

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

CAMPUS TUXTLA GUTIÉRREZ

**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE EL
PROCESO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO PARA
MINIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN DE LODOS”**

Residencia Profesional

PRESENTA

CRISTIAN ALBERTO ALEGRÍA CLEMENTE

CARRERA

INGENIERÍA QUÍMICA

ASESOR INTERNO

Ing. José Luis Escobar Villagrán

Revisores

Dra. Claudia Ivette Ruiz Suárez

Ing. René Cuesta Díaz

ASESOR EXTERNO

M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos

PERIODO

AGOSTO - DICIEMBRE 2018

INDÍCE

CAPÍTULO I GENERALIDADES DEL PROYECTO	5
INTRODUCCIÓN	6
1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA U ORGANIZACIÓN Y EL ÁREA DEL TRABAJO DEL ESTUDIANTE	8
1.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA	8
1.2. MISIÓN	8
1.3. VISIÓN	8
1.3.1. TRASCENDENCIA INSTITUCIONAL	8
1.3.2. CAPACIDADES POTENCIALES	8
1.3.3. ORGANIZACIÓN COMPETITIVA	8
1.4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE DESARROLLO DEL PROYECTO	9
1.4.1. TECNOLOGÍA AMBIENTAL	9
1.5. OBJETIVOS	9
1.5.1. OBJETIVO GENERAL:	9
1.5.2. OBJETIVOS PARTICULARES:	9
1.6. ALCANCES	10
1.7. LIMITACIONES	10
1.8. JUSTIFICACIÓN	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	11
2. FENTON QUÍMICO	12
2.1. CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA	13
2.2. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS DEL PROCESO FENTON CLÁSICO	21
2.3. PARAMETROS QUE INFLUYEN EN EL TRATAMIENTO DEL FENTON	22
2.3.1. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGENTE OXIDANTE Y DEL CATALIZADOR	23
2.3.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA	24
2.3.3. INFLUENCIA DEL PH	24
2.3.4. INFLUENCIAS DEL TIEMPO DE RESIDENCIA	25
2.3.5. INFLUENCIA DEL TIPO DE CONTAMINANTE	25
2.3.6. INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE ANIONES	26
2.4. APLICACIONES DEL PROCESO FENTON CONVENCIONAL EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	27
2.4.1. INDUSTRIA QUÍMICA	27
2.4.2. INDUSTRIA FARMACÉUTICA	29
2.4.3. INDUSTRIA PAPELERA	29
2.4.4. INDUSTRIA TEXTIL	30
2.4.5. INDUSTRIA ALIMENTARIA	31
2.5. INCONVENIENTES Y MEJORAS AL TRATAMIENTO FENTON CONVENCIONAL	31
2.6. REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO	33
2.7. PROCESO DE FENTON DE LECHO FLUIDIZADO	34
2.8. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA OPERACIÓN EN EL PROCESO DE FENTON DE LECHO FLUIDIZADO (FLF)	36
2.8.1. SOPORTES	36
2.8.2. PH INICIAL	38
2.8.3. CONCENTRACIONES INICIALES DE FE ₂₊ Y H ₂ O ₂	39

CAPÍTULO III DESARROLLO	40
3. PROCEDIMIENTOS Y DESCRIPCIONES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS	41
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN EQUIPO A NIVEL LABORATORIO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES SANITARIAS.....	42
3.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	42
3.1.2. PRETRATAMIENTO (FILTRACIÓN).....	42
3.1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	43
3.1.4. ACIDIFICACIÓN CON ÁC. SULFÚRICO (H ₂ SO ₄) DE AGUA RESIDUAL A TRATAR..	44
3.1.5. REACTOR FENTON DE LECHO FLUIDIZADO	44
3.1.6. SOPORTE DEL CATALIZADOR.....	44
3.1.7. NEUTRALIZACIÓN	45
3.2. METODOLOGÍA PARA REALIZAR EL TRATAMIENTO FENTON QUÍMICO	48
3.2.1. MUESTREO	48
3.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA.....	48
3.2.3. FILTRACIÓN.....	51
3.2.4. ACIDIFICACIÓN DEL AGUA CRUDA	51
3.2.5. PESO DE REACTIVO A UTILIZAR SULFATO FERROSO HEPTAHIDRATADO (FeSO ₄ * 7H ₂ O) Y PERÓXIDO DE HIDRÓGENO (H ₂ O ₂).....	52
3.2.6. REACCIÓN FENTON QUÍMICO	53
3.2.7. NEUTRALIZACIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO.....	55
3.3. METODOLOGÍA PARA FENTON DE LECHO FLUIDIZADO (USANDO COMO SOPORTE SILICA GEL).....	57
3.3.1. MATERIALES	57
3.3.2. REACTIVOS	57
3.3.3. EQUIPOS	57
3.3.4. DIAGRAMA DE FLUJO PARA TRATAMIENTO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO A NIVEL LABORATORIO.....	58
3.4. DISEÑO DEL PROTOTIPO PARA PRUEBAS FENTON DE LECHO FLUIDIZADO	60
3.4.1. PRUEBAS HIDRÁULICAS CON EL SOPORTE	61
3.4.2. CARGA DEL RECIPIENTE DE ALIMENTACIÓN.....	61
3.4.3. SEPARACIÓN DE LODOS DE REACCIÓN.....	63
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	65
4. RESULTADOS	66
4.1. DETERMINACIÓN DE LODOS GENERADOS EN FENTON QUÍMICO	68
4.2. DETERMINACIÓN DE DQO EN FENTON QUÍMICO	69
4.3. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO	71
4.4. DETERMINACIÓN DE REMOCIÓN DE DQO EN FENTON DE LECHO FLUIDIZADO.....	74
4.5. COMPARACIÓN DE LA REMOCIÓN DE DQO ENTRE FENTON QUÍMICO Y FENTON DE LECHO FLUIDIZADO	75
4.6. COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN DE LODOS FENTON QUÍMICO Y FENTON DE LECHO FLUIDIZADO.....	76
CONCLUSIÓN	78
RECOMENDACIONES	79
ANEXOS.....	80
.....	82
BÚSQUEDA DE PATENTES CON LOS SOFTWARES DERWENT INNOVATION Y LATIPAT.....	83

PATENTES DE DISEÑOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON EQUIPO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO	85
.....	86
REFERENCIAS	95

CAPÍTULO I GENERALIDADES DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos que sean llevado a cabo a través de los años han traído con ellos diferentes problemas que no fueron notorios, hoy en día vemos las diferentes situaciones que se están presentando, como es la gran contaminación a diferentes partes de la tierra que están impactando de una manera muy preocupante al aire, agua y suelo, entre otros.

Se ha propuesto encontrar soluciones de tratamientos innovadores los cuales sean capaces de degradar los compuestos más recalcitrantes, con ellos cabe destacar que uno de los mayores problemas es la contaminación que está sufriendo el agua puesto que las industrias (Farmacéuticas, Petroquímicas, Cosméticas, Textiles entre otras) en su mayoría usan este servicio de suma importancia en muchos de sus procesos, por lo cual el agua resulta contaminada por diferentes compuestos tóxicos y compuestos fenólicos, los cuales son altamente contaminantes ya que estos no pueden ser degradados por tratamientos biológicos convencionales (Poloni, M., Milena, C., 2004).

Estas aguas pueden ser tratadas efectivamente con diferentes métodos conocidos como lo es la adsorción con carbón activado, incluso con tratamientos químicos convencionales oxidación térmica, cloración u ozonización (Glaze, 1987) pero no son en su totalidad limpias, estas quedan con residuos de compuestos que no son degradados por los tratamientos, he aquí donde intervine la importancia de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) como una alternativa muy atractiva a diferencia de los tratamientos conocidos, debido a su gran eficiencia al eliminar dichos compuestos.

El proceso de oxidación avanzada Fenton de Lecho Fluidizado (FLF), este constituye una modificación al Fenton convencional (homogéneo) para la degradación de contaminantes en solución acuosa. Los diferentes resultados operacionales han confirmado las ventajas de este método, entre las que se encuentran (Tisa, 2014).

- Una mayor tasa de degradación de contaminantes
- Menores tiempos de reacción para el mismo rendimiento
- Mejor recirculación del catalizador Fe^{2+}

El Fenton químico tiene aplicación industrial en México y otros Países. Una innovación del Fenton químico a nivel internacional es el Fenton de Lecho Fluidizado con instalaciones a nivel industrial (los resultados prometedores obtenidos durante los últimos 20 años sobre el tratamiento de POA y efluentes industriales por el proceso FLF, incentivaron la ampliación de ingeniería de los reactores FLF para tratar no solo con efluentes industriales sino también a nivel industrial utilizando grandes volúmenes de residuos. La primera experiencia a escala real se realizó en 2002 teniendo en cuenta los efluentes de birrefracción de la industria química en Taiwán.) (Sergi, Garcia-segura., Luzvisminda, M. Bellotindos., Yao-Hui. Huang., Enric, Brillas.,, 2016)

Actualmente en México no se tiene esta tecnología aplicada a nivel industrial, por lo que el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica CIDETEQ muestra interés en iniciar con desarrollos a nivel laboratorio que le permitan escalar a nivel prototipo el proceso Fenton Químico de Lecho Fluidizado para el tratamiento de aguas residuales.

1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA U ORGANIZACIÓN Y EL ÁREA DEL TRABAJO DEL ESTUDIANTE

1.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

Nombre: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.

Año de fundación: 1991

Número de empleados: Aproximadamente 250 personas

Localización del centro: Parque Sanfandila s/n, Pedro Escobedo, 76703 Santiago de Querétaro, Qro.

1.2. MISIÓN

Contribuir al bienestar social con nuestra generación y transferencia de conocimiento y formación de talento humano en electroquímica, enfocados al ambiente y energías a nivel nacional e internacional.

1.3. VISIÓN

1.3.1. TRASCENDENCIA INSTITUCIONAL

- 1.3.1.1. 90% de egresados en el mercado laboral
- 1.3.1.2. Creación de empresa de base tecnológica
- 1.3.1.3. Licencias o ventas de propiedad intelectual
- 1.3.1.4. Gestión del conocimiento Institucionalizada

1.3.2. CAPACIDADES POTENCIALES

- 1.3.2.1. Participar en una Sede del sur del país
- 1.3.2.2. Proyectos patrocinados enfocados a las demandas sociales
- 1.3.2.3. Participación del 30% en proyectos en red nacional e internacional

1.3.3. ORGANIZACIÓN COMPETITIVA

- 1.3.3.1. Acreditaciones institucionales (ISO/AS9100)
- 1.3.3.2. Servicios tecnológicos (NADCAP/EMA)
- 1.3.3.3. La mitad de los investigadores están en SIN 2/3

1.4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE DESARROLLO DEL PROYECTO

1.4.1. TECNOLOGÍA AMBIENTAL

En el área de tecnología ambiental se aplican los conocimientos técnicos y científicos para conservar el ambiente natural y los recursos, frenar los impactos negativos de las actividades industriales. En esta área se desarrollan proyectos económicamente viables y ambientalmente seguros. Algunas de las tecnologías ambientales que se desarrollan son: purificación del agua, tratamiento de aguas residuales, reciclaje de aguas residuales tratadas, mejoras ambientales, tratamiento de gases, manejo de desechos sólidos y energía renovable.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL:

Proponer un prototipo a nivel laboratorio para el tratamiento de aguas residuales mediante el proceso Fenton de Lecho Fluidizado para disminuir la producción de lodos.

1.5.2. OBJETIVOS PARTICULARES:

Revisar antecedentes de la aplicación del proceso Fenton Homogéneo y Heterogéneo en el tratamiento de aguas residuales, así como sus principales reacciones.

Describir los avances existentes de la revisión de patentes del proceso Fenton de lecho fluidizado.

Elaborar el diseño de un prototipo a nivel laboratorio para el Proceso Fenton de Lecho Fluidizado, realizar pruebas.

1.6. ALCANCES

Este proyecto está diseñado para tratar de resolver y aumentar la eficiencia tanto como reducir el consumo de reactivos la producción de lodos en el tratamiento convencional Fenton por lo que las pruebas se realizaran a nivel laboratorio, al mismo tiempo generar datos que puedan ser útiles para desarrollar esta tecnología más adelante.

1.7. LIMITACIONES

Por falta de equipos y tiempo para hacer del proceso Fento de Lecho Fluidizado un tratamiento en operación de forma continua se optó por realizarlo de Operación en forma Batch (Cargas).

1.8. JUSTIFICACIÓN

La producción de cantidades considerables de lodo el constante uso de reactivos para llevar a cabo el tratamiento Fenton Químico es el principal inconveniente que presenta puesto que a grandes concentraciones de DQO se necesita mayor cantidad de reactivos por lo que como principal objetivo se pretende reducir la generación de lodos implementando un soporte.

Por ello este proyecto va enfocado a una incorporación de un reactor de lecho fluidizado al tratamiento Fenton convencional para minimizar la producción de lodos y reducir el tiempo de tratamiento, así como una mejora en la remoción de los contaminantes

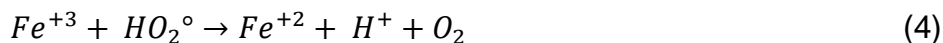
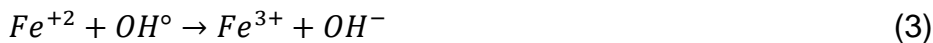
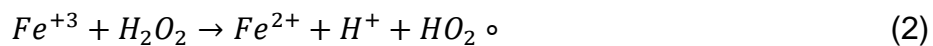
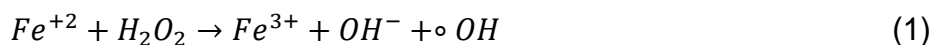
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2. FENTON QUÍMICO

El reactivo de Fenton fue descubierto hace unos 100 años, pero su aplicación como oxidante el proceso para destruir compuestos orgánicos tóxicos no se aplicó hasta fines de la década de 1960 (Huang, 1993). Los procesos de tratamiento de aguas residuales de la reacción de Fenton son conocidos por ser muy efectivos en la eliminación de muchos contaminantes orgánicos peligrosos del agua. La principal ventaja es la destrucción completa de contaminantes a compuestos inocuos, CO₂, agua e inorgánico sales. La reacción de Fenton causa la disociación del oxidante y la formación de radical hidroxilo reactivos que atacan y destruyen los contaminantes orgánicos.

El proceso de oxidación Fenton fue descrito por primera vez en 1894 por Henry J. Fenton, cuando descubrió que el peróxido de hidrogeno (H₂O₂) podía activarse con iones ferrosos para oxidar ácido tartárico (Pignatello JJ. Oliveros E, 2006). Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de H₂O₂, en medio ácido, para la formación de radicales $\cdot\text{OH}$. A la combinación de H₂O₂ y sales de hierro se denomina reactivo Fenton (Ec. 1 y 2) (Neyens E & Baeyens J., 2003).

El reactivo Fenton es una mezcla de H₂O₂ y hierro ferroso la cual genera radicales hidroxilos de acuerdo a las siguientes reacciones.



Además de formarse radicales $\cdot\text{OH}$, se generan radicales per hidroxilo (HO_2^+) las cuales forman una reacción en cadena para eliminar el material oxidable. En las principales reacciones que se llevan a cabo sucede que hay una abstracción de hidrogeno, una adición a la estructura del contaminante lo que conlleva a una transferencia de carga.

2.1. CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

Los procesos de oxidación avanzada se clasifican:

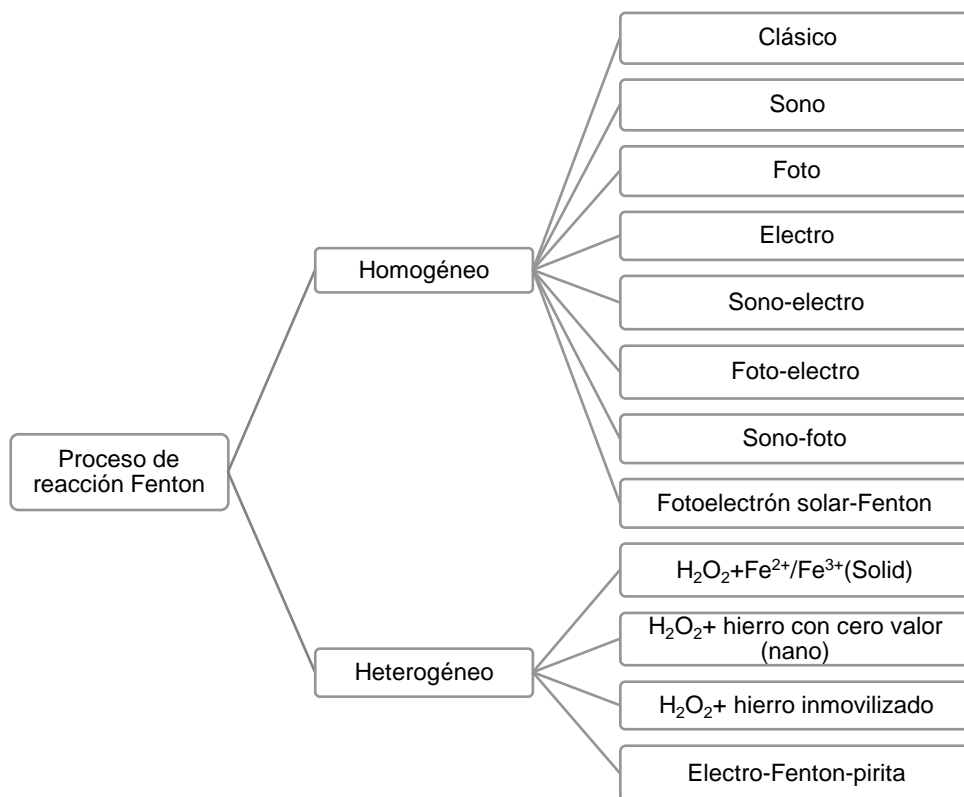


Figura 1 Clasificación de los diferentes tratamientos de la rama del FENTON (Bhawana Jain , Ajaya Kumar Singh, Hyunook Kim, Eric Lichtfouse, Virender K. Sharma, 2018).

Como se puede observar en la **figura 1** el proceso de reacción Fenton se divide en dos grandes grupos: homogéneo y heterogén, y estos en pequeños subgrupos de los cuales se hablaran de unos en el trabajo específicamente del homogéneo se

Se analizará el Fenton clásico o convencional y por parte del heterogéneo el Fenton de lecho fluidizado ($H_2O_2 + Fe^{2+}/Fe^{3+}(Solid)$)

De los cuales se enfocará en el estudio principalmente del heterogéneo, presente uno de los más atractivos y como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Se describe de manera general alguno de los procesos antes mencionados.

2.1.1. PROCESO ELECTRO-FENTON

En el proceso de electro-Fenton, Fe^{2+} y H_2O_2 estos son producidos simultáneamente por reducción catódica de Fe^{3+} y O_2 , respectivamente (Bhawana Jain, Ajaya Kumar Singh, Hyunook Kim, Eric Lichtfouse, Virender K.Sharma, 2018). Una pequeña cantidad de sal de Fe^{2+} se agrega inicialmente, que puede reaccionar con H_2O_2 producido electroquímicamente para producir Fe^{3+} a Fe^{2+} . El carbón vidrioso y el grafito rara vez se utilizan como cátodos en el proceso electro-Fenton. Los cátodos de electro-Fenton más utilizados son los cátodos de fieltro de carbono y GDE (Electrodo de difusión de gas) (Bhawana Jain, Ajaya Kumar Singh, Hyunook Kim, Eric Lichtfouse, Virender K. Sharma, 2018) se aplica un electrodo de platino para realizar la reacción anódica en la configuración del laboratorio. En la percoagulación, con Fenton, tratamiento con Fenton anódico o peroxidación electroquímica, Fe^{2+} también puede producirse a partir de la oxidación del ánodo de hierro sacrificado. En diferentes reseñas que se han publicado sobre la eliminación de contaminantes, incluidos microcontaminantes en el agua mediante el proceso electro Fenton (Bhawana Jain, Ajaya Kumar Singh, Hyunook Kim, Eric Lichtfouse, Virender K. Sharma, 2018).

1. Aire comprimido.
2. Medidores de flujo de gas.
3. Solución H_2SO_4 0.5 mol L^{-1} .
4. Ánodo (Platino).
5. Barras magnéticas.
6. Cátodos (fieltro de carbono).
7. Agitadores magnéticos.
8. Amperios de corriente continua.

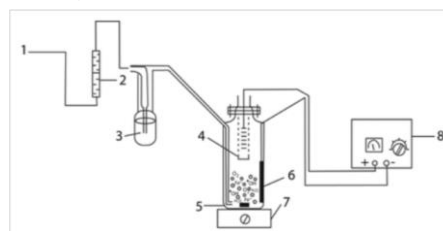
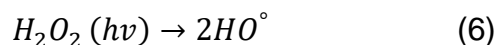


Figura 2 Configuración experimental para el proceso de electro-Fenton (Fatiha Ferrag, Siagh, Florence Fourcade, Isabelle Soutrel, Hamid Ait, Hayet Djelal, Abdeltif Amrane, 2012)

2.1.2. PROCESO FOTO-FENTON

Este proceso de oxidación implica la formación de radicales hidroxilos por fotólisis de peróxido de hidrógeno y reacción de propagación. El mecanismo más comúnmente aceptado para la fotólisis es la ruptura del enlace O-O, por acción de la radiación ultravioleta para formar dos radicales hidroxilos, tal como se muestra a continuación reacción 6:



Mecanismo general.

El proceso de generación de los iones ferrosos en el mecanismo Fenton, es estimulado en presencia de rayos UV/luz visible, como se ilustra en la reacción 7, la cual muestra la regeneración fotoquímica de los iones ferrosos por foto-reducción de iones férricos. La nueva generación de iones ferrosos, reacciona con peróxido de hidrogeno generando nuevamente radicales hidroxilos y iones férricos con lo que el ciclo continúa:

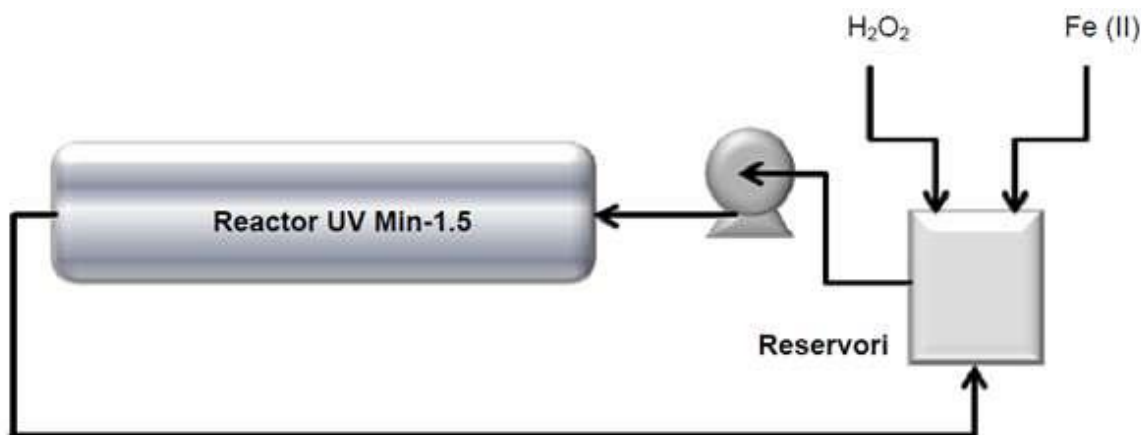
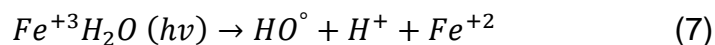


Figura 3 Esquema del sistema de foto catalítico (Foto-Fenton) (Gina M. Hincapié-Mejía, David Ocampo, Gloria M. Restrepo, Juan M., 2011)

2.1.3. FENTON QUÍMICO

Entre los POA que utilizan H_2O_2 , como especie precursora de radicales $^{\cdot}OH$, se encuentra la familia de procesos Fenton. Una primera clasificación de estos procesos nos permite diferenciar:

- Procesos Fenton clásico (homogéneo) a presión atmosférica y temperatura ambiente.
- Procesos Fenton heterogéneo, con una amplia variedad de catalizadores, tanto sólidos como soportados.
- Procesos Fenton modificados, en los que se aporta energía al proceso mediante el aumento de la temperatura del proceso (Fenton con intensificación térmica), radiación visible o ultravioleta (Proceso Foto-Fenton), corriente eléctrica (Proceso electro-Fenton) o ultrasonidos (Procesos sonó-Fenton).

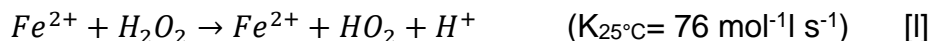
Cada una de estas categorías admite múltiples subdivisiones en función de la configuración de los reactores, del catalizador y/o soporte empleado, de los esquemas de tratamiento adoptados, de la temperatura de trabajo, de las combinaciones con otros POA, etcétera. El grado de desarrollo alcanzado en la actualidad difiere notablemente entre los distintos tipos de proceso Fenton descritos. Los más novedosos, como los que suministran energía mediante ultrasonidos, se encuentran aún en fase de desarrollo experimental.

Los procesos Fenton de los que se tienen referencias de explotación a escala real para el tratamiento de aguas residuales industriales son:

- Los procesos Fenton homogéneos clásicos, bien a presión atmosférica o bien a presiones elevadas y temperaturas por encima de 100°C
- Los procesos Fenton heterogéneos, llevados a cabo a escala industrial en reactores de lecho fluidizado.
- Los procesos electro-Fenton, con aporte externo del catalizador, o bien con generación in situ de Fe^{2+} a partir de ánodos de sacrificio
- Los procesos foto-Fenton, tanto con radiación UV como visible (Solar).

2.1.3.1. FUNDAMENTOS: REACCIÓN FENTON

La posibilidad de generar radicales $\cdot OH$ a presión atmosférica y temperaturas ambiente a partir de la denominación reacción Fenton, descrita a finales del siglo XIX, se conoce desde los años 30 del siglo pasado. La reacción de Fenton clásica se produce cuando se ponen en contacto peróxido de hidrógeno e iones Fe^{2+} en solución acuosa a pH ácido. El ion ferroso inicia la reacción teniendo contacto con el peróxido lo que provoca una descomposición del mismo, que este da como resultado la generación de fuertemente reactivos radicales $\cdot OH$ y de agua, así como de una cierta cantidad de calor, dado que la reacción global es exotérmica:



Las sucesivas etapas de la reacción (iniciación, propagación, terminación), el acoplamiento de sucesivas reacciones de oxidación y reducción, la formación simultánea de otras especies radicálicas con menor poder oxidante, además de las múltiples interacciones entre estas y las restantes especies químicas que puedan estar presentes en la matriz acuosa, hacen de la comúnmente conocida como “Reacción Fenton” un sistema químico altamente complejo, cuya descripción precisa se halla aun sometida a controversia (Barbusinski, 2009) (Bautista, 2008)

Por otra parte, la participación del ion ferroso en la reacción de Fenton debería ser de naturaleza catalítica, debido a que teóricamente, la especie que es oxidada en este caso Fe^{3+} reacciona nuevamente con el peróxido de hidrógeno, que genera a su vez radicales de hidroperóxilo (HO_2), de menor poder oxidante ($E^\circ = 1.76 V$). en el proceso este regresaría a su forma reducida, para dar comienzo nuevamente a la reacción.

Se ilustra el potencial de oxidación de algunos componentes en la **tabla 1**



Agente oxidante	Potencial de oxidación (E°) en Voltios
Flúor (F)	3.06
Radical hidroxilo ($\cdot OH$)	2.80
Oxígeno atómico (O)	2.42
Ozono (O_3)	2.08
Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)	1.78
Cloro (Cl_2)	1.36
Oxígeno molecular (O_2)	1.23

Tabla 1. Potencial oxidante de diferentes componentes

Sin embargo, en la práctica los iones férricos Fe^{3+} formados en la reacción [I], mucho más rápida que la reacción [II], se acumula progresivamente en solución acuosa hasta alcanzar su producto de solubilidad, dando lugar a la aparición de precipitados de hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ de un característico tono pardo-rojizo y aspecto coloidal.

Este es uno de los aspectos particulares de la reacción Fenton debe ser especialmente considerado a la hora de la selección y diseño del proceso porque:

- Para minimizar la aparición de precipitados de hierro es preciso mantener el pH de la mezcla en torno a 3, rango en el que el hierro permanece en disolución como Fe^{2+}
- La acidificación de los efluentes exige una posterior etapa de neutralización.
- La no regeneración de Fe^{2+} obliga a su adición en continuo para el mantenimiento de la reacción.
- La aparición de precipitados férricos exige una etapa de separación y de acondicionamiento y gestión final de los lodos tras la reacción de oxidación.

2.1.3.2. VENTAJAS DEL PROCESO FENTON CLÁSICO

El proceso Fenton Clásico ofrece las siguientes ventajas como alternativa para el tratamiento de los efluentes industriales:

- Amplio rango de aplicación a diversos tipos de efluentes, contaminantes y cargas orgánicas
- Elevada afinidad por los compuestos cromóforos, dando como resultado una rápida eliminación del color con tiempos de contacto relativamente bajos
- Facilita la biodegradación de compuestos orgánicos refractarios
- Simplicidad de diseño de equipos e instalaciones
- Sencillez operativa

- Escalabilidad del proceso
- Menores costos de inversión y explotación con respecto a otros POA
- Reactivos de fácil adquisición y manipulación
- No da lugar a la aparición de subproductos tóxicos
- Reduce la toxicidad de efluentes y vertidos finales
- Baja superficie de ocupación
- Validado a escala industrial
- Aportar un tratamiento de coagulación asociado a la coprecipitación de algunos contaminantes junto con el hierro (III) .

2.1.3.3. DESVENTAJAS DEL PROCESO FENTON CLÁSICO

El proceso presenta tres fundamentales condiciones que son de igual importancia

- Producción de lodos: Es uno de los inconvenientes del método que desde el punto de vista operacional. Se trata de un precipitado coloidal de color pardo rojizo, que debe de ser separado de la mezcla líquida en una etapa posterior a la oxidación, y gestionado adecuadamente como residuo sólido.
- Control de pH: el pH óptimo para la reacción, vecino a 3, limita su aplicación salvo que efectúe una acidificación previa de los efluentes, así como su neutralización posterior a la etapa de oxidación. Esta característica implica la necesidad de introducir etapas complementarias al proceso efectivo de oxidación Fenton.
- Consumo de reactivos: la ausencia de regeneración de Fe^{2+} obliga al suministro en continuo del catalizador durante la reacción. El consumo de peróxido de hidrógeno puede elevar excesivamente los costos de explotación en el caso de grandes caudales de agua residuales, o para elevadas cargas orgánicas hasta hacerlo económicamente desventajoso. En tales casos, puede ser preciso establecer una adecuada estrategia de segregación de los caudales sometidos a tratamientos Fenton, con el fin de optimizar su aplicación a los flujos de mayor rendimiento en los procesos POA.

2.2. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS DEL PROCESO FENTON CLÁSICO

El esquema que se ilustra a continuación es el tratamiento Fenton convencional en fase homogénea se representa en la **figura 4** está conformado por tres etapas en las cuales se agregan operaciones de separación y tratamiento de los lodos férricos que se generan durante el proceso.

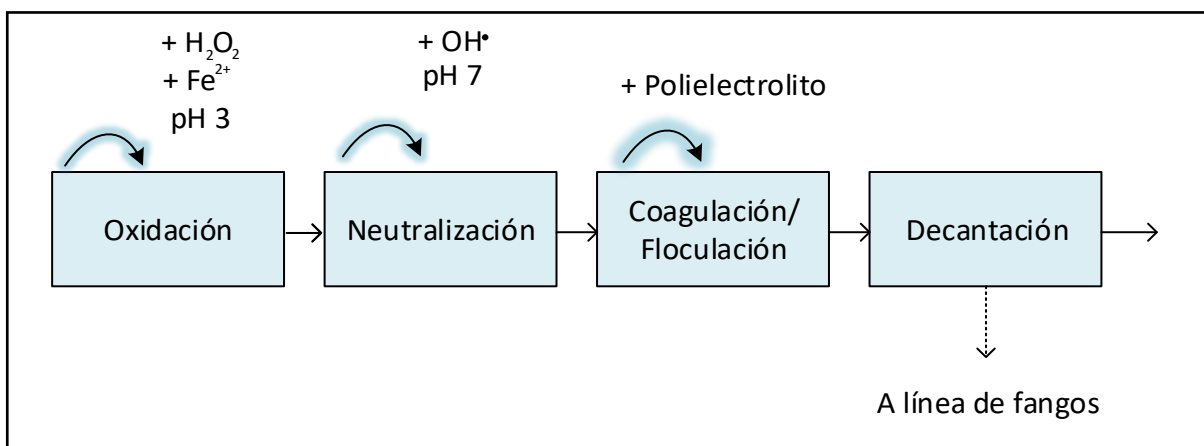


Figura 4. Esquema general del proceso de oxidación avanzada Fenton para tratamiento de aguas residuales (Wikipedia La enciclopedia libre, s.f.)

Las etapas consisten en la reacción de oxidación que se lleva a cabo a un pH 3 este puede tener variantes como es un rango de pH 2-4 los cuales aún estarían dentro de condición para que se lleve la reacción, seguida de esta tenemos la neutralización del efluente, y una coagulación de la materia suspendida cada una de las etapas tiene lugar en un reactor independiente que opera en modo secuencial.

Las etapas finalizan en la operación de decantación, en la que el efluente oxidado se separa de los lodos férricos que se generaron a través del transcurso del tratamiento Fenton.

Los lodos que son decantados requieren una línea posterior de tratamiento. El empleo de hierro como coagulante permite emplear el espesamiento por gravedad, pasado del 1% hasta una concentración que va del 10% en peso.

Estos son sometidos a operaciones de secado (filtros prensa) esto para reducir su humedad hasta que sean compatibles con el destino que se les vaya a proporcionar.

Para que el proceso Fenton se complete este debe de contar con depósitos adecuados para el almacenamiento, preparación y dosificación de los reactivos, así como de los correspondientes sensores y equipos de control automatizado de todo el proceso descrito anteriormente.

2.3. PARAMETROS QUE INFLUYEN EN EL TRATAMIENTO DEL FENTON

Los diferentes autores coinciden en que el rendimiento del proceso Fenton depende, entre otros factores de la concentración del agente oxidante y catalítico, temperatura, pH y tiempo de reacción (Pontes, 2010); (Neyens E & Baeyens J., 2003). La eficiencia también depende de la naturaleza del contaminante que se degradara y la presencia de otros compuestos orgánicos e inorgánicos (Pignatello JJ. Oliveros E, 2006).

En la siguiente tabla se presenta un resumen de reacción y los diferentes porcentajes de degradación de diferentes trabajos realizados sobre la aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de los principales contaminantes en las aguas residuales petroquímicas. En la **tabla 1** se destaca la eficiencia del sistema Fenton en la remoción de dichos contaminantes respecto de otros POA (O_3/H_2O_2 , UV/ O_3 , UV/ H_2O_2 y UV/ TiO_3).

2.3.1. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGENTE OXIDANTE Y DEL CATALIZADOR

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) tales como las sales de hierro las cantidades a utilizar depende del tipo de contaminantes que se pretenden remover, No cabe mencionar que el H_2O_2 requiere de grandes cantidades de Fe^{2+} para lograr su descomposición en radicales ($\cdot OH$) es de esperarse que la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas sea mayor a medida que aumenta la concentración del oxidante y del catalizador; sin embargo, grandes cantidades de H_2O_2 y de Fe^{2+} limitan el porcentaje de degradación del contaminante, ya que se favorecen las reacciones secundarias (Neyens E & Baeyens J., 2003).

(Homem, V., Z., Santos, L., & Alves, A. (2009)., 2009) encontraron que un aumento en la concentración de H_2O_2 no suponía una mayor degradación de benzo(a) pireno ($10 \mu g/L$); ya que con una concentración inicial de H_2O_2 de $50 mg/L$ se conseguía una degradación del 90 % tras 90 min de reacción; mientras que una concentración de $150 mg/L$ solo permitía eliminar el 80 % del contaminante.

Por otra parte (Ghosh, 2010) observaron una reducción máxima de DQO ($11,500 mg/L$) del 97.5 % para una concentración de Fe^{2+} de 0.06 M en un tiempo de tratamiento de 100 min; niveles de Fe^{2+} de 0.1 M llevaban a la reducción en la eficiencia del proceso, con una remoción DQO del 80 %.

Así como estas se reportan diferentes experiencias con valores idóneos de agente oxidante y catalítico. Sin embargo, para determinar las concentraciones optimas de estas variables es necesario conocer el tipo de contaminante presente en el agua objeto de análisis, al igual que su concentración. Por este motivo, es necesario llevar a cabo la caracterización previa de cada tipo de agua residual a tratar.

2.3.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

El proceso Fenton puede ocurrir a temperatura ambiente, un aumento de esta favorece la cinética de las reacciones de oxidación. (Homem, V., Z., Santos, L., & Alves, A. (2009)., 2009) manifestaron la viabilidad de operar a altas temperaturas (alrededor de 70 °C), consiguiendo remociones de benzo(a)pireno (10 µg/L) del 90 y 100% a 30 y 70 °C, respectivamente. No obstante, el incremento de temperatura puede disminuir la estabilidad del H₂O₂, ya que altos valores de temperatura aumentan la velocidad de degradación del H₂O₂ a O₂ y H₂O (Maliková, 2009).

2.3.3. INFLUENCIA DEL PH

El pH es una de las variables más significativas en el proceso ya que estudios sobre el reactivo Fenton han demostrado que solo es efectivo a un rango de pH que va entre 2.5-4; algunos autores (Duran-Moreno, 2011); (Pignatello JJ. Oliveros E, 2006); (Xu, 2004) fijan que el valor de 2.8, siendo este pH el óptimo para llevar a cabo la formación de los radicales ⁻OH a partir de la descomposición del peróxido de Oxígeno (H₂O₂) en presencia de Fe²⁺.

Las condiciones de un pH muy ácido o muy alcalino estos dan lugar a un descenso de la velocidad de la degradación de los contaminantes. Un aumento del pH conduce a la precipitación del hierro como Fe(OH)₃, impidiendo que se lleve a cabo la reacción, por lo tanto, la regeneración de Fe²⁺. Por otro lado, si el pH es excesivamente ácido se forma [Fe(H₂O)₆]²⁺, el cual reacciona lentamente con el H₂O₂ ralentizando la generación de radicales ⁻OH (Pignatello JJ. Oliveros E, 2006)

2.3.4. INFLUENCIAS DEL TIEMPO DE RESIDENCIA

Cuando el tiempo de residencia se toma del punto de vista económico este sea demostrado que cuanto más tardada es la reacción no es viable (Ghosh, 2010); de hecho, con bajos periodos de reacción se consigue buena eficiencia en la degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química (Esplugas, 2002) evaluaron el rendimiento de diferentes POA para la degradación de fenol, en estos destacando el proceso Fenton por su efectividad en la remoción de la totalidad del fenol después de 9 min de tratamiento.

2.3.5. INFLUENCIA DEL TIPO DE CONTAMINANTE

Las aguas residuales petroquímicas se distinguen por su alto contenido en demanda química de oxígeno (DQO) y en carbono orgánico total (COT). Tanto la DQO como el COT son parámetros esenciales a la hora de conocer el grado de contaminación de las aguas (Hasan, 2012) y de gran importancia en la eficiencia del proceso Fenton (Bianco, 2011). A altos niveles de contaminantes, aumenta el número de colisiones entre estos y el catalizador y los radicales $\cdot\text{OH}$, lo cual aumenta la posibilidad y acelera la degradación de los compuestos tóxicos (Bianco, 2011) sin embargo, si existe una cantidad excesiva de contaminante en las aguas esto podría reducir las colisiones, provocando una ralentización en la etapa de reacción.

Estudios realizados por (Ghosh, 2010) reportaron una disminución en la constante de velocidad de reacción (K) de aproximadamente el 14 % al tratar de bajo las mismas condiciones dos efluentes petroquímicos de distinta DQO (3,100 mg/L($k=0.064/\text{min}$) y 5,950 mg/L($k=0.055/\text{min}$)). La reducción en la velocidad de degradación del efluente de origen puede deberse a la formación de subproductos de reacción (Hong, 2007).

Cuanto mayor es la cantidad inicial de contaminantes, se genera un mayor número de intermediarios, los cuales a su vez reaccionaran con radicales $\cdot\text{OH}$, oxidándose y dejando un menor número de $\cdot\text{OH}$ disponibles para interactuar con las sustancias de origen (Hong, 2007). Por otro lado, debe destacarse que, a pesar de que el reactivo Fenton suele ser considerado como un potente agente oxidante, este puede no ser completamente efectivo para algunas especies químicas como ácidos carboxílicos de cadena corta (ácido málico, acético, etc.) (Bianco, 2011)

2.3.6. INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE ANIONES

Determinados aniones, tanto orgánicos como inorgánicos, participan en la formación de complejos de hierro, impidiendo que este siga reaccionando. La formación de tales compuestos depende, en gran medida, del pH, e influye directamente en la cantidad de iones férricos y ferrosos libres en el agua, restringiendo el ciclo catalítico del proceso Fenton (Maliková, 2009). Esta limitación puede ser superada usando radiación UV o solar, ya que permite la degradación de tales complejos, como sucede con los ferri oxalatos (Litter, M.I., & Quici, N., 2010).

2.4. APLICACIONES DEL PROCESO FENTON CONVENCIONAL EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

2.4.1. INDUSTRIA QUÍMICA

La industria química contribuye en gran medida al problema asociado hoy en día con las aguas residuales industriales, no solo en términos de volúmenes de vertido, sino también en relación al carácter tóxico de muchos de los contaminantes presentes en este tipo de efluentes. (Barbusinski, K., Filipek, K., 2001) analizaron la eficacia del proceso Fenton en el tratamiento de las aguas residuales procedentes de la producción de pesticidas en el sureste de Polonia.

La mayoría de los pesticidas fueron completamente degradados usando una dosis de H_2O_2 de 2.5 g/L, la cual corresponde a 5 veces la cantidad teórica estequiometría referida a la DQO inicial del agua. Los mejores resultados se alcanzaron con los pesticidas organofosforados, que fueron degradados en un 97-100 %. No obstante, la eficacia de eliminación de los organoclorados fue también alta (>90%), y la toxicidad del efluente para la bacteria bioluminiscente *Vibrio fischeri* se redujo drásticamente.

Las aguas residuales generadas en la extracción de petróleo, su refinado y procesamiento químico han sido tratadas con éxito mediante el sistema Fenton a temperatura ambiente y presión atmosférica (Lopez, R., Nuñez, O., Morales F., Calderon C., Liewald, W., 1999). Estos autores evaluaron la eficiencia de este proceso en el tratamiento de dos muestras diferentes de agua residual, una procedente de las operaciones de producción de petróleo y la otra de un complejo de plantas petroquímicas. Los contaminantes tratados, en concentraciones peligrosas, fueron: m-cresol, 2-clorofenol, metil-terbutil-eter (MTBE) y aromáticos volátiles (Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno). En todos los casos se observó una significativa mineralización (Oxidación completa) de los contaminantes en periodos de tiempo relativamente cortos.

Los efluentes del curtido del cuero producen un impacto ambiental importante, ya que esta industria genera aguas residuales alcalinas con elevadas concentraciones de materia orgánica, sulfuros, sólidos en suspensión y sales, con elevados valores de toxicidad. El tratamiento de estas aguas industriales mediante la combinación de procesos de oxidación química y biológica ha sido estudiado por (Vidal G., 2004).

En el estudio realizado la reacción Fenton fue usada como pre-tratamiento en discontinuo. Las relaciones H_2O_2/Fe^{2+} (molar) y H_2O_2/DQO (másica) empleadas fueron 9 y 4, respectivamente, alcanzándose una reducción de la DQO próxima al 90%. Posteriormente, el efluente oxidado fue alimentado a un sistema de lodos activos, obteniéndose una eliminación del 35-60% y 60-70% de DQO y DBO, respectivamente. Este tratamiento combinado incremento, por tanto, la eliminación global de DQO por encima del 95%, frente al 60% alcanzado sin el pre-tratamiento.

Sin embargo, los bioensayos de toxicidad realizados con *D. magna* y *D. pulex* mostraron que este tipo de tratamiento solo logra una eliminación parcial de la toxicidad de estos efluentes. Las aguas residuales procedentes de la fabricación de resinas fenólicas presentan una elevada concentración de fenol y derivados, los cuales son ciertamente tóxicos y refractarios (Kavitha, V., Palanivelu, K., 2004) evaluaron la eficiencia de los tratamientos Fenton y foto-Fenton (Con radiación UV y solar) para la degradación de fenol en aguas residuales sintéticas y reales. El efluente industrial procedencia de una fábrica de resinas en la India, y se caracterizaba por un contenido de 2.904 mg/L de DQO, 933 mg/L de carbono orgánico disuelto (COD) y 1.215 mg/L de fenol. Las condiciones de operación optimas fueron: temperatura ambiente, pH= 3, $H_2O_2/DQO=2,2$ (másica) y $Fe^{2+}/H_2O_2 = 0.026$ (Molar) en Fenton y 0,013 en Fenton-solar.

En ambos procesos de oxidación el fenol fue eliminado eficazmente en un tiempo de reacción de 5 min. Sin embargo, la eficiencia en la degradación (DQO) y mineralización (COD) alcanza en el proceso Fenton fue del 82 y 41%, respectivamente, mientras que con la ayuda de radiación solar se consiguió una degradación casi completa, con un 97% de mineralización a las 2 h de reacción.

2.4.2. INDUSTRIA FARMACÉUTICA

La oxidación Fenton ha resultado ser un pre-tratamiento adecuado para las aguas residuales de la industria farmacéutica con elevados niveles de materia orgánica (DQO=3622.000 mg/L), principalmente debida a compuestos recalcitrantes, tal como indica su baja relación DBO/DQO, de 0.008 (San Sebastián N., Figuls J., Font X., Sánchez A., 2003). Los resultados obtenidos muestran que más del 90% de la eliminación total de la DQO (55-60%) se alcanza en los primeros 10 minutos de reacción. Este hecho hace que la oxidación Fenton presenta gran interés en las aplicaciones industriales, ya que permite una reducción significativa de la DQO en periodos de tiempo cortos.

Esta ventaja frente a otros procesos de oxidación avanzada también ha sido puesta de manifiesto por (Höfl C., 1997), quienes compararon la eficiencia de tres POA (H_2O_2/UV , O_3/UV y Fenton) en la eliminación de compuestos orgánicos halogenados (AOX) y de la DQO de dos efluentes de la industria farmacéutica. Aunque, en líneas generales, puede decirse que los tres tratamientos son adecuados para la generación de los AOX y DQO, la oxidación Fenton, si bien es menos selectiva que la radiación UV en la degradación de los AOX, es considerablemente más efectiva en la eliminación de la DQO.

2.4.3. INDUSTRIA PAPELERA

Los efluentes procedentes del blanqueo de la pasta de papel pueden tratarse de manera eficaz mediante la combinación de los procesos Fenton y foto-Fenton (Pérez M., 2002). Estos últimos autores observaron que el empleo de irradiación solar en el proceso Fenton es muy eficaz para este tipo de aguas residuales, alcanzándose conversiones de COT del 93% en tan solo 15 minutos de tratamiento. (Tambosi J.L., 2006) evaluaron la eficacia del proceso pseudo-Fenton (incluyendo oxidación y coagulación) para el tratamiento de las aguas residuales de una fábrica

de papel en Brasil, con el objetivo de reducir la DQO, el color, el olor y los compuestos aromáticos.

Llevaron a cabo ensayos en discontinuo para determinar las condiciones de operación óptimas (T ambiente, pH = 2.5 (Oxidación) y 5 (Coagulación), $[H_2O_2]=1$ g/L, $[Fe^{3+}]=400$ mg/L, $t_{reacción}=1$ h), con las que se alcanzó una eliminación de la DQO, color y aromáticos del 75, 98 y 95%, respectivamente.

2.4.4. INDUSTRIA TEXTIL

Estos efluentes se caracterizan, por tanto, por una elevada carga orgánica (DQO, DBO), sólidos en suspensión, color y valor de pH de hasta 2 en el rango ácido y 12 en el básico (Szpyrkowicz L., 2001). La eficacia de la oxidación Fenton y con O_3 ha sido comparada con un proceso de coagulación-floculación para reducir la toxicidad, así como el color y la DQO de las aguas residuales generadas en una industria textil de Estambul (Merici S., 2005). Las condiciones de operación para cada proceso se fijaron en base a la completa reducción de la toxicidad para *Daphnia magna*. Los resultados obtenidos indicaron que la oxidación Fenton elimina la DQO en una mayor extensión (59%) que el O_3 (33%), alcanzando en ambos casos una reducción del color similar (89 y 91% respectivamente). El tratamiento de coagulación-floculación permitió una eliminación de la DQO y el color próximo a la alcanzada mediante la oxidación Fenton, pero genera un mayor volumen de lodos con compuestos recalcitrantes (tintes, aditivos, etc.). Aunque el proceso Fenton se llevó a cabo a mayor temperatura ($40^\circ C$), este hecho no suponía en este caso, un inconveniente, ya que la temperatura del efluente a tratar era superior a $70^\circ C$. (Papadopoulos A.E., 2007) evaluaron la eficacia del proceso Fenton para la reducción de la materia orgánica de las aguas residuales de una industria textil en Atenas. La contaminación orgánica inicial del agua a tratar era de 1.200 mg/L de DBO, 8.100mg/L de DQO y 3.010 mg/L de COT. La baja relación DBO/DQO, 0,148, indica que esta materia orgánica es en su mayoría no biodegradable. Los resultados experimentales obtenidos mostraron que la DQO se redujo en un 45% en 4 h, no

obteniendo mejoras significativas para mayores tiempos de reacción (reducción total del 48% en 6 h).

2.4.5. INDUSTRIA ALIMENTARIA

La oxidación Fenton ha resultado ser también efectiva para el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, como es el caso de las almazaras (Rivas F.L., 2001) y de la industria productora de aceitunas de mesa. La elevada carga contaminante de las aguas generadas en estos procesos incluye polifenoles entre los contaminantes más importantes. (Beltrán de Heredia J., Domínguez J.R., 2001) Emplearon el proceso Fenton para tratar las lejías de aderezo de aceitunas negras, caracterizadas por elevados valores de DQO (6.700 mg/L) y presencia de compuestos polifenólicos. Después de 5-15 min de reacción se consiguió reducir la DQO en un 73% llegando a ser la eliminación de los polifenoles hasta del 90%. Asimismo, con el tratamiento se consiguió reducir el color que presentaban las aguas residuales. Por su parte, (Gomec C.Y., 2007) han escrito la mejora alcanzada en una planta de tratamiento Fisicoquímico en Turquía para las aguas residuales procedentes de una almazara, al incluir una etapa de oxidación Fenton. De este modo, la eliminación de la DQO aumento del 74 a casi el 90%.

2.5. INCONVENIENTES Y MEJORAS AL TRATAMIENTO FENTON CONVENCIONAL

El principal inconveniente del proceso Fenton es la generación de una cantidad significativa de lodo de hierro que necesita más tratamiento, separación y eliminación (A Babuponnusami, 2014); (Neyens E & Baeyens J., 2003). El uso del catalizador de Fenton heterogéneo se ha propuesto como una fuerte alternativa para reducir la formación de los lodos de hierro que son generados. Se tiene en cuenta que el uso de catalizadores heterogéneos aumenta el rango operativo de pH por encima del límite 3.0 del proceso Fenton homogéneo (Huang CP H. Y., 2009); (Weng C-H L. Y.-T.-M., 2013); (A Babuponnusami, 2014). El proceso heterogéneo de Fenton también se basa en la generación in situ de radical $\cdot\text{OH}$ a partir de la

descomposición de H_2O_2 , aunque catalizado por el material heterogéneo en su superficie.

Por lo tanto, la cinética de la reacción está limitada por la transferencia de masa de H_2O_2 hacia los sitios activos catalíticos de la superficie del catalizador, que es un parámetro clave que afecta el rendimiento del proceso. Los principales inconvenientes del proceso de Fenton heterogéneo están asociados a la cinética más lenta y a la formación de aglomerados de catalizador que reducen la superficie libre. Los reactores de lecho fluidizado podrían mejorar considerablemente no solo el rendimiento de los procesos de Fenton Homogéneo y heterogéneo, sino también permitir la combinación sinérgica de ambos procesos. El uso de un reactor de lecho Fluidizado podría ser una solución factible para reducir/minimizar la generación de lodo por la precipitación de los óxidos de hierro en los vehículos de FBF (N Al-Havek, 1990); (Chou S H. C., Aplicación de un catalizador de oxidido de hierro soportado en la oxidación de ácido benzoico por peróxido de hidrógeno, 1999).

Además, el reactor FBF podría superar la limitación del pH, que es uno de los desafíos clave en la actualidad en la aplicación real de los POA de Fenton para descontaminar aguas residuales. (M Zupanc T Kosiek, 2013); (Weng C-H H. V., 2015), debido a la posibilidad de conducir de manera más eficiente la reacción Fenton. Se han realizado grandes esfuerzos para superar esta restricción, donde los catalizadores heterogéneos aparecen como una alternativa prometedora (E Bocos, 2015); (R. Idel-Aouad, 2011). Sin embargo, la cinética de la reacción de Fenton heterogénea es sensiblemente más lenta que la homogénea debido a los sitios catalíticos limitados, la aglomeración de partículas y el control de transferencia de masa. El FLF como un sistema de reactor prometedor que mejora la actividad del catalizador heterogéneo por el efecto de fluidización.

2.6. REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO

Los reactores de lecho fluidizado son un resultado de la combinación de los reactores flujo continuo más comunes: lecho empacado y el tanque agitado (F Tisa, 2014); (J Anotai C. C., 2012). En este sistema, un fluido (liquido o gas) pasa a través de un sólido particulado y lo mantiene suspendido continuamente debido a la velocidad de flujo del fluido (Werther, Reactores de lecho fluidizado en la enciclopedia de química industrial de Ullmann, 2007) debe de notarse que la velocidad del fluido debe ser suficiente para suspender las partículas, pero no demasiado fuerte para sacar las partículas del recipiente. Cuando se suspenden partículas pequeñas en una corriente de fluido que fluye hacia arriba, el sólido se comporta como si fuese un fluido, mejorando la cinética de catálisis heterogénea. Este proceso se le llama fluidización (Werther, Reactores de lecho fluidizado en la enciclopedia de química industrial de Ullmann, 2007); (JG Yates, 1983). En función de la velocidad del fluido y la distribución del sólido, se pueden diferenciar tres etapas (Werther, Reactores de lecho fluidizado en la enciclopedia de química industrial Ullmann, 2007): la primera etapa, denominada reactor compacto, aparece cuando el flujo de fluido es bajo y las partículas sólidas no se desplazan, quedando en la base del reactor fluidizado. Mediante el aumento de la velocidad del fluido, es posible alcanzar la siguiente etapa en la que el sólido comienza a desplazarse por la fuerza del fluido en equilibrio con el peso del material sólido, que podría considerarse el punto de inflexión que indica la velocidad mínima para iniciar el proceso de fluidización que se define como etapa de fluidización incipiente. La última etapa corresponde al reactor de lecho fluidizado en sí, que se alcanza cuando se supera la velocidad mínima del fluido. El proceso de FLF mejora la cinética de catálisis heterogénea por la fluidización de sólidos en suspensión en el reactor (Werther, Reactores de lecho fluidizado en la enciclopedia de química industrial Ullmann, 2007). El uso de directo del catalizador de Fenton heterogéneo en lugar de los portadores inertes también es factible (Wang Y, 2015); (Hsueh C-L, 2006).

2.7. PROCESO DE FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

Para abordar el problema de la formación de lodos de hierro, aumentar la eficiencia de degradación y acortar los tiempos operativos, se podría utilizar un reactor de lecho fluidizado para la reacción de Fenton, y el proceso se denomina proceso de lecho fluidizado Fenton (FLF) (MDG de luna, 2015), (Chou S H. C., Efecto de F(II) en la oxidación catalítica en un reactor de lecho fluidizado, 1999). El proceso FLF usa como material inerte fluidizado sólidos definidos como portadores. Estos portadores proporcionan el área de superficie para la precipitación y para proporcionar la cristalización del lodo de hierro sobre ellos (Chou S L. C.-C.-H.-H., Factors influencing the preparation of iron oxide in fluidized-bed crystallization , 2004) (N Boonrattanakij, 2011). La cantidad de lodo formado puede reducirse notablemente y contribuir a la propagación de la reacción de Fenton, mejorando el proceso de degradación/mineralización (J Anotai S. C., 2010) (C Ratanatamskul, Efecto de los iones cloruro en la oxidación de nitrobenzono mediante el proceso de lecho fluidizado Fenton, 2010). Los restos de hierro en la fase sólida se cristalizaron sobre los portadores, lo que hace que la separación posterior al tratamiento de las aguas residuales tratadas sea considerablemente más fácil accesible. La reducción del consumo de productos químicos en el reactor de lecho fluidizado también contribuye a una menor generación de lodo.

El proceso de FLF implica cuatro procesos diferenciados que los cuales contribuyen a la mejora y al mejor rendimiento en comparación con el proceso de Fenton convencional, como se ilustra en la siguiente **figura 5**.

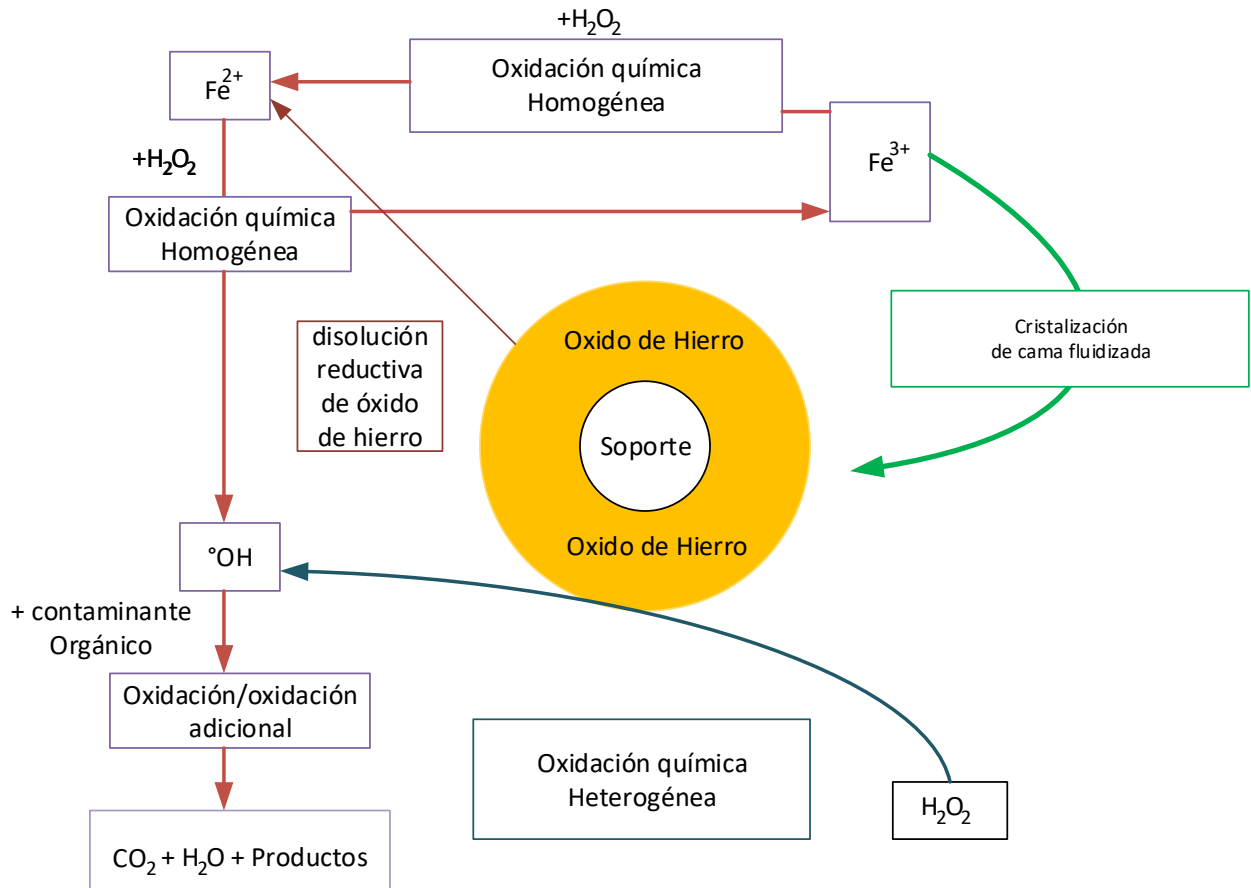


Figura 5 Esquema de comparación de reacciones Fenton químico y Fenton de lecho fluidizado (Sergi Garcia-Segura, Luzvisminda M. Bellotindos, Yao-Hui Huang, Enric Brilla, 2016)

El primer proceso relacionado con la degradación de los POA es la reacción de Fenton homogénea convencional la cual produce $\cdot\text{OH}$ (Huang CP H. Y., 2009), (LM Bellotindos, 2014). El segundo proceso corresponde a la cristalización del lodo de hierro como óxidos de hierro sobre los portadores fluidizados reduciendo la cantidad de lodo, lo que mejora la aplicabilidad del proceso Fenton (Chou S L. C.-C.-H.-H., Factors influencing the preparation of iron oxide in fluidized-bed crystallization , 2004), (N Boonrattanakij, 2011), y proporciona los dos últimos procesos involucrados en el F.F. La precipitación de óxidos de hierro en los portadores inertes conduce a la formación de partículas de óxidos de hierro fluidizado que también podrían actuar como catalizadores de Fenton heterogéneos, siendo entonces una fuente adicional de $\cdot\text{OH}$ (E Bocos, 2015) (Huang Y-H, 2011). Además, la fluidización de óxidos de hierro promueve la disolución reductora de óxidos de hierro como Fe^{2+} que regenera el catalizador homogéneo de Fenton y propaga en mayor medida la reacción de Fenton (Zhang A, 2012) (Hsueh C-L, 2006).

2.8. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA OPERACIÓN EN EL PROCESO DE FENTON DE LECHO FLUIDIZADO (FLF)

2.8.1. SOPORTES

Los portadores o soportes son los vehículos o partículas sólidas inertes Fluidizadas dentro del reactor FLF. Estas partículas proporcionan el área superficial para la cristalización del lodo de hierro, que permanecerá en la fase sólida como óxido de hierro (Chou S L. C.-C.-H.-H., Factors influencing the preparation of iron oxide in fluidized-bed crystallization, 2004); (N Boonrattanakij, 2011). La presencia de partículas sólidas promueve la nucleación del hierro sobre la superficie del vehículo y el crecimiento del cristal posterior. Por lo tanto, la cristalización compite con los flocúlos y la formación de lodo de hidróxidos de hierro.

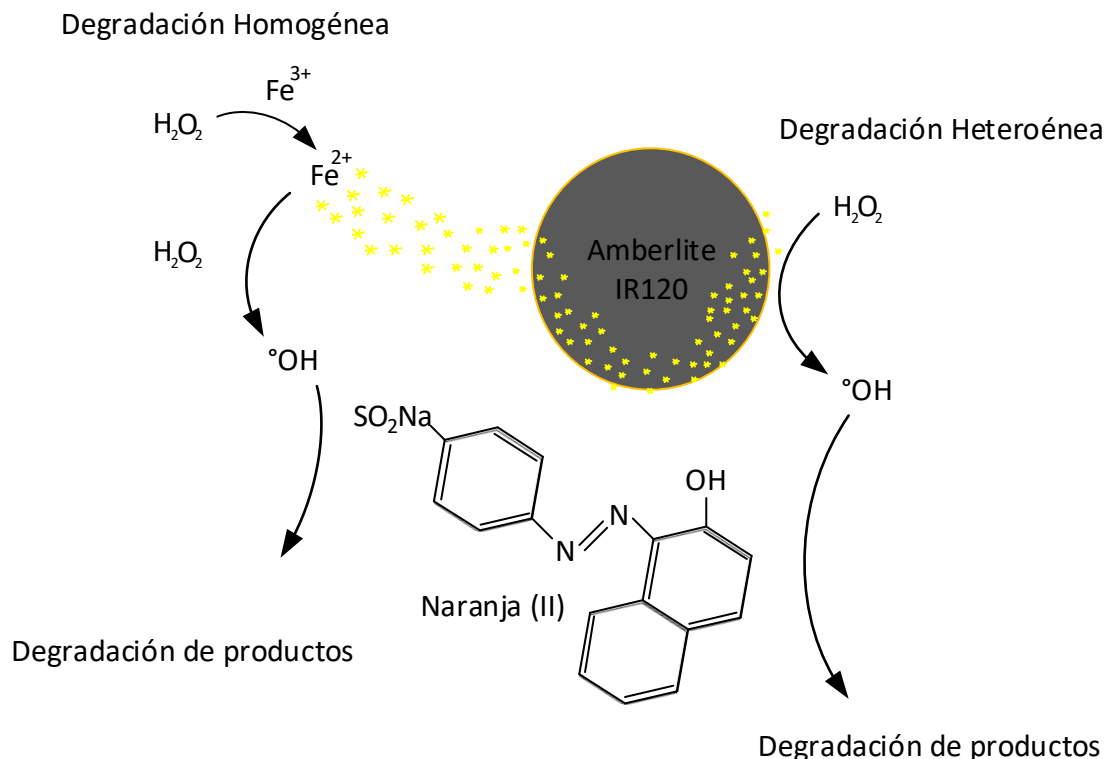


Figura 6 Esquema de degradación Heterogénea y homogénea de Naranja (II) (Homem, V., Z., Santos, L., & Alves, A. (2009)., 2009).

El material de los portadores, sus características superficiales y distribución de tamaño juegan un papel importante en el proceso FLF que afecta:

- La velocidad del fluido para la fluidización incipiente y por lo tanto la fluidización sólida.
- La termodinámica de cristalización que modifica la nucleación de óxidos de hierro y crecimiento cristalino de las energías de Gibbs.
- La cinética de cristalización.
- El peso del sólido.

Por lo tanto, la selección de los soportes es un parámetro importante que influye en la eficiencia del proceso de FLF. En la literatura consultada sean presentado diferentes portadores como lo es el óxido de silicio (SiO_2) puro **figura 7**

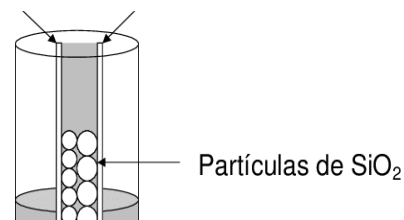


Figura 7. Soporte de óxido de sílice

(Huang CP H. Y., 2009), (E Bocos, 2015), (J Anotai C. C., 2012), alúmina (Al_2O_3) figura 4 (C Ratanatamskul, Efecto inhibidor de los iones inorgánicos sobre la oxidación de nitrobenzeno mediante el proceso de lecho fluidizado Fenton, 2010), (Cheng H, 2014), goetita

(Huang Y-H, 2011), hierros de residuos de óxidos (Wang Y, 2015), (Li H, 2015) nano partículas de quitosano (E Bocos, 2015), arena de cuarzo (Huang Y-H, 2011) e incluso cenizas de mosca activada que contienen óxido de hierro (Fe_2O_3) (Zhang A, 2012).

El portador que mostro un mejor rendimiento son las partículas de óxido de silicio (SiO_2) este promueve en gran medida la cristalización del hierro en comparación de otros portadores.

2.8.2. PH INICIAL

Estos procesos Fenton están muy limitados en cuestión de este parámetro a un rango operacional eficiente que va de un pH de 2.8-4.0 (E Brillas, 2009), (S Garcia-Segura, 2011), (A El-Ghenymy, 2012). Las condiciones operativas optimas son de aproximadamente 2.8-3.0, lo que hace que la cinética sea más lenta al aumentar el pH de la solución tratada (SE Pouran, 2015) (A Babuponnusami, 2014).

Por encima de un pH 5,0, las especies de Fe (III) son insolubles y precipitan en forma de hidróxido, deteniendo la extensión del ciclo catalítico y consecuentemente la generación de $\cdot\text{OH}$.

2.8.3. CONCENTRACIONES INICIALES DE Fe^{2+} Y H_2O_2

Un exceso de los reactivos de Fenton aumenta las reacciones parasitas que consumen $\cdot OH$ en eventos no orgánicos. Un exceso de H_2O_2 mejora la reacción mientras que un exceso en Fe^{2+} acelera la reacción (Sergi Garcia-Segura, Luzvisminda M. Bellotindos, Huang, Yao-Hui, Eric Brillas, Lu, Ming-Chun, octubre 2016). Las aguas residuales que contienen una alta concentración de compuestos orgánicos en las soluciones presentan valores altos de DQO que podrían seleccionarse como el valor indicativo de H_2O_2 requerido, por lo general a partir de datos experimentales podría establecerse un requisito de Ca. 2.12 mg de H_2O_2 por mg de DQO. La concentración requerida de catalizador de Fenton (Fe^{2+}) debe aumentarse de acuerdo con la cantidad de H_2O_2 añadida. La generación de lodo es más alta para aguas residuales con mayor DQO. El uso de reactores de lecho fluidizado permite minimizar los lodos generados y también muestra menores requerimientos de hierro debido a la contribución del hierro cristalizado que permanece fluidizado en el reactor, en comparación con el proceso Fenton convencional (Sergi Garcia-Segura, Luzvisminda M. Bellotindos, Huang, Yao-Hui, Eric Brillas, Lu, Ming-Chun, octubre 2016).

Cuando se tiene concentraciones altas de DQO se presentan mayores eficiencias en la mineralización orgánica debido a la inhibición de las reacciones parasitas, aunque los tiempos de operativos se hacen más largos para alcanzar las condiciones del efluentes requeridas por la ley (Sergi Garcia-Segura, Luzvisminda M. Bellotindos, Huang, Yao-Hui, Eric Brillas, Lu, Ming-Chun, octubre 2016).

Los efluentes industriales generalmente representan un perfil constante en la composición con un rango definido de concentración de contaminantes y DQO. Por lo tanto, las condiciones de tratamientos deben optimizarse para cada efluente industrial al que se le aplicara esta tecnología (Sergi Garcia-Segura, Luzvisminda M. Bellotindos, Huang, Yao-Hui, Eric Brillas, Lu, Ming-Chun, octubre 2016).

CAPÍTULO III DESARROLLO

3. PROCEDIMIENTOS Y DESCRIPCIONES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

Como primer paso se realiza una meticulosa búsqueda de artículos con información detallada y específica de las aplicaciones y resultados del tratamiento Fenton convencional, de igual forma para el tratamiento Fenton de lecho fluidizado como diseños patentes para poder tomar de referencia y comprender los mecanismos como estos operan, con ayuda de los Software LATIPAT y DERWENT INNOVATION los cuales fueron proporcionados por la empresa para facilitar la búsqueda se obtuvieron resultados de mucha importancia. Como segundo paso el diseño del prototipo para realizar pruebas a nivel laboratorio, realizando pruebas hidráulicas para analizar la operación de este prototipo y conocer los parámetros para realizar las pruebas.

3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN EQUIPO A NIVEL LABORATORIO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES SANITARIAS.

Con el conocimiento de literaturas citadas, así como las patentes nacionales e internacionales, se analiza los diferentes diseños de equipos Fenton de lecho fluidizado y algunas cotizaciones, se procede a llevar a cabo el diseño experimental.

3.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El equipo experimental es una unidad con capacidad de degradación de componentes recalcitrantes en aguas residuales sanitarias aplicando el reactivo Fenton, estará conformado por:

- Filtración de las aguas residuales sanitarias (En caso de que esta contenga sólidos de gran tamaño).
- Alimentación de agua residual sanitaria y acidificación para ajuste de pH.
- Mezclado agente oxidante (H_2O_2) y catalizador (Fe^{2+}) con el agua previamente acondicionada.
- Se introducirán a un reactor Phos Reactor.
- Soporte para el catalizador (Óxido de silicio, alúmina).
- Neutralización del agua tratada (NaOH).

3.1.2. PRETRATAMIENTO (FILTRACIÓN)

En este paso las aguas residuales sanitarias se hacen pasar por un medio poroso y su objetivo es reducir la mayor cantidad de posible material en suspensión, utilizando papel filtro.

3.1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En otros dispositivos estudiados se analiza que a escala industrial este puede tratar 300 Ton/día de aguas residuales con una calidad de $pH=2$, $DQO = 8000 \frac{mg}{L}$, puesto que el reactor a nivel laboratorio cuenta con una capacidad de $19 \text{ cm}^3/\text{min}$ de agua residual sanitaria con una $DQO = 818.2571 \frac{mg}{L}$. A continuación, se describe el prototipo terminado que es ilustrado en la **figura 8**.

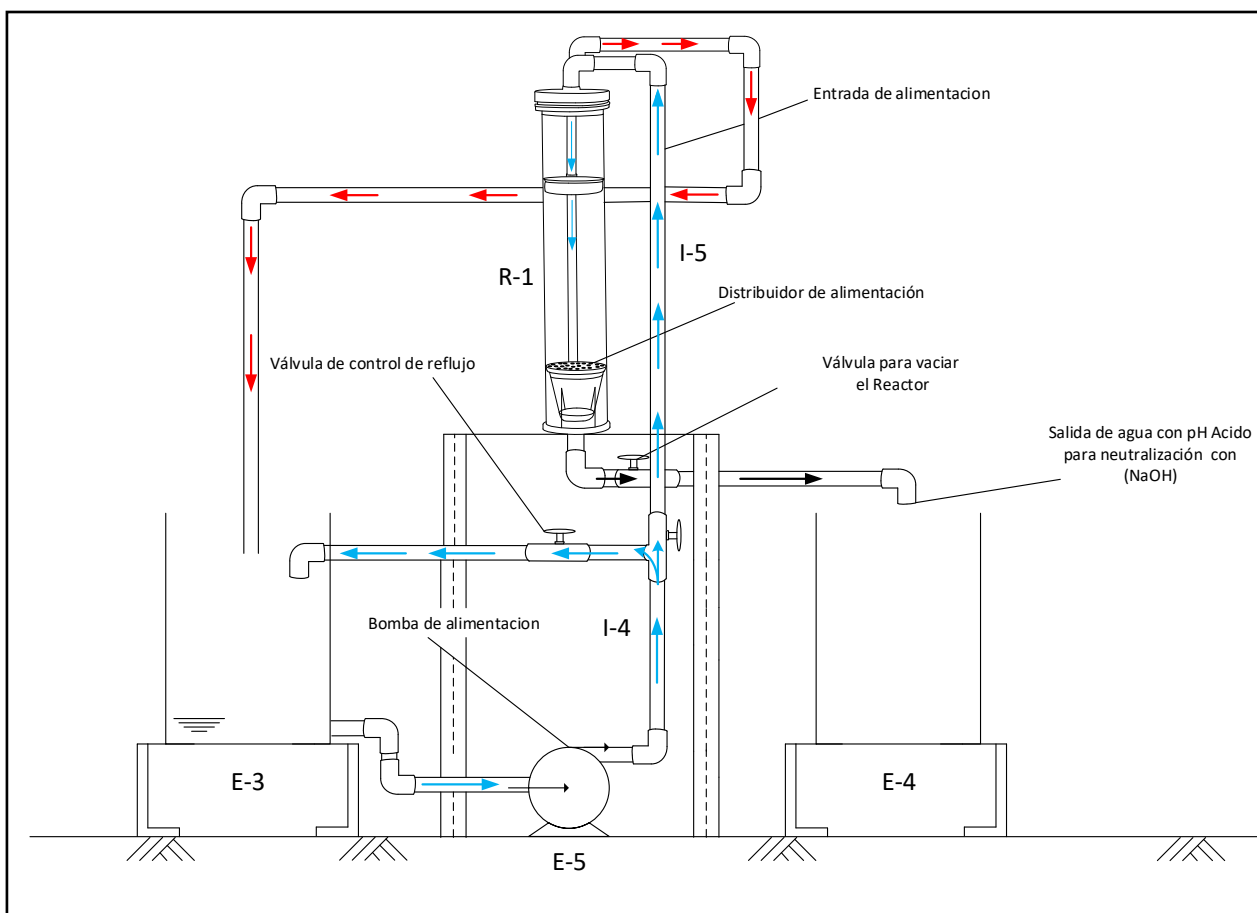


Figura 8 Prototipo de tratamiento de aguas residuales sanitarias con el proceso Fenton de lecho fluidizado

3.1.4. ACIDIFICACIÓN CON ÁCIDO SULFÚRICO (H_2SO_4) DE AGUA RESIDUAL A TRATAR.

Como primer paso se aplicará un cambio de pH para el agua residual que entrará a ser cargada a el recipiente (E-3), la acidificación se logra agregando ácido sulfúrico (60%) a el agua cruda, una vez que se ajusta el PH, se agrega el agente oxidante (H_2O_2) y el catalizador (Fe^{2+}) este caso para conseguir el hierro se agrega sulfato de hierro heptahidratado. Esta es impulsada por una bomba (E-5) que fluirá a través de un tubo de PVC (I-4) industrial. Debido a que las condiciones de operación del proceso se llevan en medios ácidos.

3.1.5. REACTOR FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

El agua residual proveniente del tanque (E-3) acidificada mezclada con el oxidante y el catalizador que serán impulsados por una tubería (I-5) mientras fluye para llegar al reactor, la alimentación será por la parte superior a través de un tubo que conduce a el fondo del reactor (R-1) donde esta será impulsada hacia arriba a través de una placa de dispersión, lo cual creará una distribución uniforme de la mezcla, y así lograr una fluidización adecuada.

3.1.6. SOPORTE DEL CATALIZADOR

En esta parte la reacción que se llevó a cabo, se hace pasar por un vehículo de partícula o soporte, el cual consiste en un material inerte este proporciona el área de superficie para la precipitación y la cristalización del lodo de hierro sobre ellos, esta precipitación conduce a la formación de óxidos de hierro fluidizado que estos actúan como catalizador convirtiéndolos en una fuente adicional de radicales $\cdot OH$, esta fluidización de óxidos de hierro regenera el catalizador del Fenton y ayuda a la

reacción. Es aquí donde la cantidad de formación de lodos es reducida notablemente mejorando el proceso de degradación y mineralización.

Para ello se utiliza como soporte Óxido de silicio (SiO_2) el cual en la literatura este presenta un mayor rendimiento.

3.1.7. NEUTRALIZACIÓN

Una vez que se realiza el tratamiento en el reactor la salida vierte el efluente tratado en un tanque (E-4) con pH ácido, por lo que es necesario neutralizar el efluente obtenido para finalizar el proceso, esto se realizara suministrando hidróxido de sodio (NaOH) al 25 %. El reactor a base de consulta de diferentes patentes y diversas investigaciones, se buscó y cotizo un reactor comercial que cumplieran con las cualidades por ello se seleccionaron los siguientes tres:

- Sistema de filtración de eliminación de fosfato Phos Reactor
- AquaMaxx Fluidized GFO y Carbon Filter Media Reactor XL
- Reactor PhosBan ATLPBR150 de dos Little Fishies

El seleccionado para adaptarlo para cumplir la función de FLF fue el Sistema de filtración de eliminación de fosfato Phos Reactor posteriormente se toma los datos de especificaciones de dicho dispositivo:

Dimensionamiento (H*D): 14" x 3".

- Columna de reacción:
- Entrada / Salida: 1/2"
- Material: acrílico

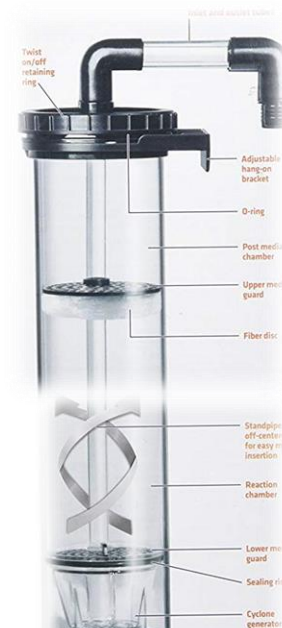


Figura 9 Prototipo

Con estas especificaciones se procedió a realizar los siguientes cálculos primeramente tendremos el cálculo del volumen para ello se procede a convertir las unidades:

$$H = 10.2 \text{ in} * \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} = 26 \text{ cm}$$

$$D = 3 \text{ in} * \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} = 7.62 \text{ cm}$$

Calculo del volumen del reactor:

El reactor a utilizar tiene forma cilíndrica por lo que para calcular su volumen utilizaremos la ecuación 1.

$$V_r = \frac{\pi * D^2}{4} * H \text{ ----- (1)}$$

Se procede a sustituir los datos en la ecuación 1 y así conocemos el volumen del reactor:

$$V_r = \frac{\pi * (7.62 \text{ cm})^2}{4} * 26 \text{ cm} = 1,179.4795 \text{ cm}^3$$

Como condición para el diseño de reactores se utiliza un volumen que solo ocupa el 70% del real por condiciones de formación de espumas o algún imprevisto. Pero para la reacción Fenton omitiremos este paso ya que no tenemos formación de espumas.

Así que el volumen que utilizaremos será el 100%, para calcular el flujo volumétrico, dado los tiempos de residencia que se estudiaron anteriormente se fijaron que esta reacción tiene un rango de 1~2 h dependiendo la caracterización de las aguas que se trataran.

Cálculo del flujo requerido para un volumen de 1,179.4795 cm³ y un tiempo de residencia de 1 h, el tiempo de retención hidráulica es aquel tiempo que una unidad de fluido permanece en un recipiente, es decir el tiempo en que el líquido entra y tarda en salir del mismo.

Para ello se realiza pruebas hidráulicas, con ello se observa el mejor fluidizado del soporte para realizar correctamente los experimentos, la bomba se ajusta para que el siguiente flujo $0.1018 \frac{L}{s}$ este constante, este flujo se utiliza para los diferentes tratamientos en estos el tiempo se divide en rangos de 0,5,10,15,20 minutos.

3.2. METODOLOGÍA PARA REALIZAR EL TRATAMIENTO FENTON QUÍMICO

3.2.1. MUESTREO

El muestreo se realizó en las instalaciones del CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S. C. ubicado en el parque Sanfandila s/n, pedro Escobedo, 76703 Santiago de Querétaro, Qro. Las muestras tomadas directamente del cuerpo de agua con ayuda de una bomba que alimenta a una planta de tratamiento de aguas residual pequeña como se muestra en las **figuras 10 y 11**.



Figura 10 Toma de agua para pruebas Fenton Químico y Fenton de lecho Fluidizado



Figura 11 Cárcamo de descarga de aguas residuales de las instalaciones del CIDETEQ (Sitio de muestreo)

la muestra de agua residual se procede a realizar una caracterización de suma importancia puesto que el agua tiene variación en concentración de DQO para ello se realiza una previa caracterización antes de hacer los cálculos.

3.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

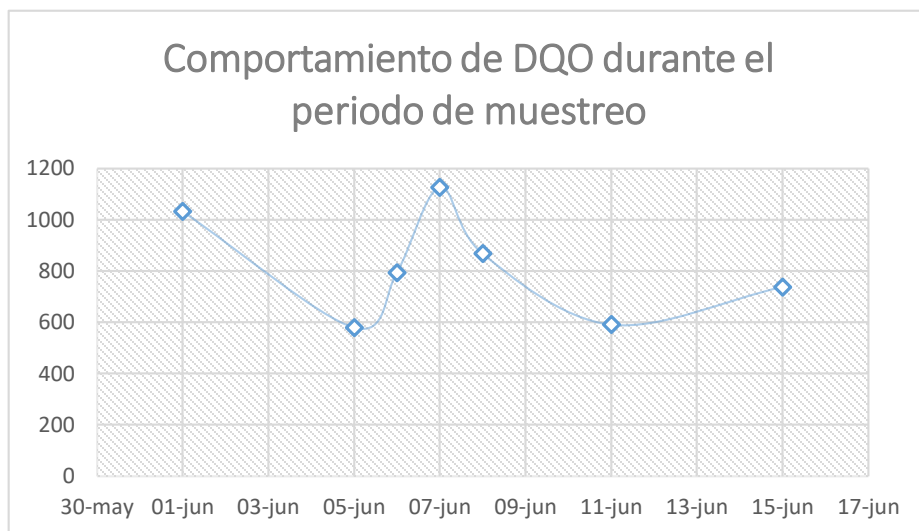
Previo a un análisis que fue elaborado por parte del laboratorio clínico de Celaya y toxicología industrial, s.a. de C.V. con sus resultados **Tabla 2** se aprecia una variación de la concentración de la DQO durante el periodo de muestreo que comprendió del 01 de junio al 17 de junio de 2018, por lo que se decide determinar el valor de este parámetro para realizar las pruebas.

Tabla 2 Resultados de caracterización y los límites máximos permisibles que establece la normatividad

INFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CIDETEQ, SANFANDILA.

Determinación	NOM-001 RÍOS. Uso en Riesgo Agrícola (A) P.M.- P.D.	NOM-003	01-junio-18	05-junio-18	06-junio-18	07-junio-18	08-junio-18	11-junio-18	15-junio-18	promedio
			Resultado							
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	150-200	20-30	215.7	84.3	200.0	273.3	206.7	86.7	88	164.9571
Sólidos sedimentables (mg/L)	1-2		2.3	1.2	2.1	2.1	2.2	0.9	0.1	1.5571
Fósforo Total (mg/L)	20-30		8.285	11.271	13.579	8.920	7.105	5.609	5.829	8.6568
Nitratos (mg/L)			2.245	1.119	0.261	0.772	0.209	2.329	0.145	1.0114
Nitritos (mg/L)			0.153	0.014	0.296	0.253	0.079	0.099	0.118	0.1445
DQO (mg/L)			1032	579.6	793.8	1126.2	867.7	590.8	737.7	818.2571
Demanda Química de Oxígeno (DQO) _{SOLUBLE}			597.7	362.3	553.8	664.6	812.3	461.5	510.7	566.1285
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO) _{SOLUBLE}			365.8	254.0	219.7	405.8	461.3	348.2	484.2	362.7142
DBO (mg/L)	150-200	20-30	851.9	493.1	560.6	810.4	641.5	469	726.4	650.4142
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L)			82.3	48.7	30.6	39.4	41.4	20.4	31.9	42.1
Nitrógeno Total (mg/L)	40-60		84.6	49.8	31.1	40.4	41.6	22.8	32.1	43.2
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)			79.5	47	28.7	38.5	41.2	18.2	13.2	38.0428
Grasas y Aceites (mg/L)	15-25	15	47.7	38.2	66.1	64.2	38.9	91.3	30.6	53.8571
Huevos de Helminto (Huevo/L)	5	<1<5	1	1	1	1	1	1	1	1
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	1000-2000	240-1000	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Arsénico (mg/L)	0.2-0.4		0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Cadmio (mg/L)	0.2-0.4		0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.025
Cobre (mg/L)	4.0-6.0		0.0500	0.0500	0.0500	0.054	0.0500	0.0500	0.0500	0.05057
Cromo Total (mg/L)	1.0-1.5		0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.15
Níquel (mg/L)	2.0-4.0		0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1
Plomo (mg/L)	0.5-1.0		0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.106	0.1008
Zinc (mg/L)	10-20		0.311	0.343	0.478	0.431	0.249	0.690	0.231	0.3904
Mercurio (mg/L)	0.01-0.02		0.002000	0.002000	0.002000	0.003000	0.003000	0.002000	0.004000	0.0025
Cianuros (mg/L)	1.0-3.0		0.1050	0.0154	0.0453	0.0276	0.0625	0.0405	0.0432	0.0485

Se presenta la **gráfica 1** con el comportamiento que mostro en la tabla anterior el parámetro que se usara como referencia para comparar la eficiencia de ambos tratamientos tanto como Fenton Químico (F.Q) como Fenton de lecho fluidizado (FLF).



Grafica 1 Comportamiento de la DQO en el periodo de muestreo de parte del laboratorio Clínico de Celaya y toxicología industrial S.A de C.V.

Primer paso se prepara el Digestor DRB 200 Marca Hach **figura 12** a una temperatura de 105°C, se toma 2 ml de la muestra de agua cruda para introducirla dentro de un Vial con solución digestor para DQO en un rango de 0 – 1500 $\frac{mg}{L}$ el vial se elige tomando como referencia los resultados anteriores.



Figura 12. Digestor HACH DRB 200.

Una vez que el vial se le es agregado los 2 ml de agua cruda este se agita para tener una mezcla homogénea entre el agua cruda y la solución como siguiente paso es introducirlo dentro del Digestor el tiempo que tendrá un tiempo de 2 horas para que la muestra sea preparada para ser introducida en el espectrofotómetro DR6000, Marca Hach para determinar la DQO una vez que el tiempo llegado a su fin se recomienda esperar 40 minutos más para que el vial este a una temperatura considerable, ahora bien se procede a introducir el vial al espectrofotómetro para determinar la DQO de la muestra **figura 13**.

Una vez realizado el paso anterior y obtenido la DQO de la muestra de agua tratada se procede a determinar las cantidades de reactivos que se utilizarán para los diferentes experimentos, se realizarán diferentes experimentos con variación de

parámetros como es la relación molar entre el $\frac{H_2O_2}{Fe^{2+}}$, el ajuste del pH el tiempo de tratamiento, la variación de estos parámetros nos ayudara a encontrar un punto medio donde la eficiencia sea no menor del 80% y así encontrar cual es la producción de lodos para poder usar las misma condiciones en las réplicas tanto como el tratamiento convenciones como el tratamiento Fenton de lecho fluidizado y poder llevar a cabo una comparación de resultados.



Figura 13. Resultado de DQO con el espectrofotómetro

3.2.3. FILTRACIÓN

Se realiza una filtración previo a la primera etapa del proceso en nuestro caso este paso se omite puesto que la muestra de agua cruda **figura 14** no cuenta con sólidos de tamaño considerable (Trozos de ramas, hojas etc.)

3.2.4. ACIDIFICACIÓN DEL AGUA CRUDA

Este paso se lleva acabo agregando ácido sulfúrico al 60% agregando aproximadamente 6 ml esto depende del pH inicial **figura 15** de cada experimento se registrará el pH inicial de cada una de las pruebas. Una vez llevada a condiciones el agua cruda se procede a realizar exactamente el mismo procedimiento para las diferentes pruebas.



Figura 14 Agua residual Cruda

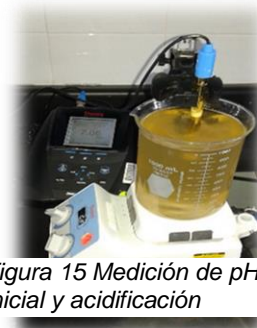


Figura 15 Medición de pH inicial y acidificación

3.2.5. PESO DE REACTIVO A UTILIZAR SULFATO FERROSO HEPTAHIDRATADO ($FeSO_4 * 7H_2O$) y PERÓXIDO DE HIDRÓGENO (H_2O_2)

Ahora bien, que tenemos el agua cruda en condiciones para que se lleve a cabo la reacción Fenton se procede a pesar el sulfato ferroso heptahidratado **figura 16** con la ayuda de una balanza analítica Modelo PA214, Marca OHAU **figura 17** con ella se consigue el peso exacto del reactivo a utilizar.



Figura 16 Reactivo Sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4*7H_2O$)



Figura 17 Balanza analítica PA214, Marca OHAU

Para el caso del peróxido de hidrógeno en el artículo (Sergi Garcia-Segura, Luzvisminda M. Bellotindos, Huang, Yao-Hui, Eric Brillas, Lu, Ming-Chun, octubre 2016) ellos propusieron, a partir de datos experimentales podría establecerse un requisito de Ca. 2.12 mg de H_2O_2 por mg de DQO, por lo tanto, usamos esta relación para calcular la cantidad de reactivo que sería necesarios para tratar el agua residual de las instalaciones el centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica.

Se usaron datos de referencia para realizar la tabla de experimentos, la siguiente **tabla 3** fue tomada de una residencia que tiene por título Tratamiento Terciario de Efluentes porcícolas Mediante Procesos de Oxidación Avanzada Fenton y Fenton Solar el cual comparo el tratamiento convencional con otro de la misma rama.

Tabla 3 Datos de referencia tomados (Guzman, 2014)

CONDICIONES EXPERIMENTALES

Experimento	pH	Tiempo de reacción (min)	H ₂ O ₂ /Fe ²⁺
1	3	10	1.5
2	3	30	2
3	3	60	2.5
4	3.5	10	2.5
5	3.5	30	1.5
6	3.5	60	2
7	4	10	2
8	4	30	2.5
9	4	60	1.5

Tomando como referencia estos datos se construyó una tabla similar para realizar los experimentos en un orden con el cual se tenga la facilidad de interpretar los datos que se registraran y poder hacer las observaciones más detalladas.

3.2.6. REACCIÓN FENTON QUÍMICO

Se prepara el equipo de agitación de pruebas de jarra **figura 18** para llevar a cabo la reacción una vez que el equipo está listo con una aproximación de agitación de 150 rpm por parte de las aspas se introduce el sulfato ferroso heptahidratado para que la reacción se lleve a cabo es necesario agregar el peróxido de hidrogeno una vez este es agregado la reacción comienza por lo que se enciende rápidamente el agitador para mantener una mezcla homogénea del agua con los reactivos **figura 19**.



Figura 18 Agitador de jarra HS-4 Mod 7790-100 Phip ps & Bird

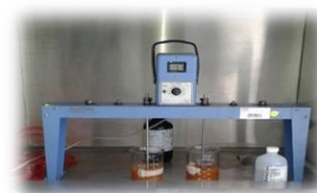


Figura 19 Equipo de agitación con pruebas Fenton químico

Se realiza exactamente lo mismo para las diferentes replicas **figura 20** una vez terminado el tiempo de tratamiento se retira para que este pueda sedimentar el lodo que se produjo durante la reacción **figura 21** se retira para cuantificarlo y registra el pH que se obtiene cuando el tiempo de tratamiento finalizo se registra para tener una serie de datos de pH.



Figura 20 Replicas con variación del parámetro tiempo de tratamiento

Cuando es retirado el lodo de reacción del líquido se obtiene el siguiente producto **figura 22** el cual será el que era llevado a el proceso de neutralización para finalizar el tratamiento por completo.



Figura 22 Producto filtrado de lodo generado en la Reacción



Figura 21 Separación de lodo sedimentado después de la reacción

3.2.7. NEUTRALIZACIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO

Una vez separado el lodo de reacción y registrado el pH del producto obtenido se procede a neutralizar, como recordaremos al descomponer el peróxido con las sales de hierro contenidas en el sulfato ferroso heptahidratado se generan hidrogeniones (H^+) lo cual causa que el pH se altere por lo que se le agrega un agente para neutralizar al efluente obtenido **figura 23**. Al realizar este proceso se genera nuevamente lodo esto por el fenómeno de coagulación y floculación ya que al agregar el agente este desestabiliza las partículas suspendidas y ayuda a la reducción de las fuerzas entre ellas lo cual da lugar a la floculación que hace que las partículas se pongan en contacto.

Lo que implica la formación de coágulos mediante el crecimiento de las partículas de los diferentes contaminantes que contenía el agua a lo que genera un crecimiento de estas partículas coaguladas formando un flocs **figura 24** los suficientemente grandes y pesados para sedimentar.



Figura 23 Medición del pH y Neutralización.

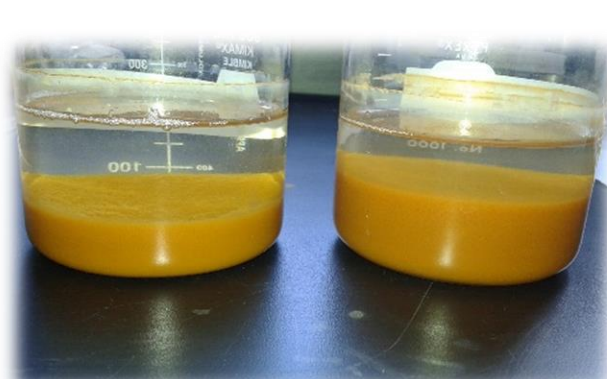


Figura 24 Sedimentación de los Floc formados durante la neutralización.

Se realiza una nueva filtración **figura 25** para cuantificar de igual forma los lodos **figura 26** formados después del proceso de neutralización se realiza una comparación con los que se forma en las diferentes pruebas y se obtiene como resultado final de tratamiento el siguiente producto agua con características mejores que a la inicial.



Figura 25 Filtración de los lodos generados en la Neutralización



Figura 26 Lodo separado del agua tratada con Fenton Químico.

Los resultados son muy favorables, con este tratamiento se observa de manera notoria la diferencia al comparar el agua cruda antes del tratamiento **figura 27** con la obtenida después de aplicarle el proceso Fenton químico **figura 28**



Figura 27 Agua cruda antes del tratamiento.



Figura 28 Resultados después del tratamiento del agua cruda.

3.3. METODOLOGÍA PARA FENTON DE LECHO FLUIDIZADO (USANDO COMO SOPORTE SILICA GEL).

3.3.1. MATERIALES

- 10 codos de PVC ½"
- 2 válvulas
- 1 Te Mixta 90° PVC
- 2 tramos de tubería PVC de ½" (3 m)
- Mistral65

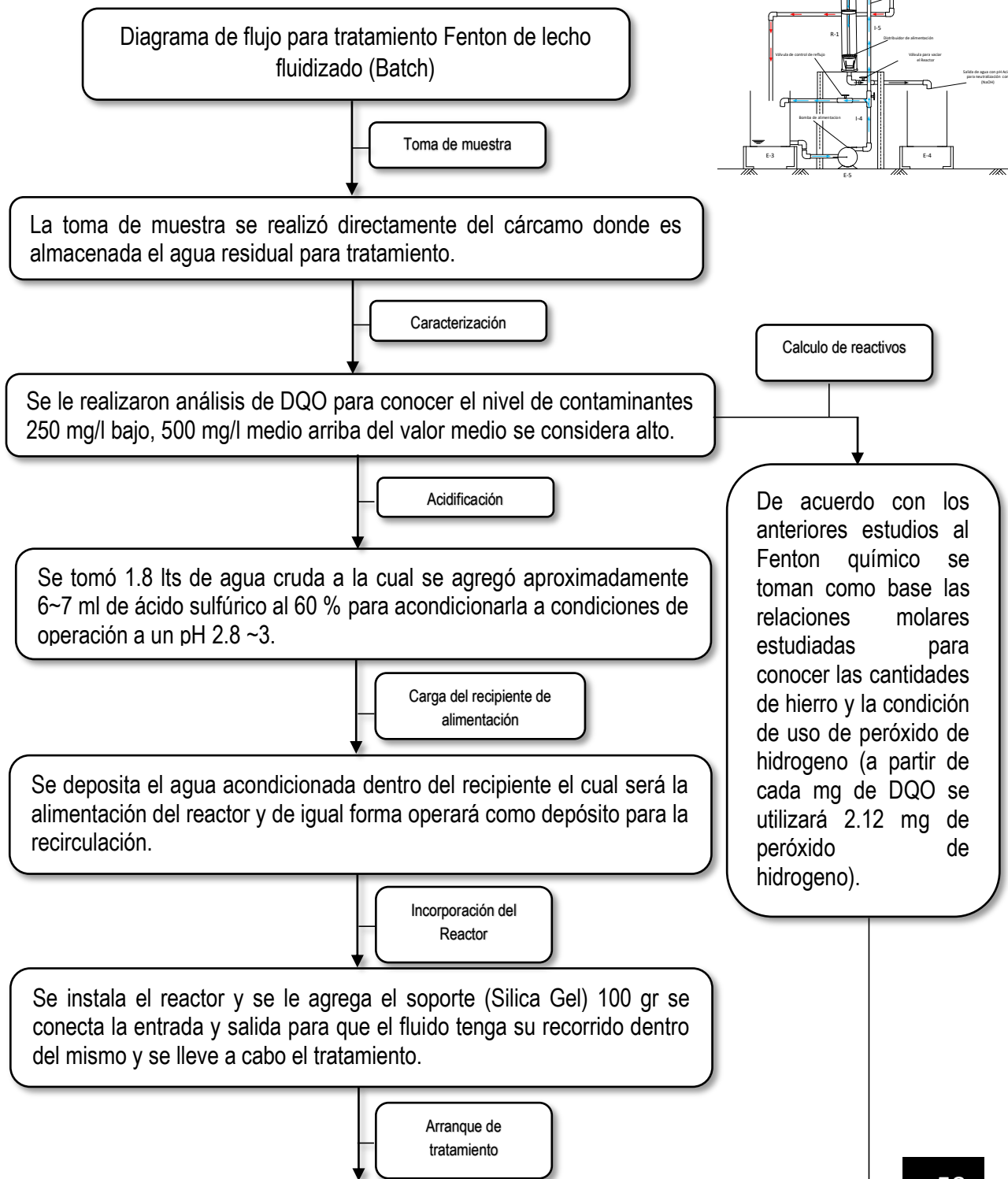
3.3.2. REACTIVOS

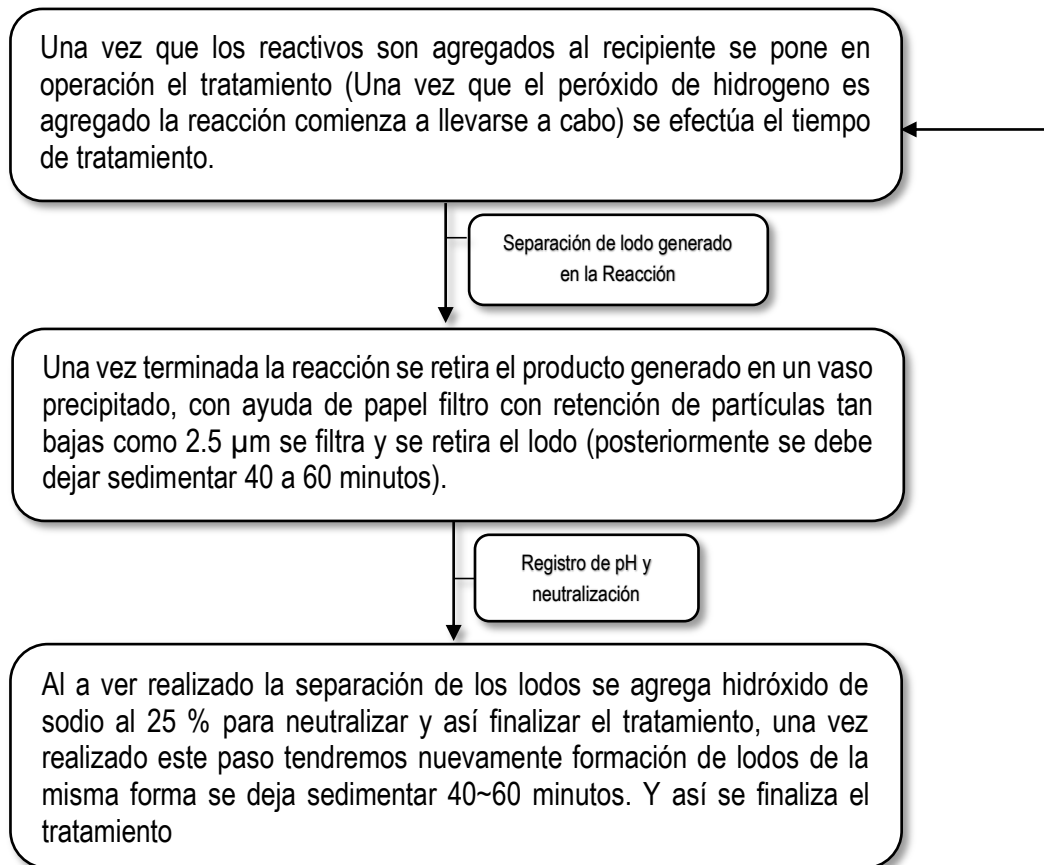
- Ácido Sulfúrico 95.4% Marca Baker
- Hidróxido de sodio (NaOH) al 50%
- Solución de digestor para DQO Rango de 0-1500 mg/L, Marca Hach
- Silica gel
- Sulfato Ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Marca Baker
- Muestra de agua Residual sanitaria de las instalaciones (CIDETEQ)

3.3.3. EQUIPOS

- Balanza analítica Modelo PA214, Marca OHAU
- Espectrofotómetro DR6000, Marca Hach
- Digestor DRB200, Marca Hach
- Master flex Pump with Easy-Load II Pump Head, 115 VAC
- Bomba Shurflo 2088-492-444
- Reactor PhosBanReactor150

3.3.4. DIAGRAMA DE FLUJO PARA TRATAMIENTO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO A NIVEL LABORATORIO.





3.4. DISEÑO DEL PROTOTIPO PARA PRUEBAS FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

Se obtuvo una base de metal para montar el diseño experimental que consta del reactor, bomba de alimentación y el recipiente de acrílico donde se agregara el agua a tratar, se montara de manera que este opere de forma por cargas, de esta manera se realizaran las pruebas para ello una vez instalado la bomba el recipiente se presenta de la siguiente manera **figura 29 y 29.1**.



Figura 29 Diseño para pruebas Fenton de lecho fluidizado.



Figura 29.1.

Una vez instalado cada uno de los equipos que se utilizaran para dichas pruebas se le introduce agua para observar potenciales fugas en el sistema, especialmente en el recipiente donde se colocara la carga de agua para el tratamiento **figura 30** ya que este fue perforado para poder instalar la entrada de la bomba para alimentación del reactor.



Figura 30 Recipiente para alimentación de la bomba.

3.4.1. PRUEBAS HIDRÁULICAS CON EL SOPORTE

Una vez instalado y puesto a pruebas para que se tuvieran inconvenientes en fugas de agua y otros percances se comenzó con experimentos para conocer la cantidad de soporte a utilizar **figura 31**, así como el nivel de expansión y el flujo de tratamiento que nos daba dicha expansión **figura 32**.



Figura 31 Silica gel utilizada como partícula vehículo (Soporte).



Figura 32 Pruebas de expansión del soporte.

Realizadas las pruebas correspondientes y a ver encontrado el flujo que se adecuara a las condiciones para obtener resultados satisfactorios y confiables se procede a realizar los paso exactamente como la metodología del Fenton químico comenzado por la acidificación de agua cruda y registros de pH siguiendo a metodología ahora bien tenemos la primera modificación, el prototipo operara de forma Batch.

3.4.2. CARGA DEL RECIPIENTE DE ALIMENTACIÓN

Una vez que el agua cruda es acidificada se procede a cargar el recipiente que actúa como alimentación del reactor **figura 33**.

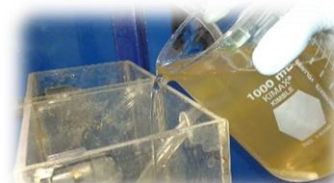


Figura 33 Carga del agua ajustada a las condiciones de tratamiento



Figura 34 Recipiente cargado y agregando el $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Una vez cargado el recipiente se procede a agregar los reactivos para comenzar el tratamiento se agrega el sulfato ferroso **figura 34** como siguiente paso es agregar el peróxido de hidrógeno cuando este es agregado comienza a reaccionar con la sal de hierro contenida en el sulfato ferroso dando el lugar a formación de los radicales hidroxilos, este paso se puede apreciar ya que cuando el reactivo Fenton es formado el agua toma un color naranja pardo **figura 35**. En la siguiente **figura 36** se observa el tratamiento de forma completa. De igual manera en la **figura 37** observamos el fluidizado que se da en el tratamiento esto para efectivamente afirmar que el tratamiento se está dando en condiciones de fluidización.



Figura 37 Fluidizado en el reactor Phosban Reactor 150.



Figura 36 Prototipo Fenton de lecho fluidizado en operación.



Figura 35 Recirculación de agua en tratamiento Fenton de lecho fluidizado

3.4.3. SEPARACIÓN DE LODOS DE REACCIÓN

Una vez que el periodo de tratamiento se termina para cada prueba, se puede observar como el lodo que es generado durante la reacción se sedimenta sobre el soporte utilizado de igual manera se aprecia como la partícula vehículo (Silica Gel) toma un color naranja pardo, a su vez tenemos el lodo formado, el material soportador y por último tenemos el filtro que evita que partículas pequeñas de soporte puedan ocasionar un taponamiento en la alimentación **figura 38**.



Figura 38 Sedimentación de los lodos sobre el soporte.



Figura 38.1 Sedimentación de los lodos sobre el soporte.

Realizado este paso se vacía y filtra el producto en vasos **figura 39** precipitados así separando el lodo generado para realizar el mismo procedimiento registrar el pH y realizar la neutralización del líquido.

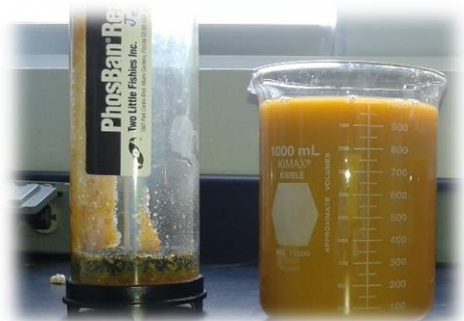


Figura 39 Se vacía el producto en un vaso de precipitado

Se realizó para cada una de las réplicas **figura 40** del este tratamiento para poder cuantificar la cantidad de lodo que se genera durante la reacción y la neutralización la generación de suma importancia es la de reacción pues se busca disminuir con los parámetros fijados para el tratamiento.



Figura 40 Pruebas Fenton de lecho fluidizado y el lodo generado en la reacción

una vez que neutralizadas y separado los lodos tanto como de reacción y de neutralización se obtiene los siguientes resultados estos muestran mejor aspecto no solo en apariencia **figura 41** si no en características en comparación al tratamiento

Fenton convencional



Figura 41 Resultados finales de cada prueba Fenton de lecho fluidizado (tiempo de tratamiento: 5, 10, 15 y 20 minutos)

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4. RESULTADOS

A continuación, se registra en forma de tabla los parámetros usados para cada uno de los tratamientos Fenton químico estos se realizaron con el fin de obtener un análisis de cómo se ve afectado el tratamiento al variar alguno de los parámetros como los que fueron tomados de referencia el $pH_{ajustado}$, tiempo de tratamiento y relación molar entre el peróxido y el Hierro **tabla 4**.

Tabla 4 Parámetros del tratamiento Fenton químico

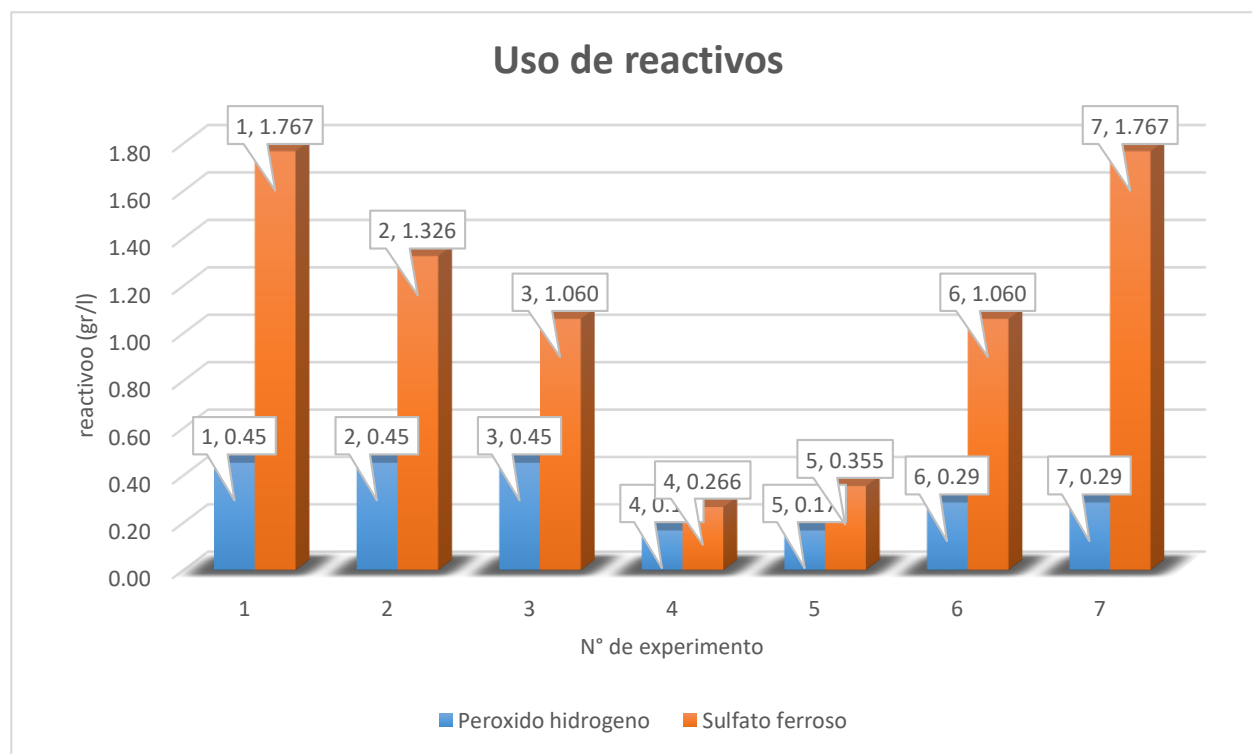
Parámetros usados para cada experimento					
N° Exp	$pH_{inicial}$	Ph_{ajus}	Tiempo Reacción (min)	Relación molar H_2O_2/Fe^{2+}	Carga de DQO (mg/L)
1	7.5	4.2	60	1.5	612
2	7.4	4.4	60	2.0	612
3	7.9	3.4	60	2.5	612
4	7.1	4.7	60	1.5	385
5	7.2	4.7	60	2.0	385
6	7.2	3.1	120	2.5	385
7	7.9	3.2	120	1.5	385

La carga de DQO afectada por las condiciones climáticas en la tomada de muestras en días con precipitación, lo cual afectaba de manera muy notable en la toma de muestra los tiempos de tratamientos se utilizaron los que sean presentado en diferentes artículos como trabajos de maestría. Se presenta los resultados que se obtuvieron de los experimentos propuestos en la **tabla 5**.

Tabla 5 Resultados de remoción para los diferentes experimentos (Fenton químico)

Resultados para cada experimento							
N° Exp	pH _R x	Ph _{Neutralización}	Peróxido de hidrogeno Utilizado (ml)	Sulfato Ferroso heptahidratado (gr)	Carga de DQO (mg/l)	DQO después de tratamiento (mg/l)	% de Remoción
1	2.2	7.64	0.5424	1.767	612	142	77
2	2.3	7.3	0.5424	1.326	612	154	75
3	2.4	8.2	0.5424	1.060	612	109	82
4	2.6	8.7	0.2000	0.266	385	141	63
5	2.5	8.09	0.2000	0.355	385	108	72
6	2.3	7.82	0.3412	1.060	385	86	78
7	2.2	8.08	0.3412	1.767	385	155	60

Gráfica 2 Uso de reactivo en cada una de las pruebas (Fenton químico)



4.1. DETERMINACIÓN DE LODOS GENERADOS EN FENTON QUÍMICO

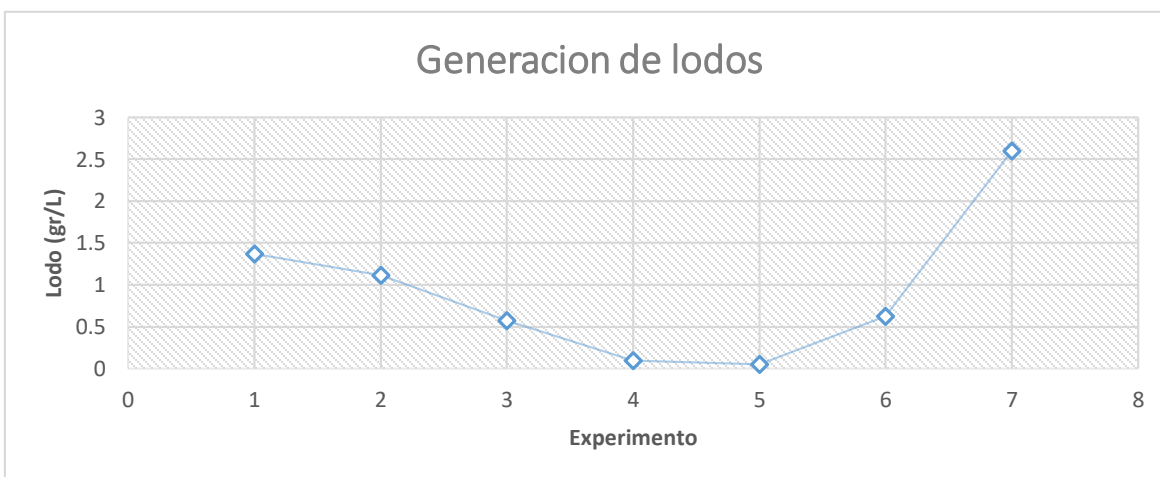
Podemos observar en la **tabla 5** los resultados, un comportamiento para cada experimento tomando como referencia el experimento 3 podemos ver que la relación que presento mejor eficiencia fue la de 2.5. A continuación, se ilustra una **gráfica 3** y la **tabla 6** donde se representa el comportamiento de la generación de lodos para los diferentes experimentos.

Tabla 6 Resultados de generación de lodos (Fenton químico)

GENERACIÓN DE LODOS

N° EXP	Peso del papel filtro vacío (gr)	Peso del papel filtro con residuos de lodo (gr)	Lodo Generado (gr/l)
1	2.6977	4.0678	1.3701
2	2.8354	3.9526	1.1172
3	2.7995	3.3709	0.5714
4	2.4218	2.5151	0.0933
5	2.4752	2.5252	0.05
6	3.1095	3.7305	0.621
7	3.341	5.9363	2.5953

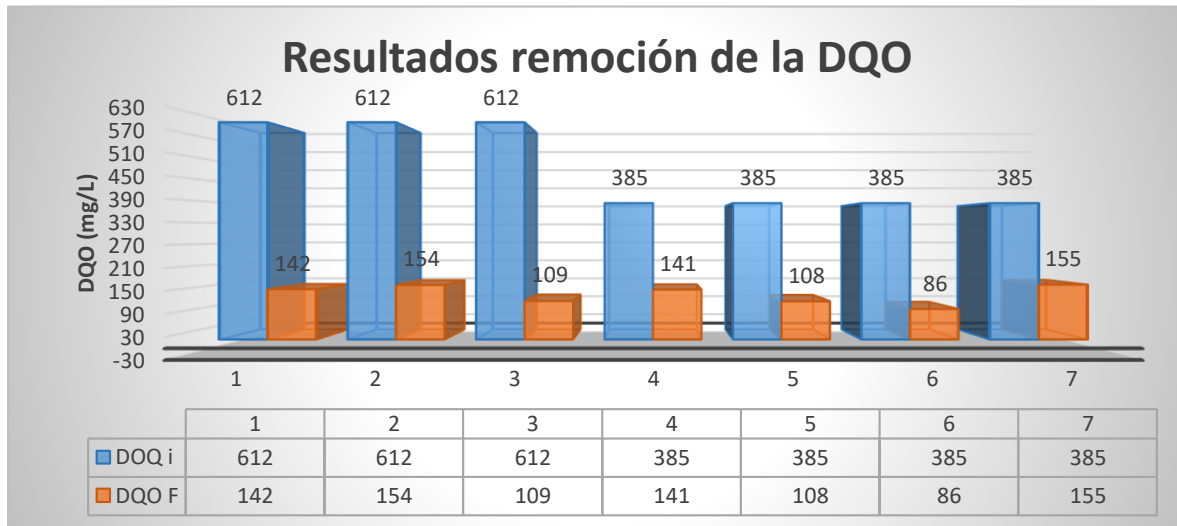
Gráfica 3 Generación de lodos (Fenton químico).



4.2. DETERMINACIÓN DE DQO EN FENTON QUÍMICO

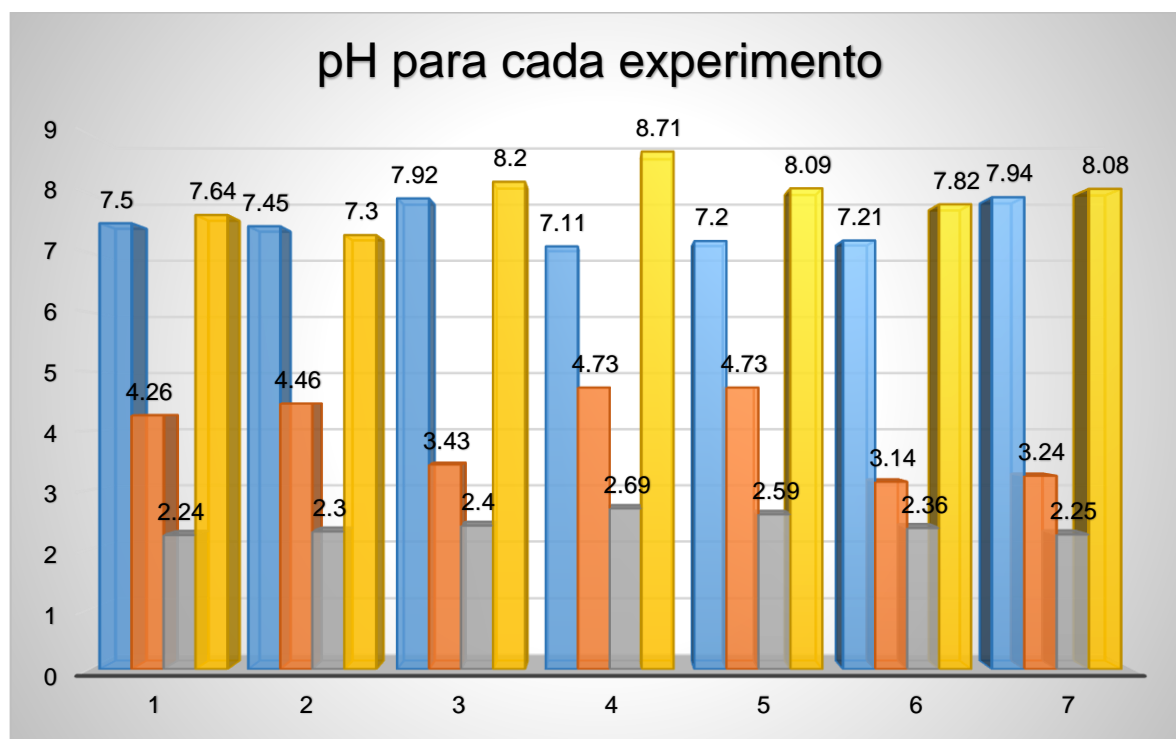
Para interpretar mejor los resultados se presenta una gráfica donde se ilustran los resultados en la remoción de la DQO para cada uno de los experimentos y los pH que fueron ajustados los cuales son de suma importancia ya que de ello depende la reacción.

Grafica 4 Remoción de DQO en tratamiento (Fenton químico)



La mayor remoción de DQO para la concentración de $612 \frac{mg}{l}$ está en el experimento 3 y para la concentración de $DQO = 385 \frac{mg}{l}$ en el experimento 6. Si observamos en la tabla 2 los parámetros de ambos experimentos tanto como el ajuste del pH como la relación molar que se usaron fueron los mismo por lo que estos parámetros son los más adecuados si nos enfocamos en la eficiencia de remoción de la DQO pero que pasa con la producción de lodos con otras relaciones y otros ajustes de pH nos dan como resultados aún más favorables en la disminución de producción de lodos, pero la eficiencia del tratamiento se ve afectada muy notablemente.

Grafica 5 Registro de pH en cada experimento (Fenton químico)



Se puede observar que para los experimentos los pH no fueron los mismos al momento de ser ajustados se trató de tener en el rango de 2.8-4 que es el adecuado para que se forme el reactivo Fenton y se lleve a cabo el tratamiento, los que presentaron mejores resultados son el del experimento 3 y el experimento 6 aunque en la formación de lodos el que presento poca producción de lodos fue experimento 5 y el de mayor producción el experimento 7 para ello se tomó de referencia los parámetros como es la relación molar.

4.3. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

Interpretado de manera comparativa con los resultados que se obtuvieron con el tratamiento Fenton químico para observar su eficiencia y para comprobar que efectivamente este tratamiento está cumpliendo con lo establecido como es la disminución de la producción de lodos y un aumento en la eficiencia en cuanto a la remoción de un parámetro que es de suma importancia en las aguas residuales DQO.

Se presenta a continuación los parámetros que se utilizaron en el tratamiento Fenton de lecho fluidizado (FLF). en este tratamiento se trató de analizar cuidadosamente los siguientes parámetros (flujo de tratamiento, cantidad de soporte y porcentaje de expansión del soporte) algunos de los inconvenientes que se tuvo con el prototipo es que no soportaba la presión tanto como en la entrada y salida del flujo por lo que no se alcanzó más del 30 % de expansión del soporte y este fue con el que se trabajó las pruebas.

Parámetros para el tratamiento Fenton de lecho fluidizado	
Soporte	Silica Gel
Cantidad (gr)	100
Altura ocupada del soporte (Cm)	3.5
Flujo de tratamiento (Its/s)	0.1018
Volumen del reactor (Its)	1.1794
% de expansión	30

Tabla 7 Resultados de generación de lodos (Fenton de lecho fluidizado)

Especificaciones de los equipos a utilizar para realizar las pruebas de tratamiento Fenton de lecho fluidizado **tabla 8 y 9**.

Bomba Shurflo 2088-492-444	
Flujo (L/s)	0.1018
Potencia (Watts)	104
Modelo	2088-492-444
Eficiencia (%)	70
Presión (PSI)	45

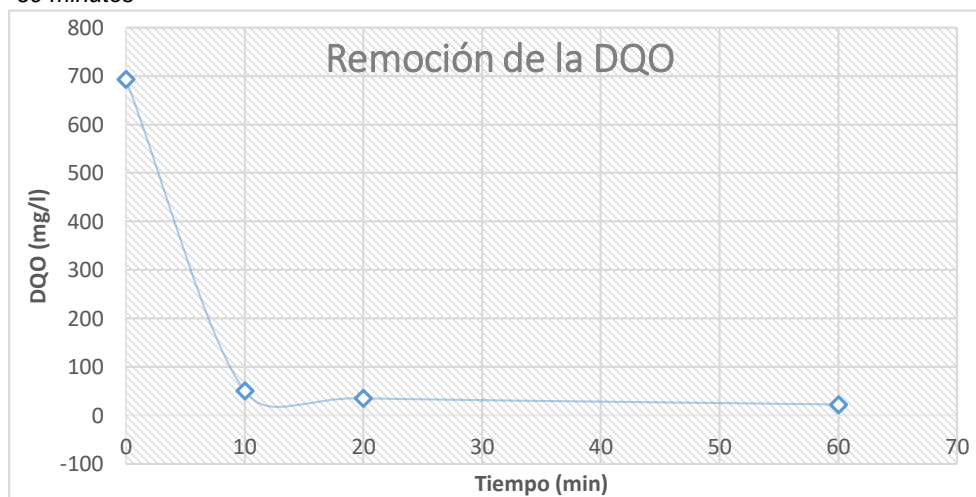
Tabla 8 especificación de la bomba

Reactor	
Volumen (Lts)	1.179
Altura(in)	10.2
Diámetro (in)	3
Material	Acrílico
Modelo	Phosba Reactor

Tabla 9 Especificaciones y medidas del Reactor

Estos fueron los parámetros usados para las diferentes pruebas en el prototipo para el tratamiento Fenton de lecho fluidizado, se realizó pruebas con tiempos de 10, 20 y 60 minutos como podemos observar en la siguiente **grafica 6**.

Grafica 6 Remoción de la DQO en el tratamiento Fenton de lecho fluidizado tiempo 10,20 y 60 minutos



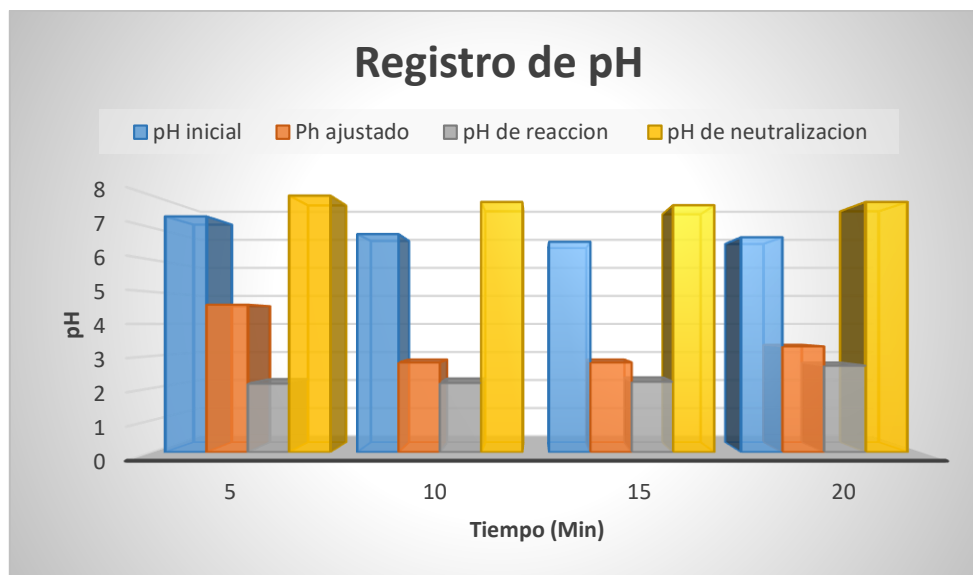
Si se observa la gráfica tenemos un comportamiento que es bastante interesante en el intervalo de 0-10 minutos por lo que se propuso trabajar con los intervalos de 5, 10, 15 y 20 minutos para apreciar mejor el cambio de los parámetros a tomar en cuenta para el tratamiento puesto que se ilustra la máxima remoción que se obtendría sería con el tiempo de 60 minutos y en el caso que si se estudiaba en tiempos muy cercanos a este los resultados no tendrían variante.

Se realiza las pruebas de acuerdo a lo establecido y se presentan las condiciones a las que se realizaron cada una de ellas y los resultados como en la producción de lodos tanto al finalizar el tratamiento como al neutralizar de igual manera se presentan los pH, eficiencia en la remoción de la DQO la producción de lodos en comparación con la que se produjo en el tratamiento Fenton químico.

Tabla 10 Registro de pH para cada etapa del proceso desde la muestra inicial hasta la Neutralización (Fenton de lecho fluidizado)

<i>Registro de Ph</i>				
<i>Tiempo (Min)</i>	pH Inicial	pH Ajustado	pH Reacción	pH Neutraliación
5	7.35	4.6	2.14	8
10	6.8	2.8	2.16	7.8
15	6.56	2.8	2.2	7.7
20	6.7	3.3	2.7	7.8

Este parámetro tanto como para el tratamiento convencional (Fenton Químico) como para el Fenton de lecho fluidizado es de suma importancia ya que este es el que da la condición para la formación del reactivo Fenton y es de suma importancia ajustarlo adecuadamente.



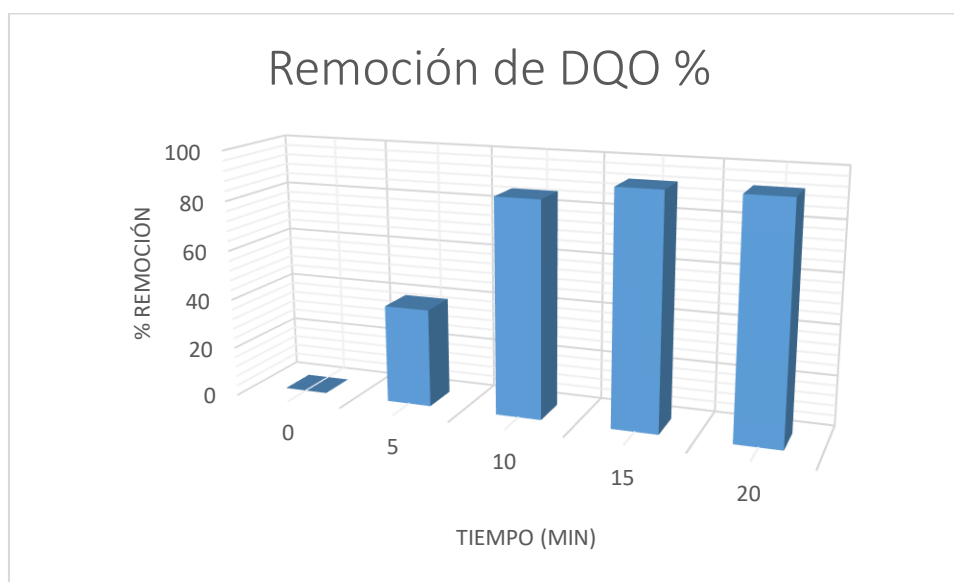
Grafica 7 Comparación de los registros de pH para los diferentes tiempos de tratamiento (FLF)

4.4. DETERMINACIÓN DE REMOCIÓN DE DQO EN FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

A continuación, el resultado obtenido solo se le modifica el tiempo de tratamiento como mencionamos anteriormente observamos un comportamiento muy espontáneo en el rango de 0-20 minutos por lo que las pruebas se realizaron en este rango para observar mejor lo que pasa en ese intervalo. La carga de DQO para estas pruebas fue de 371 mg/L la relación molar ($H_2O_2/Fe^{2+} = 1.5$) es la misma usada tanto como Fenton químico y Fenton fluidizado.

Tabla 11 Remoción de DQO en el tratamiento Fenton de lecho fluidizado

Remoción de DQO			
Tiempo	FeSO ₄ *7H ₂ O (gr)	H ₂ O ₂ (ml)	% Remoción de DQO
0			
5	17.3567	2.3675	40
10	17.3567	2.3675	86
15	17.3567	2.3675	92
20	17.3567	2.3675	92

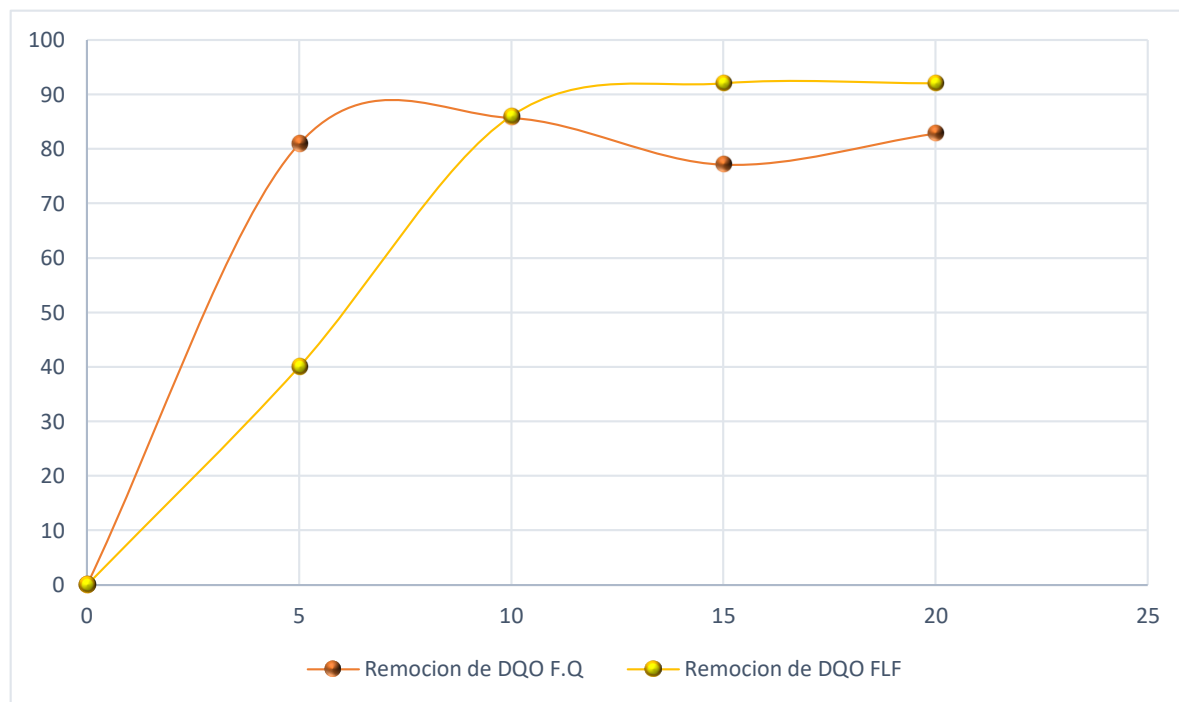


Grafica 8 Remoción de la DQO en cada experimento (FLF)

Observamos que el comportamiento de este parámetro incrementa hasta un punto donde se comporta estable por ello se dice que la remoción máxima de DQO es del 92 % en aguas residuales con el tratamiento Fenton de lecho fluidizado.

4.5. COMPARACIÓN DE LA REMOCIÓN DE DQO ENTRE FENTON QUÍMICO Y FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

Ahora comparamos la remoción de la DQO con la remoción que nos da el tratamiento Fenton convencional para ello se realizaron pruebas de igual forma con los mismos parámetros tanto como los ajustes de pH como los tiempos de tratamientos para hacer la siguiente comparación.

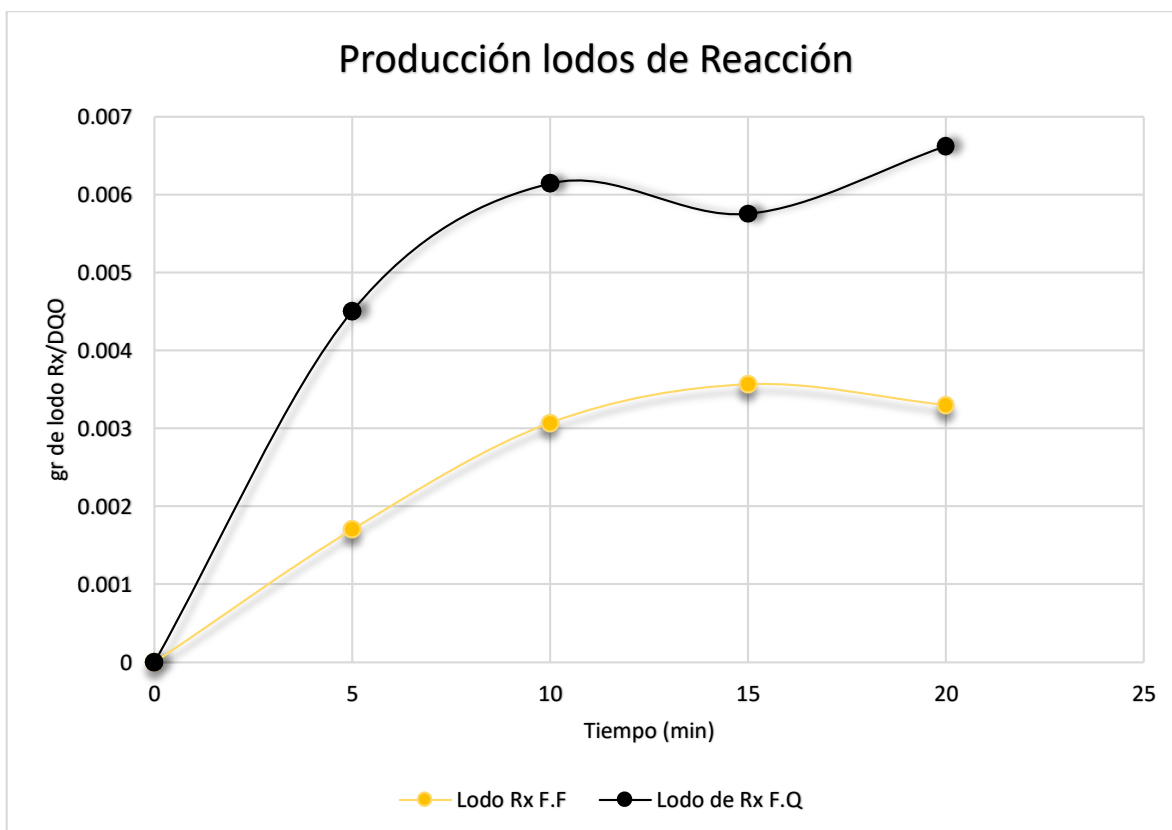


Grafica 9 Comparación en capacidad de remoción de DQO para ambos procesos.

Como se observa muy notablemente la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda química de oxígeno) en el tratamiento Fenton de lecho fluidizado es aún mayor que en el tratamiento convencional, si recordamos la mayor eficiencia que se obtuvo con el Fenton químico es del 82 % en 60 minutos de tratamiento por lo que vemos en la gráfica ambos alcanzaron su punto máximo de remoción siendo superior el Fenton fluidizado.

4.6. COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN DE LODOS FENTON QUÍMICO Y FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

Ahora compararemos la formación de lodos en ambos tratamientos uno de los objetivos de este tratamiento innovador es reducir la producción de lodos en el tratamiento por lo que se compararan ambos nuevamente las condiciones fueron las mismas para ambos.



Grafica 10 Comparación de producción de lodos en reacción

Efectivamente el tratamiento está reduciendo la formación de lodos en el tratamiento no solo mejora el tratamiento si no gracias a la incorporación de un soporte este reduce la formación de lodo en un 50 % al que se forma en el tratamiento Fenton Químico y la eficiencia es aún mayor por lo que este tratamiento no solo demuestra que si no que puede ahorrar el consumo de reactivos ya que en el soporte se concentran precipitados de hierro los cuales pueden reactivarse usando peróxido de hidrogeno.

CONCLUSIÓN

El Prototipo propuesto para las pruebas y comparación de resultados de tratamiento de aguas residuales sanitarias demuestra un comportamiento y resultados mayores al ser comparado los resultados que se obtiene en el Fenton convencional rápidamente se observa un cambio tanto como el parámetro de importancia del proyecto el cual es reducir la producción de lodos al implementar el soporte adecuado y ser integrado el soporte al tratamiento su función, crear el área de contacto más pequeñas para que la reacción se lleve a cabo con mucha más eficiencia y precipitar el hierro siendo usado el soporte como núcleo, y así poder ser regenerado o reactivado al integrar una nueva prueba al ser así se logra una eficiencia mayor en cuanto la remoción de la DQO siendo la máxima remoción 82% para el Fenton químico y un 92% para el Fenton de lecho fluidizado claramente una mayor remoción para nuestro tratamiento demostrando el aumento en eficiencia de remoción, y una producción de lodos en comparación menor la del FLF a el Fenton Convencional.

Ambos procesos son de gran eficiencia en la remoción de compuestos recalcitrantes cumpliendo con la eliminación de estos. Sin embargo, el Fenton de Lecho fluidizado ha resultado ser uno de los tratamientos hasta la fecha que obtiene mejores resultados. Al realizar las pruebas se demuestra que el inconveniente en la formación de lodos que produce el tratamiento convencional en comparación del Tratamiento Fenton de Lecho fluidizado es notablemente reducido, Efectivamente el tratamiento (FLF) reduce la formación de lodos en un 50 % al formado en el tratamiento Fenton Químico y la eficiencia aumenta de una manera muy atractiva.

Recomendaciones

Con base a los resultados del trabajo se presentan algunas recomendaciones para futuras investigaciones y propuestas.

1. Realizar y diseñar experimentos a mayor escala y en flujo continuo usando los resultados obtenidos y estudiados.
2. Evaluar resultados con el uso de diferentes soportes.

ANEXOS



HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO

Hoja 1 de 2

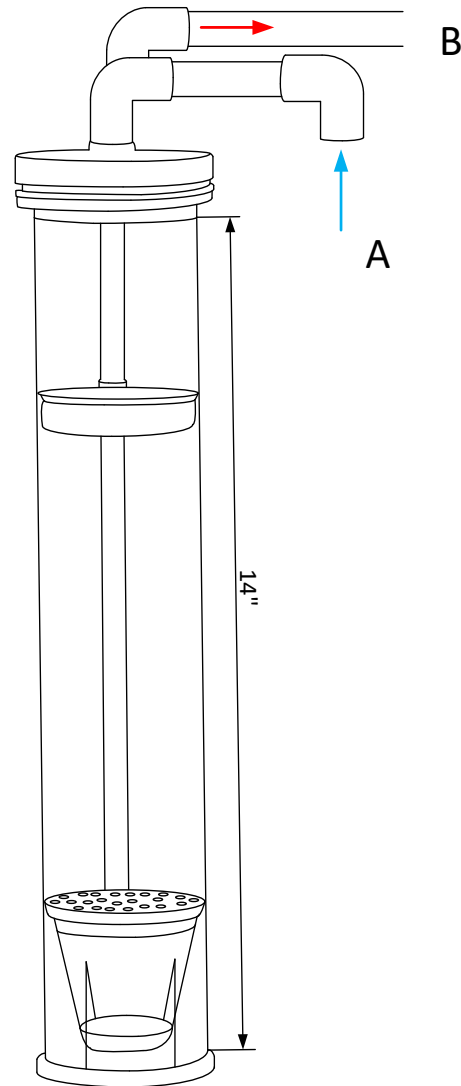
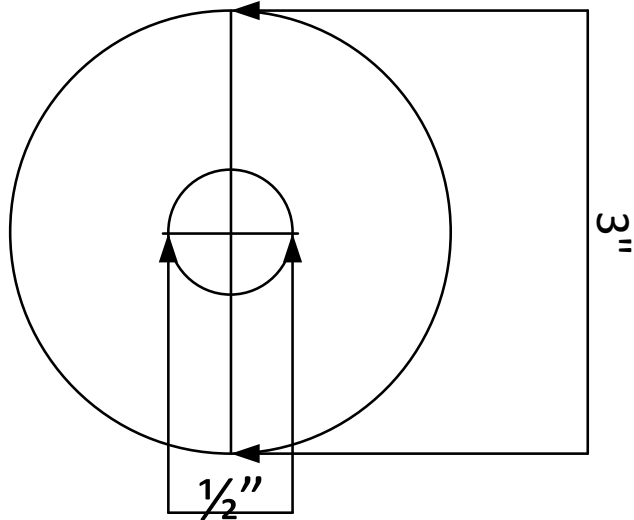
TAG EQUIPO

R-1

Ubicación: Sanfandila, pedro Escobedo, Querétaro, México


Prototipo adaptado: Para tratamiento de aguas residuales sanitarias.

Proyecto:
Reactor Fenton de Lecho Fluidizado



Relacion de conexiones

Entrada/Salida	Tamaño	Descripción
A	1/2"	Entrada de reactivos y catalizador
B	1/2"	Salida de productos

HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO		
	Hoja 2 de 2	
	TAG EQUIPO	R-1
	Ubicación: Sanfandila, pedro Escobedo, Querétaro, México	Prototipo: Para tratamiento de aguas residuales sanitarias.
Proyecto: Reactor Fenton de Lecho Fluidizado		
DATOS GENERALES		
DENOMINACION EQUIPO	Columna de lecho Fluidizado	
FUNCION	Reactor de reacción Fenton Heterogéneo	
DATOS DE OPERACIÓN		
FLUIDO	Reactivo	Peróxido de hidrogeno
	Catalizador	Sulfato Ferroso (FeSO ₄)
	Soporte	Oxido de sílice (SiO ₂) e alúmina (Al ₂ O ₃)
TEMPERATURA DE OPERACIÓN (°C)	26	
PRESION DE OPERACIÓN (atm)	1	
PESO DE OPERACIÓN (Kg)	1.382	
VOLUMEN UTIL (%)	100	
REGIMEN HIDRODINAMICO	Heterogéneo	
DATOS DE DISEÑO		
CAPACIDAD (Cm ³)	1135.16	
DIAMETRO INTERIOR (Cm)	7.6	
LONGITUD TOTAL (Cm)	35.56	
POSICIONAMIENTO	Vertical	
GRUESO TOTAL CILINDRO (mm)	2.5	
PESO VACIO (Kg)	0.364	
PESO CON AGUA (Kg)	1.484	
MATERIAL DE CONSTRCCION	Acrílico	

Búsqueda de patentes con los softwares Derwent Innovation y LATIPAT

Derwent Innovation Welcome Minerva

PATENT SEARCH PUBLICATION NUMBER

FIELD **EXPERT** Change collections: All

...Title/Abstract/Claims ? FENTON and BED and FLUID* OR + -

Title-DWPI ? FENTON and BED and FLUID* AND + -

Publication Date ? 1970-01-01 To YYYY-MM-DD + -

Templates

Make these my defaults

Clear All Fields Reset Search

SEARCH RESULTS

222 record(s) found out of 113,225,981 searched (display limit 1,000,000) 0 record(s) selected

Search within your results: Smart Search-Topic Enter key terms or text block

Filter your results:

Country Code Show Top: 10 20 Assignee Show Top: 10 20

WO (4)

Print Watch Records Alert Charts (Beta) Charts Order Export Save Add To

Derwent Innovation Welcome Minerva

PATENT SEARCH PUBLICATION NUMBER

FIELD **EXPERT** Change collections: All

...Title/Abstract/Claims ? "FLuidized-bed Fenton" OR + -

Title-DWPI ? "FLuidized-bed Fenton" AND + -

Publication Date ? 1970-01-01 To YYYY-MM-DD + -

Templates

Make these my defaults

Clear All Fields Reset Search

SEARCH RESULTS

21 record(s) found out of 113,232,813 searched (display limit 1,000,000) 0 record(s) selected

Search within your results: Smart Search-Topic Enter key terms or text block

Filter your results:

Country Code Show Top: 10 20 Assignee Show Top: 10 20

Print Watch Records Alert Charts (Beta) Charts Order Export Save Add To



Espacenet
Búsqueda de patentes
Un servicio en cooperación con la OEP

Español Portuguese English
Contacto
Cambia de país ▼

← Sobre Espacenet Otros servicios en línea de EPO ▼

Búsqueda
Resultados
★ Mi lista de patentes (0)
Historial
Configuración
Ayuda

Está intentando acceder a la lista de resultados sin una sesión. Para buscar, puede usar un formulario de búsqueda ó regresar a la [web](#) para repetir su búsqueda.

Datos bibliográficos: MX2018002156 (A) — 2017-08-17

Datos bibliográficos

- Descripción
- Reivindicaciones
- Mosaicos
- Documento original
- Documentos citados
- Documentos citantes
- Situación Jurídica de INPADOC
- Familia de patentes INPADOC

★ A mi lista de patentes [Informar de error](#) [Imprimir](#)

ELIMINACIÓN DE PETROLEO DEL AGUA MEDIANTE CUBRIMIENTO, ADSORCIÓN Y OXIDACIÓN CON CENIZA Y PERÓXIDOS ORGÁNICOS VÍA REACCIONES TIPO FENTON.

Marca de página [MX2018002156 \(A\) - ELIMINACIÓN DE PETROLEO DEL AGUA MEDIANTE CUBRIMIENTO, ADSORCIÓN Y OXIDACIÓN CON CENIZA Y PERÓXIDOS ORGÁNICOS VÍA REACCIONES TIPO FENTON.](#)

Inventor(es): OXANA VASILIEVNA KHARISSOVA [MX]; BORIS ILDUSOVICH KHARISSOV; H V RASIKA DIAS; LIZBETH MARROQUIN TJIJERINA ±

Solicitante(s): BORIS ILDUSOVICH KHARISSOV [MX] ±

Clasificación: - internacional: **C02F1/28**
- cooperativa:

Número de solicitud: MX20180002156 20180218

Número(s) de prioridad: MX20180002156 20180218

Resumen de MX2018002156 (A)

Traducir este texto al [patenttranslate](#) powered by EPO and Google

La presente invención se refiere al método de la eliminación de impurezas de petróleo crudo en agua en las zonas de derrames por las vías del cubrimiento y adsorción de los hidrocarburos con cenizas, oxidación con los peróxidos orgánicos y eliminación o separación posterior con uso de imanes o decantación. Las ventajas del método propuesto son alta eficiencia de separación de mezclas petróleo/agua (90-100%), uso de reactivos comunes y carecen de toxicidad significativa para el medio ambiente. Las principales fuentes de desechos de madera son: operaciones forestales, aserríos, producción de tableros o contrachapados, las cuales producen 23%, 50%, 55% de desecho respectivamente, el cual se suele vender preferentemente a 0.85 USD.

Ayuda rápida —

- ¿Qué se entiende por traducción de texto de alta calidad facsimil?
- ¿Qué significa A1, A2, A3 y B después de un número de publicación EP, que aparecen a veces debajo de la lista de También publicado como?
- ¿Qué pasa si pulso en "A mi lista de patentes"?
- ¿Qué pasa si se pulsa en el botón de "Registro"?
- ¿Por qué hay algunas opciones de la columna lateral de la izquierda desactivadas (en gris) para ciertos documentos?
- ¿Cómo se puede poner una marca en esta página?
- ¿Por qué aparece a veces una lista de documentos con el título "También publicado como" y qué son esos documentos?
- ¿Por qué a veces se muestra el resumen de un documento equivalente?
- ¿Qué pasa si pulso en el botón rojo "Patent translate"?
- ¿Qué es el Global Dossier?



Espacenet
Búsqueda de patentes
Un servicio en cooperación con la OEP

Español Portuguese English
Contacto
Cambia de país ▼

← Sobre Espacenet Otros servicios en línea de EPO ▼

Búsqueda
Resultados
★ Mi lista de patentes (0)
Historial
Configuración
Ayuda

Datos bibliográficos: BRPI0401236 (A) — 2005-12-20

Datos bibliográficos

- Descripción
- Reivindicaciones
- Mosaicos
- Documento original
- Documentos citados
- Documentos citantes
- Situación Jurídica de INPADOC
- Familia de patentes INPADOC

★ A mi lista de patentes [Informar de error](#) [Imprimir](#)

Tratamiento foto-fenton de efluentes orgánicos por adições sucessivas

Marca de página [BRPI0401236 \(A\) - Tratamiento foto-fenton de efluentes orgánicos por adições sucessivas](#)

Inventor(es): ILHA CLOVIS EDUARDO GODOY; SOUZA JURANDIR RODRIGUES DE; SANTOS ANTONIO JOSE MORAES GUA ±

Solicitante(s): UNIV BRASILIA FUDACAO [BR] ±

Clasificación: - internacional: **C02F1/64; C02F1/76; (IPC1-7): C02F1/64; C02F1/76**
- cooperativa:

Número de solicitud: BR2004PI01236 20040112

Número(s) de prioridad: BR2004PI01236 20040112

También publicado como: → BRPI0401236 (B1).

Resumen de BRPI0401236 (A)

Traducir este texto al [patenttranslate](#) powered by EPO and Google

"TRATAMIENTO FOTO-FENTON DE EFLUENTES ORGÁNICOS POR ADIÇÕES SUCESSIVAS". Processo de tratamento de efluentes contaminados por substâncias orgânicas por meio da reação foto-Fenton, com injeção de efluentes e reagentes em etapas seqüenciais, com a adição de íon férrico ou férrico apenas na primeira etapa, em quantidade igual a uma fração da quantidade que seria necessária para a decomposição de todo o contaminante.

Ayuda rápida —

- ¿Qué se entiende por traducción de texto de alta calidad facsimil?
- ¿Qué significa A1, A2, A3 y B después de un número de publicación EP, que aparecen a veces debajo de la lista de También publicado como?
- ¿Qué pasa si pulso en "A mi lista de patentes"?
- ¿Qué pasa si se pulsa en el botón de "Registro"?
- ¿Por qué hay algunas opciones de la columna lateral de la izquierda desactivadas (en gris) para ciertos documentos?
- ¿Cómo se puede poner una marca en esta página?
- ¿Por qué aparece a veces una lista de documentos con el título "También publicado como" y qué son esos documentos?
- ¿Por qué a veces se muestra el resumen de un documento equivalente?
- ¿Qué pasa si pulso en el botón rojo "Patent translate"?
- ¿Qué es el Global Dossier?

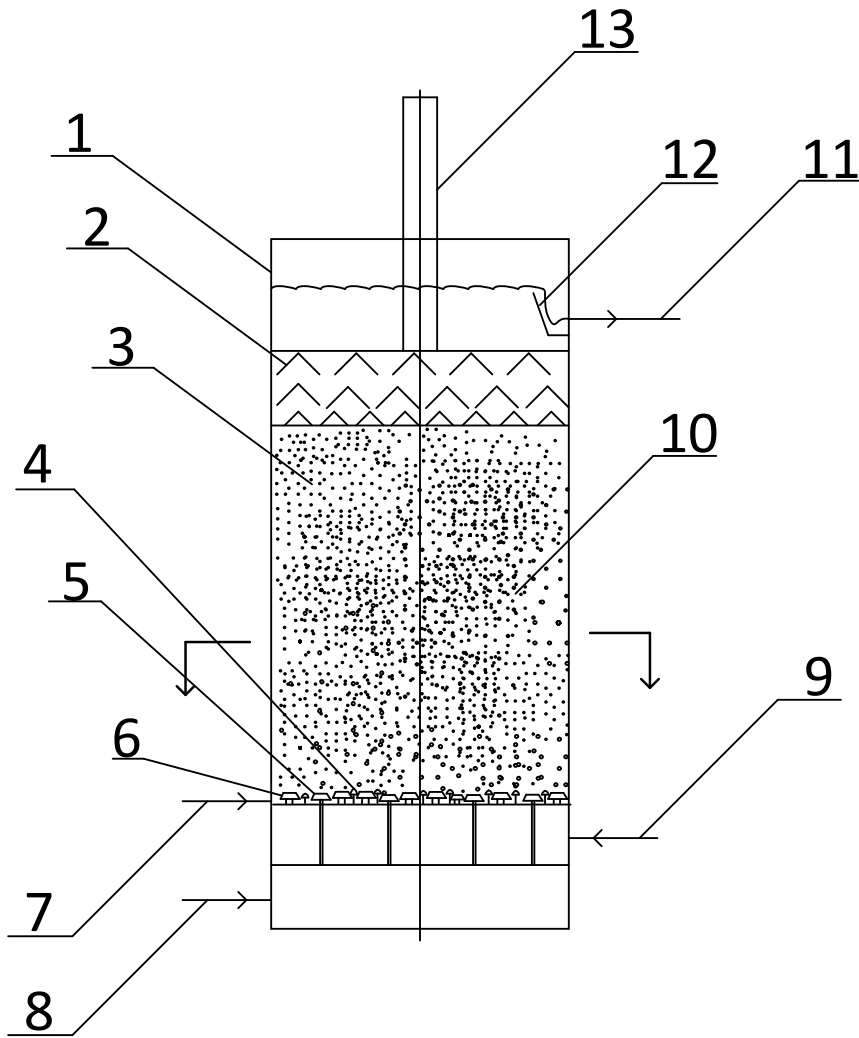
PATENTES DE DISEÑOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON EQUIPO FENTON DE LECHO FLUIDIZADO

Patente N° "Reactor Fenton de cama Fluidizada"

CN207031060U

.....Patente China.....año de Publicación 2017

La invención presente revela un reactor Fenton de la cama Fluidizada, : un reactor Fenton de cama fluidizada comprenden de un tanque de reacción, el fondo del tanque de reacción es provisto de una ensenada para agua natural con un catalizador y un catalizador en la ensenada de oxidante y el oxidante en el agua natural, con la primera cabeza de catalizador de la ensenada de la tela de conexión, la ensenada de oxidante se conectó a la segunda cabeza de distribución, con los difusores de microporos en una primera distribución del agua del cuerpo del tanque de reacción la porción lateral en la cabeza, el tanque poroso interior de reacción de a aeración le es provista sobre la cabeza zona principal de reacción, la zona principal de reacción con una pasta para relleno, proveyó con separador de tres fases arriba de la reacción primaria Zona.



Reactor Fenton de cama fluidizada			
1	Tanque de reacción	7	Lumbrera de admisión
2	Separador de tres fases	8	Ensenada de catalizador
3	Zona de reacción	9	Ensenada de oxidante
4	Cabeza porosa de aeración	10	Pasta para relleno
5	Tela de la pierna principal	11	Conexión de salida
6	Pequeña tela principal	12	Derramadero
		13	Tubo de escape

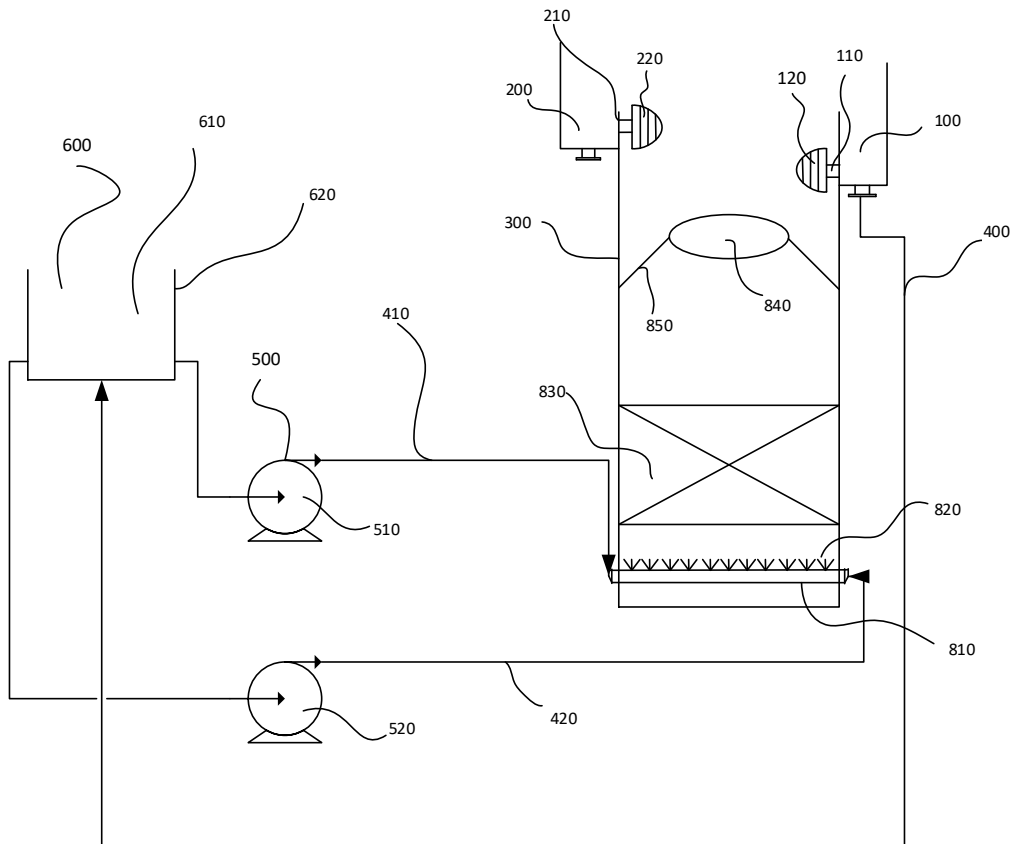
Patente N°
CN102774953A

Cama Fluidizada Fenton y método operativo

Patente China Año de publicación: 2012

La invención describe un lecho fluidizado Fenton, comprende un cuerpo de torre, un tanque de entrada de agua, un tanque de salida de agua, un tubo de entrada de agua, una bomba de circulación y un tubo de alimentación de productos químicos, donde el tanque de entrada de agua y el tanque de salida de agua están respectivamente dispuestos en ambos lados del extremo superior del cuerpo de la torre, el tanque de entrada de agua y el tanque de salida de agua están comunicados con la cavidad interna del cuerpo de la torre, el tanque de entrada de agua está conectado a la parte inferior del cuerpo de la torre a través del tubo de entrada de agua, la bomba de circulación está dispuesta en la tubería de entrada de agua, la tubería de alimentación de productos químicos está conectada a la tubería de entrada de agua, y la arena de hierro para promover la reacción está dispuesta en la cavidad interna del cuerpo de la torre. Un método operativo del lecho fluidizado Fenton comprende los siguientes pasos que: (1) el sulfato ferroso y el peróxido de hidrógeno se agregan a las aguas residuales para llevar a cabo la reacción mixta de la arena de hierro; (2) se forma un efecto sinérgico con un sistema Fenton; (3) una parte de las aguas residuales purificadas fluye de regreso al tanque de entrada de agua para llevar a cabo la reacción de recirculación; (4) la otra parte de las aguas residuales purificadas fluye hacia el tanque de salida de agua; y (5) el método se completa. Debido a que la mayoría de los hierros férricos producidos debido a Fenton se cristalizan o se precipitan en la superficie de la arena de hierro con el fin de formar un efecto sinérgico con un sistema Fenton, la eficacia del tratamiento del agua residual se mejora de manera efectiva. (4) la otra parte de las aguas residuales purificadas fluye hacia el tanque de salida de agua; y (5) el método se completa. Debido a que la mayoría de los hierros férricos producidos debido a Fenton se cristalizan o se precipitan en la superficie de la arena de hierro con el fin de formar un efecto sinérgico con un sistema Fenton, la eficacia del tratamiento del agua residual se mejora de manera efectiva. (4) la otra parte de las aguas residuales purificadas fluye hacia el tanque de salida de agua; y (5) el método se completa.

Debido a que la mayoría de los hierros férricos producidos debido a Fenton se cristalizan o se precipitan en la superficie de la arena de hierro con el fin de formar un efecto sinérgico con un sistema Fenton, la eficacia del tratamiento del agua residual se mejora de manera efectiva.



Cámara fluidizada Fenton y método operativo de la misma (Tratamiento de aguas residuales Farmacéuticas)

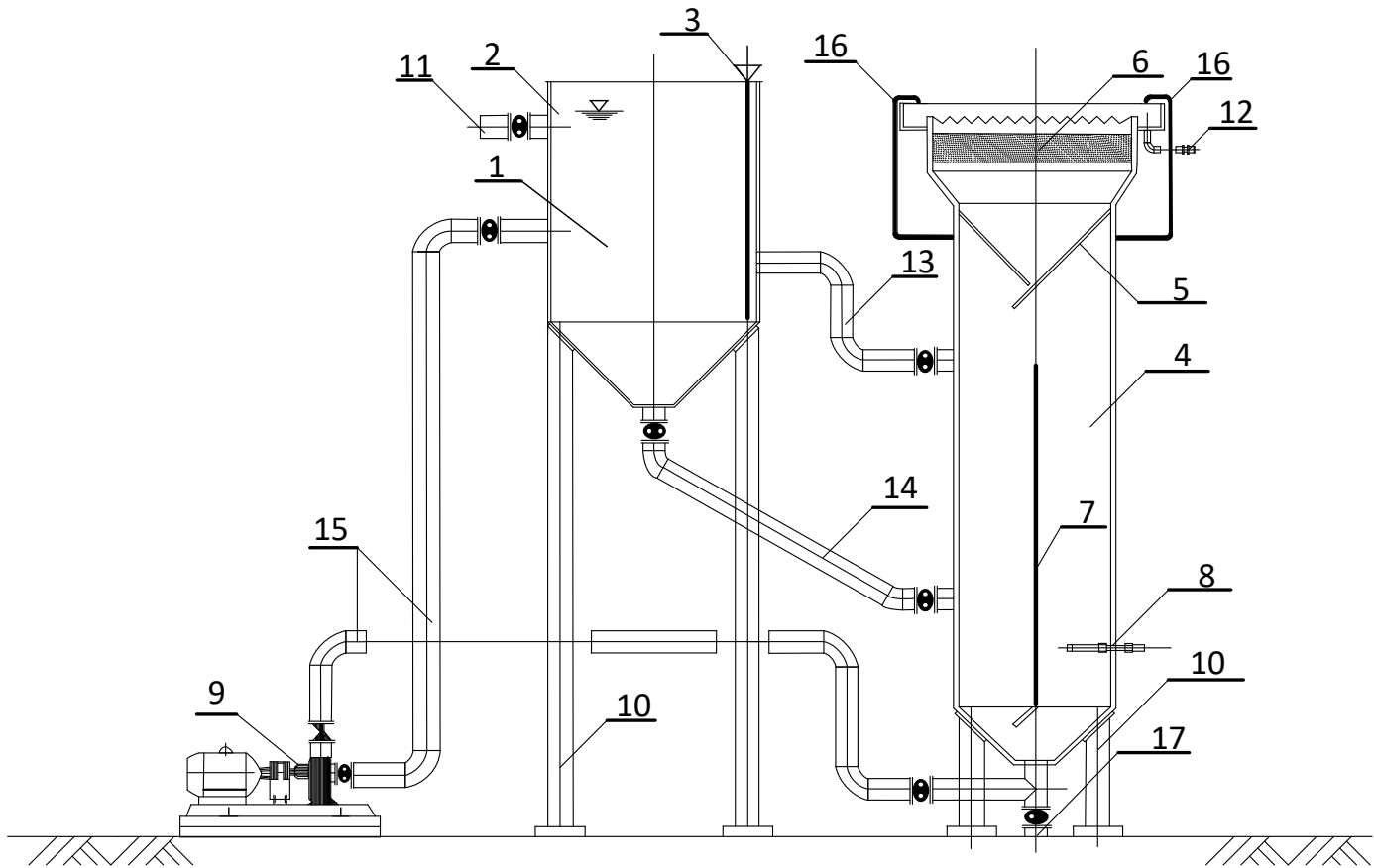
200	Tanque de purificación de aguas residuales	600	Tubo dosificador agua residual (Sulfato ferroso)	410	Entrada de sulfato ferroso
210	Salida de agua	420	Entrada de mezcla	810	Distribución de agua
220	Tapón de filtro	620	Dosificación de Peróxido de hidrogeno	820	Orificios de distribución y pulverización del agua
100	Tanque de agua para alimentación	520	Bomba de circulación	830	Columna para mineral de hierro
120	Tapón de filtro	610	Dosificación de sulfato ferroso	300	Espacio interior de la torre o fondo
110	Comunicación entre agua por el lumen 100	510	Bomba de circulación	850	Varillas de soporte (N° de varillas 4)
400	Tubo de entrada de agua	500	Bomba recirculación	840	Soporte separador cono invertido

Patente N° CN103922520A Dispositivo y método de microelectrólisis de lecho fluidizado
circulante interno aplicable al pretratamiento
de aguas residuales orgánicas.

Patente China: Año de publicación: 2014-07-16

La invención se refiere al campo de la tecnología de tratamiento de aguas residuales, particularmente a un dispositivo de microelectrólisis de lecho fluidizado circulante interno y a un método aplicable al pretratamiento de aguas residuales orgánicas.

El dispositivo comprende de un reactor principal y un auxiliar que están conectados entre sí; el reactor principal consiste en una zona de sedimentación de tubo inclinado, una zona de separación de tres fases y una zona de reacción que están dispuestas secuencialmente de arriba hacia abajo; y el reactor auxiliar consiste en una zona de alimentación y una zona de separación de ciclones que están dispuestas secuencialmente de arriba hacia abajo. La invención divulga además un método para pre tratar aguas residuales orgánicas utilizando el dispositivo. Un cuerpo de agua esta abajo fluidización por la circulación interna de agua residual y partículas de electrodos en el reactor principal y la circulación externa entre el reactor principal y el reactor auxiliar, por un lado, el endurecimiento y la canalización de un material de electrodo micro electrolítico puede ser evitado; y por otro lado, no se requiere un sistema de agitación mecánica para la disposición, y el suministro de agua y el reflujo del reactor principal se pueden realizar a través de la misma bomba de circulación, el equipo es simple y el costo de operación y mantenimiento es menor.



Dispositivo y método de microelectrólisis de lecho fluidizado circulante interno aplicable al pretratamiento de aguas residuales orgánicas.

1	Zona de separación de turbulencia	8	Tubería de aireación	15	Tubo de retorno de partículas de electrodo
2	Zona de alimentación	9	Bomba de circulación	16	Tubo de reciclado de aguas residuales mezcladas
3	Puerto de alimentación	10	Marco de soporte del equipo	17	Tubo de ventilación
4	Zona de reacción	11	Tubo de entrada		
5	Zona de separación trifásica	12			
6	Zona de sedimentación de tubería inclinada	13	Tubo de salida		
7	Deflector de derivación	14	Tubo de retorno de líquido mezclado		

Patente N^a “Dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton”

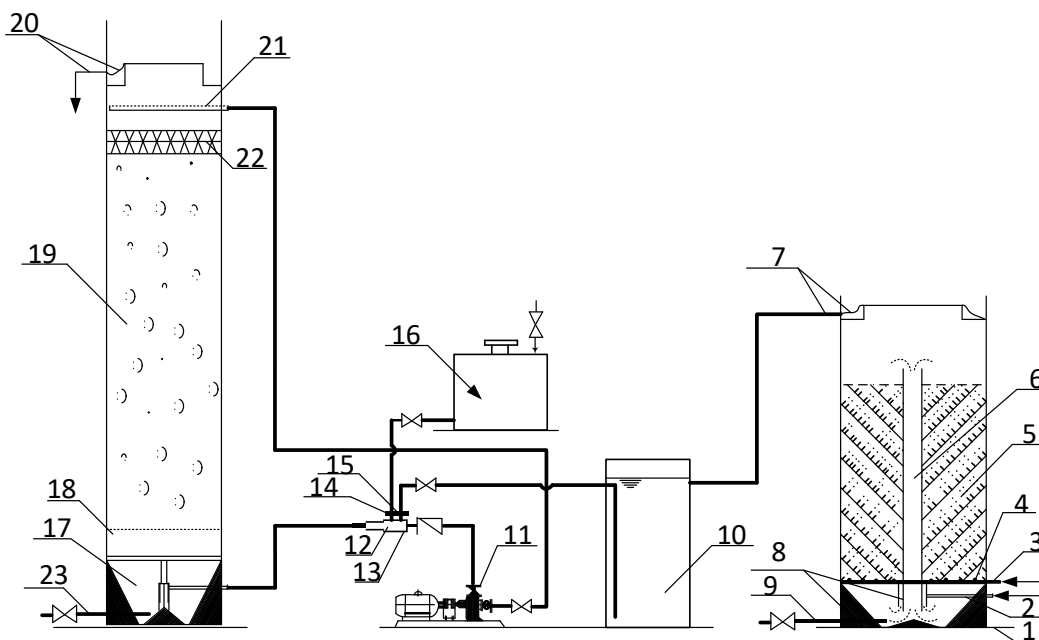
CN202139138U

Patente China Año de publicación: 2011

El modelo de utilidad describe un dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton. El dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton comprende un dispositivo de reacción de microelectrólisis de lecho de hierro, un lecho fluidizado Fenton, un tanque de agua intermedio, una bomba de circulación de agua de alimentación de lecho fluidizado Fenton, un dispositivo de chorro multifuncional, una entrada de aire y una adición de oxidante abertura, una entrada de agua de lecho fluidizado y un tanque de almacenamiento de oxidante, donde una salida de agua recogida de un lecho de hierro del dispositivo de reacción de microelectrólisis de lecho de hierro, el tanque de agua intermedio, la entrada de agua de lecho fluidizado del dispositivo de chorro multifuncional están conectados giro; la salida del dispositivo de chorro multifuncional está conectada con la entrada de agua del lecho fluidizado Fenton; la entrada de agua del dispositivo de chorro multifuncional está conectada con la entrada de agua de la bomba de circulación de agua de alimentación de lecho fluidizado Fenton; la entrada de agua de la bomba de circulación de agua de alimentación de lecho fluidizado Fenton está conectada con un tubo de succión de agua circulante; y el tanque de almacenamiento de oxidante está conectado con la abertura de adición de oxidante del dispositivo de chorro multifuncional. El dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton trata principalmente las aguas residuales que son difíciles de degradar; el equipo tiene una alta relación de altura a diámetro; el espacio del piso es pequeño; el tiempo de reacción es corto; solo se usa un oxidante añadido externamente, concretamente H_2O_2 , y la cantidad de adición es baja; el rendimiento del lodo es bajo; y el costo de operación es bajo. la entrada de agua de la bomba de circulación de agua de alimentación de lecho fluidizado Fenton está conectada con un tubo de succión de agua circulante; y el tanque de almacenamiento de oxidante está conectado con la abertura de adición de oxidante del dispositivo de chorro multifuncional.



El dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton trata principalmente las aguas residuales que son difíciles de degradar; el equipo tiene una alta relación de altura a diámetro; el espacio del piso es pequeño; el tiempo de reacción es corto; solo se usa un oxidante añadido externamente, concretamente H_2O_2 , y la cantidad de adición es baja; el rendimiento del lodo es bajo; y el costo de operación es bajo. La entrada de agua de la bomba de circulación de agua de alimentación de lecho fluidizado Fenton está conectada con un tubo de succión de agua circulante; y el tanque de almacenamiento de oxidante está conectado con la abertura de adición de oxidante del dispositivo de chorro multifuncional. El dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton trata principalmente las aguas residuales que son difíciles de degradar; el equipo tiene una alta relación de altura a diámetro; el espacio del piso es pequeño; el tiempo de reacción es corto; solo se usa un oxidante añadido externamente, concretamente H_2O_2 , y la cantidad de adición es baja; el rendimiento del lodo es bajo; y el costo de operación es bajo. El dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton trata principalmente las aguas residuales que son difíciles de degradar; el equipo tiene una alta relación de altura a diámetro; el espacio del piso es pequeño; el tiempo de reacción es corto; solo se usa un oxidante añadido externamente, concretamente H_2O_2 , y la cantidad de adición es baja; el rendimiento del lodo es bajo; y el costo de operación es bajo. El dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton trata principalmente las aguas residuales que son difíciles de degradar; el equipo tiene una alta relación de altura a diámetro; el espacio del piso es pequeño; el tiempo de reacción es corto; solo se usa un oxidante añadido externamente, concretamente H_2O_2 , y la cantidad de adición es baja; el rendimiento del lodo es bajo; y el costo de operación es bajo.



Dispositivo mejorado de tratamiento de aguas residuales de lecho fluidizado Fenton					
1	Tiechuang entrada a la zona de la cama	9	Deposito intermedio	17	Zona de mezcla
2	Tubo de admisión de perturbación	10	Bomba	18	Entrada del lecho de distribución de agua capa de soporte Fluidizado
3	Capa de soporte de distribución de agua	11	Circulación en el lecho fluidizado Fenton	19	Zona del lecho fluidizado del soporte
4	Microelectrólisis zona de reacción	12	Jet-Multi-funcional	20	Salida del colector de aceite de lecho fluidizado
5	Cilindro de circulación	13	Entrada de aire	21	Tubería de agua de circulación
6	Salida del colector de aceite	14	Adición oxidante de salida	22	Separador de tres fases
7	Flujo de agua medios	15	Lecho fluidizado de entrada	23	Puerto de descarga
8	Ventilación de lodos estabilizantes	16	Depósito de oxidante		

REFERENCIAS

- A Babuponnusami, K. M. (2014). Una revision sobre Fenton y mejoras al proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales . *J Environ Manage* .
- A El-Ghenymy, S. G.-S. (2012). Optimizacion de los tratamientos electro-Fenton y Fotoelectro-Fenton solar de soluciones de acido sulfanilico usando una planta de flujo pre-piloto por metodologia de ssuperficie de respuesta . *J Hazard Mater*.
- Barbusinski. (2009). *Fenton reaction - Controversy concerning the chemistry*.
- Barbusinski, K., Filipek, K. (2001). Use of fenton's reagent for removal of pesticides from industrial wastewater. *zz*
- Bautista. (2008). *An overview of the application of fenton oxidation to industrial wastewaters treatment*.
- Beltrán de Heredia J., Domínguez J.R.,. (2001). Aplicacion del reactivo Fenton para la depuracion de las aguas residuales de la industria productora de aceituna de mesa . *Tecnologia del Agua* .
- Bianco, B. D. (2011). *Fenton treatment of complex industrial wastewater Optimizacion of process conditions by response method* .
- C Ratanatamskul, S. C.-C. (2010). Efecto de los iones cloruro en la oxidacion de nitrobenceno mediante el proceso de lecho fluidizado Fenton. *Fresen Environ Bull*.
- C Ratanatamskul, S. C.-C. (2010). Efecto inhibidor de los iones inorganicos sobre la oxidacion de nitrobenceno mediante el proceso de lecho fluidizado Fenton. *J mol Catal A-Chem*.
- Chamarro, E. M. (2001). *Use of Fenton Reagent to improve organic chemical biodegradability*.
- Cheng H, C. S. (2014). Photoassisted Fenton degradation of phthalocyanine dyes from wastewater of printing industry using Fe(III)/ γ -Al₂O₃ catalyst in up-flow fluidized-bed. *J environ Sci* .
- Chou S, H. C. (1999). Aplicacion dde un catalizador de oxidoxido de hierro soportado en la oxidacion de acido benzoico por peroxido de hidrogeno . *Chemosphere*.
- Chou S, H. C. (1999). Efecto de F(II) en la oxidacion catalitica een un reactor de lecho fluidizado . *Chemosphere*.
- Chou S, L. C.-C.-H.-H. (2004). Factors influencing the preparation of iron oxide in fluidized-bed crystallization . *Chemosphere* .
- Chou S, L. C.-C.-H.-H. (2004). Factors influencing the preparation of iron oxside in fluidized-bed crystallization . *Chemosphere*.
- Coelho, A. C. (2006). *Treatment of petroleum refinery sourwater by advanced oxidation processes*.

Duran-Moreno, A. G.-G.-L. (2011). *Assessment of Fenton's reagent and ozonation as pre-treatments for increasing the biodegradability of aqueous diethanolamine solutions from an oil refinery gas sweetening proces.*

E Bocos, D. P.-A.-A. (2015). Electrodo de espuma de níquel recubierto para la aplicacion del tratamiento continuo electro-Fenton. *J Chem Technol Biotechnol.*

E Brillas, I. S. (2009). Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chem Rev.*

EM Matira, C. T.-C.-C. (2015). Degradación de dimetilsulfoxido a traves del proceso de lecho fluidizado de Fenton . *J Hazard Mater .*

Esplugas, S. G. (2002). *Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation.*

F Haber, J. W. (1934). La descomposicion catalitica del peroxido de hidrogeno por sales de hierro . *Proc R Soc Lond.*

F Tisa, A. R. (2014). Aplicabilidad del reactor de lecho fluidizado en la degradacion del compuesto recalcitrante a traves de procesos de oxidacion avanzados. *J Envirn Manage.*

Ghosh, P. S. (2010). *COD reduction of petrochemical industry wastewater using fenton's oxidation.*

Glaze. (1987). *The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and Ultraviolet radiation.*

Gomec C.Y., E. E. (2007). Advanced oxidation treatment of physico-chemically pre-treated olive mill industry effluent. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes.*

Hasan, D. A. (2012). *Oxidative mineralisation of petroleum refinery effluent using Fenton-like process.*

Höfl C., S. G. (1997). Oxidative degradation of AOX and COD by different advanced oxidation processes. A comparative study with two samples of a pharmaceutical wastewater. *Water Science and Technology .*

Homem, V. Z. (2009). Preliminary feasibility study of benzo(a)pyrene oxidative degradation by fenton treatment . *Journal of Environmental and Public Health.*

Hong, S. Z. (2007). Degradation of methyl tertiarybutyl ether (MTBE) by anodic Fenton treatment. *Journal of Hazardous Materials, 29-40.*

Hsueh C-L, H. Y.-H.-C.-Y. (2006). Degradacion photoassisted Fenton de azo-colorante no biodegradable (Negro rectivo 5) sobre una pelicula catalizador soportador de oxido de hierro a pH neutro. *J Mol Catal A-Chem.*

Hu, Q. Z. (2008). *Photodegradation of methyl tert-butyl ether (MTBE) by UV/H2O2 and UV/TiO2.*

Huang CP, H. Y. (2009). Estudio cinetico de un oxido de hierro inmovilizado para la degradacion catalitica del colorante negro azoico B reactivo con la descomposicion catalitica del peroxido de hidrogeno. *Catal Commun*.

Huang CP, H. Y. (2009). Estudio cinetico de un oxido de hierro inmovilizado para la degradacion catalitica del colorante negro azoico B reactivo con la descomposicion catalitica del peroxido de hidrogeno . *Catal Commun* .

Huang Y-H, S. C.-C.-P.-C. (2011). Comparacion de la degradacion catalitica de anilina por catalizadores de oxido de hierro inmovilizado. *Environ Eng Sci*.

Huang, C. D. (1993). *Advanced chemical oxidation* .

J Anotai, C. C. (2012). Tratamiento de aguas residuales TFT-LCD que contienen etanolamina mediante tecnologia Fenton de lecho fluidizado . *Bioresour Technol*.

J Anotai, S. C. (2010). Efecto del peroxido de hidrogeno en la oxidacion de la anilina mediante electro-Fenton y procesos de Fenton en lecho fluidizado. *J Hazard Mater*.

JG Yates, J. M. (1983). *Fundamentos de procesos quimicos de lecho fluidizado*. Estados Unidos : Butterworth.

Kavitha, V., Palanivelu, K.,. (2004). The role of ferrous ion in Fenton and photo-Fenton processes for the degradation of phenol.

Li H, R. P.-H. (2015). Mineraliztion of bisphenol a by photo-Fenton-like process using a waste iron oxide catalyst in a three-phase fluidized bed reactor . *J Taiwan Inst Chem E*.

Litter, M.I., & Quici, N. (2010). *Photochemical advanced oxidation processes for water and wastewater treatment*.

LM Bellotindos, L. M.-H.-C. (2014). Factores que afectan la degradacion del dimetilsulfoxido (DMSO) por el proceso de Fenton en lecho fluidizado . *Environ Sci Pollut Res* .

Lopez, R., Nuñez, O., Morales F., Calderon C., Liewald, W. (1999). Application of advanced oxidant systems in the treatment of residual waters in the petroleum industry (Fenton system). *Acta cientifica Venezolana* , (págs. 75-80).

M Zupanc T Kosiek, M. P. (2013). Eliminacion de productos famaceuticos de aguas residuales mediante procesos biologicos cavitacion hidrodinamica y tratamiento con UV . *Ultrason Sonochem*.

Maliková, P. H. (2009). *Oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fenton reaction* .

MDG de luna, L. B.-C. (2015). Extraccion y recuperacion de plomo en un reactor de lecho fluidizado por proceso de cristalizacion . *Hydrometall*.

Meric S., S. H. (2005). Acute toxicity removal in textile finishing wastewater by Fenton's oxidation, ozone and coagulation-flocculation processes . *Water Research*.

N Al-Havek, M. D. (1990). Oxidacion de fenoles en agua por peroxido de hidrogeno en ioones soportados por alumina . *Water Res*.

- N Boonrattanakij, L. M.-C. (2011). Iron Crystallization in a fluidized-bed fenton process. *Water Res.*
- Neyens E & Baeyens J. (2003). *A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation techni.*
- Papadopoulos A.E., F. D. (2007). Development and optimization of dark Fenton oxidation for the tratment of textile wastewaters with high organic load . *Journal of Hazardous Materials* .
- Patterson, C. C.-k. (2013). *Field Treatment of MTBE Contaminated Groundwater Using Ozone/UV Oxidation.*
- Pérez M., T. F.-H. (2002). Removal of organic contaminants in paper pulp treatment effluents under Fenton and photo-Fenton conditions .
- Pignatello JJ. Oliveros E, M. A. (2006). *Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction base on the Fenton reaction and relate Chemistry* .
- Poloni, M., Milena, C.. (2004). *Degradacion fotocatalitica de un derivado del 4,4'-BIS(1, 2, 3, 5-Triazinilamino)-estilbeno-2,2'-disulfonato en solucion acuosa por el Procesos fot-fenton* .
- Pontes, R. M. (2010). A mechanistic kinetic model for phenol drgradation by the fenton process.
- R. Idel-Aouad, M. V.-M. (2011). Rapida decoloracion y mineralizacion del colorante azoico CL Acid red 14 por reaccion heterogenea de Fenton. *J Hazard Mater* .
- Rivas F.L., B. F. (2001). Treatment of olive oil mill wastewater by Fenton's reagent. *Journal of agricultural and Food Chemistry*.
- S Garcia-Segura, L. A. (2011). Solar-Fenton degradacion del herbicida Acido 4-cloro -2-metilfenoxiacetico optimizado por la metodologia de superficie de respuesta . *J Hazard Mater*.
- San sebastián N., Figuls J., Font X., Sánchez A. (2003). Pre-oxidation of an extremely polluted industrial wastewater by the Fenton's reagent. *Journal of Hazardous Materiaals*.
- SE Pouran, A. A. (2015). Review sobre los principales avances en el sistema de oxidacion foto-Fenton para aguas residuales recalcitrantes . *J Ind Eng Chem* .