

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**COMERCIALIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN
DE LAS TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN
AVANZADA**

**(Commercialization and Implementation of
Advanced Oxidation Technologies)**

Para acceder al Título de

Graduada en Ingeniería Química

Autora: Sandra Fernández Heras

Febrero 2016

TÍTULO	Comercialización e Implementación de las Tecnologías de Oxidación Avanzada		
AUTOR	Sandra Fernández Heras		
DIRECTOR/CODIRECTOR	María José Rivero Martínez		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería Química</i>	FECHA	26/02/2016

PLABRAS CLAVE

Tecnologías oxidación avanzada, mineralización, materia orgánica, contaminante, comercialización, implementación, nivel de maduración, ozono, luz ultravioleta, reactivo Fenton, peróxido de hidrógeno.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que los tratamientos biológicos sólo producen una eliminación parcial de los contaminantes orgánicos eliminando únicamente los compuestos biodegradables, en los últimos años se han estudiado una serie de tecnologías emergentes, denominadas tecnologías de oxidación avanzada (TOAs), especialmente orientadas a la eliminación de compuestos recalcitrantes y/o tóxicos.

El presente trabajo se centra en el estudio de cada una de estas tecnologías, así como de su nivel de comercialización e implementación en la industria.

Para ello, se desarrollarán los siguientes objetivos:

1. Comparativa de las distintas TOAs en cuanto a posibilidades de uso para contaminantes orgánicos en aire, agua o suelos.
2. Comercialización de las TOAs.
3. Grado de implementación industrial de las TOAs.

RESULTADOS

Para la asignación del nivel de maduración tecnológico (TRL) de las tecnologías de oxidación avanzada, previamente se realizó una comparación global de varios parámetros comunes a cada una de ellas, así como su posibilidad de tratamiento en aguas, aire y suelos.

A continuación, se realizó un estudio sobre la comercialización de las mismas, elaborando una búsqueda minuciosa de empresas comercializadoras de equipos de oxidación avanzada, comparando especificaciones y resaltando las mejores opciones según el tipo de necesidad de cada industria. Por último, se evaluó su grado de implementación, por ello, se contactó vía email con cada empresa y se consiguió reunir distintos casos de estudio verificando qué equipos han sido ya probados a nivel industrial y con qué resultados.

CONCLUSIONES

Para comentar que tecnologías son las más adecuadas como método de oxidación avanzada se han considerado condiciones de trabajo ambientales no extremas y se ha tenido en cuenta la duración de los electrodos en la oxidación electroquímica. Por lo tanto, aquellas que muestran un mejor comportamiento en la eliminación de contaminantes son las que utilizan como oxidantes el ozono, el peróxido de hidrógeno, la luz ultravioleta y el reactivo Fenton. La elección de cada una de ellas dependerá de las necesidades requeridas y de la corriente tratada.

Para su comercialización, únicamente se han tenido en cuenta aquellas que utilizan ozono y luz ultravioleta ya que se venden en el mercado como equipos con unas especificaciones y condiciones de operación determinadas. Las empresas estudiadas han sido; KAUFMANN, ITDI, TROJANUV, BNP, XYLEM, AQUAFINE y CALGON CARBON.

Por último, en la elaboración del grado de implementación industrial, se han trabajado los casos de estudio, tanto los que utilizan ozono o luz ultravioleta como también reactivo Fenton o peróxido de hidrógeno, de las empresas TROJAN UV, XYLEM, ISOTEC y US Peroxide, concluyendo que el nivel de maduración tecnológica (TRL) de cada una es; 7 (Ozonización y Peróxido de hidrógeno) y 8 (Luz ultravioleta y Reactivo Fenton).

BIBLIOGRAFÍA

Blesa, M. A. y Sánchez, B. (Eds.). (2004). *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea* (pp. 7-33). Madrid, CIEMAT.

Irabien, A. y Rodríguez, J.J. (2013). *Gestión sostenible de los residuos peligrosos*. (pp. 128-141). Madrid, SÍNTESIS.

TÍTULO	Commercialization and Implementation of Advanced Oxidation Technologies		
AUTOR	Sandra Fernández Heras		
DIRECTOR/CODIRECTOR	María José Rivero Martínez		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería Química</i>	FECHA	26/02/2016

KEYWORDS

Advanced oxidation technologies, mineralization, organic matter, pollutant, commercialization, implementation, maturation level, ozone, ultraviolet light, Fenton reagent, hydrogen peroxide.

SCOPE

Biological treatments produce only a partial removal of organic pollutants eliminating only biodegradable compounds. Therefore, a number of emerging technologies, called advanced oxidation technologies (AOTs), have been studied, especially aimed at the removal of recalcitrant and/or toxic compounds.

This work focuses on the study of each of these advanced oxidation technologies (AOTs) and their level of commercialization and implementation in the industry.

To do this, the following objectives will be pursued:

1. Comparison of different AOTs in terms of usability for organic pollutants in air, water or soil.
2. Commercialization of AOTs.
3. Industrial implementation degree of AOTs.

RESULTS

For the assignment of the technological maturity level (TRL) of advanced oxidation technologies, previously, a global comparison of several parameters as well as the possibility of treatment in water, air and soil were carried out.

Then, a study about their commercialization was carried out, elaborating a meticulous search of companies that commercialize with advanced oxidation equipments, comparing specifications and highlighting the best options according to the needs of each industry. Finally, was evaluated their implementation degree, contacting every company and assembling several cases of study of equipments that already have been proved to industrial level.

CONCLUSIONS

To select the most suitable technology, some criteria such as avoiding extreme conditions or uncertainty of electrodes materials were considered, those that show a better behavior in the pollutant's elimination are those that use ozone, hydrogen peroxide, ultraviolet light and Fenton reagent. The election of each of them will depend on needs of the treated current.

For its commercialization, it has been only considered ozone and ultraviolet light because companies sell it like equipments with specifications and operation conditions. The companies that have been studied was KAUFMANN, ITDI, TROJANUV, BNP, XYLEM, AQUAFINE and CALGON CARBON.

Finally, to determine the industrial implementation grade, several cases of study has been highlighted, including, ozone, ultraviolet light, Fenton reagent and hydrogen peroxide of the companies TROJANUV, XYLEM, ISOTEC and US Peroxide. The following level of technological maturation has been determined; 7 (ozone and hydrogen peroxide) and 8 (ultraviolet light and Fenton reagent).

REFERENCES

- Blesa, M. A. y Sánchez, B. (Eds.). (2004). *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea* (pp. 7-33). Madrid, CIEMAT.
- Irabien, A. y Rodríguez, J.J. (2013). *Gestión sostenible de los residuos peligrosos*. (pp. 128-141). Madrid, SÍNTESIS.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Contexto técnico y social	1
1.1.1. Problemática por contaminación de compuestos orgánicos	1
1.1.2. Tecnologías convencionales.....	4
1.1.3. Motivación... ..	4
1.2. Tecnologías de oxidación avanzadas (TOAs)	6
1.2.1. Descripción de las TOAs no fotoquímicas	7
1.2.1.1. Ozonización en medio alcalino (O_2/OH^-)	7
1.2.1.2. Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2)	8
1.2.1.3. Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2)	8
1.2.1.4. Oxidación electroquímica	9
1.2.1.5. Radiólisis y y tratamiento con haces de electrones	9
1.2.1.6. Plasma no térmico	10
1.2.1.7. Oxidación en agua subcrítica y supercrítica	10
1.2.2. Descripción de las TOAs fotoquímicas	11
1.2.2.1. Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UUV).....	12
1.2.2.2. UV/ H_2O_2	12
1.2.2.3. UV/ O_3	13
1.2.2.4. Foto-Fenton.....	13
1.2.2.5. Ferrioxalato y otros complejos de Fe (III)	14
1.2.2.6. UV/Peryodato	14
1.2.2.7. Fotocatálisis heterogénea.....	15
1.3. Alcance y objetivos	16
2. Comparativa entre las distintas TOAs	17
3. Combinación de las TOAs	33
3.1. Mejora de la eficiencia introduciendo el proceso del ultrasonido	33
3.2. Combinación a gran escala	36

4. Comercialización de las TOAs	37
4.1. Empresas y tecnologías comercializadas	37
4.2. Equipos comercializados y especificaciones técnicas	38
5. Implementación industrial de las TOAs	53
5.1. Casos de estudio y localización geográfica	53
5.2. Grado de madurez tecnológica	60
6. Conclusiones	63
7. Anexos	66
8. Referencias bibliográficas	68

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Fenómeno físico de cavitación acústica.....	33
Figura 2. Mapa de localización geográfica de los casos de estudio.....	58
Figura 3. Representación de los niveles TRL.....	60
Tabla 1. Compuestos orgánicos controlados en el Convenio de Estocolmo (17 de mayo de 2004).....	2
Tabla 2. Compuestos incluidos en el Convenio tras varios estudios.....	2
Tabla 3. Valoración cualitativa de los parámetros a estudiar en las tecnologías de oxidación avanzada no fotoquímicas y tratamiento aplicable.....	18
Tabla 4. Valoración cualitativa de los parámetros a estudiar en las tecnologías de oxidación avanzada fotoquímicas y tratamiento aplicable.....	26
Tabla 5. Combinaciones de algunas TOAs con ultrasonido y luz ultravioleta.....	36
Tabla 6. Listado de empresas y tecnologías con las que comercializa.....	37
Tabla 7. Comparación de las distintas empresas comercializadoras de equipos de producción de ozono.....	39
Tabla 8. Comparación de las distintas empresas comercializadoras de equipos de producción de luz ultravioleta.....	45
Tabla 9. Casos reales de equipos implementados en la industria.....	54
Tabla 10. Nivel de maduración tecnológica.....	61
Tabla 11. Tratamiento de cada tecnología de oxidación avanzada no fotoquímica.....	63
Tabla 12. Tratamiento de cada tecnología de oxidación avanzada fotoquímica.....	64
Tabla 13. Empresas estudiadas y tecnología que comercializan.....	64
Tabla 14. Grado de implementación de cada tecnología.....	65
Tabla 15. Información de las empresas comercializadoras de equipos de oxidación avanzada.....	66
Tabla 16. Información de contacto de cada empresa.....	67

1. Introducción

1.1. Contexto técnico y social

1.1.1. Problemática por contaminación de compuestos orgánicos

Hoy en día no hay actividad humana que no genere compuestos, tanto inorgánicos como orgánicos. Los inorgánicos, al estar constituidos por sencillas moléculas, no presentan mucha problemática en cuanto a la desaparición o transformación de sus constituyentes, a diferencia de lo que ocurre con los orgánicos.

Estos compuestos orgánicos se caracterizan por tener una gran estabilidad pues son moléculas de gran volumen prácticamente cerradas protegidas contra posibles ataques oxidantes, lo que les hace no degradarse tan fácilmente convirtiéndoles en contaminantes persistentes (COPs) en el medio ambiente (Méndez, 2010).

Los COPs son sustancias bioacumulables que poseen características de toxicidad capaces de ocasionar efectos adversos a la salud o al ambiente y propensos al transporte atmosférico de largo alcance, se consideran contaminantes emergentes ya que se sabe relativamente poco o nada acerca de su presencia e impacto en los distintos compartimentos ambientales y en el hombre y que, por tanto, precisan investigación (Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, 2013).

Por ello, para reducir o erradicar las distintas emisiones de compuestos orgánicos e investigar sobre los aspectos y efectos negativos de dichos compuestos sobre la salud, tanto del ser humano como del planeta en sí, se firma un acuerdo entre los distintos países europeos denominado Convenio de Estocolmo (17 de mayo de 2004).

Para lograr sus objetivos, el Convenio establece varias medidas para disminuir la presencia de estos compuestos en el ambiente mediante acciones de restricción y

prohibición en su uso y producción, así como también en la disminución de su generación por fuentes no intencionales. La tabla 1 incluye los compuestos químicos a controlar.

Tabla 1.

Compuestos orgánicos controlados en el Convenio de Estocolmo (17 de mayo de 2004).

Plaguicidas	Productos industriales	Productos de generación no intencional
Aldrina ^a	Bifenilos policlorados (PCB) ^{a, c}	Dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD) ^c
Clordano ^a		
DDT ^b		
Dieldrina ^a		
Endrina ^a	Hexaclorobenceno (HCB) ^{a, c}	Dibenzo-p-furanos policlorados (PCDF) ^c
Heptacloro ^a		
Mirex ^a		
Toxafeno ^a		

^a Listado en el Anexo A del Convenio (para su eliminación)

^b Listado en el Anexo B del Convenio (para restricción en su uso)

^c Listado en el Anexo C del Convenio (para reducción de sus emisiones utilizando la mejor tecnología disponible)

Así mismo, nuevos estudios han señalado la importancia de otros compuestos por lo que el propio Convenio ha previsto procedimientos para considerar regularmente la inclusión de los mismos en el listado anterior. Éstos se recogen a continuación en la tabla 2.

Tabla 2.

Compuestos incluidos en el Convenio tras varios estudios.

Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPAs)	Perfluoro-octan-sulfonato (PFOS)	Hexaclorociclohexanos incluyendo al lindano
Éteres bifenílicos policromados	Hexabromobifenilo (HBB)	Compuestos órgano-estánnicos
Atrazina	Endosulfán	Plomo y compuestos órgano-plúmbicos
Ftalatos	Parafinas policloradas (PPCs)	Compuestos órgano-mercúricos
Pentaclorofenol (PCF)	Clordecona	Nonil y octil-fenoles

Como se ha citado anteriormente, los COPs pueden provocar efectos adversos tanto a la salud humana como al medio ambiente. En cuanto a la toxicidad para los seres humanos, éstos se encuentran expuestos a los COPs principalmente a través de tres formas:

- Accidentes en plantas industriales o ingesta de alimentos altamente contaminados.
- Exposiciones laborales o consumo de alimentos contaminados (nivel medio).
- Exposiciones a los niveles existentes en el ambiente (nivel bajo).

Sus efectos pueden ser muy sutiles presentándose a bajas concentraciones y después de varios años de exposición, lo que hace que su diagnóstico sea difícil de realizar y dificulte la evaluación de los problemas potenciales de salud pública.

Algunos de estos efectos son:

- Cáncer.
- Impedimento en el comportamiento neuronal, incluyendo desorden en el aprendizaje, bajo desempeño mental y déficit de atención.
- Alteraciones en el sistema inmune.
- Deficiencias reproductivas.
- Reducción del período de lactancia en madres en edad de lactancia.
- Diabetes.

Por otro lado, en cuanto a la toxicidad para el medio ambiente, los COPs afectan a una gran cantidad de especies pertenecientes a todos los niveles de la cadena trófica. Además, tienen una larga vida media biológica lo que les permite acumularse en pequeñas concentraciones durante prolongados periodos de tiempo.

Una exposición a bajas concentraciones puede estar asociada con efectos no letales crónicos, como pueden ser:

- Inmunotoxicidad.
- Problemas cutáneos.
- Alteración del rendimiento reproductor.
- Carcinogenicidad.

1.1.2. Tecnologías convencionales

Como se ha visto anteriormente, los contaminantes orgánicos producen una gran cantidad de efectos adversos en la salud de las personas y en el medio ambiente por lo que a lo largo de los años ha sido necesario el desarrollo de una serie de tecnologías para la reducción o disminución de los mismos.

Estas tecnologías se reducen a una serie de procesos fisicoquímicos y biológicos cuyo principal objetivo es la eliminación de los compuestos perjudiciales.

Los tratamientos fisicoquímicos abarcan desde la coagulación, flotación y cloración hasta la ozonación, la oxidación y la adsorción con carbón activado granular. Aunque son ampliamente empleados en la eliminación de contaminantes orgánicos, no todos son igual de eficaces; por ejemplo, en un estudio realizado a nivel laboratorio utilizando diversos tratamientos, se analizó la eliminación de 30 compuestos farmacéuticos diferentes; con los procesos de coagulación, flotación y precipitación con cal, no se obtuvo una eliminación significativa (<20%) mientras que con el carbón activado granular, la oxidación por ozono y la cloración si se obtuvo un buen resultado (90%) (Westerhoff et al., 2005).

Los tratamientos biológicos convencionales como sistemas de lodos activados o filtros biológicos percoladores emplean microorganismos (bacterias, hongos, protozoos y algas) para llevar a cabo la eliminación de aquellos componentes indeseables del agua, aprovechando su actividad metabólica, y obtener, así, un efluente final que pueda ser vertido al medio. Como ocurre con los fisicoquímicos, no consiguen metabolizar todas las sustancias contaminantes requeridas (Roig, 2014).

1.1.3. Motivación

Los tratamientos biológicos ya descritos se han catalogado como la tecnología más viable en el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, sólo producen una eliminación parcial de los contaminantes orgánicos ya que únicamente eliminan los compuestos biodegradables.

Es por esta razón que los últimos años se han estudiado una serie de tecnologías emergentes, especialmente orientadas a la eliminación de compuestos recalcitrantes y/o tóxicos.

- Reactores biológicos con membranas (MBRs)
- Sistemas de membranas (osmosis inversa, ultrafiltración y nanofiltración)
- Tecnologías de oxidación avanzada (TOAs).

Los reactores biológicos de membrana (MBR) son sistemas en los que se combina la filtración por membranas con la degradación biológica, usando fangos activos, consiguiendo tanto la retención física de los contaminantes como su biodegradación (Rubio et al, 2013). Están considerados como una mejora al tratamiento microbiológico de aguas residuales, sin embargo, muchos contaminantes emergentes siguen presentes en el efluente tratado (Petrovic et al., 2003).

Los sistemas de membranas consisten en el empleo de membranas con distintos tamaños de poro (microfiltración (MF), 1-0,1 μm ; ultrafiltración (UF), 0,1-0,01 μm ; nanofiltración (NF), 0,01-0,001 μm), así como de membranas selectivas semipermeables (ósmosis inversa (OI), tamaño de poro $< 0,001 \mu\text{m}$). Una de las grandes ventajas que presentan es que son capaces de retener un gran número de sustancias contaminantes en las aguas, sin embargo, no permiten la degradación de las mismas, por lo que dichos contaminantes se concentran, requiriendo de un tratamiento adicional posterior, y, por tanto, encareciendo los costos del proceso.

Las TOAs son procesos químicos en los que se generan radicales hidroxilo (HO^*), actúan como fuertes oxidantes, capaces de degradar una gran cantidad de contaminantes orgánicos mostrándose como uno de los sistemas más eficientes para la eliminación de contaminantes emergentes (Irabien, 2013).

1.2. Tecnologías de oxidación avanzadas (TOAs)

Las TOAs son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores.

El uso de este tipo de tecnologías conlleva una serie de ventajas:

- Transforman químicamente el contaminante (no le cambian sólo de fase).
- Consiguen la mineralización completa del contaminante, siempre que se emplean especies fuertemente oxidantes.
- No suelen generar lodos.
- Muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros tratamientos, los transforman en productos tratables por métodos más económicos, principalmente el biológico.
- Tratan contaminantes a muy baja concentración.
- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- Ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- Suelen mejorar las propiedades organolépticas del agua tratada.
- En algunos casos, consumen menos energía que otros métodos, como la incineración.
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.

Se pueden clasificar en dos tipos, no fotoquímicas y fotoquímicas, con la diferencia de que en estas últimas se emplea algún tipo de radiación, lo que aumenta la eficacia en el tratamiento de aguas, sin limitarse al aprovechamiento de HO• como oxidante (Blesa et al., 2004).

1.2.1. Descripción de las TOAs no fotoquímicas

❖ 1.2.1.1. Ozonización en medio alcalino (O_2/OH^-)

El ozono es un poderoso oxidante y eficiente bactericida aplicado exitosamente desde hace mucho tiempo como desinfectante de aguas potables.

- Mejora las características organolépticas.
- Mejora las características de filtración y biodegradabilidad.

El método más utilizado para la generación de este ozono es el denominado “descargas en corona” o “descargas eléctricas silenciosas”, el cual consiste en pasar oxígeno en forma gaseosa a través de dos electrodos separados por un dieléctrico y un hueco de descargas. Se aplica un voltaje a los electrodos, causando que un electrón fluya a través del hueco de descargas. Esos electrones suministran la energía para disociar las moléculas de oxígeno, produciéndose así la formación de ozono (Castañeda, 2014).

El ozono puede reaccionar en forma directa con un sustrato orgánico a través de:

- Reacciones lentas y selectivas: (favorecida en medios ácidos)



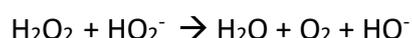
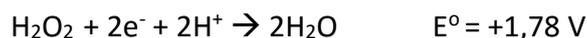
- Reacciones rápidas y no selectivas: (favorecida en medios alcalinos)



Este camino indirecto es menos selectivo ya que las especies formadas tienen gran capacidad oxidante. Existen sin embargo compuestos refractarios, como los ácidos acético y oxálico, productos de oxidación intermedia en ozonización y otros procesos de hidroxilación, que resisten la mineralización. La materia orgánica reaccionará, por lo tanto, por una combinación de ambas reacciones, dependiendo de la composición del agua tratada, del pH y de la dosis de ozono (Blesa et al., 2004).

❖ 1.2.1.2. Ozonización con peróxido de hidrógeno (O₃/H₂O₂)

La ozonización transforma los contaminantes en compuestos más simples, más refractarios al reactivo. Para mejorar el tratamiento se agrega H₂O₂, poderoso oxidante y compuesto inestable que se oxida y reduce a una velocidad máxima a pH=pK_a:



La combinación de dos o más oxidantes produce una destrucción adicional de la carga orgánica. El proceso combina la oxidación directa (y selectiva) del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales HO[•] con los compuestos orgánicos (Blesa et al., 2004).

El H₂O₂ inicia la descomposición de O₃ por transferencia de e⁻:

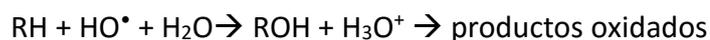
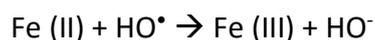


La reacción genera HO[•] consumiendo H₂O₂ y O₃ (a través de un mecanismo en cadena):



❖ 1.2.1.3. Procesos Fenton (Fe²⁺/ H₂O₂)

Los ensayos de Fenton demostraron que las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas oxidaban los ácidos tartárico y málico y otros compuestos orgánicos.



Es un proceso potencialmente útil para destruir contaminantes ya que es muy efectivo para la generación de HO[•].

Tanto el HO• y el HO₂, reaccionan indiscriminadamente con la materia orgánica, siendo este último menos reactivo. En la reacción de ion ferroso con H₂O₂ la velocidad de reacción es alta y el Fe (II) se oxida a Fe (III) en exceso de H₂O₂ (Blesa et al., 2004).

La eficiencia y la velocidad inicial de mineralización son mayores al partir de Fe (II) y a pH alrededor de 3.0.

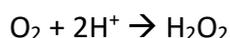
❖ 1.2.1.4. Oxidación electroquímica

Los electrones se transfieren al compuesto orgánico mediante la intervención de radicales hidroxilo.

La aplicación de la corriente eléctrica entre dos electrodos adecuados en agua produce reacciones químicas primarias, con la generación de HO•, que oxida la materia orgánica:



En la oxidación anódica, los compuestos orgánicos se oxidan a partir de los radicales hidroxilo generados en un ánodo a partir de la oxidación de moléculas de agua. En la oxidación electroquímica, los compuestos orgánicos reaccionan con oxidantes moleculares generados electroquímicamente, como el peróxido de hidrógeno, que se produce en cátodos a partir del oxígeno disuelto en el medio (Castañeda, 2014).



Si se usa un ánodo de sacrificio de Fe, el proceso se conoce como peroxicoagulación (Blesa et al., 2004).

❖ 1.2.1.5. Radiólisis y tratamiento con haces de electrones

Es un proceso basado en la generación en las aguas a tratar de electrones altamente reactivos, iones radicales y radicales neutros por exposición a haces de partículas másicas u ondas electromagnéticas de alta energía (Blesa et al., 2004).

Se usan rayos γ , rayos X o aceleradores de haz de electrones. Al penetrar el haz de electrones en el agua, los electrones pierden energía por colisiones no elásticas con las moléculas de H_2O , y se generan especies reactivas:



- Tres primeras especies: productos primarios de la radiólisis del agua.
- e^-_{aq} , H^\bullet : reductores fuertes.
- HO^\bullet : oxidante.

❖ 1.2.1.6. Plasma no térmico

El plasma es un gas parcialmente ionizado en el cual la energía de los electrones es considerablemente mayor que la de los iones y las moléculas del gas, de tal forma que el gas se encuentra a temperatura y presión ambiente. Se consideran buenas fuentes de especies reactivas altamente reductoras y oxidantes.

Puede generarse, en forma no térmica, por una descarga eléctrica o bombardeo de un gas con un haz de electrones de alta energía. En el caso del haz de electrones la generación de electrones altamente energéticos se realiza fuera del gas a tratar mientras que en el caso de los sistemas de descargas pulsadas esta generación se realiza directamente en el interior del gas a tratar, lo que supone una clara ventaja en el diseño del equipo (Castañeda, 2014).

Una vez formados, los electrones son acelerados hacia mayores energías y pueden colisionar con las moléculas del medio, liberando más electrones en el proceso. Estas avalanchas de electrones son las denominadas descargas corona.

En conclusión, consiste en la creación de un medio ionizado mediante el establecimiento de un campo eléctrico impulsado a través de los gases que deben tratarse.

❖ 1.2.1.7. Oxidación en agua subcrítica y supercrítica

Permite la oxidación de los contaminantes en una mezcla en agua con oxígeno o aire, a altas presiones y temperaturas. Además, involucra la carbonización primaria de los

sustratos orgánicos y su posterior reacción con HO• (producido en la transformación catalítica del O₂ disuelto en la superficie del centro carbonoso) (Blesa et al, 2004).

➤ Oxidación en agua subcrítica u oxidación por aire húmedo (CWAO)

Este proceso consiste en mezclar el agua residual con aire a presión y temperatura elevada para producir la degradación en la fase líquida. El proceso se puede también llevar a cabo en presencia de un catalizador, como MnO₂, CuO, Fe₂O₃ u óxidos de Zn.

➤ Oxidación en agua supercrítica o método OXAS

Este método funciona igual que el anterior, pero en este caso se utiliza agua a presión y temperatura superiores al punto crítico. En condiciones supercríticas el agua posee una serie de propiedades únicas confiriendo a este proceso una eficacia añadida.

Estas propiedades son:

- Se comporta como un fluido cuya viscosidad, densidad y constante dieléctrica son bajas.
- Disminuye el número de uniones puente hidrógeno.
- Aumenta la solubilidad de los compuestos orgánicos y gases.
- Disminuye la solubilidad de los electrolitos.

1.2.2. Descripción de las TOAs fotoquímicas

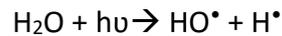
La utilización de este tipo de tecnologías aumenta la eficacia proporcionando una serie de ventajas adicionales:

- Es posible utilizar los procesos fotolíticos directos, sin el agregado de reactivo químico (procesos para compuestos que reaccionan lentamente con HO•).
- Evita el uso de O₃ o reduce su proporción (menor costes y riesgos para la salud y medioambientales).
- Aumenta la velocidad de reacción (evita el uso de tanques grandes).
- Evita cambios de pH drástico.
- Aumenta la flexibilidad del sistema (uso de variedad de oxidantes y condiciones de operabilidad).
- Reduce costos operativos (menor consumo de potencia para generar HO•).

❖ 1.2.2.1. Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)

Este proceso aprovecha la irradiación a longitudes de onda menores que la UV-C (más bajas de 190 nm) produciendo la ruptura homolítica de uniones químicas y la degradación de materia orgánica en fases condensadas y gaseosas.

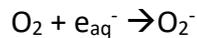
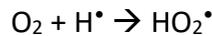
El uso más importante de la radiación UVV es la fotólisis del agua que produce radicales hidroxilo y átomos de hidrógeno con rendimientos cuánticos dependientes de la longitud de onda de irradiación (Castañeda, 2014).



Se producen también electrones acuosos, pero con bajos rendimientos cuánticos.



A partir de los radicales primarios, su reacción con O_2 genera rápidamente radicales perhidroxilo (HO_2^\bullet) y superóxido (O_2^\bullet):

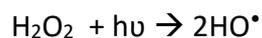


Los oxidantes y reductores pueden producir simultáneamente reducciones y oxidaciones.

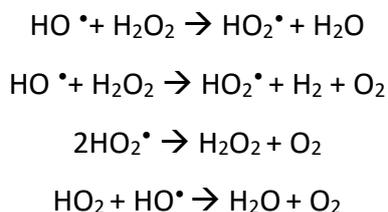
❖ 1.2.2.2. UV/ H_2O_2

Implica la formación de radicales hidroxilo por fotólisis del peróxido de hidrógeno y sus consiguientes reacciones de propagación.

El mecanismo más comúnmente aceptado para la fotólisis del peróxido de hidrógeno es la ruptura homolítica del enlace O-O debida a la acción ultravioleta para formar dos radicales hidroxilo (Castañeda, 2014).



Así mismo, el radical HO• puede atacar al peróxido de hidrógeno dando lugar a la siguiente secuencia de reacciones:



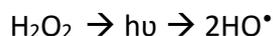
Al mismo tiempo, al estar presentes en el medio los contaminantes orgánicos, se inician reacciones con los diferentes radicales formados.

❖ 1.2.2.3. UV/ O₃

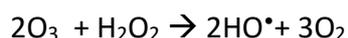
La irradiación del ozono en agua produce H₂O₂ en forma cuantitativa:



El peróxido de hidrógeno generado se fotoliza a su vez generando radicales HO•:



Y reacciona con el exceso de ozono, generando también radicales:



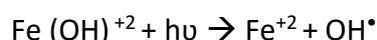
No solo es una forma cara de generar H₂O₂ y luego HO•, sino que también se trata de una combinación de UV/ H₂O₂ y O₃/ H₂O₂ (Blesa et al., 2004).

❖ 1.2.2.4. Foto-Fenton

Como los procesos Fenton no conducen a la mineralización completa, puede utilizarse la irradiación luminosa para promover una mejor degradación del contaminante.

El proceso se basa en el aumento de la eficiencia de la reacción Fenton mediante iluminación, produciendo la fotólisis de hidroxocomplejos de Fe⁺³.

El Fe⁺² fotogenerado produce radicales OH• adicionales:

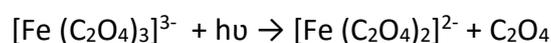


El proceso es catalítico ya que el Fe⁺² oxidado a Fe⁺³ en la reacción de Fenton, se reduce de nuevo a Fe⁺² por acción de la radiación. Ambas reacciones generan radicales hidroxilo (Castañeda, 2014).

❖ 1.2.2.5. Ferrioxalato y otros complejos de Fe (III)

En presencia de ciertos ligandos orgánicos, como ácidos carboxílicos, el Fe (III) puede formar complejos estables o pares iónicos asociados que exhiben bandas de transferencia de carga del ligado al metal en el espectro UV-visible. Estos, son fotoquímicamente activos y generan Fe (II) por irradiación (Blesa et al., 2004):

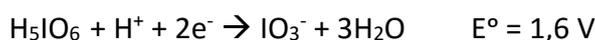
La fotólisis del trisoxalatoferrato (III) se aprovecha para la medición de intensidades de luz, y constituye el actinómetro químico más utilizado. La reacción tiene un alto rendimiento cuántico, casi independiente de la longitud de onda:



Agregando H₂O₂ la reducción fotoquímica del complejo de Fe (III) se acopla a la reacción de Fenton.

❖ 1.2.2.6. UV/Peryodato

El ácido peryódico (H₅IO₆) y el peryodato (IO₄⁻), son oxidantes fuertes:



La irradiación de soluciones de peryodato con la luz UV corta genera radicales (IO₃⁺, HO•, IO₄⁻) y otras especies oxidantes (IO₃⁻, O₃). Así el ataque a contaminantes orgánicos se

vuelve menos selectivo, pero más eficiente. Es un mecanismo complejo que involucra a varias especies yodadas (Blesa et al., 2004).

❖ 1.2.2.7. Fotocatálisis heterogénea

Es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (fotocatalizador heterogéneo).

En la región interfacial entre el sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción o eliminación de los contaminantes, sin que el catalizador sufra cambios químicos (Blesa et al., 2004).

La excitación del semiconductor puede tener lugar de dos formas:

- Por excitación directa del semiconductor (éste absorbe los fotones usados).
- Por excitación inicial de moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador (capaces de inyectar cargas en el semiconductor).

Cuando una partícula de semiconductor está excitada con radiación de energía suficiente ocurren en ella una serie de reacciones químicas. Se crean pares electrón-hueco cuya vida media está en el rango los nanosegundos (los electrones y los huecos generados deben de migrar a la superficie y reaccionar con especies adsorbidas). Los pares electrón-hueco que no alcanzan a separarse y a reaccionar se recombinan (en la superficie o en el seno de la partícula) y la energía se disipa.

La fuerza impulsora del proceso de transferencia electrónica en la interfaz es la diferencia de energía entre los niveles del semiconductor y del par redox de las especies adsorbidas. En presencia de especies redox adsorbidas en la partícula de semiconductor y bajo iluminación, ocurren simultáneamente reacciones de oxidación y de reducción.

1.3. Alcance y objetivos

El objetivo de este trabajo es la evaluación del grado de implementación y comercialización de las tecnologías de oxidación avanzadas (TOAs) antes descritas.

Para ello, se desarrollarán los siguientes objetivos:

1. Comparativa de las distintas TOAs en cuanto a posibilidades de uso para contaminantes orgánicos en aire, agua o suelos.
2. Comercialización de las TOAs.
3. Grado de implementación industrial de las TOAs.

2. Comparativa entre las distintas Tecnologías de Oxidación Avanzadas

Para la realización de la siguiente comparativa se han elaborado dos tablas, la tabla 3 muestra las tecnologías no fotoquímicas y la tabla 4 las fotoquímicas.

Con el fin de poder hacer una valoración eficaz, se han elegido una serie de parámetros a estudiar:

- Velocidad de reacción
- Eliminación de contaminantes.
- Mineralización completa de los contaminantes (degradación de los mismos a CO₂ y H₂O).
- Mejora de la toxicidad del efluente tras efectuar el tratamiento.
- Costes de operación asociados al consumo de reactivos.
- Costes de operación asociados a los requerimientos de energía.
- Costes de instalación.

Además, se ha evaluado su posible tratamiento en los tres medios; agua, aire y suelo.

Esta comparación facilitará la elección de una tecnología u otra según lo que se precise en cada caso.

Tabla 3.

Valoración cualitativa de los parámetros a estudiar en las tecnologías de oxidación avanzada no fotoquímicas y tratamiento aplicable.

	TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN AVANZADA NO FOTOQUÍMICAS							
	Ozonización en medio alcalino (O₃ / OH⁻)	Ozonización con peróxido (O₃/H₂O₂)	Procesos Fenton (Fe²⁺/ H₂O₂)	Oxidación electroquímica	Radiólisis	Plasma no térmico	Oxidación en agua subcrítica	Oxidación en agua supercrítica
Parámetros								
Velocidad reacción	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+
Elim. contaminantes	+	+	+	+/-	+/-	+	+	+
Mineralización	-	-	+/-	+/-	+	+	-	+
Mejora toxicidad	+/-	+	-	+/-	-	-	+/-	+/-
Coste reactivos	+	-	+	+	-	-	+	-
Coste energía	+	n. d	-	+	+	+	+	+/-
Coste instalación	+	+	-	-	n. d	+/-	-	+
Tratamiento								
Aguas	+	+	+	+	+	+	+	+
Aire	0	0	0	0	0	+	0	0
Suelos	0	0	+	0	0	+	0	0

+ Valor elevado; - Valor bajo; **0** No aplicable; +/- Valor susceptible de mejora; **n.d** no disponible.

➤ **Ozonización en medio alcalino (O_2 / OH^-)**

El ozono puede reaccionar con el sustrato orgánico a través de dos tipos de reacciones, una lenta y selectiva, favorecida en medios ácidos, y otra rápida y no selectiva, favorecida en medios alcalinos. Por tanto, para que la reacción sea rápida es necesario que se produzca en este último medio.

Al tratarse de una reacción rápida favorecida en un medio alcalino, que puede iniciarse a partir de diferentes especies, su eficiencia en cuanto a la eliminación de contaminantes es mayor que de hacerlo de forma lenta en un medio ácido. Sin embargo, no siempre conduce a una completa mineralización (Blesa et al., 2004).

No es un método especialmente tóxico ya que el ozono se transforma únicamente en H_2O y O_2 . Sin embargo, el ozono como materia prima sí que es altamente tóxico.

En cuanto a los costes de operación, el coste de reactivos es alto ya que para la completa destrucción del contaminante se necesita una relación molar de O_3 respecto al mismo de 5:1. Igualmente, los generadores consumen una gran cantidad de energía por lo que su coste es también elevado. Así mismo, se necesita una alta inversión en equipos que generen una agitación eficiente, como difusores o venturis, haciendo que también estos costes sean considerables (Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables, 2008).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, en la decoloración de caolín y de pulpa de celulosa.

➤ **Ozonización con peróxido (O_3/H_2O_2)**

Este tipo de tecnología combina la oxidación directa y selectiva del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales HO^\bullet con los compuestos orgánicos por lo que se puede hablar de velocidades de reacción altas con posibilidad de acelerar el proceso a pH alcalino.

El tratamiento ha resultado efectivo para eliminación de compuestos organoclorados como tricloroetileno, tetracloroetileno, etc. Por lo tanto, es excelente para el postratamiento de aguas sometidas a tratamientos de desinfección con cloro o dióxido

de cloro. A pesar de ello, no se consigue siempre la mineralización total del contaminante (Blesa et al., 2004).

El ozono es altamente corrosivo y tóxico por lo que su nivel de toxicidad es alto.

Este proceso puede tratar contaminantes orgánicos presentes en muy bajas concentraciones (ppb) siendo la relación molar óptima de O_3/H_2O_2 de 2:1 por lo que el coste de reactivos no va a ser muy alto, sin embargo, los costes de instalación son elevados (Quicaño, 2014).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, en la degradación de plaguicidas presentes en agua, en la decoloración de aguas residuales en la industria papelera y en el postratamiento de aguas desinfectadas con cloro o dióxido de carbono.

➤ **Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2)**

En la reacción del ion ferroso con el agua, la velocidad de reacción es alta y el Fe (II) se oxida a Fe (III) en exceso de peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

Es un proceso útil en la destrucción de contaminantes ya que resulta muy efectivo para la generación de radicales HO^\bullet . La relación de concentración de los reactivos (Fe^{2+}/H_2O_2) es un factor importante para determinar la eficiencia del proceso de mineralización de los compuestos orgánicos en la reacción de Fenton. Un aumento en la concentración de los mismos favorece una mayor velocidad de mineralización, sin embargo, una concentración demasiado elevada provoca una disminución de la degradación de la materia orgánica ya que se inhibe la reacción de Fenton (El Ghenymy, 2013).

Aunque el H_2O_2 es un compuesto tóxico, en el efluente tratado no se forman compuestos organoclorados por lo que no supone un gran problema.

Así mismo, el Fe (II) es un compuesto de fácil manejo y ambientalmente benigno.

En cuanto a los costes de operación, se necesita una alta concentración de Fe que se suele aportar como $FeSO_4$, materia prima de bajo coste, a pesar de ello, el coste del H_2O_2 sí que es alto por lo que el coste de reactivos va a incrementar, sin embargo, no se necesita de la aplicación de corriente eléctrica para favorecer las reacciones producidas

por lo que el consumo de energía no va a ser elevado. Así mismo, es una tecnología sencilla en cuanto equipamiento lo que disminuye los costes de instalación (Blesa et al., 2004).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas y suelos contaminados, como, por ejemplo, en la degradación de compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, clorobenzenos, PCP, fenoles y nitroaromáticos, como oxidante de herbicidas y otros contaminantes como el hexadecano o el Dieldrin, en la reducción de la DQO de aguas residuales, municipales y subterráneas y para el tratamiento de lixiviados.

➤ **Oxidación electroquímica**

En la oxidación electroquímica, los compuestos orgánicos reaccionan con oxidantes moleculares generados electroquímicamente, como es el caso del peróxido de hidrógeno que se produce en cátodos de grafito, a partir del oxígeno disuelto en el medio. Al ser un proceso altamente oxidante la velocidad de reacción es alta, aunque esta va a estar comandada por la densidad de corriente aplicada (Castañeda, 2014).

Aunque es un proceso altamente oxidante no siempre se llega a una completa mineralización, por lo que, para mejorar la eficiencia del mismo y aumentar la eliminación de contaminantes se agrega Fe (II), lo que se conoce como electro-Fenton.

Si hay cloro en el medio se forman intermedios clorados que pueden ser incluso más tóxicos que el orgánico de partida sin embargo no se forman compuestos químicos nocivos, por lo que la toxicidad del efluente puede mejorar.

En cuanto a los costes de operación, se necesita una alta concentración de Fe, que aportado como FeSO_4 rebaja los costes de materias primas, sin embargo, se requiere una conductividad adecuada lo que a veces requiere la adición de sales, por ello, el coste de reactivos puede incrementarse, además, se necesita aplicar una corriente eléctrica a la celda electroquímica para llevar a cabo la oxidación por lo que su consumo va a ser elevado también. Así mismo, es una tecnología sencilla en cuanto equipamiento lo que disminuye los costes de instalación (Blesa et al., 2004).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, en el tratamiento de efluentes generados por la industria textil.

➤ **Radiólisis**

Como es un proceso basado en la generación de electrones altamente reactivos, iones radicales y radicales neutros en el agua a tratar por exposición a haces de partículas másicas u ondas electromagnéticas, la velocidad de descomposición depende de la intensidad de los rayos γ , rayos x o haces de electrones empleados (Blesa et al., 2004).

Ataca principalmente a compuestos, difícilmente oxidables y atacables por HO^{\bullet} . Éstos pueden ser mineralizados o bien, degradados a productos de menor peso molecular. Para mejorar la eliminación de contaminantes puede combinarse con ozono provocando una rápida formación de especies reactivas adicionales (Castañeda, 2014).

El método no genera residuos, lodos u otros desechos que necesiten tratamiento posterior, ni compuestos tóxicos como las dioxinas por lo que no produce alta toxicidad.

En cuanto a los costes de operación, como no se necesitan materias primas adicionales si no que el efluente se trata directamente, el coste de los reactivos es bajo.

Sin embargo, para producir esos electrones reactivos que ayuden a descomponer la materia orgánica se necesitan equipos que requieren un alto consumo eléctrico (González, 2001).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en aguas subterráneas, residuales, potables y lixiviados y en el tratamiento de compuestos halogenados.

➤ **Plasma no térmico**

Como es una tecnología que consiste en la creación de un medio ionizado mediante el establecimiento de un campo eléctrico impulsado por los gases a tratar, la velocidad de degradación de los contaminantes depende de la intensidad de ese campo eléctrico.

Constituye una tecnología emergente, eficaz en la eliminación y mineralización de diferentes tipos de compuestos entre los que destacan: compuestos orgánicos volátiles (COVs) y clorofluorcarburos (CFC). Además, puede eliminar simultáneamente orgánicos peligrosos y emisiones (SO_x y NO_x) (Blesa et al., 2004).

No genera subproductos tóxicos como dioxinas o furanos, tampoco requiere combustible lo cual minimiza residuos secundarios.

En cuanto a los costes de operación, como no se necesitan catalizadores, el coste de los reactivos es bajo. Sin embargo, el establecimiento del campo eléctrico que crea el medio ionizado requiere de un alto consumo eléctrico lo que se traduce en elevado coste energético. De la misma manera, para disminuir los gastos de instalación y que no sean tan altos, la generación del plasma puede realizarse mediante sistemas de descargas pulsadas en el interior del gas (Castañeda, 2014).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas, aire y suelos contaminados, como, por ejemplo, en la eliminación de SO_x y NO_x de gases de escape, en la descomposición de hidrocarburos alifáticos y alifáticos halogenados, en el tratamiento de gases de salida, industriales y de incineradores y para el tratamiento de COVs en suelos y aguas subterráneas.

➤ **Oxidación en agua subcrítica**

Esta tecnología, denominada también oxidación por aire húmedo (CWAO), degrada el contaminante en la fase líquida mezclando el agua residual con aire a presión y temperatura elevada. Como el proceso de oxidación se puede también llevar a cabo en presencia de un catalizador sólido, la velocidad de reacción se aumenta.

Aunque sí que es efectiva en la eliminación de contaminantes tanto por el uso de catalizadores homogéneos o heterogéneos como agregando un oxidante, uno de sus principales inconvenientes es su incapacidad para lograr la mineralización completa de efluentes altamente contaminados ya que algunos productos de oxidación poseen un peso molecular bajo (Blesa et al., 2004).

Al no lograr una completa mineralización su nivel de toxicidad depende de los compuestos que contenga el agua residual.

En cuanto a los costes de operación, al haber compuestos químicos, como el ácido acético o el propiónico, muy resistentes, se requiere de catalizadores para su destrucción con lo que el coste de reactivos aumenta considerablemente. Además, como se necesita una fuente de energía que favorezca las reacciones de oxidación producidas, el coste de energía también es elevado. Así mismo, el equipamiento requiere de materiales de construcción bastante costosos por lo que los costes de instalación son igualmente altos (Castañeda, 2014).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, para el tratamiento de residuos orgánicos convencionales acuosos, lodos, solventes clorados y nitrogenados, plaguicidas y herbicidas clorados y en la destrucción de hidratos de carbono, polifenoles, compuestos alifáticos e hidrocarburos aromáticos.

➤ **Oxidación en agua supercrítica**

El agua en condiciones supercríticas es un disolvente eficaz para los compuestos orgánicos y completamente miscibles con gran cantidad de gases, incluido el oxígeno, obteniéndose así una única fase homogénea sin limitaciones, lo que aumenta considerablemente la velocidad efectiva de reacción (Martínez et al., 2015).

Es altamente eficiente en la eliminación de contaminantes llegando a una buena mineralización ya que tiene un porcentaje de degradación de la materia orgánica cercano al 100% (Blesa et al., 2004).

Durante el proceso no hay formación apreciable de NO_x , SO_x u O_3 , sin embargo, se pueden producir dibenzofuranos y dioxinas aumentando la toxicidad.

En cuanto a los costes de operación, las características del agua supercrítica permiten una buena degradación orgánica sin la ayuda de catalizadores disminuyendo así los costes de reactivos. Además, a pesar de necesitar un gran porcentaje de energía, el proceso puede autoabastecerse quemando compuestos orgánicos de concentraciones

superiores al 5% con lo que el coste de energía se reduce. Sin embargo, se necesita un equipamiento costoso lo que eleva los costes de instalación (Castañeda, 2014).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, para el tratamiento de residuos orgánicos convencionales acuosos, lodos, solventes clorados y nitrogenados, plaguicidas y herbicidas clorados y en la destrucción de hidratos de carbono, polifenoles, compuestos alifáticos e hidrocarburos aromáticos.

Tabla 4.

Valoración cualitativa de los parámetros a estudiar en las tecnologías de oxidación avanzada fotoquímicas y tratamiento aplicable.

	TECNOLOGÍAS DE OXIDACIÓN AVANZADA FOTOQUÍMICAS						
	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UUV)	UV/ H₂O₂	UV/O₃	Foto-Fenton	Ferrioxalato y otros complejos de Fe (III)	UV/Peryodato	Fotocatálisis heterogénea
Parámetros							
Velocidad reacción	+/-	+/-	+/-	+	+/-	+/-	-
Elim. contaminantes	+	+	+	+	-	+	+/-
Mineralización	+	+	+	+	-	+	+
Mejora toxicidad	-	-	+	-	-	-	-
Coste reactivos	+/-	+	-	+	-	-	-
Coste energía	+	+	+	+	+/-	+	+
Coste instalación	-	-	+	-	-	n. d	n. d
Tratamiento							
Aguas	+	+	+	+	+	+	+
Aire	+	0	0	0	0	0	0
Suelos	0	0	0	+	0	0	0

+ Valor elevado; - Valor bajo; **0** No aplicable; +/- Valor susceptible de mejora; **n.d** no disponible.

➤ **Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)**

Esta tecnología aprovecha la irradiación a longitudes de onda por debajo de 190 nm usando habitualmente lámparas de Xe ($\lambda = 172$ nm). La excitación electrónica en esta longitud de onda lleva, en la mayoría de los casos, a la ruptura homolítica de uniones químicas y puede producir la degradación de materia orgánica, tanto en fase condensada, como en gaseosa. La velocidad de degradación del contaminante depende de la longitud de onda empleada (Blesa et al., 2004).

Es eficaz en la eliminación de contaminantes a alta intensidad de iluminación, así como en la absorción del agua a las longitudes de onda utilizadas. Puede llegar a una completa mineralización ya que una de sus ventajas es la obtención de agua ultrapura.

No produce toxicidad ya que tras el tratamiento no deja residuos químicos en el agua tratada (Pietrobon, 2010).

En cuanto a los costes de operación, aunque se necesita un suministro constante de oxígeno, no es necesario agregar agentes químicos, lo que disminuye los costes de reactivos. Como la degradación se produce aplicando una intensidad de iluminación que requiere de una alta potencia eléctrica, los costes energéticos son elevados. Así mismo, el equipo de desinfección ultravioleta es sencillo en su diseño, operación y mantenimiento por lo que los costes de instalación son bajos (Castañeda, 2014).

Es muy útil en el tratamiento de aguas y de aire ya que degrada contaminantes en aguas y en corrientes de aire con alto contenido en humedad.

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas y aire contaminados, como, por ejemplo, en la degradación de contaminantes en aguas y corrientes de aire con alto contenido de humedad, en la obtención de agua ultrapura y para el tratamiento de compuestos difícilmente oxidables.

➤ **UV/ H₂O₂**

Esta tecnología implica la formación de radicales hidroxilo por fotólisis del peróxido de hidrógeno y sus consiguientes reacciones de propagación. El mecanismo más comúnmente aceptado para la fotólisis del peróxido de hidrógeno es la ruptura

homolítica del enlace O-O debida a la acción ultravioleta para formar dos radicales hidroxilo. La velocidad de esta ruptura depende de la intensidad de la luz ultravioleta empleada (Castañeda, 2014)

El proceso es poco eficiente para tratar aguas de alta absorbancia y con exceso de peróxido, sin embargo, se puede mejorar su eficiencia en la eliminación de contaminantes si estos se fotolizan directamente, si se utiliza un medio alcalino y si se combina con ultrasonido. Así mismo, consigue una buena mineralización de compuestos alcanos y clorados.

Como es eficiente en la degradación de compuestos tóxicos como pueden ser los clorados, es una tecnología que no produce alta toxicidad.

En cuanto a los costes de operación, dada la baja sección eficaz de absorción, se necesita una concentración bastante elevada de oxidante, lo que aumenta considerablemente los costes de reactivos. Así mismo, como se necesita aplicar luz ultravioleta, ésta requiere de una alta potencia eléctrica para degradar la materia orgánica, haciendo que los costes energéticos sean altos. Sin embargo, es un método simple que requiere una inversión de capital mínima, lo que reduce los costes de instalación (Blesa et al., 2004).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, en la reducción de contaminantes presentes en agua y efluentes industriales incluyendo organoclorados alifáticos, aromáticos, fenoles y plaguicidas y en la degradación de alcanos y clorados no atacados por HO[•].

➤ **UV/O₃**

En esta tecnología, el ozono ve potenciada su actividad por la aplicación de radiación UV, generalmente a 254 nm. Esto se debe a que la molécula se descompone a través de una secuencia de reacciones que le llevan a formar el radical hidroxilo. La velocidad de irradiación del ozono en agua produciendo peróxido de hidrógeno depende de luz ultravioleta aplicada.

Es eficiente en la eliminación de contaminantes, sobre todo en el tratamiento de PCBs pudiéndose aumentar si la irradiación se produce a longitudes de onda menores de 310

nm y se aprovecha la fotólisis del O_3 . Además se consigue una buena mineralización del contaminante ya que es un método utilizado en la desinfección de aguas residuales (Castañeda, 2014).

A causa del burbujeo del reactivo, hay peligro de escape a la atmósfera de COVs pudiendo ocasionar problemas de seguridad y salud, aumentando la toxicidad.

En cuanto a los costes de operación, no se necesita una alta concentración de materias primas, por lo que se abarata el coste de los reactivos. Sin embargo, la necesidad de aplicar luz ultravioleta en la irradiación del ozono, hace que el coste de la energía aumente. Así mismo, al emplear el ozono como materia prima es necesario utilizar un equipamiento adicional que destruya el ozono remanente lo que implica altos costes de instalación (Blesa et al., 2004).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, para la potabilización y desinfección de las aguas, en la decoloración de aguas de la industria de papel y en la degradación de hidrocarburos alifáticos clorados.

➤ **Foto-Fenton**

En esta tecnología, la producción de radicales hidroxilo se aumenta irradiando la mezcla y aumentando la concentración de peróxido de hidrógeno y de sal empleada. No obstante, a partir de una determinada cantidad de ambos compuestos, la velocidad de la reacción puede verse negativamente afectada, debido posiblemente a la auto-descomposición del peróxido en oxígeno y agua, por recombinación con radicales hidroxilo (Albizzati et al., 2011).

La combinación de la iluminación con la reacción de Fenton aumenta claramente la eficiencia del proceso en cuanto a la eliminación de contaminantes, así como su completa mineralización.

El H_2O_2 es un compuesto tóxico, sin embargo, se consigue una buena mineralización, por lo que la toxicidad del efluente tratado depende de la concentración, existente o no, de esta materia prima.

En cuanto a los costes de operación, se requiere del agregado continuo de peróxido de hidrógeno y del mantenimiento de unas condiciones ácidas, lo que incrementa el coste de los reactivos. Además, la necesidad de aplicar irradiación a la mezcla hace que el coste de la energía aumente. El equipamiento no es complejo y se puede operar con radiación solar, convirtiéndola en una tecnología sostenible y reduciendo visiblemente los costes de instalación (Blesa et al., 2004).

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas y suelos contaminados, como, por ejemplo, para el tratamiento de compuestos nitroaromáticos, fenoles policlorados, herbicidas y plaguicidas y para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo.

➤ **Ferrioxalato y otros complejos de Fe (III)**

En esta tecnología, la presencia de ácidos carboxílicos hace que el Fe (III) pueda formar complejos estables o pares iónicos que son fotoquímicamente activos y generan Fe (II) por irradiación, cuya velocidad depende de la luz ultravioleta aplicada.

La eficiencia en la eliminación de contaminantes no es muy alta ya que estos se transforman en otros compuestos orgánicos. Así mismo, la mineralización total de los mismos no es fácil de alcanzar (Blesa et al., 2004).

Tanto la materia prima utilizada como los productos de su descomposición no producen toxicidad.

En cuanto a los costes de operación, las materias primas se encuentran en la naturaleza de forma abundante y son accesibles, por lo que no conllevan un gran gasto de reactivos. Así mismo, para disminuir los costes de energía, se puede utilizar la luz solar como fuente de energía renovable. El equipamiento es sencillo, por lo que no se invierte un gran capital en la instalación.

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, para el tratamiento de aguas con alta absorbancia y el tratamiento de hidrocarburos aromáticos y cloroaromáticos, etilenos clorados, éteres, alcoholes, cetonas y otros compuestos.

➤ **UV/Peryodato**

La irradiación de soluciones de peryodato con la luz UV genera radicales y otras especies oxidantes pudiendo atacar así a los contaminantes orgánicos. La velocidad de degradación de los mismos depende de la luz ultravioleta que irradia estas soluciones.

Es una tecnología eficiente en la eliminación de contaminantes ya que la generación de esos radicales y esas especies oxidantes hacen que el proceso se vuelva menos selectivo, pero más eficiente. Puede destruir una amplia variedad de compuestos a bajas concentraciones, por lo que también alcanza un cierto grado de mineralización de la materia orgánica (Blesa et al., 2004).

No existen leyes que limiten la descarga de compuestos de yodo, lo que indica que no es una materia prima que produzca una toxicidad considerable.

En cuanto a los datos de operación, el coste de reactivos no es excesivo ya que el yodo puede recuperarse por intercambio iónico y generar peryodato electroquímicamente. Así mismo, al utilizar luz ultravioleta que irradie al peryodato, los costes de energía van a ser altos.

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, para la decoloración.

➤ **Fotocatálisis heterogénea**

En esta tecnología, la energía es absorbida directa o indirectamente por un sólido al que se denomina fotocatalizador heterogéneo. Entre este sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de eliminación de contaminantes sin que el catalizador sufra cambios químicos. Se caracteriza por tener una cinética lenta.

La eficiencia de la reacción fotocatalítica depende de la alta probabilidad de recombinación electrón-hueco y las reacciones inversas. Disminuye con la luz visible, pero puede mejorarse al modificar el semiconductor. Permite la descomposición de compuestos orgánicos hasta su mineralización total (Blesa et al., 2015).

Puede conseguir una mineralización total de los compuestos orgánicos y el catalizador (mayoritariamente el TiO_2) por lo que no conlleva una alta toxicidad.

En cuanto a los costes de operación, el coste de reactivos no va a ser muy alto ya que los catalizadores comerciales son económicamente asequibles. Sin embargo, como en otras tecnologías, la aplicación de energía es la base del proceso por lo que su coste es elevado a no ser que se utilice la energía solar como fuente principal.

Esta tecnología se puede emplear para el tratamiento de aguas contaminadas, como, por ejemplo, en la degradación de una gran variedad de fármacos detectados en aguas residuales y otros contaminantes emergentes.

3. Combinación de las TOAs

3.1. Mejora de la eficiencia introduciendo el proceso del ultrasonido

El ultrasonido es un método de tratamiento que permite la remoción de compuestos orgánicos sin añadir al medio agentes químicos trabajando a temperatura y presión ambiental (Cruz et al., 2010).

Se basa en el principio de cavitación acústica (figura 1), mediante el cual las ondas sonoras provocan que las diminutas burbujas, presentes en los líquidos de forma natural, se expandan (durante las fases A y B de baja presión) y se contraigan hasta implosionar (durante las fases C y D de alta presión).

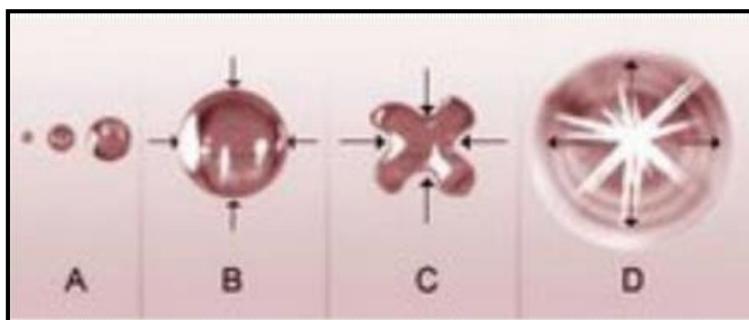


Figura 1. Fenómeno físico de cavitación acústica

Fuente: ULTRATECNO- Power Ultrasonic Applications. *Ultrasonidos y cavitación*. Recuperado de: <http://www.ultratecno.es/tecnologia/ultrasonidos-cavitacion/>. [Último acceso 16/12/2015].

En algunos casos, las tecnologías de oxidación avanzada pueden combinarse con el ultrasonido para así disminuir los tiempos de reacción, aumentar la eficiencia del tratamiento y tratar de llegar a la mineralización total de los contaminantes.

Esta combinación puede darse con:

- Ozono.
- Reactivo Fenton.
- Fotocatálisis.
- Proceso electroquímico.

❖ Ultrasonido y ozono:

- Efecto mecánico: la aplicación del ultrasonido proporciona una mezcla eficiente del ozono en el agua (Hoffman et al., 1998).
- Efecto químico: La combinación del ultrasonido y el proceso de ozonización ofrece tres fuentes altamente activas de radical OH[•].

El ultrasonido puede mejorar el uso del ozono en la desinfección de aguas residuales

- Debilita las paredes celulares bacterianas.
- Mejora las tasas de descomposición de ozono en el agua.
- Aumenta el número de radicales libres y los niveles de peróxido de hidrógeno en aquellos medios que tienen efectos bactericidas sobre diversos microorganismos.

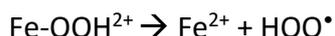
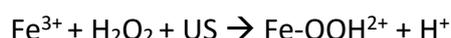
Ejemplo: Efecto de la combinación del ozono con el ultrasonido en la bacteria E. Coli

(Al- Hashimi et al., 2015):

- 1 mg/L de ozono reduce un 93% el número de células vivas después de 16 minutos.
- La utilización únicamente de ultrasonido reduce un 24% el número de células vivas también después de 16 minutos.
- La combinación de ambas tecnologías produce un efecto sinérgico mejorando la inactivación de estas células a un 99% después de 4 minutos.

❖ Ultrasonido y reactivo Fenton:

La combinación del reactivo Fenton con el ultrasonido tiene un efecto sinérgico sobre la generación de radicales hidroxilo (Zhang et al., 2007):



Ejemplo: Eliminación del compuesto 2,4-dinitrofenol mediante Sono-Fenton (Bagal et al., 2013).

- Equipo 7L (Telsonic, 1 kW, 25 kHz) equipado con un transductor grande.
- FeSO_4 (0,2 g/L), H_2O_2 (0,12 g/L).
- Concentración inicial de 2,4-dinitrofenol a pH 4= 20 ppm.

Pasado un tiempo de 90 minutos, la eliminación del 2,4-dinitrofenol es de:

- Tratamiento de ultrasonido= 5,8%.
- Proceso Fenton= 21%.
- US/Fenton= 98,7%

❖ Ultrasonido y fotocátalisis

En esta combinación, el ultrasonido toma el siguiente rol (Hocking et al, 1993):

- Limpieza de superficies.
- Reducción de tamaño de partícula.
- Incremento del transporte de masa a la superficie.

Ejemplo: Fotocátalisis de pentaclorofenol acuoso ($2,4 \cdot 10^{-4}$ M) que contiene 0,2% de TiO_2 (Hocking et al., 1993).

- Rendimiento a los 50 minutos → Fotocátalisis= 40% Fotocátalisis/US= 60%.
- Rendimiento a los 120 minutos → Fotocátalisis= 40% Fotocátalisis/US= 100%.

❖ Ultrasonido y proceso electroquímico

En este caso la aplicación de ultrasonido presenta una serie de beneficios (Lorimer et al., 1990):

- Desgasificación: limita la acumulación de burbujas de gas en el electrodo.
- Agitación: perturba la capa de difusión y detiene el agotamiento de las especies electroactivas.
- Colapso de la burbuja cerca de la superficie del electrodo: proporciona un mayor transporte de iones a través de la doble capa del electrodo limpiándola de forma continua y activando las superficies de los electrodos.

Ejemplo: Eliminación del percloroetileno mediante sono-electroquímica a 20 kHz
(Sáez, 2010)

- En una solución de sulfato de sodio acuoso en modo continuo, la descomposición y la eficiencia mejoran a través de una electrólisis simple.

3.2. Combinación a gran escala

Algunas de las tecnologías de oxidación avanzada estudiadas anteriormente pueden combinarse con ultrasonido o luz ultravioleta para aumentar su eficacia y llegar a una buena mineralización de los contaminantes tratados en la corriente residual. La tabla 5 recoge las posibles combinaciones destacando su posible implementación industrial.

Tabla 5.

Combinaciones de algunas TOAs con ultrasonido y luz ultravioleta.

	Ozonización con peróxido	Procesos Fenton	Oxidación electroquímica	Peryodato	Fotocatálisis heterogénea
UV	✓	✓	✓*	✓	✓
US	✓	✓	✓	✗	✓*

✓: Posible combinación.

✗: Sin posibilidad de combinación.

✓*: Está empezando a implementarse a escala de laboratorio, pero los resultados son todavía preliminares (Dobrosz, 2013).

4. Comercialización de las TOAs

Para facilitar la recogida de información, las tecnologías de oxidación avanzada se han clasificado en cuatro grupos:

- Tecnologías con ozono
- Tecnologías con luz UV
- Tecnologías con reactivo Fenton
- Tecnologías con peróxido de hidrógeno

4.1. Empresas y tecnologías comercializadas

En la tabla 6 se han recogido varias empresas indicando la tecnología que comercializa. No se ha encontrado ninguna que distribuya equipos para Fenton y peróxido de hidrógeno sin combinar, al no requerir de un equipamiento específico.

Tabla 6.

Listado de empresas y tecnologías con las que comercializa.

Empresa	Tecnología Comercial	
	Ozono	Ultravioleta
KAUFMANN	✓	✗
AQUAFINE	✗	✓
ZONOSISTEM	✓	✗
OXICREW	✓	✗
ENVIOLET	✗	✓
ITDI	✓	✗
OZONO SYSTEM	✓	✗
TROJANUV	✗	✓
BNP	✓	✗
XYLEM	✓	✓
ESCO INTERNATIONAL	✓	✓
CALGON CARBON	✗	✓

✓ : Tecnología comercializada

✗ : Tecnología no comercializada

Estas empresas tienen en el mercado una serie de equipos asociados a cada tipo de tecnología, a pesar de ello, no todas disponen de las especificaciones necesarias para hacer una buena comparación.

La lista de empresas de las que se ha podido obtener la información necesaria es la siguiente:

- KAUFMANN
- ITDI
- TROJANUV
- BNP
- AQUAFINE
- XYLEM
- CALGON CARBON

En el Anexo se han recogido los datos de contacto de aquellas empresas con las que se ha conseguido contactar.

4.2. Equipos comercializados y especificaciones técnicas

A continuación, se han elaborado dos tablas, la tabla 7 para aquellas empresas que comercializan con ozono y la tabla 8 para aquellas que comercializan con luz ultravioleta.

En la tabla de comercialización del ozono (tabla 7) se han incluido las empresas; KAUFMANN, ITDI, BNP y XYLEM, comparando los siguientes parámetros:

- Producto
- Material
- Producción de ozono (g O₃/h)
- Potencia instalada (kW)
- Dimensiones (mm)
- Aplicaciones

En la tabla de comercialización de la luz ultravioleta (tabla 8) se han incluido las empresas; AQUAFINE, TROJANUV, XYLEM y CALGON CARBON, comparando los siguientes parámetros:

- Producto
- Caudal
- Tipo de lámpara
- Potencia de lámpara (kW)
- Necesidades eléctricas
- Aplicaciones

Tabla 7.

Comparación de las distintas empresas comercializadoras de equipos de producción de ozono.

Empresa	Producto	Material	Producción de O ₃ (g O ₃ /h)	Potencia (kW)	Dimensiones (mm)	Aplicaciones
KAUFMANN (KAUFMANN, 2013)	Gama OZMT	Acero inoxidable	1-3	n. d	340x150x680	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Desodorización
	Gama OZ-LV	Acero inoxidable	5-10	n. d	600x400x1200	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Desodorización
	Gama OZ 15/20-V	Acero inoxidable	15-25	n. d	800x400x1200	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Desodorización
	Gama OZ 30/80-VFU	Acero inoxidable	30-80	n. d	800x600x1800	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Desodorización Oxidación de Fe y Mn
	Gama OZ 100/150-V	Acero inoxidable	100-1050	n. d	1200x600x2000	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn Eliminación de pesticidas

Empresa	Producto	Material	Producción de O ₃ (g O ₃ /h)	Potencia (kW)	Dimensiones (mm)	Aplicaciones
KAUFMANN (KAUFMANN, 2013)	Gama OZM	Acero inoxidable	1	n. d	200x150x680	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Desodorización
	Gama OZ-LC	Acero inoxidable	2-8	n. d	250x300x700	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Desodorización
	Gama OZ-LD	Acero inoxidable	15-25	n. d	800x400x1200	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Desodorización
	Gama OZ 15/20-D	Acero inoxidable	15-25	n. d	800x400x1200	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn Eliminación de pesticidas
	Gama OZ 30/80-DFU	Acero inoxidable	30-80	n. d	800x600x1800	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn Eliminación de pesticidas
	Gama OZ 100/50-D	Acero inoxidable	100-750	n. d	1200x600x2000	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn Eliminación de pesticidas

Empresa	Producto	Material	Producción de O ₃ (g O ₃ /h)	Potencia (kW)	Dimensiones (mm)	Aplicaciones
KAUFMANN (KAUFMANN, 2013)	Gama OZ1000-D	Acero inoxidable	800	n. d	2000x800x2000	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn Eliminación de pesticidas
	Gama OZ2000-D	Acero inoxidable	1500-15000	n. d	2400x800x2000	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn Eliminación de pesticidas
	Gama OZ-LSC	Acero inoxidable	9-50	n. d	760x260x760	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn
	Gama OZ 100/150-SC	Acero inoxidable	100-1000	n. d	1200x600x2000	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn
	Gama OZ 1000-S	Acero inoxidable	800-1000	n. d	n. d	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn Eliminación de pesticidas
	Gama OZ 2000-S	Acero inoxidable	1500-30000	n. d	n. d	Desinfección Oxidación de compuestos orgánicos Oxidación de Fe y Mn

Empresa	Producto	Material	Producción de O ₃ (g O ₃ /h)	Potencia (kW)	Dimensiones (mm)	Aplicaciones
ITDI (ITDI, 2015)	SDB-1000	PRFV	1	0,065	310x270x170	Desinfección
	SDB-2000	PRFV	2	0,09	430x330x180	Desinfección
	SDB-4000	PRFV	4	0,135	500x430x210	Desinfección
	SDB-8000	PRFV	8	0,195	650x430x210	Desinfección
	SDB-12000	PRFV	12	0,285	650x540x260	Desinfección
	SDB-16000	PRFV	16	0,385	805x605x315	Desinfección
	SDB-20000	PRFV	20	0,482	805x605x315	Desinfección
BNP (BNP, 2016)	OZ15G	Acero inoxidable	15	0,18	350x630x250	Tratamiento de aguas residuales Purificación del aire
XYLEM (XYLEM, 2016)	OSG 10	Acero recubierto en polvo	3-30	0,45	800x850x350	Potabilización de agua
	OSG 20	Acero recubierto en polvo	5-50	0,6	800x850x350	Potabilización de agua
	OSG 30	Acero recubierto en polvo	10-100	1,15	800x850x350	Potabilización de agua

Empresa	Producto	Material	Producción de O ₃ (g O ₃ /h)	Potencia (kW)	Dimensiones (mm)	Aplicaciones
XYLEM (XYLEM, 2016)	OSG 40	Acero recubierto en polvo	20-200	2,4	910x1615x540	Potabilización de agua
	OSG 50	Acero recubierto en polvo	40-400	4,5	911x1615x540	Potabilización de agua
	SMOevo 760	Acero recubierto en polvo	10,4	93,3	4050 x 1250 x 2300	Aguas residuales municipales
	SMOevo 810	Acero recubierto en polvo	11,4	116	4050 x 1250 x 2300	Aguas residuales municipales
	SMOevo 860	Acero recubierto en polvo	13	116	4050 x 1250 x 2300	Aguas residuales municipales
	SMOevo 910	Acero recubierto en polvo	16,9	170,9	5220 x 1500 x 2300	Aguas residuales municipales

Código de colores de cada empresa:



La empresa KAUFMANN, (Alemania), tiene una serie de productos en el mercado fabricados a partir de acero inoxidable. La producción de ozono global de los equipos oscila entre 1-30000 g O₃/h con datos de potencia no disponibles. La superficie de los equipos varía entre 200x150x680 y 2400x800x2000 mm. Las aplicaciones más comunes son: desinfección, oxidación de Fe y Mn y eliminación de pesticidas.

La empresa ITDI (España), comercia con productos fabricados con plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). La producción de ozono global de los equipos oscila entre 1-20 g O₃/h con datos de potencia de entre 0,0135 y 0,482 kW. La superficie de los equipos varía entre 310x270x170 y 805x605x315 mm. La aplicación más común es la desinfección.

La empresa BNP (China), expone las especificaciones adecuadas de un único equipo, fabricado a partir de acero inoxidable. La producción de ozono del mismo es de 15 g O₃/h con una potencia de 0,18 kW. La dimensión es de 350x630x250 mm. La aplicación más común es la purificación del aire.

La empresa XYLEM (EE. UU.), comercializa, de igual forma, con varios productos, fabricados todos ellos a partir de acero recubierto en polvo. La producción de ozono global de los equipos varía entre los 3 y 400 g O₃/h con datos de potencia de entre 0,45 y 170,9 kW. La superficie de los equipos varía entre 800x850x350 y 5220x1500x2300 mm. La aplicación más habitual se basa en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales.

Si se realiza una comparación a gran escala, KAUFMANN ofrece un mayor número de productos en el mercado. En cuanto al material utilizado, KAUFMANN, XYLEM y BNP suministran productos con acabados de acero inoxidable y acero recubierto en polvo (mayor resistencia a la corrosión), mientras que ITDI, apuesta por un acabado de PRFV (ligereza, resistencia y fácil moldeo). Para una mayor producción de ozono, KAUFMANN es la elegida, lo contrario ocurre con ITDI. Así mismo, XYLEM requiere de una mayor potencia contratada a diferencia de ITDI. Además, las mayores dimensiones las proporciona XYLEM y las menores KAUFMANN. En cuanto a las aplicaciones antes mencionadas, destacan KAUFMANN e ITDI en desinfección y BNP en purificación del aire.

Tabla 8.

Comparación de las distintas empresas comercializadoras de equipos de producción de luz ultravioleta.

Empresa	Producto	Caudal (m3/h)	Tipo de lámpara	Potencia lámpara (kW)	Necesidades eléctricas	Aplicaciones
AQUAFINE (AQUAFINE, 2015)	Gama óptima HX	10-380 12-600	Baja presión	0,265 - 1,92	240V/50 Hz	Desinfección
	Gama CLS	10-60 12-70	Baja presión	0,190 - 865	120V/50 Hz 240V/50 Hz	Desinfección Reducción TOC Destrucción Ozono
	Gama SP & SL	0,2-4,5 0,22-5,5	Baja presión	0,040 - 0,150	120V/60 Hz 240V/50 Hz	Desinfección
	Gama SCD H	14-40 16-45	Baja presión	2,7 - 6,8	20-240V/50-60 Hz 208-240V/50-60 Hz	Reducción TOC Destrucción Cloro
	Gama LS HX	6-34	Baja presión	0,00135 - 5,7	120-240V/50-60 Hz 208-240V/50-60 Hz	Desinfección
	Gama SWIFTBEVERAGE	24-190	Baja presión	0,810 - 4,6	208-240VAC/50-60 Hz	Desinfección
	Gama UVK	7-130 195-2.430	Baja presión	n. d	208-240VAC/50-60 Hz	Desinfección

Empresa	Producto	Caudal (m3/h)	Tipo de lámpara	Potencia lámpara (kW)	Necesidades eléctricas	Aplicaciones
AQUAFINE (AQUAFINE, 2015)	Gama TROJAN UVLOGIC	50-1.700 65-1.850 20-1.200	Baja presión	0,350 - 8	208-240VAC/50 Hz 208-240VAC/60 Hz	Desinfección Reducción TOC Destrucción Ozono Destrucción Cl/Cloraminas
	Gama CHLORID	3-11 7-25 180-660	Baja presión	3,25 - 12,5	240VAC/60 Hz 480-277VAC/60 Hz	Desinfección Destrucción Cl/Cloraminas
	Gama MPR	180-660	Baja presión	3,5 - 12,5	208-240VAC 50/60 Hz 480/277VAC 60 Hz	Desinfección Destrucción Cl/Cloraminas
TROJANUV (TROJANUV, 2016)	TrojanUV3000PTP	473,2	Baja presión	0,045 - 0,0875	120 V	Desinfección 2º y 3º Conv. de Cl a desinfección UV
	TrojanUV3000B	158 - 789	Baja presión	0,0875	120V, una fase 208V, 3 fases 240V, una fase	Desinfección 2º y 3º Conv. de Cl a desinfección UV
	TrojanUV3000Plus	n. d	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,25	208Y/120V, 3f, 60 Hz 480Y/277V, 3f, 60 Hz 380Y/220V, 3f, 50/60 Hz 400Y/230V, 3f, 50/60 Hz 415Y/240V, 3f, 50/60 Hz	Reutilización del agua Desinfección 2º y 3º Desinfección UV de agua Conv. de Cl a desinfección UV

Empresa	Producto	Caudal (m3/h)	Tipo de lámpara	Potencia lámpara (kW)	Necesidades eléctricas	Aplicaciones
TROJANUV (TROJANUV, 2016)	TrojanUV4000Plus	1.578	Media presión Salida UV policromática	3,2	277/480V, 3f, 50/60 Hz 230/400V, 3f, 50/60 Hz	Reutilización del agua Desinfección 2º y 3º Desinfección UV Conv. de Cl a desinfección UV
	TrojanUVSonus	315 – 2.370	TrojanUV Solo Lamp	0,5	380Y/220V, trifásica	Desinfección 2º y 3º Conv. de Cl a desinfección UV
XYLEM (XYLEM, 2016)	BX series	435	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,285	400/230 +/- 10%, 50 Hz 480/277 +/- 10%, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	Duron	1000	Ecoray- Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,6	400/230 +/- 10%, 50 Hz 480/277 +/- 10%, 60 Hz	Reutilización del agua
	K143	11040	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230 +/- 10%, 50 Hz 480/277 +/- 10%, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	90e	83	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230 +/- 10%, 50 Hz 480/277 +/- 10%, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua
	120e	127	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230 +/- 10%, 50 Hz 480/277 +/- 10%, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua
	200e	216	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230 +/- 10%, 50 Hz 480/277 +/- 10%, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua

Empresa	Producto	Caudal (m3/h)	Tipo de lámpara	Potencia lámpara (kW)	Necesidades eléctricas	Aplicaciones
XYLEM (XYLEM, 2016)	400e	347	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50 Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua
	550e	536	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50 Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua
	850e	717	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50 Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua
	1000e	911	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50 Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua
	1500e	1346	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50 Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales Reutilización del agua
	Quadron 600	1200	Media presión	6	400/480V, 50/60 Hz	Aguas residuales municipales
	Quadron 1200	2800	Media presión	6	400/480V, 50/60 Hz	Aguas residuales municipales
	Quadron 3000	4100	Media presión	9	400/480V, 50/60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 30e	49	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	233V, 50/60 Hz	Aguas residuales municipales

Empresa	Producto	Caudal (m3/h)	Tipo de lámpara	Potencia lámpara (Kw)	Necesidades eléctricas	Aplicaciones
XYLEM (XYLEM, 2016)	Spektron 50e	101	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	233V, 50/60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 90e	152	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	233V, 50/60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 180e	223	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	233V, 50/60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 250e	390	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 350e	670	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 650e	1247	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 900e	1795	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,29	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	Spektron 2000e	2100	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,6	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales

Empresa	Producto	Caudal (m3/h)	Tipo de lámpara	Potencia lámpara (Kw)	Necesidades eléctricas	Aplicaciones
XYLEM (XYLEM, 2016)	Spektron 4000e	4156	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,6	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55 01/02	90	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55 01.01	38	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55 2.4	552	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55 4.4	1030	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55 2-2	254	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55 3-1	155	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55 3-2	386	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales

Empresa	Producto	Caudal (m3/h)	Tipo de lámpara	Potencia lámpara (Kw)	Necesidades eléctricas	Aplicaciones
XYLEM (XYLEM, 2016)	TAK 55 4-3	750	Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
	TAK 55	1000	Ecoray- Baja presión Amalgama de alta eficiencia	0,315	400/230V, 50Hz 480/277V, 60 Hz	Aguas residuales municipales
CALGON CARBON (CALGON CARBON, 2015)	SENTINEL 12	756,96	Media presión Intensidad alta	4-12	400-600 VAC	Potabilización de agua
	SENTINEL 18	1577	Media presión Intensidad alta	4-32	400-600 VAC	Potabilización de agua
	SENTINEL 24	4415,6	Media presión Intensidad alta	20-90	400-600 VAC	Potabilización de agua
	SENTINEL 36	4257,9	Media presión Intensidad alta	10-90	480-600 VAC	Potabilización de agua
	SENTINEL 48	8042,7	Media presión Intensidad alta	40-360	400-600 VAC	Potabilización de agua

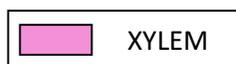
Código de colores de cada empresa:



AQUAFINE



TROJANUV



XYLEM



CALGON CARBON

La empresa AQUAFINE (California), tiene una gran variedad de productos en el mercado. El caudal tratado por los equipos oscila entre 0,2 y 2430 m³/h. Utiliza lámparas de baja presión, cada una con unas determinadas necesidades eléctricas, con potencias entre 0,00135 y 865 kW. Las aplicaciones más comunes son; desinfección, reducción de TOC y destrucción de cloro, cloraminas y ozono.

La empresa TROJANUV (Canadá), cuenta con una serie de equipos en el mercado cuyo caudal oscila entre 158 y 2370 m³/h. Utiliza dos tipos de lámparas, de baja y media presión, cada una también con unos determinados requerimientos eléctricos, con valores de potencia de entre 0,045 y 3,2 kW. Las aplicaciones más comunes son; desinfección secundaria y terciaria, desinfección del agua y desinfección por luz UV en sustitución de cloro.

La empresa XYLEM (EE. UU.), también comercializa con una gran cantidad de productos. El caudal tratado por los equipos oscila entre 38 y 11040 m³/h. Utiliza lámparas de baja y media presión con distintas necesidades eléctricas cuya potencia varía desde 0,285 hasta 9 kW. Las aplicaciones más comunes son; reutilización para usos agrícolas y tratamiento de aguas residuales municipales.

La empresa CALGON CARBON (Pennsylvania), comercializa con equipos capaces de tratar amplios caudales, entre 756,96 y 8042,7 m³/h. Utilizan lámparas de media presión y alta intensidad con sus correspondientes requerimientos eléctricos y con valores de potencia entre 4 y 360 kW. La aplicación más utilizada es la potabilización del agua.

Si se realiza una comparación a gran escala, XYLEM ofrece un mayor número de productos. Para caudales pequeños la más especializada es AQUAFINE y para grandes la elegida es CALGON CARBON. En cuanto al tipo de lámpara; AQUAFINE utiliza únicamente lámparas de baja presión y CALGON CARBON únicamente de media presión mientras que TROJANUV y XYLEM combinan en sus equipos lámparas de ambos tipos. Así mismo, TROJANUV y XYLEM necesitan menor potencia para sus lámparas, al contrario que AQUAFINE y CALGON CARBON. Con respecto a las diferentes aplicaciones, en este caso destacan AQUAFINE y TROJANUV en desinfección y XYLEM en reutilización.

5. Implementación industrial de las TOAs

Como se ha podido ver anteriormente, hay varias empresas que ofrecen sus productos en el mercado, cada uno con una serie de especificaciones técnicas que ofrecer. Sin embargo, no todas ellas tienen sus equipos implementados en la industria, lo que hace que no puedan verificar su aptitud, limitando la elección del consumidor.

5.1. Casos de estudio y localización geográfica

Una vez recogidas aquellas empresas que ofrecen productos de oxidación avanzada, se ha procedido a contactar con ellas para recabar información sobre aquellos equipos ya instalados en plantas industriales, que hayan dado unos resultados específicos.

El contacto con estas empresas se ha dado mayoritariamente vía email. Aunque no ha sido posible contactar con todas ellas, sí se han obtenido casos reales de implementación industrial de algunas: TROJANUV, XYLEM, ISOTEC Y US Peroxide.

Los casos tratados en la tabla 9 recogen equipos que utilizan ozono y luz ultravioleta, así como directamente compuestos como el reactivo Fenton y el peróxido de hidrógeno. En todos ellos se han determinado los mismos parámetros:

- Caso de estudio → tipo de industria y situación geográfica.
- Contaminantes → tipo de contaminantes que contiene el fluido tratado.
- Empresa → nombre de la empresa que implementa ese equipo o compuesto.
- Tecnología → tipo de proceso empleado para tratar la corriente contaminada.
- Equipo/método → equipo utilizado (O_3 y UV) o método (Fenton y peróxido).
- Condiciones → características de la corriente y especificaciones de los equipos.
- Conclusiones → resultados tras un determinado tiempo de actuación.

La situación geográfica de cada caso de estudio se representa en la figura 2.

Tabla 9.

Casos reales de equipos implementados en la industria.

Caso de Estudio	Contaminantes	Empresa	Tecnología	Equipo/Método	Condiciones	Conclusiones
Planta de agua potable (Catskill/Delaware, New York)	Cryptosporidium Giardia lamblia	TROJANUV (TROJANUV, 2016)	UV	TrojanUVTorrent™	Unidades= 56 Dosis/ud.= 40 mJ/cm ² Caudal= 7,65 mill. m ³ /día	Menor coste eléctrico Mayor eficacia Reducción= 3-log
Planta de agua potable (Croton, New York)	Cryptosporidium Giardia lamblia	TROJANUV (TROJANUV, 2016)	UV	TrojanUVTorrent™	Unidades= 20 Dosis/ud.= 40 mJ/cm ² Caudal= 1097,8 mill. m ³ /día	Menor coste eléctrico Mayor eficacia Reducción= 3-log
Planta de agua potable (Andijk, Holanda)	Clostridium Cryptosporidium Giardia lamblia	TROJANUV (TROJANUV, 2016)	UV H ₂ O ₂	TrojanUVSwift™	Caudal min. = 72000 m ³ /día Caudal máx.= 96000 m ³ /día	Sin subproductos nocivos Sin productos químicos Desinfección del 80%
Tratamiento de olor y sabor (Cornwall, Canadá)	Geosmina 2-metilisoborneol (MIB)	TROJANUV (TROJANUV, 2016)	UV H ₂ O ₂	TrojanUVSwift™	Caudal= 99,936 m ³ /día Dosis= 40 mJ/cm ² [Geosmina]= 50 mg/L	Eliminación toxinas Solución multibarrera Reducción= 1 log10
Reducción de contaminantes (Bad Sassendorf, Alemania)	Microcontaminantes orgánicos	XYLEM (XYLEM, 2016)	O ₃	SMO series	Caudal= 15552 m ³ /día Dosis ozono= 15 mg/L Volumen tanque= 63 m ³	Fácil manejo Eliminación contaminantes farmacéuticos
Refrigeración industrial (Frankfurt, Alemania)	Crecimiento biológico	XYLEM (XYLEM, 2016)	O ₃	SMO/SMA systems	Unidades= 8 7 uds.= 10 % O ₃ en peso 1 uds.= 2,3 % O ₃ en peso	Tecnología fiable Aplicación prometedora de ozono

Caso de Estudio	Contaminantes	Empresa	Tecnología	Equipo/Método	Condiciones	Conclusiones
Planta de agua reutilizable (Clovis, California)	Poliovirus	XYLEM (XYLEM, 2016)	UV	LBX Series	Caudal= 24216 m ³ /día Dosis= 80 mJ/cm ² Transmitancia UV= 65%	Menor coste eléctrico Mayor eficacia Reducción= 5-log
Planta de tratamiento de agua (Witten, Alemania)	Bacterias Virus Parásitos	XYLEM (XYLEM, 2016)	UV	Quadron 120	Caudal= 24000 m ³ /día Dosis= 40 mJ/cm ² Transmitancia UV= 65%	Sostenible y rentable Reducción costes de mantenimiento
Planta de tratamiento de agua (Shanghai, China)	Coliforms Giardia Cryptosporidium	XYLEM (XYLEM, 2016)	UV	K 143	Caudal= 318048 m ³ /día 5 ud. dosis= 25 mJ/cm ² 7 ud. dosis= 40 mJ/cm ²	Mayor eficacia Tecnología más reciente
Planta de tratamiento de agua (Wahnachtalsperre, Alemania)	Arcilla Patógenos Bacterias	XYLEM (XYLEM, 2016)	UV	K3000	Unidades= 3 Caudal= 60000 m ³ /día Dosis= 40 mJ/cm ²	Menos aditivos y residuos
Planta de almacenamiento (Union County, New Jersey)	BTEX MTBE	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Pozo de inyección permanente	[BTEX]= 28,161 mg/L [MTBE]=7,240 mg/L Área = 5000 pie ²	Reducción de: VOCs= 62,222 a 1,028 mg/L
Planta de Fabricación (Denver, Colorado)	BTEX	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Zanjas y pozos de inyección	[BTEX]= 24,595 mg/L Área= 9600 pie ²	Reducción de: BTEX= 24,595 a 0,089 mg/L

Caso de Estudio	Contaminantes	Empresa	Tecnología	Equipo/Método	Condiciones	Conclusiones
Planta de fabricación de transformadores electrónicos (Ocean County, New Jersey)	Tricloroetileno (TCE) Tetracloroetileno (PCE) Cloroformo (CF) 1,1,1-Tricloroetano (1,1,1-TCA)	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Pozo de inyección permanente	[TCE]= 0,493 mg/L [PCE]= 0,212 mg/L [CF]= 0,025 mg/L [1,1,1-TCA]= 0,033 mg/L Área= 1400 pie ²	Reducción de: COVs= 0,793 a 0,269 mg/L
Planta de alquiler de camiones (Oklahoma)	BTEX	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Pozo de inyección permanente	[BTEX]= 4,1 mg/L Área= 3000 pie ²	Reducción de: BTEX= 71,3-93,1%
Cantera (Sussex County, New Jersey)	1,4-Diclorobenzeno (1,4-DCB) 1,2-Diclorobenzeno (1,2-DCB) Naftalina	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Pozo de inyección roca madre	[1,4-DCB]= 0,489 mg/L [1,2-DCB]= 2,847 mg/L [Naftalina]= 0,279 mg/L Área= 1200 pie ²	Reducción de: 1,4-DCB= 0,489 a 0,010 mg/L 1,2-DCB= 2,847 a 0,074 mg/L Naftalina= 0,279 a ND
Estación de servicio (Florida)	Benceno Tolueno	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Pozo de inyección permanente	[Benceno]= 29,942 mg/L [Tolueno]= 25,009 mg/L Área= 14130 pie ²	Reducción de: Benceno= > 90%
Planta de fabricación de cosméticos (New Jersey)	Tricloroetileno (TCE) Triclorofluorometano (TCFM) Etanol Cloruro de metileno (MC) 1,1,1-Tricloroetano (1,1,1-TCA)	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Pozo de inyección roca madre	[TCE]= 31,162 mg/L [TCFM]= 51,762 mg/L [Etanol]= 354,943 mg/L [MC]= 10,2 mg/L [1,1,1-TCA]=11,166 mg/L Área= 3500 pie ²	Reducción de: TCE= 31,162 a 1,795 mg/L TCFM= 51,762 a 4,408 mg/L Etanol=354,943 a 4,591 mg/L MC= 10,2 a 0,132 mg/L 1,1,1-TCA= 11,16 a 0,397 mg/L

Caso de Estudio	Contaminantes	Empresa	Tecnología	Equipo/Método	Condiciones	Conclusiones
Planta de fabricación y almacenamiento (Bergen County, New Jersey)	Tricloroetileno (TCE) Cloruro de vinilo (VC) 1,2-Dicloroetileno (1,2-DCE)	ISOTEC (ISOTEC, 2016)	Fenton	Pozo de inyección interior	[TCE]= 1,980 mg/L [VC]= 17,57 mg/L [1,2-DCE]= 113,66 mg/L Área= 5400 pie ²	Reducción de: COVs= 93-98%
Manufacturera química (Louisiana)	Fenol	US Peroxide (US Peroxide, 2016)	Fenton H ₂ O ₂	Inyección	[Fenol]= 200-300 mg/L	Reducción de: Fenol= 99%
Planta de tratamiento de aguas residuales (Alabama)	Fenol	US Peroxide (US Peroxide, 2016)	Fenton H ₂ O ₂	Inyección	[Fenol]= 400-600 mg/L	Reducción de: Fenol= 0,2 mg/L
Planta de tratamiento de agua (San José, California)	Sulfuro	US Peroxide (US Peroxide, 2016)	H ₂ O ₂	Inyección	Caudal= 340956,75 m ³ /día [Sulfuro]= 1,8 mg/L	Reducción de: [Sulfuro]= < 0,5 mg/L
Planta de tratamiento de agua (Santa Clara, California)	Sulfuro	US Peroxide (US Peroxide, 2016)	H ₂ O ₂	Inyección	Caudal=181843,6 m ³ /día [Sulfuro]= 2 mg/L	Reducción de: [Sulfuro]= < 0,5 mg/L

Código de colores de cada empresa:

 TROJANUV	 XYLEM	 ISOTEC	 US Peroxide
--	---	--	---



Figura 2. Mapa de localización geográfica de los casos de estudio.

Fuente: Recuperado de: <http://www.lahistoriaconmapas.com/atlas/asia-mapa/mapa-politico-del-mundo-con-capitales.htm>. [Último acceso: 10/02/2016].

La empresa TROJANUV (Canadá), tiene varios equipos implementados, tanto en Europa como en América del Norte, en plantas de agua potable. Estos equipos emplean luz UV a veces combinada con peróxido de hidrógeno. Todos ellos tratan bacterias que contaminan las aguas residuales, especificando las unidades utilizadas, la dosis de luz UV de cada unidad y el caudal total diario a procesar. Pasado un tiempo de su aplicación, los resultados demostraron una minimización general del coste eléctrico, una mayor eficacia en la desinfección y una reducción de parásitos de 3-log (99,999%).

La empresa XYLEM (EE. UU.), también cuenta con varios equipos en Europa, América del Norte y en Asia, en plantas de tratamiento de agua. Sus equipos, aparte de emplear luz ultravioleta, también emplean ozono. Tratan distintos tipos de bacterias y virus, así como otros agentes patógenos contaminantes de aguas residuales, especificando, en este caso, caudales, dosis e incluso hasta volumen del tanque, en el caso del ozono, y transmitancia, en el caso de la luz UV. Tras un tiempo de aplicación mostraron resultados favorables en la eliminación del poliovirus, con una reducción de 5-log (99,99999%) y en la minimización de costes eléctricos y de mantenimiento.

La empresa ISOTEC (New Jersey), proporciona una serie de casos de estudio en EE. UU, en este caso, utilizando el reactivo Fenton en varios tipos de industrias, desde una planta de fabricación de transformadores electrónicos hasta una planta de fabricación de cosméticos. En todos ellos inyectan directamente el reactivo a la corriente subterránea a tratar mediante varios pozos de inyección. Procesan varios tipos de contaminantes orgánicos a diferentes concentraciones en un área de aplicación concreta. Pasado un tiempo tras la primera aplicación de reactivo consiguieron en algunos casos reducir los compuestos orgánicos volátiles hasta un 98%.

Por último, la empresa US Peroxide (Atlanta), utiliza en sus casos de estudio, todos localizados también en EE. UU, tanto este compuesto como el reactivo Fenton, ya sea en plantas de tratamiento de agua o directamente en una manufacturera química. Como ocurre con el Fenton, el peróxido de hidrógeno también se inyecta de forma directa a la corriente contaminada, tratando sulfuros y fenoles a determinadas concentraciones. Los resultados en este caso también fueron esclarecedores, consiguiendo reducir la concentración de fenol en un 99%.

5.2. Grado de madurez tecnológica

Para valorar el grado de madurez de una tecnología se utiliza un índice denominado “Technology readiness levels” (TRL). Por lo tanto, si se considera una tecnología concreta y se tiene información del TRL o nivel en el que se encuentra, se puede tener una idea aproximada de su nivel de madurez.

Este índice considera 9 niveles que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a pruebas con éxito en un entorno real. Estos niveles son (European Commission, 2015):

- TRL 1 - Principios básicos observados.
- TRL 2 - Concepto tecnológico formulado.
- TRL 3 - Prueba de concepto.
- TRL 4 - Validación a nivel de componentes en laboratorio.
- TRL 5 - Validación a nivel de componentes en un entorno relevante.
- TRL 6 - Validación de sistema o subsistema en un entorno relevante.
- TRL 7 - Validación de sistema en un entorno real.
- TRL 8 - Validación y certificación completa en un entorno real.
- TRL 9 - Pruebas con éxito en entorno real.

Se representan en la siguiente figura:

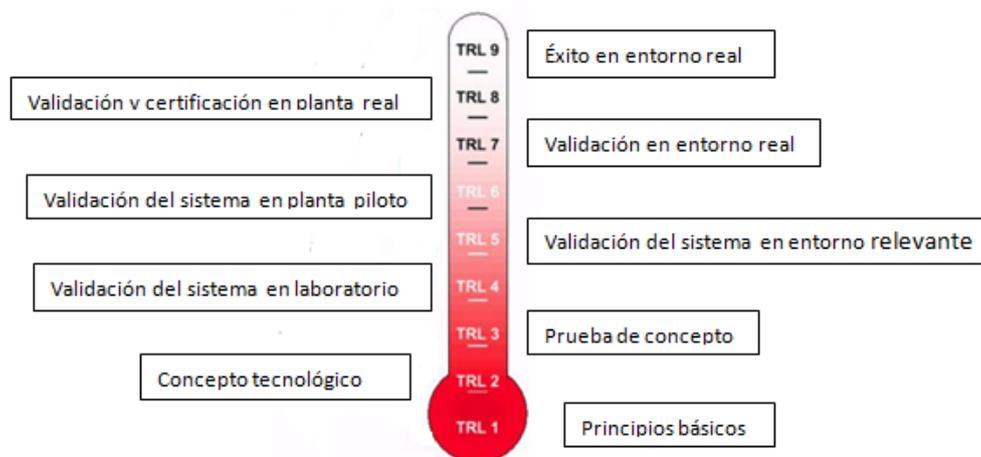


Figura 3. Representación de los niveles TRL.

Fuente: QiEnergy. Technology to Market. Infoday Regional H2020. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/Redites/20150226infoday-h2020energajavier-medina>. [Último acceso: 29/01/2016].

En los cuatro primeros niveles (TRL 1 - TRL 4), el entorno de validación de la tecnología se da en el laboratorio, en los dos siguientes (TRL5 y TRL6) en un entorno con características similares al entorno real y en los tres últimos niveles (TRL 7 - TRL 9) directamente en el entorno real requerido.

Así mismo, en los tres primeros niveles (TRL 1 - TRL 3), se aborda una investigación tecnológica más básica hasta llegar a una primera prueba de concepto. En los cuatro siguientes niveles (TRL 4 - TRL 7), se lleva a cabo un desarrollo tecnológico hasta llegar a un primer prototipo no comerciable y en los dos últimos niveles (TRL 8 y TRL 9), se produce una innovación tecnológica con la introducción de un nuevo producto o servicio en el mercado tras haber superado todas las pruebas y certificaciones, así como las homologaciones pertinentes (Ibañez, 2015).

Una vez expuestos los casos de estudio, se ha procedido a realizar una escala de maduración de los cuatro grupos de tecnologías de los que se ha encontrado una implementación real a escala industrial. Por ello, he asignado un nivel a cada una de ellas teniendo en cuenta los resultados ya probados y recogidos en la tabla 9. En la asignación del nivel TRL para cada tecnología (tabla 10), he tenido en cuenta el tipo de entorno en el que se ha probado y el desarrollo tecnológico llevado a cabo.

Tabla 10.

Nivel de maduración tecnológica.

Tecnología	TRL	Situación
Ozonización	7	Los equipos implementados están en fase de prueba
Luz Ultravioleta	8	Los equipos implementados ya han dado resultados específicos
Reactivo Fenton	8	Los equipos implementados ya han dado resultados específicos
Peróxido de Hidrogeno	7	Los equipos implementados están en fase de prueba

Todos los equipos de producción de ozono y de luz ultravioleta y tanto el reactivo Fenton como el peróxido de hidrógeno, son productos comerciables y se encuentran en el mercado por lo que con lo explicado anteriormente ya deberían de situarse mínimo en un nivel 8.

Sin embargo, no considero que a ninguna tecnología se le pueda asignar todavía un nivel 9 ya que su implementación es reciente y necesita tiempo de maduración; por ello, para poder hacer una diferenciación entre aquellas tecnologías que están en fase de prueba y aquellas que ya están dando algún resultado, he decidido asignar únicamente los niveles 7 y 8.

Las tecnologías que utilizan ozono y peróxido de hidrógeno ya han sido probadas en un entorno real; a pesar de ello, para verificar sus resultados se necesita que se apliquen de forma continua durante más tiempo. Aunque producen una mejora en la corriente tratada consiguiendo reducir las distintas bacterias y compuestos orgánicos, los resultados ya obtenidos son todavía muy generales por lo que las he situado en un TRL de 7

A sí mismo, las tecnologías que conllevan la utilización de luz ultravioleta y de reactivo Fenton también han sido implantadas en un entorno real, pero al contrario de las anteriores, muchos de los equipos implementados y la inyección del reactivo en pozos para tratar aguas subterráneas, han mostrado resultados más específicos con valores reales de reducción de cada concentración de contaminante en la corriente de partida asignándoles en este caso un TRL de 8.

En conclusión, los cuatro grupos se encuentran en un nivel alto de madurez tecnológica, aportando una idea bastante clara al consumidor de que realmente consiguen reducir los niveles de materia orgánica de las aguas.

6. Conclusiones

1. Comparativa de las distintas TOAs en cuanto a posibilidades de uso para contaminantes orgánicos en aire, agua o suelos.

Para comentar que tecnologías son las más adecuadas como método de oxidación avanzada se han considerado condiciones de trabajo ambientales no extremas, excluyendo así, la radiólisis, el plasma no térmico, la oxidación en agua subcrítica y supercrítica, el ferrioxalato, el UV/periodato y la fotocatalisis heterogénea. Así mismo, se ha tenido en cuenta la duración de los electrodos en la oxidación electroquímica por lo que esta tecnología también se ha descartado. Por lo tanto, aquellas que muestran un mejor comportamiento en la eliminación de contaminantes son las que utilizan como oxidantes el ozono, el peróxido de hidrógeno, la luz ultravioleta y el reactivo Fenton. La elección de cada una de ellas dependerá de las necesidades requeridas y de la corriente tratada. En cuanto a posibilidad de tratamiento se ha concluido lo siguiente (tablas 11 y 12):

Tabla 11.

Tratamiento de cada tecnología de oxidación avanzada no fotoquímica.

Tecnología no fotoquímica	Tratamiento		
	Agua	Aire	Suelo
Ozonización alcalina	✓	✗	✗
Ozonización en peróxido	✓	✗	✗
Procesos Fenton	✓	✗	✓
Oxidación electroquímica	✓	✗	✗
Radiólisis	✓	✗	✗
Plasma no térmico	✓	✓	✓
Oxidación en agua subcrítica	✓	✗	✗
Oxidación en agua supercrítica	✓	✗	✗

Tabla 12.

Tratamiento de cada tecnología de oxidación avanzada fotoquímica.

Tecnología fotoquímica	Tratamiento		
	Agua	Aire	Suelo
Fotólisis en UVV	✓	✓	✗
UV/Peróxido	✓	✗	✗
UV/Ozono	✓	✗	✗
Foto-Fenton	✓	✗	✓
Ferrioxalatos y complejos de Fe(III)	✓	✗	✗
UV/Peryodato	✓	✗	✗
Fotocatálisis heterogénea	✓	✗	✗

2. Comercialización de las TOAs.

Para la comercialización de las tecnologías de oxidación avanzada, únicamente se ha tenido en cuenta aquellas que utilizan ozono y luz ultravioleta ya que se venden en el mercado como equipos con unas especificaciones y condiciones de operación determinadas. La lista de empresas estudiadas ha sido la siguiente (tabla 13):

Tabla 13.

Empresas estudiadas y tecnología que comercializan.

EMPRESA	Tecnología Comercial	
	Ozonización	Ultravioleta
KAUFMANN	✓	✗
ITDI	✓	✗
BNP	✓	✗
TROJAN UV	✗	✓
AQUAFINE	✗	✓
XYLEM	✓	✓
CALGON CARBON	✗	✓

3. Grado de implementación industrial de las TOAs.

Para la evaluación del grado de implementación de este tipo de tecnologías y conseguir asignar a cada uno de los cuatro grupos generales un nivel de TRL que indique su maduración, se ha trabajado con una serie de casos de estudio valorando el contaminante eliminado, la tecnología utilizada, el equipo o método empleado, las condiciones de cada corriente tratada y los resultados ya obtenidos. En este apartado además de las tecnologías que utilizan ozono y luz ultravioleta también se han tenido en cuenta las que emplean el reactivo Fenton y el peróxido de hidrógeno (tabla 14):

Tabla 14.

Grado de implementación de cada tecnología.

Tecnología	TRL
Ozonización	7
Luz Ultravioleta	8
Reactivo Fenton	8
Peróxido de Hidrogeno	7

7. Anexos

Para evaluar la comercialización e implementación de las tecnologías de oxidación avanzadas se ha necesitado contactar con varias empresas para así conseguir una mayor información en cuanto a especificaciones técnicas de los equipos comercializados y parámetros analizados en cada caso de estudio.

La tabla 15 recoge todas aquellas empresas de las que se conoce que comercializan con este tipo de productos

Tabla 15.

Información de las empresas comercializadoras de equipos de oxidación avanzada.

Empresa	Página web
OZONO SYSTEM	http://ozonosystem.com/
ENVIOLET	http://www.enviolet.com/
ZONOSISTEM	http://zonosistem.com/
TROJANUV	http://www.trojanuv.com/es/
XYLEM	http://www.xylem.com/en-us/Pages/default.aspx
OXICREW	http://www.oxicrew.com/
AQUAFINE	http://www.aquafineuv.com/
BNP	http://www.bnpozone.com/en/html/about/about-107.html
ITDI	http://www.ozonodecalidad.es/
KAUFMANN	http://www.kaufmann-umwelttechnik.com/5/home
CALGON CARBON	http://www.calgoncarbon.com/
US Peroxide	http://www.h2o2.com/
ISOTEC	http://www.isotec-inc.com/

Aunque no de todas se ha recibido contestación, a continuación, se ha elaborado la tabla 16 con aquellas que tras explicarle en qué consistía el trabajo proporcionaron información adicional.

Tabla 16.

Información de contacto de cada empresa.

Empresa	Nombre de contacto	Email
OZONO SYSTEM	Félix del Castillo	systemsozono@gmail.com
ENVIOLET	Martin Sörensen	info@enviolet.com;
ZONOSISTEM	José Ángel Suárez Álvarez	info@generadoresdeozono-asturias.es
TROJANUV	Eduardo Gracia	egracia@trojanuv.com
AINIA	Josep Martínez	informacion@ainia.es
OXICREW	Ernesto González	comercial@oxicrew.com
ISOTEC	Ashley Fehn	AFehn@insituoxidation.com

8. Referencias bibliográficas

Al- Hashimi, A., Joyce, E.M., Mason, T.J. (2015). *Combined Effect of Ultrasound and Ozone on Bacteria in Water*. Environ. Sci. Technol, 49, 11697–11702.

Albizzati, E., Alfano, O., Conte, L. (2011). *Tratamiento de un herbicida comercial por el proceso foto-fentón*. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

AQUAFINE. (2015). Maximum Performance. Release the power of UV. California. Recuperado de: <http://www.aquafineuv.com/>. [Último acceso: 17/02/2016].

Bagal, M. V., Gogate, P. R., Lele, B. J. (2013). *Removal of 2, 4-dinitrophenol using hybrid methods based on ultrasound at an operating capacity of 7L*. Ultrasonics Sonochemistry, 20, 1217-1225.

Blesa, M.A., Chocrón, M., Litter, M.I., Pardo, M. P., Repetto, P. (2015). *Tratamiento de residuos nucleares líquidos por fotocatalisis heterogénea*. Comisión de energía atómica. Buenos Aires, Argentina.

Blesa, M. A. y Sánchez, B. (Eds.). (2004). *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea* (pp. 7-33). Madrid, CIEMAT.

BNP. (2014). China. Recuperado de: <http://www.bnpozone.com/en/>. [Último acceso: 17/02/2016].

CALGON CARBON. (2015). Pure water, clean air, better world. Pennsylvania. Recuperado de: <http://www.calgoncarbon.com/>. [Último acceso: 14/01/2016].

Castañeda, A.C. (2014). *Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo* (Proyecto de grado). Escuela de ingeniería Julio Garavito, Colombia.

Chica, E.L., Peñuela, G.A, Rubio, A. (2013). *Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes*. Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia.

Cruz, G., Delmas, H., González, k., Jáuregui, U. J., Julcour, C., Quesada, I. (2010). *El empleo del ultrasonido en el tratamiento de aguas residuales*. CENIC. Vol 41, (pp 1-11). La Habana, Cuba.

Dobrosz, I., Gilpavas, E., Gómez, M.A. (2013). *Degradación y Mineralización de Tartrazina mediante Electrooxidación. Optimización de las Condiciones de Operación*. Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia.

El Ghenymy, A. (2013). *Mineralización de fármacos sulfamidas por métodos electroquímicos de oxidación avanzada* (Proyecto de doctorado). Universitat de Barcelona, España.

González, D.E. (2001). *Radiólisis de benceno, tolueno y fenol en solución acuosa utilizando haces de electrones* (Tesis de máster). Universidad autónoma del estado de México, México.

Hocking, P., Johnston, A. J. (1993). *Ultrasonically Accelerated Photocatalytic Waste Treatment*. Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III, American Chemical Society. 518: 106-118.

Hoffman, M.R., Weavers, L.K. (1998). *Sonolytic Decomposition of Ozone in Aqueous Solution: Mass Transfer Effects*. Environmental Science & Technology 32(24): 3941-3947.

Ibañez, J.M. 2015. *Niveles de madurez de la tecnología. TRLS*. Recuperado de: <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/393/NOTAS.pdf>. [Último acceso: 29/01/2016].

Irabien, A. y Rodríguez, J.J. (2013). Gestión sostenible de los residuos peligrosos. (pp. 128-141). Madrid, SÍNTESIS.

ISOTEC. (2016). In-Situ Oxidative Technologies. Modified Fenton's reagent. New Jersey. Recuperado de: <http://www.isotec-inc.com/>. [Último acceso: 14/01/2016].

ITDI. (2016). Implantación de tratamientos y diseños industriales. Generadores de ozono. Valencia. Recuperado de: <http://www.ozonodecalidad.es/272560974>. [Último acceso: 14/01/2016].

KAUFMANN. (2013). The ozone house. Alemania. Recuperado de: <http://www.kaufmann-umwelttechnik.com/5/home>. [Último acceso: 17/02/2016].

Lorimer, J.P., Mason, T.J., Walton, D.J. (1990). Sonoelectrochemistry. Ultrasonics. 28, 333-337.

Martínez, E.J, Nebot, E., Portela, J.R. (1996). Cinética de oxidación en agua supercrítica. Universidad de Cádiz, España.

Medina, J. (2015). *Technology to Market. Infoday Regional H2020*. QiEnergy. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/Redites/20150226infoday-h2020energajavier-medina>. [Último acceso 29/01/2016].

Méndez, A. (2010). La guía. <http://quimica.laguia2000.com/quimica-organica/la-contaminacion-por-compuestos-organicos>. [Último acceso: 12/12/2015].

Petrovic, M., Gonzales, S., Barceló, D. (2003). Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. Trends in Analytical Chemistry, 23 (10), 685-696.

Pietrobon, E. (2010). *Desinfección por luz ultravioleta*. Indaiatuba, Sao Paulo, Brasil.

Quicaño, A. (2014). *Reducción de compuestos fenólicos en aguas residuales de baños portátiles con proceso de oxidación química avanzada ozono-peróxido de hidrógeno* (Proyecto de grado). Universidad nacional de ingeniería, Perú.

Remtavares. (2008). Un lugar para la ciencia y la tecnología. *Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas. descripción y funcionamiento*. Recuperado de: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477>. [Último acceso: 15/12/2015]

Roig, J. (2014). *Eliminación de contaminantes emergentes mediante Humedales Artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencional* (Tesis de máster). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Sáez, V. (2010). *20 kHz sonoelectrochemical degradation of perchloroethylene in sodium sulfate aqueous media: Influence of the operational variables in batch mode*. Journal of Hazardous Materials 183 648-654.

Sáez, V. (2011). *Sonoelectrochemical degradation of perchloroethylene in water: Enhancement of the process by the absence of background electrolyte*. Chemical Engineering Journal 168 649-655.

Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (2013). México. Recuperado de: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/765-sqre-cop>. [Último acceso: 12/12/2015].

TROJANUV. (2016). Water confidence. Desinfección ultravioleta. Canadá. Recuperado de: <http://www.trojanuv.com/es/>. [Último acceso: 14/01/2016].

ULTRATECNO- Power Ultrasonic Applications. *Ultrasonidos y cavitación*. Recuperado de: <http://www.ultratecno.es/tecnologia/ultrasonidos-cavitacion/>. [Último acceso: 16/12/2015].

US Peroxide. (2016). USP technologies. Solutions for a clean environment. Atlanta. Recuperado de: <http://www.h2o2.com/>. [Último acceso: 14/01/2016].

XYLEM. (2016). The World of Water Solutions. Estados Unidos. Recuperado de: <http://www.xylem.com/en-us/Pages/default.aspx>. [Último acceso: 14/01/2016].

Zhang, D., Zhang, H., Zhang, Y. (2007). *Decolorisation and mineralization of CI Reactive Black 8 by Fenton and ultrasound/ Fenton methods*. Coloration Technology. 123, 101–105.