

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
SECCION DE POSGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACION**



**“REDUCCION DE COMPUESTOS FENOLICOS EN AGUAS  
RESIDUALES DE BAÑOS PORTATILES CON PROCESO DE  
OXIDACION QUIMICA AVANZADA OZONO-PEROXIDO DE  
HIDROGENO”**

**TESIS  
PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
CON MENCIÓN EN: TRATAMIENTO DE AGUAS Y REUSO DE  
DESECHOS**

**ELABORADO POR:  
Ing. ALEJANDRO QUICAÑO TAFUR**

**ASESOR:  
Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO**

**LIMA, PERÚ**

**2014**

**DEDICATORIA**

A mis padres Alejandro y Maria del Pilar, que me impulsaron a terminar este proyecto, a mi familia, Rosabel, Alexandra y Sofía, que alentaron las ganas más de culminar con la presente tesis.

**AGRADECIMIENTO**

Primordialmente agradecer al área de mantenimiento de LAP (Lima Airport Partners), concesionario del aeropuerto Internacional Jorge Chávez, institución que me brindó la infraestructura y todas las facilidades para realizar este proyecto.

A los profesores del área de maestría de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ingeniería, que nos brindaron su sabiduría en varios campos del conocimiento ayudándonos así en varios aspectos que requerí para el desarrollo de este proyecto.

A mi asesor de tesis, Dr. Raymundo Erazo, quien con su experiencia y consejos ayudo a culminar este proyecto.

## RESUMEN

En el Perú el desarrollo económico y el auge de los grandes y diversos proyectos, como la construcción, el transporte terrestre y aéreo, así como los campamentos de avanzada, han llevado al uso masivo de los baños portátiles o baños químicos. Estas unidades de uso en diversos sectores del desarrollo nacional, sirven para retener y evitar la contaminación por las evacuaciones humanas, sólidas y líquidas, en el lugar de generación. Desde el punto de vista ambiental, estas unidades son de gran ayuda para evitar impactos en los lugares donde son usados, pero se debe tener en cuenta que estos baños portátiles tienen en su composición elementos mucho más contaminantes que las propias descargas que recibe. En el Perú, no es conocido con exactitud el tratamiento que se aplica a los efluentes de los baños portátiles, y si los poco conocidos no son los más adecuados.

El presente trabajo de investigación experimental consiste en usar el proceso de oxidación química avanzada ozono-peróxido de hidrogeno para dar tratamiento y reducir los compuestos fenólicos, contaminante principal de las aguas residuales de estos baños portátiles.

En el experimento se usó agua residual de los baños portátiles del transporte aéreo nacional, similar en composición y características a los demás baños portátiles de otros sectores de la industria peruana.

10 litros de agua residual previamente cribadas fueron vertidas a un reactor de plástico, donde se le inyectó aire para homogenizar y mantener el licor en mezcla completa durante las reacciones químicas.

Se inyectó ozono desde un equipo ozonizador de 0.223 gr/h, con un caudal de aire ozonizado de 15 litros/minuto (constante) y peróxido de hidrogeno en diferentes concentraciones, de 0.25, 0.50, 1.00 y 2.00 molar.

En concentraciones de peróxido de 2.0 molar la reducción de los compuestos fenólicos hasta valores de 0.01 mg/l se dio en 3 horas de reacción, tiempo muy corto en comparación con la reacción con 0.25 molar, donde la reducción del compuesto fenólico a valor de 0.01 mg/l se dio en 28 horas.

Los tiempos de reacción para reducir el compuesto fenólico del agua residual del baño portátil va acompañado de la concentración del peróxido de hidrogeno, manteniendo la misma concentración al ozono y con una homogenización constante del licor de la mezcla.

**ABSTRACT:**

A system of treatment was developed to reduce the concentration of phenolic compounds from an initial concentration of 4 mg/L contained in wastewater from portable toilets generated in various commercial and industrial activities. For this purpose was applied the advanced chemical oxidation process ozono-peroxido of hydrogen ( $O_3/H_2O_2$ ). Residual water was used of the portable toilets of the national air transport, of which is taken 10 liters previously screened and are charged to a batch reactor, where is supplied air to homogenize and maintain agitation during the process. Using an ozonator equipment is injected  $O_3$  with 0.2 g/h , with a flow of air ozonized of 15 L/min and  $H_2O_2$  at concentrations of 0.25, 0.50, 1.00 and 2.00 molar. The results show that for the concentration of  $O_3$  of 0.223 mg/L, with the concentration of  $H_2O_2$  of molar 2.0, the reduction of phenolic compounds to values of 0.01 mg/L, (Peruvian environmental standard), occurred in 3 hours of reaction, very short time compared to the reaction with 0.25 molar, where the reduction of the phenolic compound occurred in 28 hours. I.e., the speed of decomposition of phenol depends strongly on the concentration of  $H_2O_2$  and is the main promoter of formation of OH- hydroxyl radicals. Under these conditions, the laboratory analysis also reports that the organic load contained in the wastewater of the portable toilets is reduced to 87% of its initial value, which is attributed to the presence of the OH- hydroxyl radicals and it makes viable the subsequent treatment with conventional system. Both the pH and the temperature of process do not vary significantly. It performs an economic analysis of the treatment system, what was estimated in a total cost of \$ 0.117 USD/m<sup>3</sup> of wastewater treated and is shown the technical, economic and environmental treatment system feasibility.

**INDICE****CAPITULO I: INTRODUCCION**

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Justificación
- 1.3. Marco Legal
- 1.4. Problema Científico
  - 1.4.1. Problema General
  - 1.4.2. Problema Secundario
- 1.5. Hipótesis
  - 1.5.1. Hipótesis Principal
  - 1.5.2. Hipótesis Secundarias

**CAPITULO II: MARCO TEORICO**

- 2.1. Baño portátil o baño químico
- 2.2. Aguas residuales Industriales
- 2.3. Aguas residuales de baños portátiles
- 2.4. Principales componentes de las aguas residuales de los baños portátiles
- 2.5. Investigaciones previas de procesos de oxidación química avanzada
- 2.6. Procesos de oxidación química avanzada
  - 2.6.1. Ventajas y desventajas de los procesos de oxidación química avanzada
- 2.7. Impactos de la calidad del agua residual en el proceso de oxidación química avanzada.
  - 2.7.1. Alcalinidad
  - 2.7.2. Nitratos y nitritos
  - 2.7.3. Fosfatos y sulfatos
  - 2.7.4. Hierro (II), Cobre (I) o Manganeseo (II)
  - 2.7.5. Turbidez
  - 2.7.6. Temperatura
- 2.8. Proceso de oxidación química avanzada ozono-peróxido de hidrogeno
  - 2.8.1. Ventajas y desventajas del sistema ozono/peróxido de hidrogeno.
  - 2.8.2. Ozono
    - 2.8.2.1. Características
    - 2.8.2.2. Aplicaciones del ozono
  - 2.8.3. Peróxido de hidrogeno

2.8.3.1. Características

2.8.3.2. Aplicaciones del peróxido de hidrógeno para tratamiento  
de aguas residuales

CAPITULO III: OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

3.2. Objetivos Específicos

CAPITULO IV: MATERIALES Y METODOS

4.1. Materiales:

4.2. Método Experimental

4.2.1. Características fisicoquímicas de las muestras de agua residual

4.2.2. Metodología

4.3. Diseño muestral:

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1. Resultados de análisis de muestras

CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Discusión de los resultados

6.2. Eficiencia de otros procesos de oxidación química avanzada

6.3. Análisis de costos

CAPITULO VII: CONCLUSIONES

CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES

CAPITULO IX: FUENTES DE INFORMACION

CAPITULO X: ANEXOS

## **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. ANTECEDENTES**

El problema de la destrucción eficiente de contaminantes orgánicos ha llevado al desarrollo de los llamados procesos avanzados de oxidación. Estos permiten en ocasiones destruir completamente los contaminantes orgánicos, mineralizándolos, al realizarse reacciones hasta convertirlos en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Otras veces producen compuestos más deseables que los compuestos originales (como ácidos minerales diluidos), dependiendo del tipo de molécula a tratar, revista Lasallista de Investigación, año/Vol. 4, numero 02, Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia, pp. 24-31.

Una consecuencia de la elevada reactividad del agente oxidante es que los procesos avanzados de oxidación se caracterizan también por su baja selectividad, lo que sin embargo es una característica deseable en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales. Se trata de procesos que utilizan reactivos relativamente costosos tales como el agua oxigenada o el ozono, por lo que su utilización debe restringirse a situaciones en las que otros procesos más baratos, como los biológicos, no sean posibles, Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME). IV Programa Regional de Ciencia y Tecnología de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid.

El uso de baños portátiles en el Perú se ha incrementado enormemente, debido en gran medida al auge de los sectores de construcción, transporte aéreo y terrestre y otros rubros importantes de la economía peruana, pero, la legislación sobre las aguas residuales de estos baños portátiles y su debida disposición final es obsoleta, Revista IAMA edición diciembre del 2007.

El uso de los baños portátiles disminuye o elimina las descargas biológicas de las personas que se puedan enviar al medio ambiente.

Es importante que las aguas residuales contenidas en estos baños portátiles, sean tratadas adecuadamente para evitar de esta manera la contaminación medioambiental que evito al inicio.

Existen antecedentes sobre la utilización de procesos de oxidación química avanzada, como el ozono-peróxido, el ozono-peróxido-UV, para eliminar compuestos orgánicos en aguas residuales industriales, mencionaremos algunos:

Foto degradación de colorante textil negro 22 con proceso de oxidación UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>. Las aguas residuales de la industria textil constituyen un gran contaminante ambiental puesto que generan una gran cantidad de colorantes que son tóxicos para el medio ambiente y el tratamiento para la purificación de estos efluentes acuosos adquiere una gran importancia día a día. Los procesos avanzados de oxidación son una respuesta al problema de contaminación ambiental de aguas. En esta investigación se utilizó luz ultravioleta, ozono y peróxido de hidrogeno para generar radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ), los cuales tienen alto potencial de oxidación y pueden utilizarse para la degradación oxidativa de compuestos orgánicos contaminantes del agua.

Los resultados de esta investigación mencionan que el colorante directo negro 22 se logró degradar en un lapso ente 5 y 40 minutos dependiendo de la concentración utilizada en los experimentos y se alcanzó un porcentaje de degradación del 99% en cada una de las concentraciones utilizadas, el valor obtenido de la DQO del agua irradiada con concentración inicial de 500 ppm fue de 25 mg/L. (Gamaliel Che, Fernando Hernández, Gunther Geissler. Facultad de Ingeniería Química. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Ciudad Universitaria, Edif. 76, Col. Jardines de San Manuel, Puebla, Pue. C.P. 72570. Fax. 2295517).

Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. En esta investigación se explora la aplicación de tecnologías de oxidación avanzada en las aguas residuales típicas del proceso de refinación de crudo, como tratamiento para la mineralización de compuestos orgánicos, especialmente aromáticos de gran importancia, dada su toxicidad aún a muy bajas

concentraciones, su resistencia a los tratamientos tradicionales especialmente los biológicos, los costos de tratamiento y las normas ambientales cada vez más exigentes.

Las evaluaciones del tratamiento se efectuaron determinando los cambios de la concentración de los compuestos fenólicos en función del tiempo, la concentración de los agentes oxidantes, el pH tanto para aguas industriales como para las aguas sintéticas de concentración similar a las industriales con el fin de determinar la influencia de la complejidad de las mezclas sobre las eficiencias de la reacción.

Se debe tener en cuenta que para que haya una eficiente remoción de los compuestos orgánicos se requiere de una combinación de tratamientos básicos tales como la oxidación química, despojo por aire, extracción líquido-líquido, absorción, ósmosis inversa, ultra filtración, o tratamiento biológico. Estos son clasificados como destructivos y no destructivos y son usados según el elemento contaminante, la concentración y el caudal de la corriente a tratar. Sin embargo, estos procesos no son la solución total. Por esta razón se han desarrollado procesos de oxidación más eficientes llamados Procesos Avanzados de Oxidación (AOP) los cuales son aplicados generalmente en pequeña o mediana escala y especialmente en donde los métodos convencionales pierden eficiencia. (Jorge-Enrique Forero\*1, Olga-Patricia Ortiz<sup>2</sup> y Fabián Rios<sup>3</sup>; 1 Ecopetrol S.A. - ICP Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia; 2 UIS - Universidad Industrial de Santander - Escuela de Ingeniería de Petróleos-, Bucaramanga, Santander, Colombia; 3 Texas University, USA. (Recibido Junio 13 de 2005; Aceptado Diciembre 7 de 2005).

## 1.2. JUSTIFICACION

El presente trabajo estudia la solución del problema del tratamiento adecuado de las aguas residuales de los baños portátiles al permitir reducir la contaminación de estos efluentes antes de verterlos a las líneas de desagüe de la ciudad u otros cuerpos receptores.

En el Perú, en instituciones como DIGESA o el Ministerio del Medio Ambiente no existe información o una base de datos sobre el tipo de tratamiento o la disposición final de las aguas residuales producto de los alquileres de los baños portátiles.

Los efluentes residuales de los baños portátiles son consideradas aguas residuales industriales. Estas aguas son descargadas a la red de desagüe municipal sin tratamiento alguno y muy pocas le dan el tratamiento primario e insuficiente en pozos sépticos, como se pudo comprobar en las empresas que brindan el servicio de alquiler de estos baños portátiles. Los efluentes con alta carga química y tóxica de los baños portátiles son vertidos a la línea de desagüe municipal sin un tratamiento adecuado previo, y como consecuencias directas de estas acciones, contaminan los cuerpos receptores, disminuyen la posibilidad de un tratamiento biológico aguas abajo, provocan acumulación de compuestos xenobiótico en los ecosistemas marinos, bioacumulación, alteran las propiedades fisicoquímicas de los cuerpos receptores, disminuyen la vida útil de las líneas que trasladan estas aguas residuales entre otras.

Los generadores de aguas residuales industriales aún no incorporan la opción del tratamiento adecuado y el reuso por las siguientes razones:

- No existe conciencia del enfoque integral del manejo de las aguas residuales industriales para alcanzar el desarrollo sostenible de la ciudad.
- El empresario local no ha comprendido que los efluentes debidamente tratados y reusado en sus propios procesos productivos tiene un alto ahorro económico, al dejar de usar agua limpia con costos elevados.

- La legislación sobre tratamiento de aguas residuales industriales y especialmente sobre el reuso de este recurso es aún muy limitada.
- La poca participación activa de la comunidad y de los especialistas en la elección de tecnologías apropiadas para tratar las aguas residuales industriales, permite que las empresas adopten tecnologías de alto costo y que no logran las exigencias de calidad sanitaria requeridas para su reuso. Inclusive por el alto costo no incluyan en su plan de trabajo tratar los efluentes de su proceso industrial

Las empresas que utilizan los baños químicos portátiles como un negocio prospero, además de los usuarios finales, deben preocuparse por el impacto ambiental que se genera cuando descargan las aguas residuales de estos baños portátiles a la línea de desagüe municipal sin tratamiento previo. Deben asegurarse que la disposición final de estas aguas residuales sea adecuada y así contribuir, de alguna manera, con el manejo adecuado del ambiente en la zona donde se explotan estas unidades.

### **1.3. MARCO LEGAL**

#### **Ley de Recursos Hídricos**

Ley 29338 del 30 de marzo del 2010 y su reglamento.

La mencionada Ley en los artículos 79, 80 y 83, se refiere vertimiento de agua residual tratada, la autorización de vertimiento de agua residual tratada y prohibición de vertimiento de algunas sustancias a los cuerpos de de agua.

Vertimientos de aguas residuales tratadas

En su artículo 132.2 se menciona que las aguas residuales municipales pueden incluir la mezcla con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial siempre que éstas cumplan con los requisitos para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.

Las Condiciones para autorizar el vertimiento de aguas residuales tratadas son las siguientes:

La Autoridad Nacional del Agua ANA podrá autorizar el vertimiento de aguas residuales únicamente cuando:

- a. Las aguas residuales sean sometidas a un tratamiento previo, que permitan el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles – LMP
- b. No se transgredan los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, ECA - Agua en el cuerpo receptor, según las disposiciones que dicte el Ministerio del Ambiente para su implementación.
- c. Las condiciones del cuerpo receptor permitan los procesos naturales de purificación.
- d. No se cause perjuicio a otro uso en cantidad o calidad del agua.
- e. No se afecte la conservación del ambiente acuático.
- f. Se cuente con el instrumento ambiental aprobado por la autoridad ambiental sectorial competente.
- g. Su lanzamiento submarino o subacuático, con tratamiento previo, no cause perjuicio al ecosistema y otras actividades lacustre, fluviales o marino costeras, según corresponda.

El instrumento ambiental a que se refiere el artículo 80º de la Ley, debe contemplar el sistema de tratamiento de aguas residuales y el efecto del vertimiento en el cuerpo receptor.

Ningún vertimiento de aguas residuales podrá ser efectuado en las aguas marítimas o continentales del país, sin la autorización del ANA.

### **Ley General del Ambiente, Ley 28611**

Publicada el 13 de octubre del año 2005, deja sin efecto el Código del Medio Ambiente y Los Recursos Naturales D.S No 613 (1990), Esta norma reconoce los derechos de toda persona a gozar de un ambiente saludable y a participar responsablemente en los procesos de toma de decisiones, así como en la definición y aplicación de las políticas y medidas relativas al ambiente y sus componentes, que se adopten en cada uno de los niveles de gobierno.

Art. 31. Del Estándar de Calidad Ambiental (ECA)

31.2. El ECA es obligatorio en el diseño de normas técnicas legales públicas, es un referente obligatorio en la aplicación de los instrumentos de gestión ambiental.

Art. 32 Del Limite Máximo Permissible, o LMP.

32.1. El LMP es la medida de la concentración o del grado de los elementos o parámetros físicos, químicos, biológicos que caracterizan a una emisión o afluente y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente.

Art. 122. Del tratamiento de residuos líquidos.

122.3. Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas u otras que generen aguas residuales, son responsables de su tratamiento a fin de reducir los niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, el manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador.

### **Código Penal (03.04.91), D.L N 635**

En su Título XIII "Delitos Contra la Ecología", se establecen los comportamientos o conductas que, de verificarse en la realidad, constituirán los llamados delitos ecológicos o delitos contra la ecología, siendo los más importantes los siguientes:

- Contaminación del medio ambiente;
- Formas agravadas de contaminación del medio ambiente;
- Responsabilidad del funcionario público por otorgamiento ilegal de licencias,
- Desechos industriales o domésticos;
- Depredación de flora y fauna legalmente protegidas;
- Extracción de especies acuáticas prohibidas;
- Depredación de bosques protegidos;
- Uso indebido de tierras agrícolas;
- Autorización ilícita de habilitación urbana;
- Alteración del ambiente o paisaje.

### **Valores Máximos Admisibles (VMA), DS-021-2009-Vivienda**

En su artículo 1, la presente norma regula mediante Valores Máximos Admisibles (VMA) las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar

su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

Los VMA (ver en anexos, cuadros IX y X), son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas residuales no domésticas en el alcantarillado sanitario; su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento (SEDAPAL). En sus disposiciones finales la presente norma entró en vigencia a partir de la aprobación de su Reglamento mediante el D.S. N° 003-2011-VIVIENDA, vigente a partir del 22 de junio de 2011.

Los usuarios que a la fecha de entrada en vigencia del presente D.S., se encuentran efectuando descargas de aguas residuales no domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario, deberán adecuar sus descargas a las disposiciones establecidas en la presente norma, en un plazo no mayor de cinco (05) años.

En el caso de nuevos usuarios del sistema de alcantarillado sanitario las disposiciones de la presente norma son de aplicación inmediata.

#### **1.4. PROBLEMA CIENTIFICO**

Las aguas residuales de los baños portátiles son consideradas aguas residuales industriales.

La alta carga contaminante -entre los principales y más tóxicos, los compuestos fenólicos- de las aguas residuales procedentes de los baños portátiles, hace que sea necesario y obligatorio el tratamiento adecuado antes de verterlo en los sistemas de alcantarillado sanitario. Los contaminantes allí presentes alteran las composiciones y características físicas, químicas y biológicas de un desagüe doméstico, lo que traslada el problema al cuerpo receptor, al no poder este, de manera natural degradar estos compuestos altamente tóxicos para el ecosistema.

La acumulación de estos compuestos químicos tóxicos en el cuerpo receptor produce alteraciones en las propiedades biológicas de los microorganismos que habitan en él, (Luppi, L. I. Comité de Bioseguridad

(Hospital Churruca-Visca), 4ta Jornada de Desarrollo e Innovación, Noviembre 2002, Buenos Aires, Argentina.)

Estos compuestos químicos tóxicos presentes en el agua residual de la línea municipal disminuyen la posibilidad de un tratamiento biológico aguas abajo, debido a que estos compuestos alteran o inactivan las comunidades de microorganismos que degradan exclusivamente materia orgánica, (A. Boudou, F. Ribeyre, "Aquatic Ecotoxicology: From the Ecosystem to the Cellular and Molecular Levels" Environmental Health Perspectives. Vol 105. Supplement 1, Feb 1997.)

Existen procesos de oxidación química avanzada que pueden utilizarse para tratar las aguas residuales de los baños portátiles, Advanced Oxidation Processes Literature Review Sunil Kommineni, Ph.D.

Los compuestos fenólicos están presentes en los efluentes de numerosas industrias, entre las que destacan las siguientes: química (detergentes, colorantes, pesticidas, explosivos, producción de resinas, nylon, plastificantes, desinfectantes, biocidas, drogas, aditivos para aceites), petroquímica (refino del petróleo), farmacéutica, galvánica, textil, agroalimentaria (vinícola, oleica), forestal (papel, pulpa), siderúrgica y fotográfica (reveladores), entre otras. La industria que contribuye más a la producción de este tipo de residuos, en España, es la química, responsable de alrededor de un tercio de todos los que se generan.

Como es sabido, los compuestos aromáticos como el fenol y sus derivados son sustancias corrosivas y tóxicas, siendo peligrosos para la salud humana y para el medio ambiente; su impacto negativo se ve agravado porque son difíciles de degradar y eliminar [Gómez J. Producción limpia en el campo de los Tratamientos Superficiales. Jornadas de Producción Limpia. Universidad de la Rioja (2004)].

La creciente preocupación de la sociedad sobre este tema y la problemática medioambiental que genera ha llevado a delimitar los niveles máximos permitidos de compuestos fenólicos en efluentes

industriales, en función del tipo de cauce donde son vertidos y los usos de los mismos.

El problema de contaminación en los cuerpos de aguas por compuestos fenólicos provenientes de las aguas residuales de los baños portátiles es actual y vigente, por lo tanto, el problema de investigación se puede plantear como sigue:

#### **1.4.1 Problema General:**

- ¿Se puede reducir la contaminación por compuesto fenólicos en las aguas residuales de los baños portátiles usando el proceso químico avanzado  $O_3/H_2O_2$ ?

#### **1.4.2 Problemas Secundarios**

- ¿Será factible determinar la relación óptima  $O_3/H_2O_2$  para reducir compuestos fenólicos de las aguas residuales de baños portátiles?
- ¿Cuál será la eficiencia de remoción de compuestos fenólicos de las aguas residuales de baños portátiles con el proceso con oxidación avanzada  $O_3/H_2O_2$ ?
- ¿Cuál será la calidad del efluente para un posible tratamiento biológico posterior?

### **1.5. HIPOTESIS**

#### **1.5.1 Hipótesis principal**

- El proceso de oxidación química avanzada  $O_3/H_2O_2$  reducirá la contaminación por compuestos fenólicos de las aguas residuales de los baños portátiles.

#### **1.5.2 Hipótesis secundarias**

- Existe una relación óptima  $O_3/H_2O_2$  que reduce los compuestos fenólicos de las aguas residuales de baños portátiles.

- La remoción de los compuestos fenólicos de las aguas residuales de baños portátiles con el proceso con oxidación avanzada  $O_3/H_2O_2$  es eficiente.
- La calidad del efluente es bueno para un posible tratamiento biológico posterior.

## **CAPITULO II. MARCO TEORICO**

### **2.1. Baño Portátil o Baño Químico:**

Es una cabina personal, el cual contiene un recipiente hermético en la parte inferior del mismo, donde se almacenan los residuos orgánicos sólidos y líquidos generados por las personas que la utilizan. Generalmente viene con un tubo que va desde el recipiente hermético hasta la parte superior exterior de la cabina para ventear los gases que se forman en él. El recipiente hermético, además de agua, contiene elementos químicos en polvo o líquido que secuestran los olores que generan los residuos albergados en él, evitando también que las descargas de los humanos vayan directamente al medio ambiente. Ver foto I y II en anexos.

### **2.2. Aguas Residuales Industriales:**

Se refiere a las aguas procedentes de actividades industriales y agropecuarias que presentan características físicas, químicas o biológicas dañinas a la salud humana, animal o al ecosistema. Las aguas residuales se caracterizan por contener en él grandes concentraciones de componentes tóxicos para el medio ambiente. Este grado de toxicidad hace necesario un tratamiento antes de ser vertido a cualquier cuerpo receptor. Las aguas residuales procedentes de los baños portátiles son consideradas aguas residuales industriales, por el alto contenido de sustancias tóxicas para el medio ambiente.

### **2.3. Aguas Residuales de Baños Portátiles:**

Las aguas residuales de los baños químicos o portátiles se caracterizan por contener en pequeños volúmenes grandes concentraciones de compuestos químicos tóxicos para el medio ambiente. Debido a la alta toxicidad de los componentes presentes en estas aguas residuales, son consideradas aguas residuales industriales. Ver fotos III, IV, V y VI en anexos.

#### **2.4. Principales Componentes de las Aguas Residuales de Baños Portátiles:**

En el cuadro I, se mencionan los principales compuestos químicos contenidos en las aguas residuales de los baños portátiles, esta información fue sustraída de los envases comerciales de estos productos en diferentes presentaciones, sólidos y líquidos, que se distribuyen en el muy poco difundido negocio de los baños químicos portátiles, estos datos fueron recolectados por este investigador entre Abril 2005 a Octubre del 2010, en lugares donde se usa insumos para estas unidades, como por ejemplo, proyectos como Melchorita, de Perú LNG en Cañete-Chincha, Compañía Minera Milpo en la unidad Cerro Lindo, Compañía Minera Cerro Verde, el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, en donde se tienen baños portátiles en superficie y baños portátiles en las aeronaves.

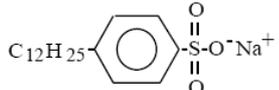
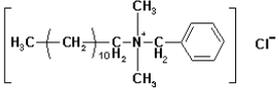
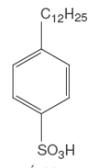
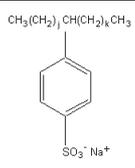
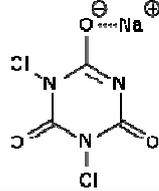
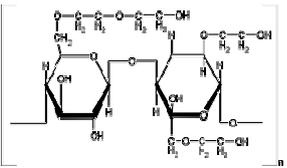
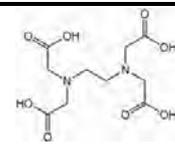
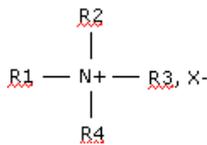
Los insumos principales de los baños portátiles son compuestos sólidos en polvo o granulados y vienen en presentaciones en bolsas de concentrado de 20 a 30 gramos y son diluidos en un volumen determinado de agua para luego ser acondicionados en un receptáculo interior del baño portátil ubicado cerca o encima al inodoro, desde donde son vertidos con cada descarga que se efectúe.

La presentación en estado líquido viene en galones semiconcentrados y se mezclan con agua y se depositan en el receptáculo interior del baño portátil ubicado cerca o encima del inodoro, desde donde son vertidos con cada descarga que se efectúe.

Existen otras presentaciones en pastillas sólidas, tipo pato tanque, donde estas son introducidas en el fondo del receptáculo del baño portátil y con el tiempo de residencia empiezan a colorar y mezclarse con el agua contenida en este sector, para luego ser vertidas en cada descarga que se efectúe.

Para el mantenimiento y evacuación de las aguas residuales de los baños portátiles debe ser manejada por personal instruido y con el uso de sus equipos de protección personal. Ver fotos VII, VIII y IX en anexos.

**Cuadro I. Principales componentes químicos de baños portátiles**

COMPUESTO QUÍMICO	FORMULA QUIMICA	FORMULA ESPACIAL
DODECIL BENCENO SULFONATO DE SODIO	$C_{18}H_{29}NaO_3S$	
CLORURO DE BENZALCONIO (n-alquil bencil cloruro de amonio)	$C_9H_{13}ClNR$ R= numero alquilos	
ACIDO DODECIL BENCEN SULFONICO	$C_{18}H_{30}O_3S$	 Ácido Dodecylbenzen-sulfónico
ALQUIL BENCEN SULFONATO DE SODIO	$C_{11.6}H_{24.2}C_6H_4SO_3Na$	
DICLOROISOCIANURATO DE SODIO (tricloseno sódico)	$C_3N_3O_3Cl_2Na$	
HIDROXIETIL CELULOSA	$[(C_6H_9O_5)(C_2H_4O)xH]n$	
EDTA (acido etilendiaminotetraacetico)	$C_{10}H_{16}N_2O_8$	
CUATERNARIO DE AMONIO		

La nomenclatura, formulas, nombres y características fueron extraídas de los envases de estos compuestos y del manual del Ingeniero Químico, Robert Perry, 6ta edición, en español.

Estos son los componentes principales, pero también existen otros como el Sulfato de sodio, Cloruro de didecil dimetil amonio, Cloruro de dioctilo dimetil amonio, Formaldehído, Glutaraldehido, Oxido de etileno etoxilado, azul de metileno, Nonil fenol, Alcohol etílico, urea, colorantes y perfumes.

Algunos de los componentes químicos mencionados, en combinaciones, son agregados al recipiente hermético del baño portátil en forma de polvo o líquido, que al mezclarse con agua y con los residuos generados por el hombre, forman las aguas residuales de los baños portátiles.

La mayoría de los componentes químicos usados en los baños portátiles para retener los olores, son considerados tóxicos para cualquier ecosistema, principalmente por no ser biodegradables, ya que contienen enlaces dobles, cadenas cíclicas (bencénicas y fenólicas) que son difíciles de romper. Son estos compuestos lo que dan características a las aguas residuales de los baños portátiles y por lo tanto denominarlos aguas residuales industriales.

Los compuestos fenólicos son los principales integrantes de las aguas residuales de los baños portátiles, y es por tanto el elemento a remover o a reducir en el tratamiento propuesto en esta investigación.

En el Perú, debido a la falta de leyes que limiten el uso indiscriminado de compuestos elevadamente tóxicos para el medio ambiente, así como el acceso sin restricciones y el bajo costo en el mercado, el uso de estos componentes químicos tóxicos se hace masivo. En la actualidad las empresas que usan y alquilan estos baños portátiles se han incrementado enormemente.

## **2.5. Investigaciones previas de procesos de oxidación química avanzada:**

Existen innumerables estudios de investigación sobre procesos de oxidación química avanzada, utilizando ozono-peroxido de hidrogeno,

para reducir o eliminar la contaminación de compuestos químicos de aguas residuales. Citamos algunos:

En la edición WWI de Octubre del 2004 de la revista Water and Wastewater International, se publico el articulo Advance Oxidation Process, reduces 1,4-dioxane to <3ppb in groundwater, donde se utilizó el sistema Ozono/peroxido en el proceso de oxidación avanzada para reducir los valores de 1,4-dioxano en aguas subterráneas. El desarrollo de la aplicación fue realiza por Applied Process Technology, Inc. of Pleasant Hill, California, USA. Estos trabajos indican que los procesos de oxidación química avanzada son efectivos donde el proceso biológico fracasa.

En diciembre del 2006, Urszula Kepa, Ewa Stanczyk-Mazanek y Longina Stepniak, usaron procesos de oxidación avanzada con el sistema ozono/peroxido de hidrogeno para la remoción del cianuro del agua (Technical University of Czestochowa, Institute of Environmental Engineering, Brzeznicza 60a, 42-200 Czestochowa, Poland).

Existen investigaciones utilizando los procesos de oxidación avanzada para oxidar el MTBE, metil terbutil éter,  $C_5H_{12}O$ , compuesto que eleva el detonante u octanaje a las gasolinas. (Advanced Oxidation Processes, Sunil Kommineni, Ph.D., Jeffrey Zoeckler, page 303-390, 1997), ver cuadro 02 en anexos.

Pero existen muy pocos trabajos sobre la aplicación de estos procesos sobre compuestos fenólicos, mencionamos dos trabajos de investigación: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002, Clementina R. Ramírez Cortina presentó el trabajo: Oxidación de fenoles con peróxido de hidrógeno y ozono, desarrollado en laboratorio con reactivos fenólicos químicamente puros.

En Junio del 2005, ECOPETROL S.A. - ICP Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia - Universidad Industrial de Santander - Escuela de Ingeniería de Petróleos-,

Bucaramanga, Santander, Colombia presenta el trabajo de Jorge-Enrique Forero, Olga-Patricia Ortiz y Fabián Ríos, Aplicación de procesos de oxidación química avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería donde se explora la aplicación de tecnologías de oxidación avanzada en las aguas residuales típicas del proceso de refinación de crudo, como tratamiento para la mineralización de compuestos orgánicos, especialmente aromáticos de gran importancia, dada su toxicidad aún a muy bajas concentraciones, su resistencia a los tratamientos tradicionales especialmente los biológicos, los costos de tratamiento y las normas ambientales cada vez más exigentes. En este documento se exploró los procesos conocidos como oxidación avanzada, ozonización en medio básica y ozonización con peróxido de hidrógeno, los cuales han sido reportados entre los de mayor potencial en el tratamiento de estos contaminantes.

Actualmente no existe trabajo de investigación sobre Proceso Químico de Oxidación Avanzada Ozono-Peróxido de hidrogeno para aguas residuales de baños portátiles que contienen compuestos fenólicos como principal contaminante además de otros.

## **2.6. Procesos de oxidación química avanzada:**

Los procedimientos avanzados de oxidación (Advanced Oxidation Processes, AOP) se definen como "aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos del medio". Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales hidroxilos y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan. Los más comunes utilizan combinaciones de ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta y foto catálisis. Una consecuencia de la elevada reactividad del agente oxidante es que los procesos avanzados de oxidación se caracterizan también por su baja selectividad, lo que sin embargo es una característica deseable en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales. Se trata de procesos que utilizan reactivos ligeramente costosos tales como el agua oxigenada

o el ozono, por lo que su utilización debe restringirse a situaciones en las que otros procesos más baratos, como los biológicos, no sean posibles.

Los procesos avanzados de oxidación permiten destruir una gran variedad de compuestos tóxicos y peligrosos aún en bajas concentraciones, que son persistentes a la degradación natural. Estos procesos se han venido desarrollando desde la década pasada y han probado ser efectivos en la destrucción de muchos contaminantes orgánicos.

La clasificación de los procesos de oxidación avanzada es:

Tecnología Establecida

- Peroxido de Hidrogeno/Ozono ( $H_2O_2/O_3$ )
- Ozono/Irradiación Ultravioleta ( $O_3/UV$ )
- Peroxido de Hidrogeno/Irradiación Ultravioleta ( $H_2O_2/UV$ )

Tecnología Emergente

- Irradiación de electrón de alta energía (E-beam)
- Cavitación (Ultrasonido e Hidrodinámica)
- Catalizador  $TiO_2$ -Oxidación UV
- Reacción de Fenton

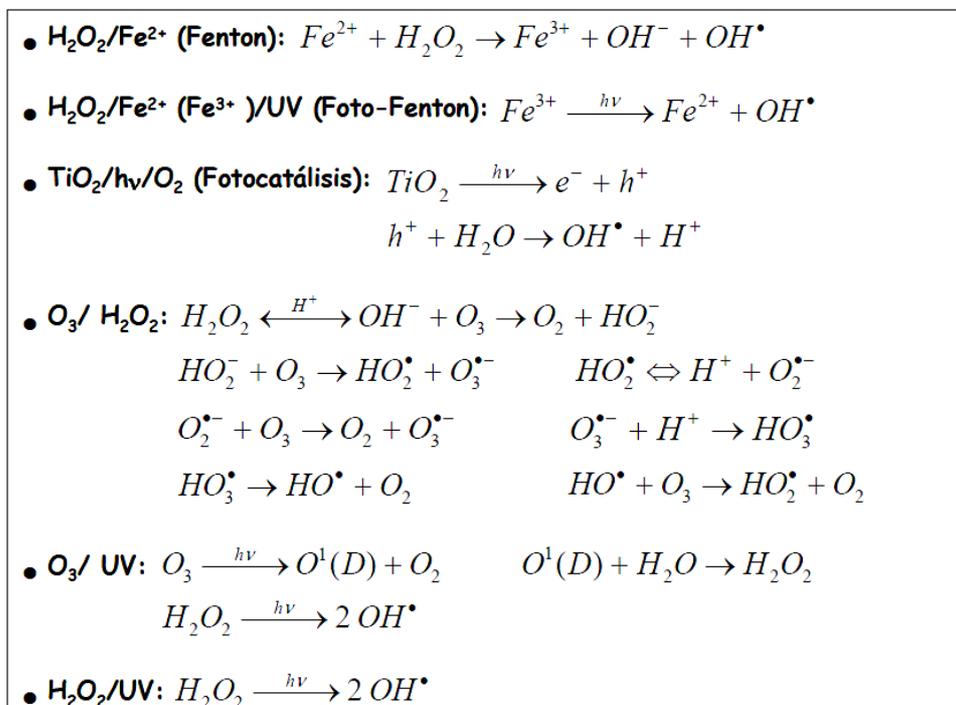
Procesos de oxidación avanzada (AOPs) combinan ozono ( $O_3$ ), los rayos ultravioleta (UV), el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y/o catalizador para ofrecer una solución de tratamiento de agua de gran alcance para la reducción o eliminación de los compuestos orgánicos residuales, medido por la DQO, DBO o TOC. Todos los AOP están diseñados para producir radicales hidroxilo, quienes actúan con una alta eficiencia para destruir los compuestos orgánicos.

La siguiente tabla muestra el poder oxidante que tiene el radical hidroxilo en comparación con otros oxidantes.

**Cuadro II. Potencial de oxidación de compuestos químicos.**

Agente Oxidante	EOP (mV)	EOP vs. Cl <sub>2</sub>
Radical hidroxilo	2.80	2.05
Oxígeno atómico	2.42	1.78
Ozono	2.08	1.52
Peróxido de Hidrogeno	1.78	1.30
Hipoclorito	1.49	1.10
Cloro	1.36	1.00
Dióxido de Cloro	1.27	0.93
Oxígeno (molecular)	1.23	0.90

El proceso de oxidación avanzada se utiliza con éxito para descomponer muchos compuestos químicos peligrosos a niveles aceptables, sin producir otros subproductos peligrosos o de lodos que requieren una mayor manipulación.

**Cuadro III. Reacciones de oxidación química avanzada**

El cuadro III, extraído del Advanced Oxidation Processes, Literature Review, Sunil Kommineni, Ph.D.

Los procesos de oxidación avanzada han tenido bastantes aplicaciones en tratamiento de aguas con pesticidas, a continuación en la tabla 03 se muestran los diferentes procesos AOPs para los distintos tipos de pesticidas usados en la agricultura, donde se menciona el autor del trabajo de investigación.

**Cuadro IV. Procesos de oxidación avanzada aplicados para remoción de plaguicidas.**

Plaguicida	Referencia	AOPs Aplicado	Evaluación de PDs
	Sun y Pignatello, 1993b.	Foto-Fenton	GC-MS
	Sun y Pignatello, 1993a.	Foto-Fenton	GC-MS
DBCP	Glaze y col., 1989.	O <sub>3</sub>	GC-MS
	Haag y col., 1992.	Foto-Fenton O <sub>3</sub> Cu <sup>2+</sup> /isopropanol	GC-MS GC-ECD HPLC-DAD
DCB	Muszkat y col., 1992.	TiO <sub>2</sub>	GC-MS
DDT	Chiron y col., 1997.	Foto-Fenton TiO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	GC-MS/EI y CI LC-MS/API GC-NPD GC-ECD SPE
	Galadi y col., 1995.	Foto-Fenton TiO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	GC-MS/EI GC-FID
	Zaleska y col., 2000.	TiO <sub>2</sub>	GC-MS GC-ECD SPME

Cuadro IV extraído Advanced Oxidation Processes Literature Review Sunil Kommineni, Ph.D. Los procesos de oxidación avanzada han basado su éxito, a escala laboratorio, en que han sido capaces de degradar completamente compuestos orgánicos refractarios, tales como pesticidas, compuestos organoclorados, fenoles, tensioactivos, etc. La generación, en el medio de reacción, de especies altamente oxidantes y reactivas, permite aumentar la velocidad de degradación de los compuestos orgánicos tóxicos en el medio [Coz A. Tratamiento de efluentes fenólicos de la industria de la celulosa. Procesos de oxidación avanzada. Dpto. de Ingeniería Química y Química Inorgánica. Universidad de Cantabria.].

### **2.6.1. Ventajas y desventajas de los procesos de oxidación química avanzada.**

Las ventajas o beneficios son:

- Rápida velocidad de reacción.
- Potencial para reducir la toxicidad y, posiblemente, la mineralización completa de compuestos orgánicos tratados.
- No produce materiales que requieren tratamiento adicional, como "carbón gastado" debido a la absorción de carbón activado.
- No crea lodo como los procesos físicos, químicos o biológicos de lodos biológicos
- No permite vía selectiva para el tratamiento de materia orgánica múltiple a la vez

Las desventajas son las siguientes:

- Ligeramente Costoso
- Química compleja por lo que debe adaptarse a aplicaciones específicas.
- Para algunas aplicaciones de temple se requerirá exceso de peróxido.

### **2.7. Impactos de la calidad del agua residual en el proceso de oxidación química avanzada.**

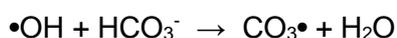
Hay muchos parámetros de calidad del agua que pueden afectar a la efectividad de cualquier proceso de oxidación química avanzada. Por ejemplo, casi todos los compuestos orgánicos disueltos presentes en el agua residual a tratar servirá para reducir la eficiencia de remoción del compuesto de destino mediante el consumo de  $\text{OH}^\bullet$  (Hoigne, 1998).

La investigación del comportamiento de estos parámetros fue realizada en aguas residuales que contienen MTBE (Metil terbutil éter) compuestos de las gasolinas para aumentar el octanaje, el cual se desarrolló en Estados Unidos por un equipo liderado por Sunil Kommineni, PhD. advance oxidation process, de 2003.

A continuación se muestra una breve discusión de cada uno de estos parámetros de calidad del agua y las medidas de mitigación que se pueden tomar para limitar el impacto negativo de estos parámetros en la eficacia de los procesos de oxidación química avanzada.

### 2.7.1. Alcalinidad

El impacto negativo de la alcalinidad en la eficacia de los procesos de oxidación química avanzada ha sido ampliamente estudiados (AwwaRF, 1998). El radical hidroxilo no es selectivo y, por tanto, puede ser agotada por la presencia de compuestos orgánicos o inorgánicos distintos de los contaminantes de preocupación. Ambos, carbonato y bicarbonato consumen los radicales hidroxilos para crear radicales carbonato, que, a su vez, reaccionan con otros orgánicos o compuestos inorgánicos presentes, aunque a un ritmo mucho más lento (Hoigne y Bader, 1976; AwwaRF, 1998). La reacción para el consumo de radicales hidroxilo por iones bicarbonato es la siguiente: (Morel y Hering, 1993).



Las constantes de velocidad,  $k$ , para las reacciones del radical hidroxilo con carbonato y el bicarbonato son  $3,8 \times 10^8$  y  $8,5 \times 10^6$   $\text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$ , respectivamente (Buxton et al., 1988). Estas constantes de velocidad son mucho más lentas que la velocidad de reacción constante de radicales hidroxilo con MTBE ( $10^9$   $\text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ). -Metil terbutil éter, compuesto que aumenta el octanaje a las gasolinas- Sin embargo, para estas reacciones de segundo orden, la velocidad de reacción real,  $r$ , es una función tanto de la constante de velocidad y la concentración del reactante,  $C$ :

$r = k [C]$ . Aguas con alcalinidad media a alta ( $> 100$  mg / L como  $\text{CaCO}_3$ ) probablemente contienen iones de carbonato y bicarbonato en concentraciones de varios órdenes de magnitud mayor que el MTBE y, por tanto, la reacción de radicales hidroxilo con carbonato y bicarbonato se produce tan rápidamente o más

rápido que su reacción con MTBE. En consecuencia, las aguas con MTBE y con elevada cantidad de iones bicarbonato pueden requerir una reducción de la alcalinidad (por ejemplo, el ajuste del pH o dióxido de carbono stripping) antes del tratamiento con un proceso de oxidación química avanzada (AwwaRF, 1998) o el aumento del tiempo de reacción.

Para el caso de las aguas residuales de los baños portátiles con un PH entre 8 y 10, no se realizará ajustes del mismo, por el contrario se observará el comportamiento del mismo para ver sus variaciones en el tiempo de reacción con el proceso de oxidación química avanzada.

#### **2.7.2. Los nitratos y nitritos.**

El radical hidroxilo puede estar formado por varios mecanismos, incluyendo fotooxidación UV de peróxido de hidrógeno. Cualquier componente presente en el agua que absorbe la luz UV disminuye la formación de radicales hidroxilo y la posterior destrucción de MTBE. Los nitratos y nitritos absorben luz UV en el rango de 230 a 240 nm y 300 a 310 nm y, en consecuencia, las concentraciones altas de nitrato (> 1 mg / L) o nitrito (> 1 mg / L) se ha demostrado que limitan la eficacia de las tecnologías de UV (véase la sección 3.4.2 para una discusión comparativa de las lámparas UV) (Calgon, 1996; Atiende, 1999).

#### **2.7.3. Los fosfatos y sulfatos.**

Mientras que los fosfatos y sulfatos están comúnmente presentes en baja concentraciones en las aguas de fuente, estos compuestos tienen el potencial de secuestro de radicales hidroxilo. Sin embargo, son extremadamente lentos en reaccionar con •OH, y su efecto de barrido por lo general puede ser despreciable (Hoigne, 1998) para el ozono/peróxido de sistemas UV. Para los sistemas de TiO<sub>2</sub>, se ha observado que los sulfatos pueden reducir significativamente la tasa de destrucción de

contaminantes orgánicos en concentraciones superiores a 100 mg/L (Crittenden et al., 1996).

#### **2.7.4. Hierro (II), cobre (I), o de manganeso (II).**

Aunque no está muy clara la presencia de estos metales reducidos en combinación con radicales hidroxilo, pueden conducir a la formación de complejos orgánicos de hierro o cobre o la oxidación de Mn (II) para formar el permanganato (Hoigne, 1998; Calgon, 1996). Se ha observado que la formación de permanganato se produce con una velocidad constante de  $3 \times 10^3$  a  $2 \times 10^4 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Reckhow et al., 1991). Además, la presencia de hierro (absorbencia 200-400 nm) y otros agentes de escala puede resultar en la contaminación de los sistemas UV.

#### **2.7.5. La turbidez.**

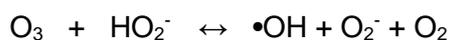
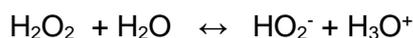
Sistemas que dependen de la radiación UV para la disociación de  $\text{H}_2\text{O}_2$  u  $\text{O}_3$  o una disminución de la eficiencia a medida que aumenta la turbidez. La turbidez reduce la transmitancia de la fuente de agua y, por tanto, reduce la penetración de la radiación UV en la fuente de agua.

#### **2.7.6. Temperatura.**

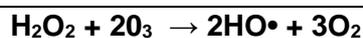
No existe registro sobre complicaciones con respecto a la temperatura de la mezcla, pero se menciona que las reacciones en los procesos de oxidación química avanzada con los compuestos orgánicos pesados son exotérmicas, lo cual eleva la temperatura de la mezcla durante el tiempo de reacción. (Hoigne, 1998; Calgon, 1996)

## 2.8. Proceso de oxidación química avanzada Ozono/Peroxido de Hidrogeno

En el presente trabajo de investigación se utilizará el sistema ozono/peróxido de hidrogeno, donde las reacciones dominantes son las siguientes:



$\bullet\text{OH} + \text{Compuestos Fenólicos} \rightarrow \text{Sub-Productos}$  (compuestos más degradables).



OH: Radical oxidrilo

H<sub>3</sub>O: Ión hidronium

HO<sub>2</sub>: Dióxido de hidrógeno ó hidroxiperoxilo

Cuando el ozono se agrega al agua, participa en una compleja cadena de reacciones que dan lugar a la formación de radicales, como el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) y el radical superóxido ( $\text{O}_2\bullet$ ) (Hoigne, 1998). Al igual que el ozono, estos productos radicales ( $\bullet\text{OH}$  y  $\text{O}_2\bullet$ ) son oxidantes capaces de destruir compuestos orgánicos como por ejemplo; el MTBE (metil terbutil éter). De los radicales intermedios formados en el agua ozonizada, el  $\bullet\text{OH}$  es el oxidante más poderoso, aún más poderosa que el ozono mismo. La oxidación directa de los éteres por ozono se sabe que ocurren muy lentamente; esta reacción es de segundo orden y su constante cinética menor de  $1 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Buxton et al., 1988). Por el contrario, la oxidación de los éteres por los radicales oxidantes es muy rápida. Los radicales hidroxilos reaccionan con MTBE de acuerdo a una tasa constante de  $1,6 \times 10^9$  al  $\text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Buxton et al., 1988).

- $\text{H}_2\text{O}_2$  puede ser combinado con el ozono para mejorar la transformación de  $\text{O}_3$  a  $\bullet\text{OH}$  en solución.
- $\text{H}_2\text{O}_2$  es un ácido débil, que se disocia parcialmente en el agua en Ion hidroperóxido ( $\text{HO}_2^-$ ).

- $\text{H}_2\text{O}_2$  reacciona lentamente con el  $\text{O}_3$ , mientras que el ión  $\text{HO}_2^-$  puede reaccionar rápidamente con el  $\text{O}_3$  para formar  $\bullet\text{OH}$  (Hoigne, 1998):

El proceso  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  combinado ha demostrado ser más eficaz en la eliminación de compuestos orgánicos naturales y sintéticos, que ozono u peróxido solos. Además, utilizando una combinación de  $\text{O}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  para producir radicales hidroxilo, y no sólo ozono, permite una dosificación menor de  $\text{O}_3$  que se utilizará.

El rendimiento teórico de radicales hidroxilo a través de la tecnología  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  es menor que el de la tecnología  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ , sin embargo, el rendimiento se ve menos afectado por la calidad del agua (es decir, la turbidez, hierro y nitratos que bajan el rendimiento de los procesos de UV, pero no de procesos  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ ).

Sistemas  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  han sido probados ampliamente y aplicados en las solicitudes de remediación de las aguas subterráneas. Así, la implementación de sistemas de  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  tiene una historia probada en el campo de operación.

La adición de peróxido de hidrógeno a los sistemas de ozonización es una de las formas más inmediatas de acelerar la descomposición de ozono a la formación de radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ). El  $\text{H}_2\text{O}_2$  es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable. El uso de estos dos oxidantes combinados permite aprovechar los efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica. Entre las posibles mezclas de agentes oxidantes, la combinación peróxido de hidrógeno y ozono es sin duda la más usada.

El proceso pretende combinar la oxidación directa del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales  $\text{H}_2\text{O}_2$  con los compuestos orgánicos.

El proceso no es barato pero es rápido, y puede tratar contaminantes orgánicos presentes en muy bajas concentraciones (ppb), a pH entre 7 y 8. El proceso se acelera a pH alcalino.

El tratamiento ha resultado efectivo para descomponer compuestos orgánicos clorados como tricloroetileno, tetracloroetileno, etc. Por lo tanto, es excelente para el postratamiento de aguas sometidas a tratamientos de desinfección con cloro o dióxido de cloro. Uno de los principales campos de aplicación es la degradación de plaguicidas presentes en aguas.

También se ha usado en la decoloración de compuestos de aguas residuales de la industria papelera y otros procesos industriales (Balcioglu I.A., 2001).

La molécula de Peróxido de hidrogeno reacciona muy lentamente con el ozono (Taube and Bray, 1940), pero el anión de hidroperóxido es altamente reactivo con el ozono, como resultado, la tasa de descomposición de ozono por peróxido de hidrógeno aumenta con el aumento del pH. Para cada incremento en el valor de pH, la concentración en  $\text{HO}_2^-$  se puede expresar como una función de  $K_a$  y el coeficiente de disociación  $\alpha$  del peróxido de hidrogeno. Por lo tanto, las ecuaciones cinéticas de las reacciones del peróxido con el ozono es el siguiente (Ozone in Water Treatment, application and engineering, pg. 20, 21 and 22):

$$k_a = \frac{[\text{HO}_2^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_2\text{O}_2]}$$

$$\alpha = \frac{[\text{HO}_2^-]}{[\text{H}_2\text{O}_2] + [\text{HO}_2^-]} = \frac{[\text{HO}_2^-]}{[\text{H}_2\text{O}_2]}$$

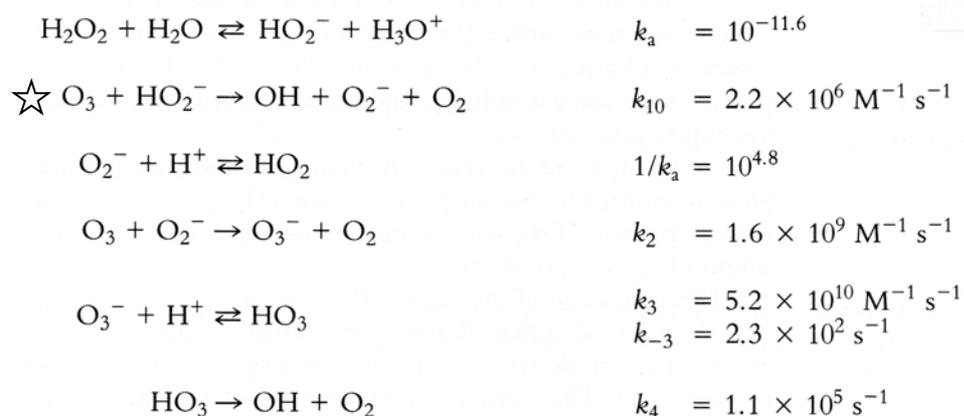
Este desarrollo refleja una ecuación cinética general de la siguiente forma

$$-\frac{d[\text{O}_3]}{dt} = k''[\text{O}_3][\text{HO}_2^-]$$

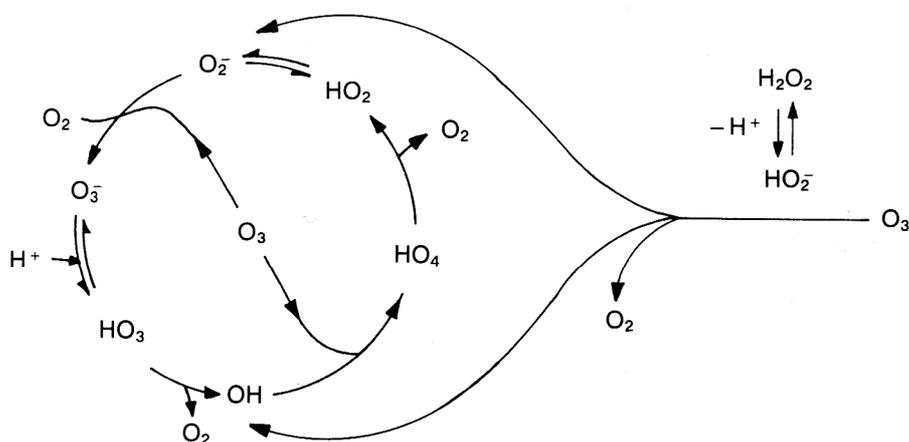
$K_a''$ , constante de reacción de segundo orden para la descomposición del ozono con peróxido de hidrogeno.

Por tanto, esta constante de velocidad es muy superior a la de la descomposición de ozono iniciada por los iones hidroxilo. Por lo tanto, el resultado es que, a muy bajas concentraciones de  $\text{HO}_2^-$  son cinéticamente más eficaz en la iniciación de la descomposición del ozono.

De acuerdo al mecanismo de descomposición del ozono, las reacciones de iniciación y propagación pueden ser las siguientes:



Esto se muestra esquemáticamente en la siguiente figura.



#### Ozone Decomposition Process by Hydroperoxide Ions

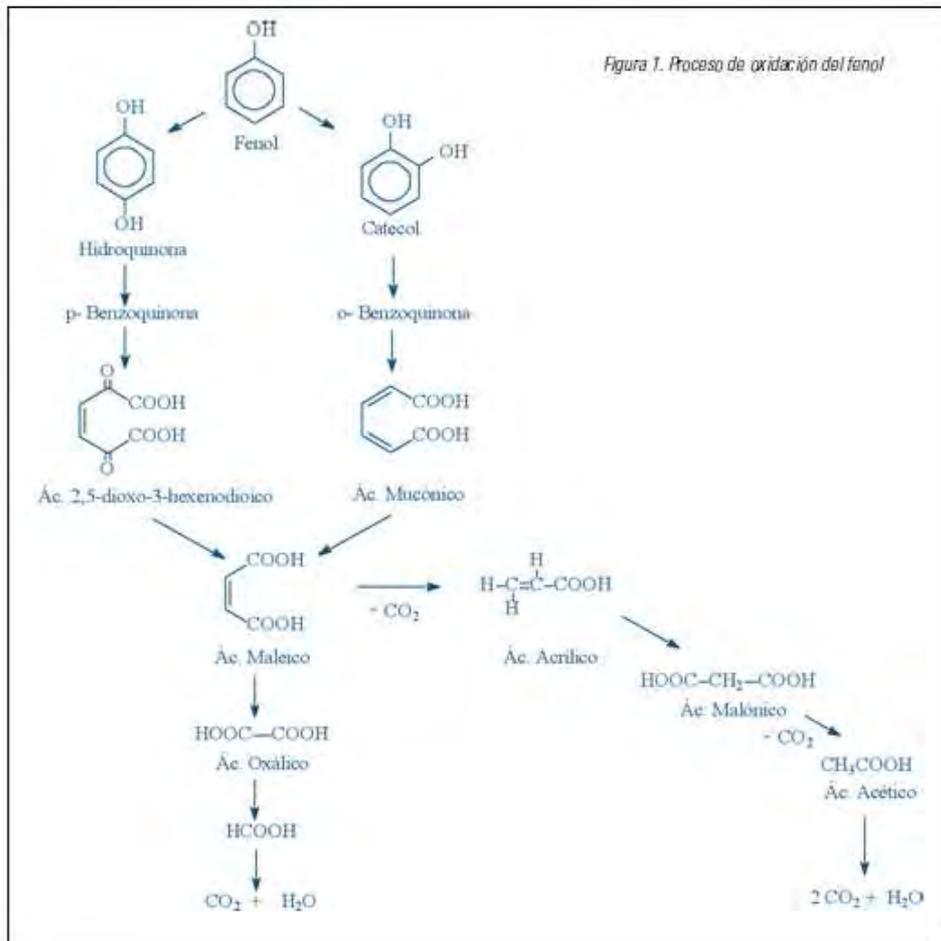
☆ Los iones hidropéroxido consumidos por el ozono son reemplazados rápidamente para conseguir el equilibrio. La velocidad a la que el

peróxido de hidrógeno es consumido por el ozono toma la siguiente forma.

$$-\frac{d[\text{H}_2\text{O}_2]}{dt} = k[\text{H}_2\text{O}_2]_t[\text{O}_3]$$

En el siguiente gráfico se observa el proceso químico de oxidación del compuesto fenólico. Gráfico extraído de Eliminación de compuestos fenólicos en aguas residuales, A. Bódalo, Dpto. de Ingeniería Química. Universidad de Murcia

**Gráfico I. Proceso de oxidación del fenol**



### 2.8.1. Ventajas y desventajas del sistema ozono/peróxido de hidrógeno.

Los beneficios de usar un sistema de  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  son:

- El proceso de  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  combinado ha demostrado ser más eficaces en la eliminación del MTBE (Metil terbutil éter, compuesto para aumentar el octanaje de las gasolinas) y otros compuestos orgánicos naturales y sintéticos que  $\text{O}_3$  u  $\text{H}_2\text{O}_2$  solos. Además, utilizando una combinación de  $\text{O}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  para producir radicales hidroxilo, en lugar de usar solo  $\text{O}_3$ , permite una dosificación menor de  $\text{O}_3$  que se utilizará. Esto es deseable para reducir los costos y el potencial de formación de bromato.
- El rendimiento teórico de radicales hidroxilo a través de la tecnología  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  es menor que el de la tecnología  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ , sin embargo, el rendimiento se ve menos afectado por la calidad del agua (es decir, la turbidez, hierro y nitratos bajan el rendimiento de los procesos de UV, pero no de los procesos  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ ). Sin embargo, una vez que los radicales hidroxilos se forman, la destrucción química y las interferencias son los mismos para ambas tecnologías.
- De acuerdo con esta revisión de la literatura, los sistemas de  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  parecen ser los más probados y aplicados en las solicitudes de Procesos de oxidación avanzada para remediación de las aguas subterráneas, en relación con otras tecnologías de procesos de oxidación química avanzada. Por lo tanto, la aplicación de los sistemas de  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  tiene una historia probada en el campo de la operación y la aceptación reguladora.

Las desventajas y limitaciones del sistema  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  son:

- El uso de  $\text{O}_3$  puede dar lugar a la formación potencial de bromato, sin embargo, la formación de bromato puede ser mitigado mediante la reducción del pH  $<6,5$ , aumentando el ratio  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{O}_3$ , o la adición de otra captadora de radicales que reaccionan con los radicales hidroxilo con anterioridad a la bromuro (por ejemplo, amoníaco).

- El proceso requiere típicamente  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  un permiso de aire para las emisiones de ozono, además de un sistema de tratamiento de gases de escape de la destrucción del ozono. El peróxido de hidrógeno reacciona rápidamente con la mayor parte de la capa de ozono aplicadas y, por tanto, el aire que sale del contactor se ha observado que generalmente contienen concentraciones de ozono inferiores a 1 mg/L (Applebury, 1999). Esta concentración es considerablemente alta que 1-hora estándar de la Ley de Aire Limpio de 0,12 ppmv (CFR Título 40, Parte 50). Los métodos actuales para la eliminación de la capa de ozono en los gases de escape incluyen la destrucción térmica, reducción catalítica, o una combinación de los dos (Horst, 1982; Blanco, 1999). Destrucción térmica aprovecha el hecho de que el ozono se descompone rápidamente a altas temperaturas. Reducción catalítica consiste en pasar la capa de ozono de los gases a través de una superficie de (Comúnmente el hierro o el óxido de manganeso), que cataliza la descomposición del ozono a oxígeno elemental. Dichos controles aumentará los costos operativos y de capital del sistema (AWWA / ASCE, 1997).
- $\text{H}_2\text{O}_2$  residual puede servir como una fuente de oxígeno para los microorganismos y pueden promover recursos biológicos de crecimiento en el sistema de distribución. Aunque actualmente no existen estándares ambientales para  $\text{H}_2\text{O}_2$  residual en el agua potable tratada, no es probable que los proveedores de agua potable en los estados unidos permitan que los niveles detectables de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en el agua potable tratada sean altos (límites de detección varían de 1 mg/L a 100 mg/L en función del método y la concentración) debido a las preocupaciones sobre el crecimiento biológico. Así, dependiendo de la concentración del efluente, después del tratamiento de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en exceso, puede ser requerida limitar la contaminación biológica aguas abajo. Sin embargo, si las concentraciones residuales  $\text{H}_2\text{O}_2$  se limitan a menos de unos pocos mg/L, el tratamiento en el sistema ya existente eliminará por oxidación de los subproductos del sistema

$\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ , el  $\text{H}_2\text{O}_2$  residual. En los casos en  $\text{H}_2\text{O}_2$  residual suele ser superior a unos pocos mg/L, un sistema de tratamiento específico para la eliminación  $\text{H}_2\text{O}_2$  (por ejemplo, el carbón activado catalítico) tendrá que ser empleado (Crawford, 1999).

### 2.8.2. Ozono.

El ozono ( $\text{O}_3$ ), es una sustancia cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno, formada al disociarse los 2 átomos que componen el gas de oxígeno. Cada átomo de oxígeno liberado se une a otra molécula de oxígeno ( $\text{O}_2$ ), formando moléculas de Ozono ( $\text{O}_3$ ).

A temperatura y presión ambientales el ozono es un gas de olor acre y generalmente incoloro, pero en grandes concentraciones puede volverse ligeramente azulado. Si se respira en grandes cantidades, es tóxico y puede provocar la muerte.

El ozono, es el primer alótropo de un elemento químico que fue identificado por la ciencia, Christian Friedrich Schönbein propuso que fuera un compuesto químico distinto en 1840, nombrándolo con el verbo griego ozein ( "tener olor"), a causa del olor peculiar que se observa durante las tormentas eléctricas. Recién en 1865 Jacques-Louis Soret determinó la fórmula del ozono ( $\text{O}_3$ ) lo que fue confirmado por Schönbein en 1867.

Se descompone rápidamente en presencia de oxígeno a temperaturas mayores de  $100\text{ }^\circ\text{C}$  y en presencia de catalizadores como el dióxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ) a temperatura ambiente.

El ozono se puede producir artificialmente mediante un generador. El ozono tiene un interesante uso industrial como precursor en la síntesis de algunos compuestos orgánicos, y sobre todo, como desinfectante (depuradoras). Su principal propiedad es que es un fortísimo oxidante. Sin embargo es más conocido por el importante papel que desempeña en la atmósfera. A este nivel es necesario distinguir entre el ozono presente en la estratosfera y el de la troposfera. En ambos casos su formación y destrucción son fenómenos fotoquímicos.

Cuando el oxígeno del aire es sujeto a un pulso de alta energía, el doble enlace O=O del oxígeno se rompe entregando dos átomos de oxígeno los cuales luego se recombinan. Estas moléculas recombinadas contienen tres átomos de oxígeno en vez de dos, lo que origina ozono.

**Cuadro V. Solubilidad del ozono en agua**

Temperature		Caprio et al. (1982) ■	Khadraoui (1988)		Rawson (1953) ▲	Matrozov et al. (1975) ○
°C	°F		(bidistilled) ●	(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 200 mg/L) ★		
0.5	32.9	0.54	—	—	—	—
5.6	42.1	—	—	0.39	—	0.41
6.9	44.4	—	0.46	—	—	—
9.6	49.3	—	0.41	—	0.39	—
12	53.6	0.34	—	—	—	—
12.4	54.3	—	0.31	—	—	—
14.5	58.1	—	—	—	0.29	—
14.7	58.5	—	—	0.26	—	0.28
15.9	60.6	—	0.25	—	—	—
20.3	68.5	—	—	—	0.21	—
20.7	69.3	—	0.20	—	—	—
21	69.8	0.24	—	—	—	—
23.6	74.5	—	0.18	—	—	—
25.5	77.9	—	—	0.14	0.17	0.16
30.5	86.9	—	—	0.10	0.14	—
31	87.8	0.17	—	—	—	0.14
33.5	92.3	—	0.10	—	—	—
34.8	94.6	—	—	0.07	—	—
35	95.0	—	—	—	0.12	—
39	102.2	—	—	—	0.07	—
41	105.8	0.12	—	—	—	0.17
43	109.4	—	0.07	—	—	—

<sup>†</sup>Solubility ratios given as S: mg/L in water to mg/L in gas. Symbols correspond to those diagrammed in Figure II-46.

### 2.8.2.1. Características.

CAS	10028-15-6
Naciones Unidas	1955
Peso molecular	48
Punto de ebullición	-112 °C
Punto de fusión	-192,5 °C
Densidad Vapor (aire=1)	1,7
Peso del litro gas a 0°C y 1 ATM	2144 gr.
Solubilidad en agua % en peso	0.49

### 2.8.2.2. Aplicaciones con el ozono

El ozono es una molécula metaestable producido a partir de oxígeno elemental, como tal, su

producción presenta aspectos contradictorios desde un punto de vista termodinámico.

Se le ha llamado una forma alotrópica del oxígeno, que es una terminología inadecuada.

La reacción total para la formación de ozono se describe en la siguiente reacción endotérmica.

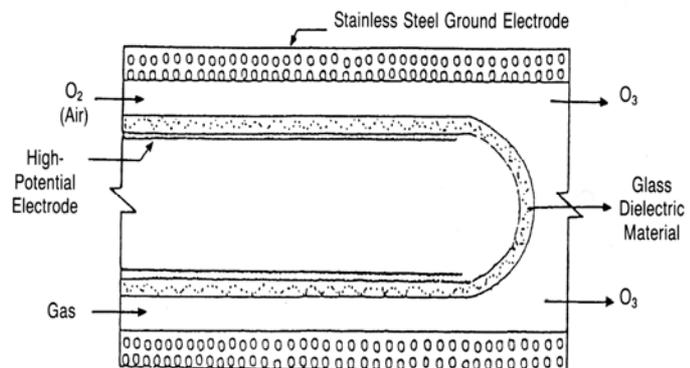


Y su entropía de formación es larga y desfavorable.

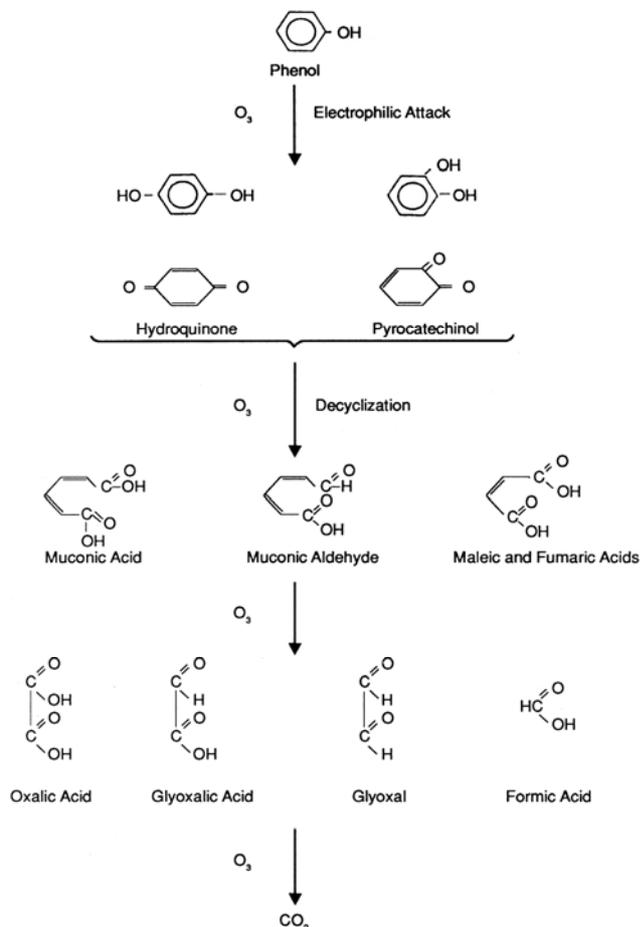
$$\Delta S^\circ (1\text{atm}) = -69.9 \text{ (J/mol/grado)}$$

La forma más conocida para producir ozono es a través de la generación por corona de descarga.

**Figura 1. Esquema básico de arco corona para generación de ozono**



**Figura 2. Esquema de oxidación por ozono del Fenol**



Schematic of Ozonation of Phenol

### 2.8.3. Peroxido de hidrógeno.

El peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), también conocido como agua oxigenada o dioxidano es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, que por lo general se presenta como un líquido ligeramente más viscoso que éste. Es conocido por ser un poderoso oxidante.

A temperatura ambiente es un líquido incoloro con sabor amargo. Pequeñas cantidades de peróxido de hidrógeno gaseoso se encuentran naturalmente en el aire. El peróxido de hidrógeno es inestable y se descompone rápidamente en oxígeno y agua con

liberación de calor. Aunque no es inflamable, es un agente oxidante potente que puede causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica o algunos metales, como el cobre, la plata o el bronce.

El peróxido de hidrógeno se encuentra en bajas concentraciones (3 a 9%) en muchos productos domésticos para usos medicinales y como blanqueador de vestimentas y el cabello. En la industria, el peróxido de hidrógeno se usa en concentraciones más altas para blanquear telas y pasta de papel, y al 90% como componente de combustibles para cohetes y para fabricar espuma de caucho y sustancias químicas orgánicas. En otras áreas, como en la investigación, se utiliza para medir la actividad de algunas enzimas, como la catalasa.

El peróxido de hidrógeno es un antiséptico general. Su mecanismo de acción se debe a sus efectos oxidantes: produce OH y radicales libres que atacan una amplia variedad de compuestos orgánicos (entre ellos, lípidos y proteínas que componen las membranas celulares de los microorganismos). La enzima catalasa presente en los tejidos degrada rápidamente el peróxido de hidrógeno, produciendo oxígeno, que dificulta la germinación de esporas anaerobias.

Se utiliza en dermoaplicaciones, limpieza de dentaduras y desinfección bucal

#### **2.8.3.1. Características**

CAS	7722-84-1
Naciones Unidas	2014
Concentración	Mínimo 50%
Apariencia	Líquido Incoloro
Densidad	1.195 g/ml (20°C)
Peso Molecular	34.02
Punto de fusión	-51°C
Punto ebullición	114°C
PH	Máximo 3.5

### 2.8.3.2. Aplicaciones para tratamiento de aguas residuales con Peróxido de hidrógeno

Para tratamiento de aguas residuales municipales, disminución del  $H_2S$ , suministro de oxígeno de emergencia, algas, control de filamentosas.

Para el tratamiento de aguas residuales industriales, destrucción del cianuro, fenoles, sulfuros, sulfito, hipoclorito, formaldehído, nitrito, etc.

En los siguientes cuadros se observa opciones de oxidación química para el fenol y sus condiciones de pH (Chemical Oxidation, Technologies for the nineties, edited by W.Wesley Eckenfelder, Feb 1991) y el uso de peróxido para reducir compuestos sulfurosos o control de olores en una refinería de aceites en Lagoon suroeste de USA (Proceedings of the first international symposium Chemical Oxidation, Nashville, Tennessee, feb 1991).

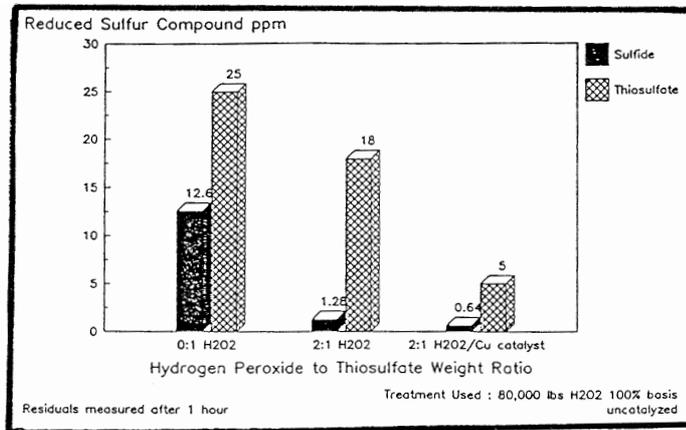
#### Cuadro VI. Oxidación química del fenol y sus condiciones de pH

Oxidant	Complete Oxidation	Oxidant:Phenol Ratio w/w	pH	Catalyst Required	Treatment Form
$O_3$ <sup>[1,2]</sup>	yes	2-6:1	7-12	no	Dissolved gas*
$Cl_2$ <sup>[3]</sup>	yes	100:1	7-8	no	Liquid or gas**
$ClO_2$ <sup>[1,4]</sup>	yes	1.5-3.5:1	2-10	no	Dissolved gas*
$H_2O_2$ <sup>[1,5]</sup>	yes	2-5:1	4-6	yes	Liquid
$KMnO_4$ <sup>[1,6]</sup>	yes	16:1	7-10	no	Crystal

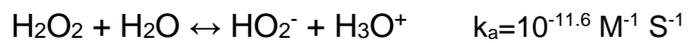
\*Generated On-Site

\*\*Hypochlorite may be applied

### Gráfico I. Uso del peróxido para control de olores



El peróxido de hidrogeno es un ácido débil, cuando es combinado con agua se disocia parcialmente en ion hidroperóxido (Ozone in water treatment, application and engineering, Bruno Langlais, Michigan 1991).



### **CAPITULO III. OBJETIVOS**

#### 3.1. Objetivo General:

- Reducir la concentración de compuestos fenólicos en aguas residuales de baños portátiles con proceso de oxidación avanzada  $O_3/H_2O_2$

#### 3.2. Objetivos Específicos:

- Determinar la relación óptima  $O_3/H_2O_2$  para reducir compuestos fenólicos las aguas residuales de baños portátiles.
- Determinar la eficiencia de remoción de los compuestos fenólicos de las aguas residuales de baños portátiles con el proceso con oxidación avanzada  $O_3/H_2O_2$ .
- Evaluar la calidad del efluente para un posible tratamiento biológico posterior.

## CAPITULO IV. MATERIALES Y METODOS

### 4.1. Materiales

#### Insumos:

- Peróxido de Hidrógeno al 50%, distribuido por Quimexsa
- Ozono generado in situ con equipo generador Ecosistemas
- Aire

#### Equipos y Estanques:

- 01 Recipiente de 20 litros de capacidad total de plástico reforzado con tapa, para ser usado como reactor.
- 02 Recipiente de 10 litros de capacidad total cada uno con caño en la parte inferior, para dosificación de Peroxido de Hidrógeno.
- 01 Equipo generador de Ozono de 0.20 gramos/hora.
- 01 Equipo soplador (para mezcla completa con inyección de aire) de 100 Litros/minuto de capacidad, marca Sutorbild modelo 2MP.
- 01 Equipo test kit colorimétrico HACH, para fenoles de rango 0-5mg/l, modelo PL-1
- 01 Medidor de PH portátil con calibración certificada.
- 01 Medidor portátil de Temperatura con calibración certificada.
- 01 cooler de 24 litros de capacidad como máximo para transporte de muestras a laboratorio certificado.
- 30 Frascos de un medio litro de capacidad total de vidrio acaramelado. Estos frascos son para el muestreo del parámetro fenol.

#### Materiales:

- Tuberías de CPVC de ½" (este material soporta la oxidación del ozono)
- Nipleria, conectores, uniones simples, uniones universales CPVC ½"
- Válvulas de gases, válvulas de líquidos de ½" de tipo esférica.
- Medidor de flujo para aire de 20 L/minuto.
- 01 Difusor de burbuja fina de ½" para inyección de aire en reactor para distribuir una mezcla completa.
- 01 Filtro coalescente para desecar aire, antes de generación de ozono.

- 01 Filtro de partículas para filtrar el aire antes de generación de ozono.

#### Otros

- 01 Investigador
- 01 ayudante
- 01 Laboratorio certificado externo para análisis de Fenoles, en esta investigación se contará con el laboratorio Envirolab. Este laboratorio aportará los frascos para los análisis de fenoles, también el ácido sulfúrico 1:1.

## **4.2. Método Experimental**

Las muestras de agua residual de baños portátiles serán tomadas de las unidades móviles que extraen estas aguas residuales de las aeronaves de servicio doméstico (vuelos nacionales), las cuales son almacenadas en sus contenedores.

El agua residual del baño portátil, previamente tiene que ser tamizado o sedimentado por 15 minutos, debido a la gran cantidad de papeles y otros sólidos de gran tamaño que posiblemente puedan dificultar las reacciones químicas en el experimento.

### **4.2.1. Características fisicoquímicas de la muestra de agua residual.**

El color de las muestras es generalmente verde intenso con abundante sólidos (papeles, materia orgánica, bolsas toallas higiénicas, entre otros).

El PH promedio de las muestras previamente tamizadas es de 9.5

La temperatura promedio de las muestras previamente tamizadas es de 20 °C.

El olor de las muestras es penetrante e irritante, por lo que se debe tomar las siguientes consideraciones de seguridad:

Para personal investigador y de apoyo que realizan toma de muestras, debe contar con guantes de PVC calibre 35, respirador de la serie 6000 3M con sus respectivas pastillas filtrantes para gases orgánicos, overol o mandil resistente, lentes de seguridad o protección completa, botas antideslizantes, el casco es opcional.

Todos estos equipos deben tener las características técnicas de acuerdo a la legislación vigente.

#### **4.2.2. Metodología**

- Se tomarán muestras de agua residual, de los baños portátiles de las aeronaves del aeropuerto Jorge Chávez, de vuelos nacionales, ya que los componentes de estos baños son los mismos que se usan en los baños portátiles de otros sectores de desarrollo del país. El volumen de estas muestras deben estar entre 15 a 18 litros.
- Estas aguas residuales serán acondicionadas, para separar los sólidos de gran tamaño, de la siguiente manera: Se usará un proceso físico de sedimentación para separar sólidos de gran tamaño que estén contenidos en él (papeles, etc.), el agua residual será depositada en un recipiente y el tiempo de sedimentación será de 15 minutos y no se aplicará ningún acelerador de sedimentación. Para el experimento se usará el agua residual superficial del recipiente.
- Para la primera corrida experimental, se tomarán 11 litros de muestra de agua residual, la misma que será vertida en el recipiente de 20 litros de capacidad (reactor).
- De este recipiente, se tomará 1 litro de muestra (día 0) para los análisis de Fenoles en un laboratorio certificado.
- A esta muestra se le realizarán mediciones de Temperatura y PH en el mismo lugar con instrumentos calibrados y certificados.
- Para preparar la muestra para el posterior análisis de compuestos fenólicos, se seguirá el siguiente procedimiento: En un frasco de vidrio acaramelado de medio litro se vierte el agua residual hasta el 80% de su capacidad, luego acidular la muestra agregando 20 gotas de ácido (ácido sulfúrico 1:1) para llevar la muestra a PH=2, cerrar la tapa, agitar el frasco y almacenar en cooler a 4°C, luego trasladar dentro de las 24 horas, al laboratorio certificado.

- La muestra sobrante de agua residual (10 litros), será utilizada en el experimento.
- En el reactor al inicio del experimento, se agrega aire (g), ozono (g) y peróxido de hidrógeno (liq.) en las dosificaciones descritas en el plan muestral.
- El aire se inyectará mediante 01 difusor de burbuja fina desde el fondo del recipiente con un caudal de aire total de 20 L/minuto. Este caudal es controlado con un medidor de flujo de aire colocado en la línea de aire.
- El peróxido de hidrógeno, previamente preparado con las concentraciones indicadas en el diseño muestral, se dosificará desde la parte superior del reactor desde un recipiente dosificador, el cual con una válvula semiabierta en la parte inferior verterá el peróxido hacia el reactor. El caudal de dosificación será de 10 ml/min.
- El ozono, previamente producido en el equipo generador, se inyectará desde el fondo del estanque mediante un tubo de CPVC con orificios. El caudal de aire ozonizado es de 15 L/minuto.
- El reactor debe estar tener la tapa semiabierta para facilitar el escape de gases producidos.
- Luego de 1 hora de reacción, se tomará mediciones de campo para los parámetros Fenoles, PH y temperatura. Estas mediciones serán realizadas cada hora, hasta, llegar a valores de fenoles de 0.01 mg/l, rango mínimo del equipo Test Kit de HACH. Registrar el tiempo y los valores de las mediciones realizadas. Ver Procedimiento para mediciones de Fenoles con el Test Kit de HACH.
- Se debe anotar el olor de la muestra durante el tiempo de la reacción, asimismo, debe anotarse el cambio de color de la muestra, la formación de espuma.

- Repetir el mismo procedimiento para las otras corridas experimentales con otras concentraciones de peróxido de hidrogeno.

#### **Procedimiento para medir Fenoles con el Test Kit de HACH**

- Llene los dos tubos plásticos con muestra hasta la primera línea del tubo
- Añada el contenido de un reactivo EDTA a cada tubo de inspección. Cierre cada tubo y mezclar hasta que el polvo sea disuelto.
- Añada 15 gotas de hardness 1 buffer solution a cada tubo de inspección. Cierre los tubos y la mezclar.
- Coloque uno de los tubos en la apertura izquierda del comparador Colorimétrico.
- Al otro tubo, añada el contenido de un sachet de Phenol reagent powder pillow for Nonextraction method. Cierre el tubo y mezclar hasta que el polvo sea disuelto.
- Entonces añada el contenido de un sachet de Potassium persulfate powder pillow for phosphonate. Cerrar y mezclar hasta que el polvo sea disuelto.
- Coloque el tubo de la muestra tratada en la apertura derecha del comparador Colorimétrico. Quite la tapa a ambos tubos.
- Sostenga el comparador de modo que la luz brille debajo de los tubos.

### 4.3. DISEÑO MUESTRAL

El diseño del equipo generador de ozono a usarse en este experimento tiene una capacidad de producción de ozono con una concentración de 0.223 mg/L de ozono en un caudal de aire de 15 litros/minuto.

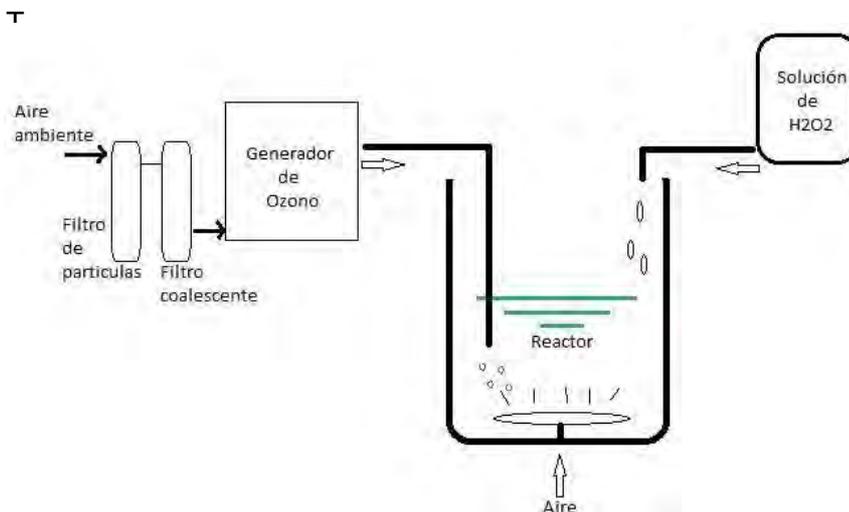
A partir de peróxido de hidrogeno al 50% de pureza, se preparan (diluyendo) cinco soluciones de peróxido de hidrogeno al 0.25, 0.50, 1.00 y 2.00 molar respectivamente.

Se utilizará aire proveniente de un soplador para mantener agitado el licor de la mezcla, el caudal promedio a usarse es de 15 litros /minuto.

Para todas las corridas experimentales las condiciones que se aplicarán, son las siguientes condiciones:

- Ozono de concentración 0.223 mg/Litro
- Muestra de agua residual 10 Litros (sedimentado previamente).
- Agitación para homogenización del licor de la mezcla, se usará 15ml/min de aire.
- Se realizarán mediciones de PH, Fenoles y temperatura cada hora hasta llegar a valores de 0.01 mg/l de fenoles (valor mínimo del equipo test kit de fenoles HACH). Es aquí donde concluirá la corrosión experimental. Ver tabla I.
- Para las demás corridas experimentales el procedimiento es el mismo, solo cambia la concentración del peróxido de hidrogeno.

**Figura 2. Esquema básico de distribución de equipos, líneas y accesorios de planta piloto**



**Tabla I.** Diseño muestral para el experimento

DISEÑO MUESTRAL												
Descripción de la muestra	Volumen Agua Residual acondicionada (Litros)	Concentración O <sub>3</sub> (mg/L)	Concentración H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Molar	Parametro a medir	Unidades de Medición	TIEMPOS						
						T=0	T=1	T=2	T=...	T=t-1	T=t	
Agua residual de baño portátil de transporte aéreo nacional, internacional	10	0.223	0.25	FENOLES	mg/L							
				PH	Unid. de pH							
				Temperatura	°C							
			0.50	FENOLES	mg/L							
				PH	Unid. de pH							
				Temperatura	°C							
			1.00	FENOLES	mg/L							
				PH	Unid. de pH							
				Temperatura	°C							
			2.00	FENOLES	mg/L							
				PH	Unid. de pH							
				Temperatura	°C							

## CAPITULO V. RESULTADOS

### 5.1. RESULTADOS DE ANALISIS DE MUESTRAS

La tabla II, nos muestra los valores de las corridas experimentales, datos brutos que nos ayudan a fabricar las curvas de trabajo.

**Tabla II. Resultados de las corridas experimentales**

Hora	CONCENTRACION MOLAR											
	0.25			0.50			1.00			2.00		
	pH	T°C	Fenoles	pH	T°C	Fenoles	pH	T°C	Fenoles	pH	T°C	Fenoles
0	9.43	19.9	4.00	9.54	19.1	3.50	9.45	20.8	3.85	9.17	21.9	3.90
1	9.40	21.9	3.50	9.50	19.8	2.00	9.43	22.4	2.50	9.18	21.6	2.45
2	9.43	21.6	3.00	9.45	20.5	1.10	9.39	23.0	1.20	9.17	22.1	0.20
3	9.42	21.3	2.90	9.44	21.1	0.90	9.37	22.9	0.76	9.22	21.7	0.01
4	9.38	23.1	2.50	9.43	22.1	0.80	9.39	23.1	0.60	9.21	21.6	0.01
5	9.36	24.1	2.50	9.43	22.0	0.70	9.39	22.8	0.40	9.22	21.4	0.01
6	9.36	23.6	2.50	9.39	23.1	0.65	9.38	23.6	0.06	9.21	21.4	0.01
7	9.37	23.1	2.50	9.41	23.6	0.50				9.22	21.5	0.01
8	9.39	21.8	2.40	9.38	23.3	0.10				9.21	21.1	0.01
9	9.41	21.0	2.35	9.42	22.0	0.04				9.22	22.0	0.01
10	9.41	20.9	2.35	9.44	21.3	0.01				9.20	21.8	0.01
11	9.38	19.9	2.35	9.47	20.0	0.01				9.19	21.6	0.01
12	9.40	20.5	2.30	9.48	20.3	0.01				9.14	23.1	0.01
13	9.35	20.1	2.30	9.47	20.1	0.01				9.13	22.8	0.01
14	9.39	19.8	2.20	9.46	19.7	0.01				9.13	24.1	0.01
15	9.41	21.0	2.00	9.48	20.2	0.01				9.15	23.7	0.01
16	9.37	20.0	1.90	9.47	20.0	0.01				9.14	23.5	0.01
17	9.41	19.9	1.90	9.49	20.4	0.01						
18	9.43	19.6	1.80	9.46	19.8	0.01						
19	9.32	20.0	1.30	9.47	20.0	0.01						
20	9.25	19.2	1.20	9.49	20.5	0.01						
21	9.29	19.7	1.10	9.48	20.3	0.01						
22	9.21	19.0	1.00	9.46	20.1	0.00						
23	9.41	19.4	0.75	9.46	20.6	0.00						
24	9.40	20.2	0.40									
25	9.37	21.1	0.20									
26	9.35	21.9	0.10									
27	9.32	22.8	0.10									
28	9.31	23.1	0.01									
29	9.31	23.0	0.01									
30	9.31	23.2	0.01									
31	9.32	23.8	0.01									
32	9.33	21.7	0.01									
33	9.35	21.3	0.01									
34	9.36	20.4	0.01									

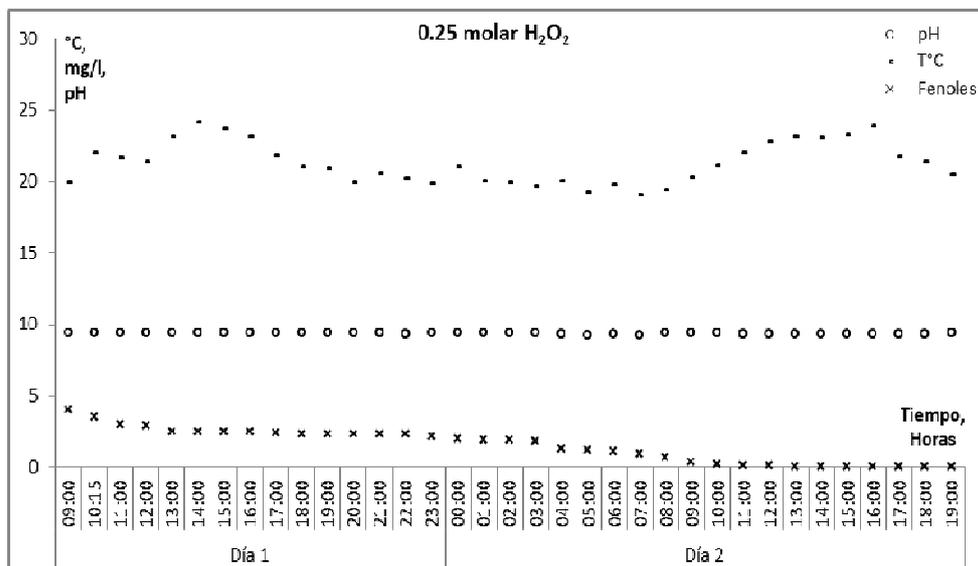
Para las corridas experimentales a diferente concentración de la solución de peróxido de hidrogeno, se muestran en los gráficos el comportamiento con respecto al tiempo, donde las variables, como el pH varían muy poco con respecto a otros parámetros de medición.

Para todas las corridas experimentales la concentración del ozono fue constante con un valor de 0.223 mg/litro.

Las concentraciones del peróxido de hidrogeno varían de concentración para cada corrida experimental.

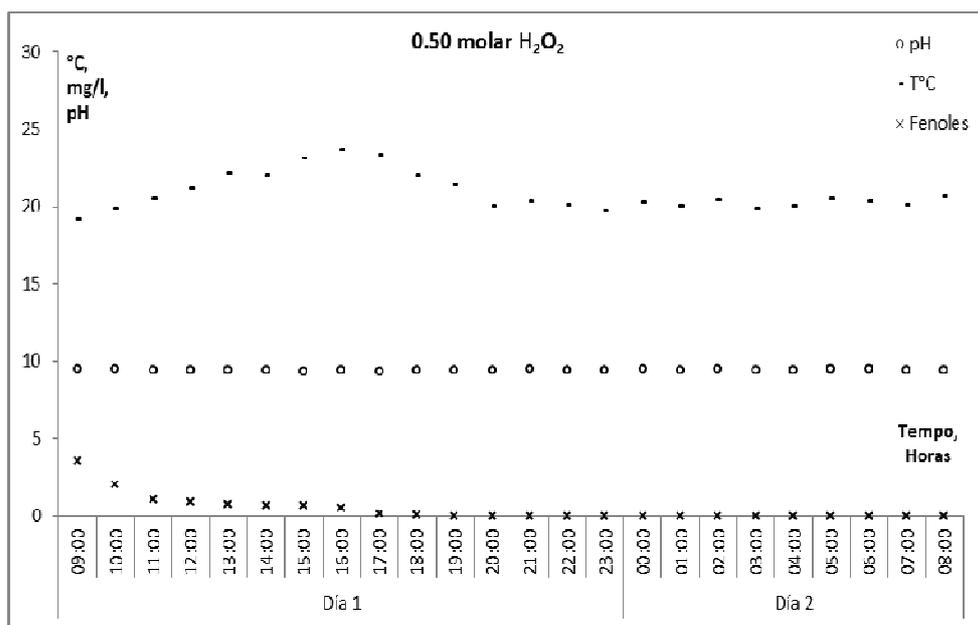
Para una concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 0.25 molar de concentración, se observa en el gráfico II los resultados de remoción de fenoles.

**Gráfico II. Remoción de fenol con 0.25M de  $\text{H}_2\text{O}_2$**



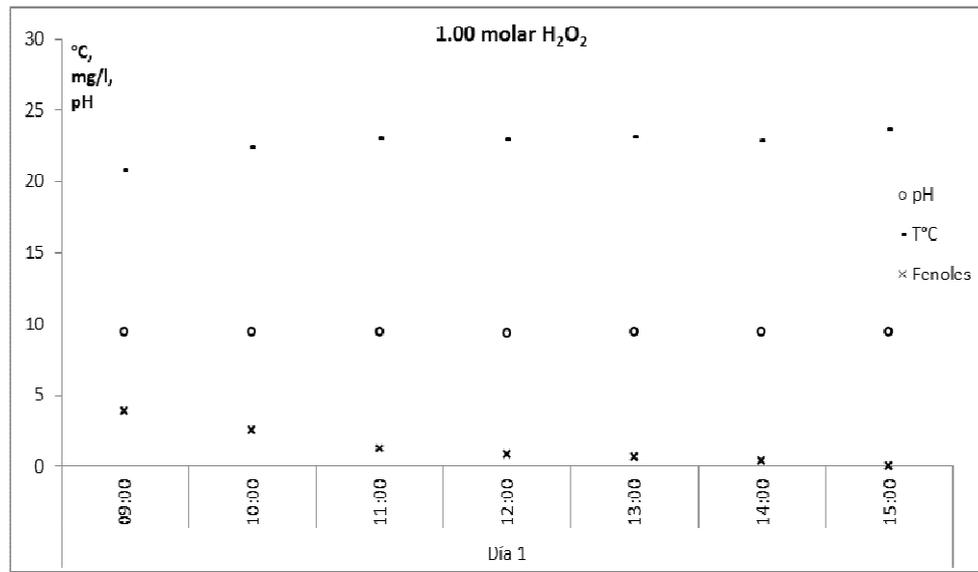
Para las corridas experimentales, usando el  $\text{H}_2\text{O}_2$  con una concentración de 0.50 molar, los resultados indicados en el gráfico III.

**Gráfico III. Remoción de Fenol con 0.5M de  $\text{H}_2\text{O}_2$**

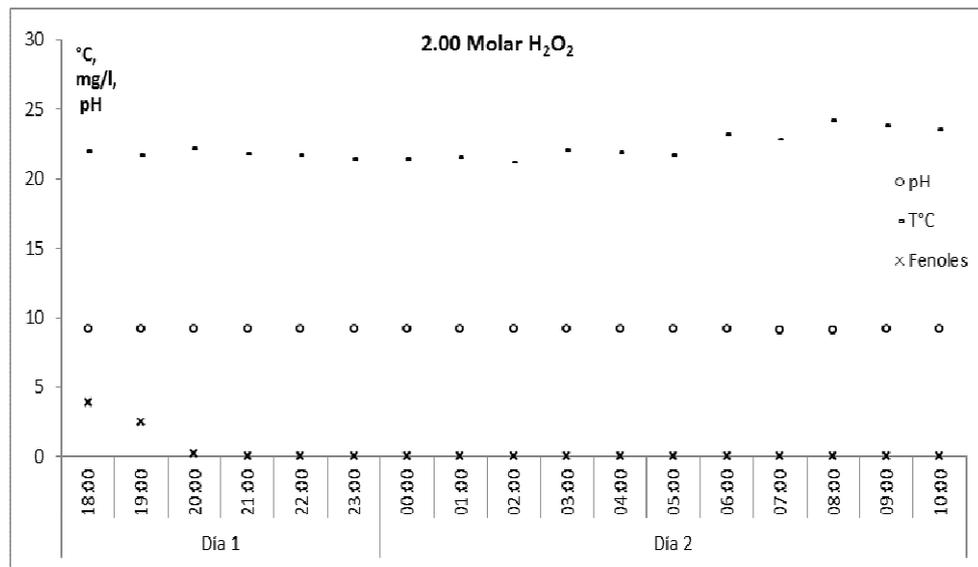


Para las corridas experimentales donde se usó concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , en 1.00 y 2.00 molar, la concentración del ozono siempre fue constante con un valor de 0.22 mg/l.

**Gráfico IV. Remoción de Fenol con 1M de  $\text{H}_2\text{O}_2$**

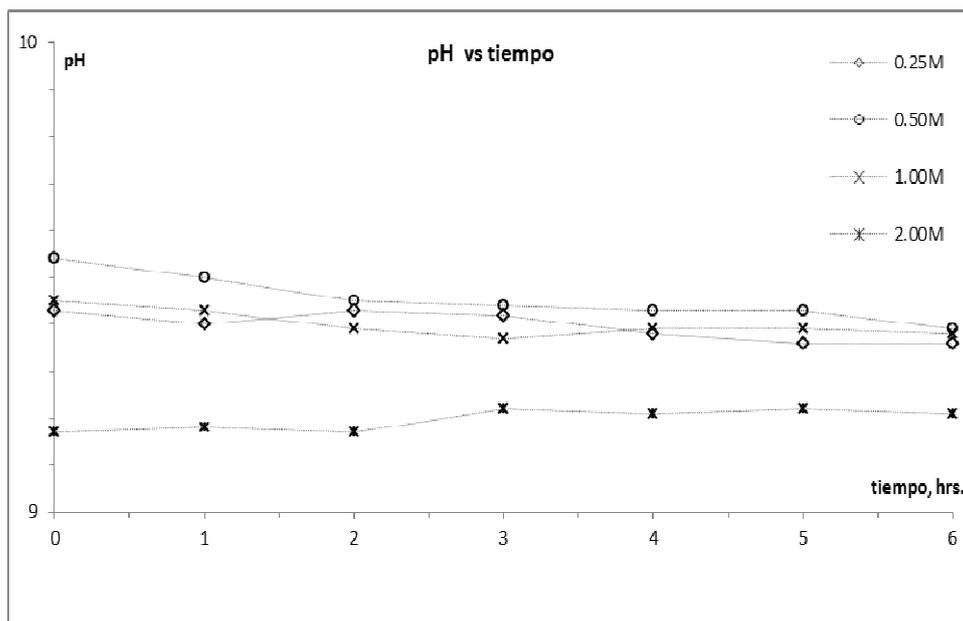


**Gráfico V. Remoción de fenol con 2M de  $\text{H}_2\text{O}_2$**



Los gráficos mostrados a continuación, muestran el comportamiento de los parámetros pH, Temperatura y concentración de Fenoles con respecto al tiempo, a diferentes concentraciones de peróxido de hidrogeno y concentración constante de ozono.

**Gráfico VI. Variación del pH en función del tiempo**



**Gráfico VII. Variación de la temperatura en función del tiempo**

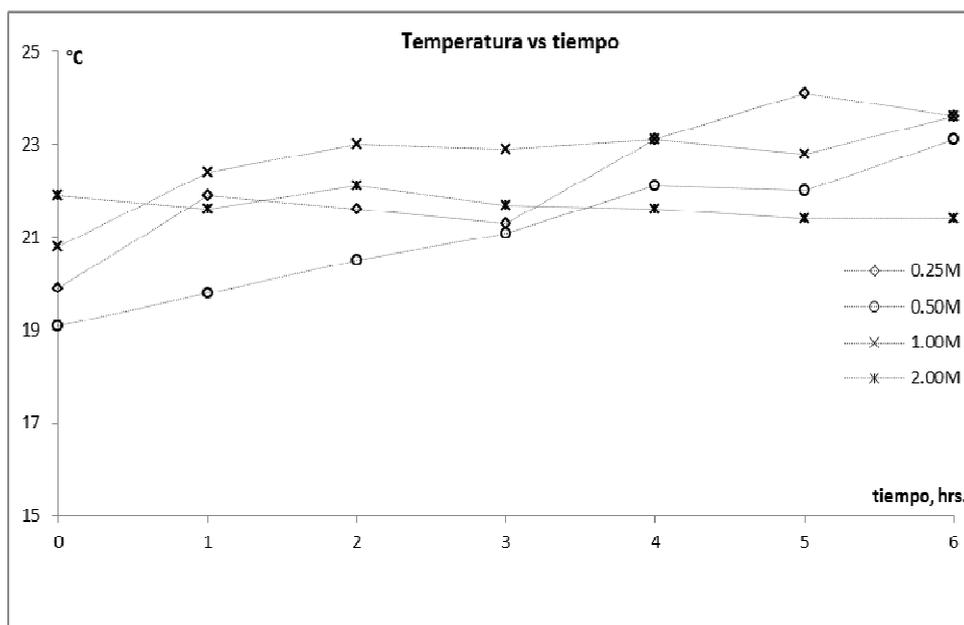


Gráfico VIII. Remoción de Fenol (mg/l) en función del tiempo

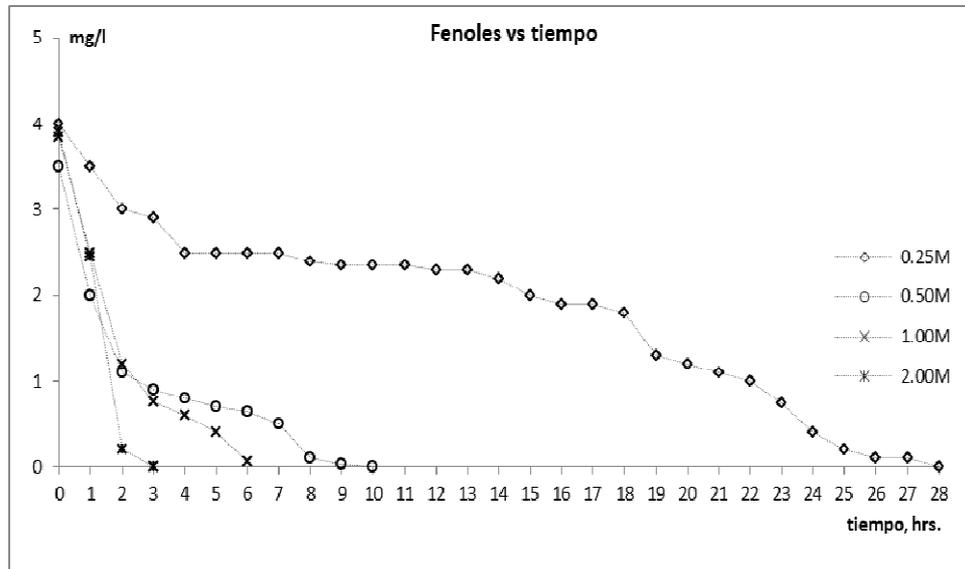
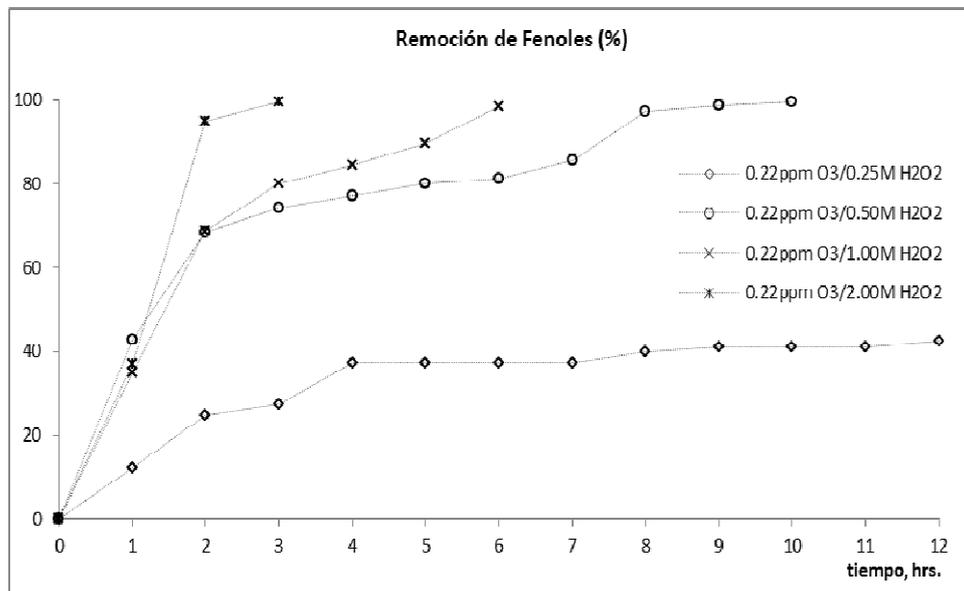


Gráfico IX. Oxidación de Fenol (%) en función del tiempo



Se observa el gráfico IX, la eficiencia de remoción de fenol con respecto al tiempo, para los 4 casos o corridas experimentales diferentes o concentraciones de peróxido de hidrógeno.

## CAPITULO VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Discusión de los resultados

Las aguas residuales de los baños portátiles, por contener compuestos químicos de cadenas cerradas, necesitan reacciones que rompan estos enlaces y así desdoblar en moléculas o compuestos más lineales o degradables, que puedan ser tratados por sistemas biológicos posteriormente.

Como se explicó anteriormente el radical oxhidrilo, formado a partir de las reacciones del peróxido de hidrógeno con el agua y luego el subproducto de esta reacción, con el ozono, viene a ser el oxidante que utiliza su potencial para desdoblar los compuestos fenólicos contenidos en el agua residual, pero este radical OH al no ser exclusivo, también desdobla o reacciona con otros compuestos, como por ejemplo la materia orgánica representada como DQO (demanda química de oxígeno).

La cantidad de radicales OH formados en las diferentes corridas experimentales, y por ende la oxidación parcial o total de los compuestos contenidos en el agua residual de los baños portátiles, depende de la relación Peróxido/ozono, es decir de la concentración del  $H_2O_2$  varíe, mientras que la concentración del ozono se mantiene constante, para este caso.

El valor de pH no aumentó ni disminuyó sustancialmente en las reacciones que se dieron a diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno, lo que nos indica que las reacciones que se dieron no afectan el pH de las muestras, manteniéndose constante durante el tiempo de reacción de todas las corridas experimentales.

El valor promedio de pH iniciales para las diferentes muestras se redujo solo hasta en un 1.27%, esto debido a que las reacciones tienen muy poca afinidad a la acidificación o la formación de  $H^+$  producto de las reacciones es mínima.

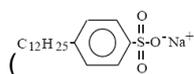
Los valores de pH constantes se mantuvieron así durante todo el tiempo de reacción para la disminución de los compuestos fenólicos en las muestras de aguas residuales.

Se podría decir entonces, que el valor del pH de todas las muestras se mantuvo constante durante las reacciones para la remoción de los compuestos fenólicos. Ver tabla III.

**Tabla III. Valores de pH durante el experimento**

pH						
[ ] H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	inicio	máxima	final	%máx.	%final	
0.25	9.43	9.43	9.31	0.00	-1.27	
0.50	9.54	9.54	9.44	0.00	-1.05	
1.00	9.45	9.45	9.38	0.00	-0.74	
2.00	9.17	9.22	9.22	0.54	0.54	

Para compuesto de DODECIL BENCENO SULFONATO DE SODIO



( presente en las aguas residuales de los baños portátiles), por ejemplo, las reacciones no desdoblan o atacan los enlaces de hidrogeno, para que de esta manera aumenten los H<sup>+</sup> en el agua y por consiguiente disminuya el pH.

En el caso de la corrida con peróxido de hidrogeno 2M, el pH no siguió la tendencia de ascenso, mas bien aumentó en un 0.54% del valor inicial. Esto se puede explicar a la velocidad de la reacción donde la presencia de OH residual puede elevar el pH.

Los resultados nos indican que la temperatura varía no solo con el tiempo de reacción, si no, también con la relación peróxido/ozono.

En ninguno de los casos la temperatura llego a aumentar al 25% de la temperatura de inicio. Ver tabla IV.

**Tabla IV. Variación de la temperatura durante el experimento**

TEMPERATURAS °C						
[ ] H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	inicio	máxima	final	%máx.	%final	
0.25	19.9	24.1	23.1	21.1	16.1	
0.50	19.1	23.6	21.3	23.6	11.5	
1.00	20.8	23.6	23.6	13.5	13.5	
2.00	21.9	22.1	22.1	0.9	0.9	

Observen que para las reacciones donde las concentraciones de peróxido de hidrogeno son más altas, las variaciones o aumentos de temperatura son mínimas, en comparación con las corridas experimentales con peróxido de hidrogeno a concentraciones bajas.

Las reacciones de remoción de fenoles con concentraciones altas de peróxido de hidrogeno son más rápidas o violentas dando poco tiempo a la generación de calor traducida en aumento de temperatura.

Para todos los casos siempre hay aumento de temperatura.

La remoción de fenoles es más rápida, llegando a valores de cero, cuando la concentración del peróxido de hidrogeno es mayor (ver los resultados para las concentraciones de 1 y 2 molar de  $H_2O_2$ ).

Esto nos indica, que la formación de compuesto hidroxilo es mayor, atacando los compuestos fenólicos de las aguas residuales de los baños portátiles mucho más rápido que a concentraciones menores de peróxido de hidrogeno. La concentración del gas ozono siempre se mantiene constante en todas las reacciones que suceden en el experimento.

Finalmente se observa el gráfico 08 donde se describe la eficiencia de remoción de compuestos fenólicos con respecto al tiempo para las diferentes concentraciones de soluciones de peróxido de hidrogeno, manteniendo constante la concentración del ozono en 0.223 mg/l.

Para un tiempo de reacción de 3 horas, tenemos que la reducción del fenol en la muestra con 0.223mg/l  $O_3/2M H_2O_2$ , la eficiencia de remoción es cerca del 100%, mientras que en la muestra con 0.223mg/l  $O_3/0.25M H_2O_2$ , la eficiencia de remoción de fenol disminuye a un 30%.

A mayor concentración del peróxido de hidrogeno, manteniendo constante la concentración del ozono, tenemos mayor eficiencia en la remoción del compuesto fenólico. Esto se traduce en costos de los insumos en este proceso de oxidación química avanzada.

Actualmente no existen aplicaciones de procesos de oxidación química avanzada (POA) en aguas residuales de baños portátiles, por lo que las comparaciones de eficiencia con otros métodos de POA o su practicidad en el campo no serán incluidas en este trabajo.

## **6.2. EFICIENCIA DE OTROS PROCESOS DE OXIDACION QUIMICA AVANZADA**

Existen aplicaciones usando diversos procesos de oxidación química avanzada, sobre todo en los estados unidos, donde se existen plantas para remover diversos componentes orgánicos de las fuentes de agua. En la tabla V, se compara la eficiencia de los diversos procesos de oxidación química avanzada para remover MTBE (metil ter-butil éter).

El MTBE sirve para aumentar el octanaje en los combustibles. Cuando la gasolina se libera al medio ambiente, una variedad de compuestos químicos, incluyendo MTBE, se puede transferir al aire o agua.

Debido a las particularidades, el MTBE de propiedades físico-químicas (tales como alta solubilidad, bajo coeficiente de partición en suelo-agua y baja constante de Henry), es algo difícil de eliminar del agua. (Small treatment systems for removal of Methyl tertiary-butyl ether "MTBE" from private drinking water Wells, Amparo Flores, Andrew Stocking, Inc. 180 Grand Avenue Suite 1000, Oakland, CA 94612.3754).

Para la remoción del MTBE de las aguas para consumo humano, se usaron los diversos procesos de oxidación química, con los cuales se discutieron los resultados de las eficiencias de los mismos en un amplio informe.

En el Perú, este y otros compuestos orgánicos están presentes en el agua de beber, con lo cual estamos expuestos a estos contaminantes. Esta problemática tiene solución con la existencia de procesos de oxidación química avanzada.

**Tabla V. Comparación de eficiencia de procesos de oxidación química para remover MTBE.**

<b>Technology</b>	<b>Range of Reactor Capacities</b>	<b>Reported MTBE Removal Efficiencies</b>
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 to 100 gpm, small portable site remediation HiPOx systems (Waters, 1999)</li> <li>• 500 to 3000 gpm, potable and large remediation HiPOx systems (Waters, 1999)</li> <li>• Parallel HiPOx modules (&gt; 3000 gpm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• up to 80% (Liang et al., 1999a)</li> <li>• &gt;99% (Table 3-5, APT and Hydroxyl Systems Case Studies)</li> </ul>
<b>O<sub>3</sub>/UV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 to 1200 gpm, Ultrox System (Himebaugh, 1999)</li> <li>• Rayox-O Process – custom-built for desired capacity (Cater, 1999)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No published removal efficiencies for drinking water systems.</li> </ul>
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Single UV Lamp Reactor: 50-700 gpm (Crawford, 1999)</li> <li>• Up to 3000 gpm, Rayox Tower System (Crawford, 1999)</li> <li>• 5 to 1200 gpm, Ultrox System (Himebaugh, 1999)</li> <li>• Riptide™ Pulsed UV Reactors: 8-350 gpm (Bender, 1999)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 80 – 95% (Wagler and Malley, 1994)</li> <li>• &gt; 99% (Table 3-5, Charnock Well Field Case Study)</li> </ul>
<b>E-beam</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40 to 100 gpm, mobile unit (Tornatore, 1999)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt;80% (Cooper, 1998)</li> <li>• 60 – 99% (Cooper et al., 1999)</li> </ul>
<b>Hydrodynamic Cavitation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 to 2000 gpm, Hydrox System (Pisani, 1999)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt;80% (Pisani, 1999)</li> </ul>
<b>TiO<sub>2</sub>-Catalyzed UV Oxidation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custom-built units</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 76 – 95% (Barreto et al., 1995)</li> </ul>
<b>Fenton's Reaction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custom-built units</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No published removal efficiencies for drinking water systems.</li> </ul>

Tabla 05, extraída de Advanced Oxidation Processes, Literature Review  
 Sunil Kommineni, Ph.D. Jeffrey Zoekler Andrew Stocking, P.E. Sun Liang,  
 Ph.D. Amparo Flores, Michael Kavanaugh, Ph.D., P.E.

### 6.3. ANALISIS DE COSTOS

Con el fin de presentar los costos del proceso de oxidación química avanzada ozono-peróxido de hidrogeno para remover compuestos fenólicos de las aguas residuales de los baños portátiles, se consulto con proveedores de equipos, obra civil, infraestructura, productos químicos, dosis, electricidad, y piezas de repuesto. Vendedores diversos proporcionaron información detallada para ayudar en esta evaluación de costos.

La Jefatura del área de mantenimiento de la empresa Lima Airport Partners, concesionaria del aeropuerto internacional Jorge Chávez, ubicado en el Callao, ofreció todas las facilidades para el análisis de costes de este proyecto.

La evaluación del costo de tratamiento usando el proceso químico de oxidación avanzada ozono-peróxido de hidrogeno, consistió en evaluar un rango típico de agua residual de baño portátil de transporte aéreo, el caudal promedio diario, las concentraciones de fenoles en el afluente y las concentraciones deseadas en el efluente.

#### Consideraciones del Afluente:

Caudal: 10m<sup>3</sup>/hora

Fenoles: 4ppm

DBO: 6,000 ppm

pH: 9.5

Temperatura: 25°C

#### Consideraciones del Efluente:

Fenoles: ≤0.1ppm

Nuestro piloto lo llevamos a escala industrial. Los equipos, materiales y los insumos que se requieren en las tablas VI y VII.

Para las cámaras o estanques se considera material de concreto enterrada. Incluye cámara de rejillas para retención de sólidos mayores, cámara de equalización y sistema de bombeo de agua tratada.

**Tabla VI. Lista de equipos para análisis de costos**

<b>Equipos</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Potencia individual (kW)</b>
Generador de Ozono	6 gr/h	01	0.110
Bomba dosificadora	4 gln/h	01	0.024
Bomba sumergible-venturi, oxidación	8 lt/s	02	0.746
Bomba sumergible, equalizador	8 lt/s	02	0.746
Soplador de aire (incluye motor)	1m <sup>3</sup> /min	02	1.789

**Tabla VII. Lista de insumos para análisis de costos**

<b>Insumo</b>	<b>Característica</b>
Peróxido de Hidrogeno, granel	50%
Energía Eléctrica	220v

El tiempo de reacción será de 3 horas (tiempo de retención en la cámara de oxidación), con este rango se asegura la remoción de más del 75% de fenoles para las concentraciones de 0.50, 1 y 2 molar de peróxido de hidrogeno, manteniendo constante la dosificación de la concentración de ozono. Estos datos se obtienen de nuestro piloto.

Para un tiempo de reacción de 3 horas y un caudal de 10m<sup>3</sup>/hora, se necesita una cámara de oxidación de 30 m<sup>3</sup> de volumen útil, lo cual nos da, con el porcentaje de seguridad un estanque de 36m<sup>3</sup> de volumen total. Además se ha considerado en los cálculos una cámara de

ecualización de 10 m<sup>3</sup> de volumen total para la acumulación e impulsión del agua tratada.

Ambas cámaras serán de material de concreto y enterrada para este calculo. Se considera además una cámara de rejillas de medidas estándar según OS.090 del reglamento general de edificaciones.

**Tabla VIII. Costos del sistema H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> para remover compuestos fenólicos de aguas residuales de baños portátiles**

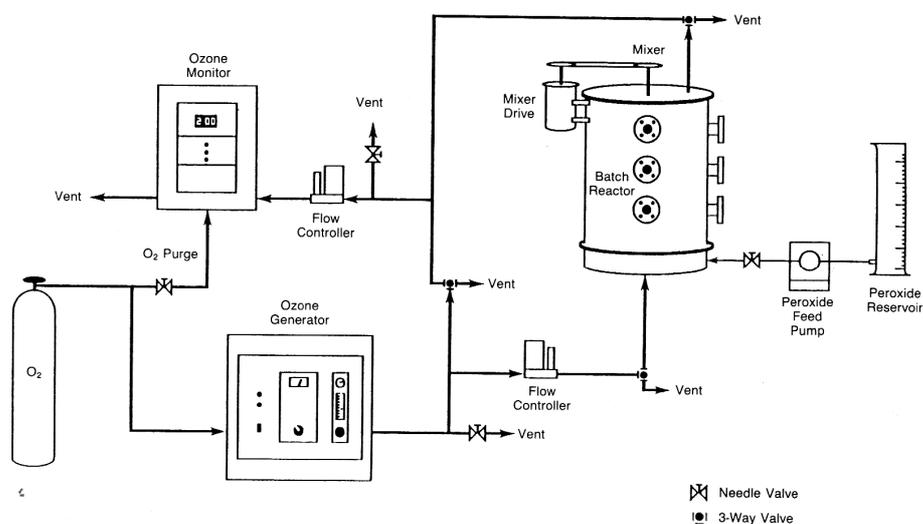
<b>Descripción</b>	<b>Costo (\$)</b>
Unidad de Oxidación Avanzada <sup>1</sup>	100,000
Tuberías, válvulas, eléctricos (30%)	30,000
Mano de obra (10%)	10,000
<b>SUBTOTAL</b>	<b>140,000</b>
Ingeniería (10%)	10,000
<b>SUBTOTAL</b>	<b>150,000</b>
Contratista (15%)	15,000
<b>SUBTOTAL</b>	<b>165,000</b>
Contingencia (15%)	15,000
<b>CAPITAL TOTAL</b>	<b>180,000</b>
<b>AMORTIZACION DE CAPITAL (ANUAL)<sup>2</sup></b>	<b>24,098</b>
<b>OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (ANUAL)</b>	<b>77,017</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL</b>	<b>101,115</b>
<b>COSTO TOTAL POR M<sup>3</sup> TRATADO</b>	<b>0.117</b>

**Tabla IX. Resumen de costos de operación y mantenimiento anual**

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo Unitarios (\$)	Costo(\$)
Repuestos	Global	1	12,000	12,000
Operador <sup>3</sup>	día	624	15	9,360
Análisis <sup>4</sup>	muestra	212	15	3,180
Químicos <sup>5</sup>	litros	97,459	0.50	48,730
Energía	kWh	29,506	0.127	3,747
<b>Operación y Mantenimiento Anual (\$)</b>				<b>77,017</b>

1. Costo de la unidad de oxidación química avanzada.
2. Amortización basada en un periodo de 20 años y una tasa de 12%.
3. Se considera 02 operadores-mantenedores en turnos de 12 horas cada uno, de lunes a sábado.
4. Laboratorio externo, dos parámetros, dos veces por semana (Fenoles, DBO).
5. Costos de insumo químico basado en dosificaciones y precios del proveedor.

**Figura 3. Esquema recomendado para instalación de planta Bach para oxidación de compuestos fenólicos con oxidación química avanzada ozono peróxido de hidrogeno.**



## CAPITULO VII. CONCLUSIONES

El proceso de oxidación química avanzada ozono-peróxido de hidrogeno reduce la contaminación por compuestos fenólicos de las aguas residuales de los baños portátiles, con una eficiencia mayor al 74% para una relación Ozono/peróxido de hidrogeno de 0.446.

Se determinaron las relaciones  $O_3/H_2O_2$  y la eficiencia de remoción de compuestos fenólicos de las aguas residuales de los baños portátiles. Se tomo como referencia, 3 horas de reacciones para cada corrida experimental. Ver Tabla 04.

**Tabla X**

[ ] $O_3$ mg/litro	[ ] $H_2O_2$ mol/litro	Relación $O_3/H_2O_2$	Eficiencia* 3 horas
0.223	0.25	0.892	27.5%
0.223	0.50	0.446	74.3%
0.223	1.00	0.223	80.2%
0.223	2.00	0.112	99.7%

\*Eficiencia de remoción de compuestos fenólicos

En el proceso de oxidación química avanzada ozono-peróxido, el radical oxidante OH no es selectivo, por esta razón, la oxidación producida en las aguas residuales de los baños portátiles también alcanzan a otros compuestos como el DBO. La carga orgánica contenida en las aguas residuales de los baños portátiles también es reducida en valores hasta de 87%, lo que hace viable el tratamiento posterior con sistema biológico de fangos activados. (Ver en anexos cuadro 03, reporte de análisis 1010036 del laboratorio ENVIROLAB).

La eficiencia del proceso de remoción de compuestos fenólicos de las aguas residuales de los baños portátiles, aumenta al mayor consumo de peróxido de hidrogeno.

Los costos asociados al consumo de los insumos químicos en la remoción de los compuestos fenólicos de las agua residuales de los baños portátiles con proceso de oxidación avanzado ozono-peróxido, son altos, pero relacionados con el

tiempo de reacción de los compuestos. A mayor tiempo de reacción, menor consumo de insumos químicos.

El costo asociado al equipo generador de ozono, es único, ya que solo necesita aire seco o filtrado del medio ambiente para luego generar el ozono. El tamaño del equipo depende de la concentración y flujo de ozono deseado.

El calor generado por las reacciones exotérmicas del proceso de oxidación no llega a alcanzar valores de 25°C, por lo que el material de fabricación del reactor puede ser de material que soporte estas temperaturas, como el plástico duro de polipropileno o rotoplast.

El efluente pre tratado con el proceso de oxidación avanzada ozono-peróxido puede recibir un tratamiento con sistema biológico para cumplir con el DS-03-2010-MINAN.

## **CAPITULO VIII. RECOMENDACIONES**

Los efluentes de los baños portátiles tratados con el proceso de oxidación avanzada pueden posteriormente ser tratados con un sistema biológico, como lodos activados para que finalmente sean evacuados a la red pública. Los efluentes de los baños portátiles sin un tratamiento adecuado no cumplen con la legislación nacional vigente (Valores máximos admisibles VMA).

Los residuos de gran tamaño que acompañan a las aguas residuales de los baños portátiles (papeles, etc.), que quedan atrapados en la criba o son separados del agua residual manualmente, deben ser escurridos y luego ser tratados antes de la disposición, con cal viva o hidratada para disminuir el contenido patógeno.

El material para este tipo de reactor puede ser de plástico reforzado como por ejemplo el rotoplast, ya que la temperatura no es muy elevada para causar daño a este material.

## **CAPITULO IX. FUENTES DE INFORMACIÓN**

**Han, YH., & Utsumi, H.** (2003). Analysis of hydroxyl radical generation in advanced oxidation process effect of humic substances during ozonation, vol. 1, Japan, Journal of Water and Environment Technology, No. 2 Korea-Japan Symposium '03 (No. 3 & 4 combined) PP 209-216

**Kepa, U., Satnczyk-Mazanek, E., & Stepniak, L.** (2006). The use of the advanced oxidation process in the ozone-hydrogen peroxide system for the removal of cyanide from water. Polonia. Technical University of Czestochowa, Institute of Environmental Engineering, PP 42-200

**Borg, C.** (2004). Advanced oxidation process reduces 1,4-dioxane to <3ppb in groundwater, Groundwater remediation. Edition WWI. USA. Water & Wastewater International. PP 212.

**Forero, JE., Ortiz, OP., & Rios, F.** (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería Ecopetrol S.A. Colombia. ICP Instituto Colombiano del Petróleo. PP 30.

**Melin, G.** (2000). Treatment Technologies for Removal of Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE) from Drinking Water. 2th edition. USA. Published by the Center for Groundwater Restoration and Protection National Water Research Institute NWRI-99-06. PP 45.

**Ramírez, C.R.** (2002). Oxidación de fenoles con peróxido de hidrogeno y ozono. Cancún, México. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. PP 28.

**Mofidi, A.A., Min, J.H., Palencia, L.S., Coffey, B.M., Liang, S., & Green, J.F.** (2002). Advanced Oxidation Processes and UV Photolysis for Treatment of Drinking Water. California, USA. Metropolitan Water District of Southern, la Verne, California. PP. 180.

**Bódalo, A., Gomez, J.L., Gomez, E., Hidalgo, A.M., Murcia, D., & Gomez, M.** (2008). Eliminación de compuestos fenólicos en aguas residuales (y II) [en línea]. Artículo. Universidad de Murcia, departamento de Ingeniería Química. España. [Fecha de acceso: 10, 13, 15, 16 y 19 de enero del 2011]. URL disponible en: <http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/432/09ARTICULOFEb.pdf>

**Garrido, J.A., Brillas, E., Cabot, P.L., Centellas, F., Arias, C., & Rodríguez, R.M.** (2007). Mineralization of Drugs in Aqueous Medium by Advanced Oxidation Processes [en línea]. Artículo. Universidad de Barcelona, España. [Fecha de acceso: 25, 26, 27, 28 y 30 agosto 2011]. URL disponible en: [http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S0872-19042007000100003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S0872-19042007000100003&script=sci_arttext)

**Perry, R.H.** (1994). Manual del Ingeniero Químico. 6ta edición (3r edición en español), Tomo V. México. Editorial Mac Graw Hill. PP 422.

## CAPITULO X. ANEXOS

Cuadro VII, procesos con Oxidación química avanzada

AOP PROCESS	MAJOR REACTIONS AND BY-PRODUCTS
$H_2O_2/O_3$	$H_2O_2 + H_2O \rightarrow HO_2^- + H_3O^+$ $O_3 + HO_2^- \rightarrow \bullet OH + O_2 + O_2$ $\bullet OH + MTBE \rightarrow$ Oxidation By-products (TBA, TBF, acetone, aldehydes)
$O_3/UV$	$O_3 + H_2O \xrightarrow{h\nu} O_2 + H_2O_2$ ( $\lambda < 300$ nm) $2 O_3 + H_2O_2 \rightarrow 2 \bullet OH + 3 O_2$ $\bullet OH + MTBE \rightarrow$ Oxidation By-products (TBA, TBF, acetone, aldehydes)
$H_2O_2/UV$	$H_2O_2 \xrightarrow{h\nu} 2 \bullet OH$ ( $\lambda < 300$ nm) $\bullet OH + MTBE \rightarrow$ Oxidation By-products (TBA, TBF, acetone, aldehydes)
<i>E-beam</i>	$H_2O + \gamma \rightarrow 2.7 \bullet OH + 0.6 \bullet H + 2.6 e_{aq}^- + 0.45 H_2 + 0.7 H_2O_2 + 2.6 H_3O^+$ $\bullet OH + MTBE \rightarrow$ Oxidation By-products (TBA, TBF, acetone, aldehydes) $MTBE + e_{aq}^- \rightarrow (CH_3)_3C\bullet + \bullet OCH_3$ $\bullet OCH_3 + H_2O \rightarrow HOCH_3 + OH^-$ $MTBE + H\bullet \rightarrow$ Reduction By-products

Foto I. Baño Portátil, presentación común



**Foto II. Interior de un baño portátil de campamento**



**Foto III. Descarga de agua residual de baño portátil en alcantarillado**



**Foto IV. Descarga de agua residual de baño portátil en alcantarilla.**



**Foto V. Descarga de agua residual de baño portátil en alcantarillado**



Foto VI. Descarga de agua residual de baño portátil en alcantarilla.



Foto VII. Producto químico extranjero para baño portátil.



Foto VIII. SaniPak, producto extranjero usado en los baños portátiles.



Foto IX. MTB, producto nacional usado en los baños portátiles.



## Cuadro VIII

**TABLA DE REPORTE DE ANALISIS - 1010036**  
**ALEJANDRO QUICANO TAFUR**



**ENVIROLAB-PERU S.A.I**  
 Ambiental Laboratorio Perú

**Fecha de envío:** 22/12/2010  
**Tipo de muestra:** Agua Servida, Agua Servida Pre Tratada  
**Analizado por:** ENVIROLAB-PERÚ S.A.C.  
**Muestreado por:** Cliente  
**Procedencia:** Planta Piloto  
**Guía de Envío:** Cadena de Custodia de fecha : 2010-12-13

Código de Laboratorio	Descripción de muestras	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	D.B.Os mg/L	Fenoles mg/L
1010036-01	Ingreso a Reactor piloto	13/12/2010	14:00	10125	4.158
1010036-02	Salida de Reactor piloto	13/12/2010	14:10	1275	0.461

N.R. : No Registrado.

< : Significa Menor al nivel de detección indicado.

**Observaciones:** Las muestras llegarán preservadas al Laboratorio.

**Foto X. Equipo generador de ozono de 0.2 gr/h**



Foto XI. Planta piloto, reactor, dosificadores de  $O_3$  y  $H_2O_2$



Foto XII. Análisis de fenoles en laboratorio de campo



**Foto XIII. Muestras en diferentes tiempos de reacción**



**Foto XIV. Muestras en diferentes tiempos de reacción**





**Cuadro IX. Anexo I de los VMA**

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	DBO5	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales (S.S.T)	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	A y G	100

**Cuadro X. Anexo II de los VMA**

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr <sup>+6</sup>	0.5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.02
Níquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0.5
Sulfatos	mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	500
Sulfuros	mg/L	S <sup>-2</sup>	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	NH <sup>+4</sup>	80
pH <sup>(2)</sup>		pH	6-9
Sólidos Sedimentables <sup>(2)</sup>	mL/L/h	S.S.	8.5
Temperatura <sup>(2)</sup>	°C	T	<35