolina 95	69,3	0,995	44,30	0,748	2,2849	kg CO ₂ /litro	10030	(2009)litro	0,2470	kg CO ₂ /kWh
	Gasolina 98	69,3	0,995	44,30	0,748	2,2849	kg CO ₂ /litro	11299	(2009)litro	0,2470	kg CO ₂ /kWh
	Gasoil	73,700	0,990	42,400	0,833	2,5754	kg CO ₂ /litro				kg CO ₂ /kWh

Los factores de emisión provienen de la Guía IPCC 2006 del Inventario Nacional de Emisiones de GEI, del Anexo B del Informe de Inventarios de GEI 1990-2007 (2009) y de los datos del Anexo I del plan de Energías Renovables de España 2005-2010

- (1) El PCI también se puede expresar en relación a la masa, siendo su valor de 48,48 GJ / tonelada.
- (2) Para el paso de PCS a PCI en el gas natural se utiliza el factor de conversión de 0,901.
- (3) La limitación del porcentaje de azufre según el R.D. 287/2001, motiva que ya no se distinga entre los fuelóleos BIA, N° 1 y N° 2.
- (4) Fuente factor de emisión: MIX ELECTRICO ESPAÑOL (considerando el valor mensual publicado).

