

# TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN AVANZADA (REACCIÓN FENTON ) DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

G. Salas C.

## RESUMEN

Los Procesos Avanzados de Oxidación (AOX) se basan en su capacidad de generación in-situ de radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), especie con un elevado potencial de oxidación mediante la combinación de un agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) con un catalizador ( $\text{Fe(II)}$ ). Estos radicales  $\bullet\text{OH}$  son capaces de oxidar muchos compuestos orgánicos de forma no selectiva y con altas velocidades de reacción. Esta propiedad es aprovechada para conseguir la completa mineralización ( $\text{CO}_2$  y ácidos minerales) de los contaminantes o su degradación en sustancias más fácilmente biodegradables. Se pretende desarrollar una alternativa eficaz para la eliminación de materia orgánica de efluentes residuales mediante la aplicación de AOX, más concretamente procesos de Fenton al agua residual de una textil después del tratamiento físico químico. Con un contenido de DQO = 1700 mg/L y las condiciones ensayadas de  $\text{pH} = 3$ ,  $[\text{Fe}^{2+}] = 200 \text{ mg/L}$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2] = 3612 \text{ mg/L}$ ; se disminuyó al cabo de 40 minutos el 97% de la demanda química de oxígeno (DQO).

**Palabras clave:** Oxidación avanzada, tratamiento de aguas residuales de textiles.

## ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOX) TEXTILE WASTEWATER

### ABSTRACT

Advanced Oxidation Processes (AOX) are based on the in situ generation of hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ), which have a high oxidation potential. In the case of Fenton processes the generation of hydroxyl radicals takes place by the combination of an oxidation agent ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) with a catalyst ( $\text{Fe(II)}$ ). These radicals are not selective and they react very fast with the organic matter, being able to oxidize a high variety of organic compounds. This property allows the degradation of pollutants into more biodegradable compounds, and, in some cases, their complete mineralization into  $\text{CO}_2$  and mineral acids. Under optimal conditions, ( $\text{pH} = 3$ ,  $[\text{Fe}^{2+}] = 200 \text{ mg/L}$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2] = 3612 \text{ mg/L}$ ) the Fenton processes are able to reduce the concentration of the organic matter present in the textile effluent, up to 97%.

**Key words:** Advanced Oxidation Processes, wastewater treatment.

## I. INTRODUCCIÓN

La industria textil ha presentado notables problemas medioambientales vinculados principalmente al uso y la gestión del agua. El impacto ambiental de sus efluentes líquidos es muy diverso, por la gran variedad de materias primas, reactivos (colorantes y auxiliares) y métodos de producción existentes en ellos [US/EPA 1997]. La industria textil

consume diariamente grandes cantidades de agua en la mayoría de sus procesos. Dichos efluentes se caracterizan generalmente por su elevada demanda química de oxígeno (DQO), debido a los compuestos orgánicos refractarios; demanda biológica de oxígeno, debida a la materia orgánica biodegradable ( $\text{DBO}_5$ ), metales, elevada temperatura, alto contenido en color, pH inestable, sólidos en suspensión.

\* Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Como consecuencia de la creciente preocupación social por el medio ambiente, la legislación referente a la calidad del agua está siendo cada vez más restrictiva. A diferencia de las aguas urbanas, en las que la mayoría de los compuestos orgánicos son fácilmente biodegradables, y en las que la diversidad de residuos no hace necesaria la adición de nutrientes, el tratamiento de las aguas industriales puede complicarse por contener compuestos difíciles de degradar biológicamente (compuestos recalcitrantes o refractarios) o cuya degradación biológica se produce tan lentamente que hace ineficaz este tipo de sistemas (compuestos persistentes), o incluso tóxicos para los microorganismos. Por lo tanto, son muchos los casos en los que se requieren tratamientos más específicos y avanzados.

La necesidad de gestionar racionalmente los recursos hídricos y la agresión ambiental que producen las aguas contaminadas, ha causado que a lo largo de los años se hayan introducido leyes cada vez más restrictivas que exigen a las industrias del sector tratar sus aguas, antes de verterlas. La tendencia actual va encaminada hacia la implementación de tecnologías de remediación eficaces que logren alcanzar un nivel de depuración suficiente como para reutilizar las aguas tratadas y reducir el consumo del recurso hídrico. Los vertidos industriales producen generalmente un menor volumen de agua residual que los urbanos, pero sus características provocan más daños al dominio público hidráulico, ya que en ocasiones, se trata de vertidos con componentes refractarios o persistentes a la degradación biológica, o incluso tóxicos para los microorganismos. Por lo tanto, son muchos los casos en los que se requieren tratamientos más específicos y avanzados.

Los tratamientos biológicos de los efluentes líquidos de la industria textil incluyen básicamente tratamientos aeróbicos y anaeróbicos que pueden ser precedidos por una o más etapas de tratamiento primario como equalización, neutralización, coagulación-floculación y flotación por aire disuelto (DAF).

La eficiencia del tratamiento biológico para la remoción de la DBO y DQO depende fuertemente de la relación DBO/DQO. El valor medio de esta razón en un efluente de la industria textil es de alrededor de 0,35, lo que hace difícil la eliminación total de la DQO. En revisión sobre la biodegradación de colorantes textiles, se encontró que la mayoría de los colorantes no muestran una biodegradación significativa en medios aeróbicos. Es conveniente llevar este ratio a un valor no menor de 0,6 para lograr una biodegradabilidad aceptable en el efluente. En consecuencia, el empleo de los procesos de oxidación avanzada, para reducir demanda química de oxígeno (DQO) como tratamientos exclusivos o como pretratamiento biológico puede constituir una alternativa viable para la eliminación de la materia orgánica refractaria de un efluente textil.

La mayoría de las empresas textiles vierten sus aguas residuales al sistema de alcantarillado de la ciudad. El Ministerio de Vivienda publicó los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario (Decreto Supremo N° 021-2009-Vivienda). La presente norma regula mediante Valores Máximos Admisibles (VMA) las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

Los Valores Máximos Admisibles (VMA) son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas residuales no domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario; su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento - EPS, o las entidades que hagan sus veces. Entiéndase por Valores Máximos Admisibles (VMA) como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria,

maquinarias y equipos de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de las aguas residuales cloacales de la ciudad.

Los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario, se establecen en la Tabla N.º 1a y N.º 2 y forman parte integrante de la norma. Los usuarios cuyas descargas sobrepasen

los valores contenidos en la Tabla N.º 1, deberán pagar la tarifa establecida por el ente competente, la cual es complementaria al reglamento de la presente norma, pudiéndose llegar en los casos que se establezca en el reglamento, incluso a la suspensión del servicio de alcantarillado sanitario. Los parámetros contenidos en la Tabla N.º 1b no pueden ser sobrepasados. En caso se sobrepase dichos parámetros, el usuario será sujeto de suspensión del servicio.

**Tabla N.º 1a.** Valores máximos admisibles.

Parámetro	Unidad	Expresión	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda bioquímica de oxígeno(DBO <sub>5</sub> )	mg /L	DBO <sub>5</sub>	500
Demanda química de oxígeno(DQO)	mg /L	DQO	1000
Sólidos suspendidos totales	mg /L	S.S.T	500
Aceites y grasas	mg /L	A y G	100

**Tabla N.º 1b.** Valores máximos admisibles.

Parámetro	Unidad	Expresión	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Aluminio	mg /L	Al	10
Arsénico	mg /L	As	0,5
Boro	mg /L	B	4
Cadmio	mg /L	Cd	0,2
Cianuro	mg /L	CN <sup>-</sup>	1
Cobre	mg /L	Cu	3
Cromo Hexavalente	mg /L	Cr <sup>+6</sup>	0,5
Cromo total	mg /L	Cr	10
Manganeso	mg /L	Mn	4
Mercurio	mg /L	Hg	0,02
Níquel	mg /L	Ni	4
Plomo	mg /L	Pb	0,5
Sulfatos	mg /L	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	500
Sulfuros	mg /L	S <sup>-2</sup>	5
Zinc	mg /L	Zn	10
Nitrógeno amoniacal	mg /L	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	80
pH	unidad	pH	6 - 9
Sólidos sedimentables	mL/L /h	S.S.	8,5
Temperatura	°C	T	< 35

## II. ANTECEDENTES

Las aguas residuales domésticas y la mayor parte de las aguas residuales no domésticas (léase industriales) son recolectadas en el alcantarillado sanitario de la empresa de agua y alcantarillado de la ciudad (Sedapal). Estas aguas residuales reciben o recibirán un tratamiento biológico antes de ser emitidas al mar (cuerpo receptor) en plantas administradas por Sedapal y pronto por empresas privadas (proyecto la Taboada y La Chira). El tratamiento biológico de las aguas residuales domésticas o cloacales se basa en un proceso aparentemente simple en que una población mixta de microorganismos utiliza como nutrientes sustancias (materia orgánica disuelta y coloidal) que contaminan el agua, mineralizando la materia orgánica y transformándola en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) que son sustancias no contaminantes.

La población microbiana puede ser destruida por envenenamiento, lo que ocurre actualmente ya que las empresas descargan residuos líquidos tóxicos en el agua que circula por el alcantarillado sanitario. Razón por la cual el Decreto Supremo en mención busca regular las descargas de aguas residuales no domésticas para garantizar la sostenibilidad del tratamiento en las plantas ya instaladas y en las que se instalarán en el futuro.

La Sunass (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento) en un informe último establece (Tabla N.º 2), que existe una reducción de la capacidad de tratamiento y

disminución de la eficiencia de reducción en el DBO<sub>5</sub> y de la vida útil de las depuradoras existentes y futuras, debido a la emisión en el desagüe de efluentes industriales tóxicos.

### 1. Métodos de oxidación avanzada (AOX)

Para los contaminantes orgánicos refractarios, los procedimientos generalmente usados, resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos y cada vez más crecientemente, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas Tecnologías o Procesos de Oxidación Avanzados (AOX), muy poco aplicados y, peor aún, menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina.

Las AOX son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de posttratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores. Los procesos involucrados poseen una mayor factibilidad termodinámica y una velocidad de oxidación muy incrementada por la participación de radicales, principalmente el radical hidroxilo, •OH. Esta especie posee propiedades adecuadas para atacar virtualmente a todos los compuestos orgánicos y reaccionar 10<sup>6</sup>-10<sup>12</sup> veces más rápido que oxidantes alternativos como el O<sub>3</sub>. (Tabla N.º 3).

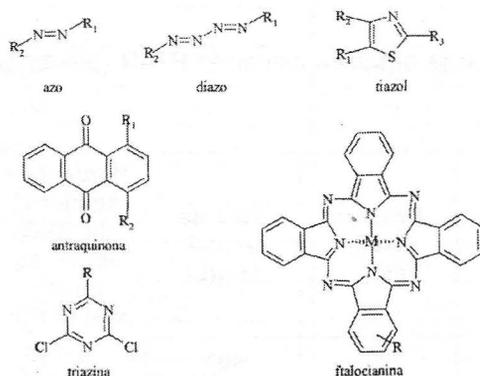
**Tabla N.º2.** Carga orgánica de diseño versus la carga orgánica actual en PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales).

Planta de tratamiento de aguas residuales	Caudal de diseño (L/s)	Caudal de tratamiento actual (L/s)	Caudal tratado vs el caudal de diseño (%)	DBO de diseño (mg/L)	DBO de actual (mg/L)	Porcentaje adicional de DBO actual en aguas residuales
San Juan	800	400	50	250	481	92,4
Huáscar	170	74	43,5	250	556	122,4

**Tabla N.º 3.** Potencial de oxidación.

Agente oxidante	Potencial de oxidación (E°) en voltios
Fluor (F)	3,06
Radical hidroxilo (•OH)	2,80
Oxígeno atómico (O)	2,42
Ozono (O <sub>3</sub> )	2,08
Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1,78
Cloro (Cl <sub>2</sub> )	1,36
Oxígeno molecular (O <sub>2</sub> )	1,23

En general, las moléculas de los colorantes utilizados en la actualidad son de estructuras muy variadas y complejas. La mayoría de ellos son de origen sintético, muy solubles en agua, altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables. Alrededor del 60% de los colorantes en uso en la industria textil actual son *colorantes reactivos*, que se caracterizan por formar una unión éter con la fibra, lo que garantiza una mayor duración del color en el tejido. Sus estructuras frecuentemente contienen grupos azo, antraquinona o ftalocianina (Figura N.º 1). Dadas sus características de solubilidad y estabilidad, los métodos tradicionales de floculación, sedimentación, flotación o adsorción son útiles en la remoción de colorantes dispersos, pero no de colorantes reactivos, por lo que una alternativa más promisoría sería la oxidación avanzada (AOX). En la Figura N.º 1 se presenta algunos ejemplos de moléculas colorantes.



**Figura N.º 1.** Ejemplos estructurales de los colorantes textiles.

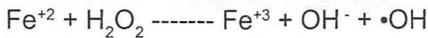
La tintura o teñido es el proceso en el cual la materia prima textil (algodón, poliéster o mezcla algodón-poliéster) es puesta en contacto con la disolución (colorante reactivo) o dispersión de un colorante (colorante disperso). La empresa textil objeto del estudio emplea en sus procesos de teñido tanto colorantes dispersos como reactivos. En los reactivos dispersos para que la tintura o teñido se lleve a cabo se han desarrollado técnicas especiales de tintura o teñido que suponen que el colorante no ionizado se disuelve en la fibra, dando lugar a una disolución similar a la aleación de dos metales. En primer lugar el colorante disperso debe tener un tamaño pequeño (coloides) para facilitar su dispersión en el baño. En segundo lugar, hay que conseguir que la fibra aumente temporalmente su tamaño de poros, permitiendo así el paso del colorante. Después de la tintura los poros recuperan su tamaño original, atrapando las moléculas de colorante en su interior. Por lo tanto, el colorante disperso que no ha sido atrapado, permanecerá como dispersión coloidal en el agua residual, específicamente como partícula coloidal

A diferencia de los colorantes dispersos, los colorantes reactivos son una clase tintorera de colorantes que contienen al menos un grupo capaz de formar enlaces covalente entre un átomo del colorante y un átomo de oxígeno, nitrógeno o azufre de la tela a teñir. Por tanto, el colorante reactivo no fijado permanecerá en solución o disuelto en el agua residual (compuesto orgánico refractario). Por lo tanto la separación del tinte disperso es por coagulación-floculación y flotación con aire disuelto (DAF) y la del tinte reactivo por oxidación avanzada (AOX).

## 2. Reacción Fenton

La reacción de Fenton es un proceso de oxidación propuesto por H. J. H Fenton (1894) para la oxidación de ácido tartárico. El método se basa en la generación de radicales hidroxilo (•OH) por la adición de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) a sales metálicas de hierro

(Fe<sup>+2</sup>) en disolución, obteniendo mejores resultados a valores de pH = 3,0



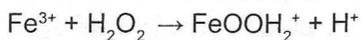
$$k = 76,5 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$

En la anterior ecuación se observa la formación de los radicales hidroxilo, que se producen por la descomposición del peróxido de hidrógeno por efectos del hierro, el cual cambia de estado de Fe<sup>+2</sup> a Fe<sup>+3</sup>. En el proceso de Fenton, después de que el Fe<sup>+2</sup> descompone al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, los radicales ·OH siguen reaccionando con el Fe<sup>+2</sup> remanente en disolución, hasta que éste se convierte totalmente a Fe<sup>+3</sup>, además de oxidar a la materia orgánica presente (RH) obteniendo los productos de la reacción

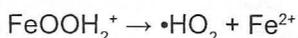


El ión Fe(III) puede reducirse por reacción con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y formar de nuevo ión Fe(II) y más radicales hidroxilo. Este segundo proceso se denomina Fenton-like. Es más lento que el proceso de Fenton, y permite la regeneración de Fe(II).

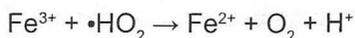
El mecanismo global resulta de carácter catalítico. Para ello, es necesario que el peróxido se encuentre en exceso respecto a la cantidad de hierro añadida.



$$\text{Keq} = 3,10 \cdot 10^{-3} \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$



$$\text{Keq} = 2,70 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$



$$\text{Keq} < 2,00 \cdot 10^3 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$

Una de las ventajas del reactivo de Fenton es que no necesita energía externa para descomponer al peróxido de hidrógeno en sus radicales hidroxilo, haciéndolo un método sencillo y efectivo de catálisis homogénea. Una de las desventajas del método se da cuando en disolución se encuentran aniones disueltos tales como fosfatos, cloruros, nitratos, etc., éstos pueden provocar una reacción de complejación con el hierro, disminuyendo la capacidad del Fe<sup>+2</sup> de disociar el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> deteniéndose el ciclo.

### III. PARTE EXPERIMENTAL

Los experimentos de oxidación Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Fe<sup>2+</sup>, en fase homogénea) se han realizado en discontinuo. Las aguas ensayadas corresponden al efluente de una textil, en la que se lleva a cabo un tratamiento físico-químico previo de coagulación-floculación y flotación por aire disuelto. El nivel de contaminación de estas aguas residuales es variable, en función de los ciclos de producción. Por este motivo, para estudiar la viabilidad y eficacia de los procesos de oxidación (homogéneo) en su aplicación a este tipo de aguas, se ha trabajado con una muestra compuesta obtenida en días diferentes. Para seguir la eficacia del proceso de oxidación se han seleccionado parámetros globales indicativos, como la demanda química de oxígeno (DQO).

La caracterización de las muestras de agua residual de la textil se recoge en la Tabla N.º 4. Todos los efluentes analizados presentan un valor de DQO superior al máximo permitido en vertidos industriales establecidos en el D.S. 021- 2009-Vivienda.

**Tabla N.º 4.** Análisis de la muestra compuesta de agua residual de la textil tras ser sometida a tratamiento físico-químico.

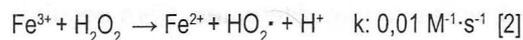
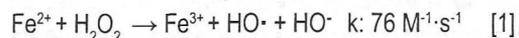
Parámetro analizado	Muestra compuesta	Valor máximo admisible (VMA)
DQO	1700	1000
DBO	460	500
Biodegradabilidad DBO/DQO	0,306	---
pH	8,1	6-9

La concentración inicial de peróxido de hidrógeno es la cantidad estequiométrica, referida a la DQO de partida. La concentración de Fe<sup>2+</sup> usada fue de 200 mg/L (Kang y Hwang, 2000; Barbusinski y Majewski, 2003; Lopez *et al.*, 2004), y la temperatura de operación entre 20 °C.

### Efecto del pH

El pH del medio de reacción tiene una influencia determinante en el proceso de oxidación Fenton. Es necesario realizar la reacción a pH ácido para generar radicales HO• y conseguir velocidades de oxidación elevadas. Numerosos autores han estudiado la influencia de esta variable en el tratamiento de diferentes efluentes industriales, encontrando el valor óptimo de pH en torno a 3 (Lin y Lo, 1997; Benítez *et al.*, 2001; Szpyrkowicz *et al.*, 2001; Guedes *et al.*, 2003).

El efecto tan acusado del pH inicial del proceso está relacionado con el estado en el que se encuentra el hierro que, a su vez, influye sobre la formación de radicales hidroxilo, de acuerdo con las reacciones:

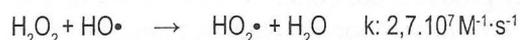


### Efecto de la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Se trabajó con la cantidad teórica estequiométrica, manteniendo constante la dosis de Fe<sup>2+</sup> en 200 mg/L. La cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> co-

rrespondiente a la relación estequiométrica respecto a la DQO, se calcula mediante la ecuación:  $[\text{H}_2\text{O}_2]_{\text{est}} = (\text{DQO}/8) \cdot 17 = 2,125 \cdot \text{DQO}$ .

Un exceso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> conduce a una mayor producción de radicales hidroxilo (reacción [1]) o a una mayor regeneración de Fe<sup>2+</sup> (reacción [2]). Una mayor concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y HO aumenta la velocidad de reacciones que implican la desaparición de los mismos, según:



Por otro lado, la concentración residual de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> que permanece en el medio después del tratamiento aporta toxicidad (Ito *et al.*, 1998), lo que obliga a ajustar convenientemente la dosis de peróxido de hidrógeno empleada, de forma que el efluente tratado no exceda los límites de vertido establecidos para dicho indicador (p.e., ecotoxicidad).

### Efecto de la concentración de Fe<sup>2+</sup>

La concentración inicial de Fe<sup>2+</sup> empleada favorece la extensión de la reacción, debido a una mayor producción de radicales HO•

Las condiciones iniciales de operación empleadas en los experimentos realizados en discontinuo, para la muestra de agua residual compuesta se resumen en la Tabla N.º 5.

**Tabla N.º 5.** Condiciones de operación empleadas en los experimentos de oxidación Fenton al agua residual compuesta (DQO = 1700).

Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	pH
200	3612	3,0

**Tabla N°6.** Cinética de oxidación del agua residual de la textil.

Parámetro (DQO)	Tiempo (min)
1400	0
900	15
450	25
250	50
80	65
40	110

#### IV. RESULTADOS

El seguimiento de la evolución de la DQO (Tabla N.º 6) como parámetro de calidad del agua residual no sólo proporciona información sobre el grado de mineralización de la materia orgánica, sino que, además, engloba la transformación de unas especies químicas a otras con diferentes grados de oxidación. Las especies que aportan DQO se pueden agrupar en una fracción más fácilmente oxidable y otra más resistente a este tratamiento.

En todos los ensayos, la oxidación de la materia orgánica tiene lugar con una elevada relación de peróxido de hidrógeno respecto del hierro adicionado (relación óptima  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  5,5%, en peso). En estas condiciones, los radicales hidroxilo se producen muy rápido, según la reacción [1.], y al reaccionar con la materia orgánica provocan una rápida disminución de la DQO. A medida que el  $\text{Fe}^{2+}$  se oxida, el  $\text{Fe}^{3+}$  va reaccionando con el exceso de agua oxigenada para regenerar el  $\text{Fe}^{2+}$  mediante la reacción [2]. Esta reacción es mucho más lenta, lo que explica la desaceleración de la disminución de DQO transcurrido el periodo inicial. Por otro lado, la reacción [2] conduce a la formación del radical perhidroxilo ( $\text{OH}_2\bullet$ ), cuyo poder oxidante es muy inferior (1,70 V, frente a 2,80V del radical  $\text{HO}\bullet$ )

#### V. CONCLUSIONES

- La oxidación Fenton, combinación de sales de  $\text{Fe}^{2+}$  con  $\text{H}_2\text{O}_2$  a pH ácido para generar radicales  $\text{HO}\bullet$ , supone una alternativa o una solución complementaria a los procesos de depuración convencionales para el tratamiento de las aguas residuales de la industria.
- La oxidación Fenton presenta su máxima actividad catalítica a pH 3,0. Un incremento o disminución en este valor de pH reduce bruscamente la eficacia. Para valores de pH > 3-4, el  $\text{Fe}^{3+}$  precipita como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y descompone el  $\text{H}_2\text{O}_2$  preferentemente a  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Además, la formación de complejos de  $\text{Fe}(\text{II})$  a valores altos de pH conduce a la disminución de la concentración de  $\text{Fe}^{2+}$ . Por otro lado, para valores de pH más ácidos, la regeneración del  $\text{Fe}^{2+}$  por reacción del  $\text{Fe}^{3+}$  con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  se ve inhibida.
- El empleo de una concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  superior a la cantidad estequiométrica no mejora la eliminación de materia orgánica en el proceso Fenton. Aunque este exceso conduce a una mayor producción de radicales  $\text{HO}\bullet$  o a una mayor regeneración de  $\text{Fe}^{2+}$ , propicia una mayor contribución de reacciones que implican la desaparición de los mismos.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahmadi M., Vahabzadeh F., Bonakdar-pour B., Mofarrah E., Mehranian M. "Application of the central composite design and response surface methodology to the advanced treatment of olive oil processing wastewater using Fenton's peroxidation". *Journal of Hazardous Materials* 123 (1-3), 187-195, 2005.
- [2] Al-Hayek N., Doré M. "Oxidation of organic compounds by Fenton's reagent: possibilities and limits". *Environment Technology Letters* 6 (1), 37-50, 1985.
- [3] Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta, R. "Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery". *Catalysis Today* 53 (1), 51-59, 1999.
- [4] Barbusinski K., Filipek K. "Use of Fenton's reagent for removal of pesticides from industrial wastewater". *Polish Journal of Environmental Studies* 10 (4), 207-212, 2001.
- [5] Barbusinski K., Majewski J. "Discoloration of azo dye Acid Red 18 by Fenton reagent in the presence of iron powder". *Polish Journal of Environmental Studies* 12 (2), 151-155, 2003.
- [6] Beltrán de Heredia J., Domínguez J.R. "Aplicación del reactivo Fenton para la depuración de las aguas residuales de la industria productora de aceituna de mesa". *Tecnología del Agua* 21 (219), 50-58, 2001.