



---

---

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA  
RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO  
KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON”**

**TESIS PROFESIONAL**

**PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:**

**VERONICA JANETTE CEDEÑO GARCIDUEÑAS**

**ASESOR DE TESIS:**

**M.C. GABRIEL MARTÍNEZ HERRERA**

**MORELIA, MICHOACÁN JUNIO DE 2008**



**U.M.S.N.H.**

## **FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

Número de oficio.344-/2007/2008.

**C.  
VERÓNICA JANETTE CEDEÑO GARCIDUEÑAS  
PASANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA  
P R E S E N T E.**

En contestación a su atenta solicitud de fecha 01 de octubre del 2007 me permito comunicarle a usted que se aprueba el tema de tesis propuesto para presentar Examen Recepcional en la Carrera de Ingeniero Químico.

El tema aprobado: "**EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO DE FENTON.**" el cual se desarrollará bajo el siguiente índice:

	<b>TITULO Y RESUMEN</b>
<b>CAPITULO 1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>
<b>CAPITULO 2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>
<b>CAPITULO 3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODO</b>
<b>CAPITULO 4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>
<b>CAPITULO 5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>

Para tales efectos fungirá como asesor de su tesis el M en C. **Gabriel Martínez Herrera**. Profesor de la Facultad de Ingeniería Química y su mesa de jurado para revisión y realización de este trabajo estará integrada por:

<b>M.C. SALVADOR PEREZ DIAZ</b>	<b>PRESIDENTE</b>	<b>(7401837-0)</b>
<b>ING. ALFONSO MARTÍNEZ RODRIGUEZ</b>	<b>V O C A L</b>	<b>(7201450-4)</b>
<b>M.C. GABRIEL MARTÍNEZ HERRERA</b>	<b>V O C A L</b>	<b>(8303068-9)</b>
<b>DRA. MARIANA RAMÓS ESTRADA</b>	<b>SUPLENTE</b>	<b>(0400219-9)</b>

**ATENTAMENTE**  
Morelia, Mich. 03 abril del 2008.

**M. en A. DELIA MORENO JUAREZ**  
**DIRECTORA DE LA FACULTAD**  
**DE INGENIERÍA QUÍMICA**



## **AGRADECIMIENTOS**

### **INSTITUCIONES**

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA  
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL  
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE UMSNH, PROYECTO 20.19

### **ASESOR**

M.C. GABRIEL MARTÍNEZ HERRERA

### **SINODALES**

PRESIDENTE	M.C. SALVADOR PERÉZ DÍAZ
VOCAL	ING. ALFONSO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ
VOCAL	M.C. GABRIEL MARTÍNEZ HERRERA

## **DEDICATORIAS**

### **A DIOS**

#### **A MIS PADRES**

Aurora Olivier Garcidueñez Soto y Miguel Angel Cedeño Martínez

Les doy mi más sincero agradecimiento por todo lo que me han dado en el transcurso de mi vida, el amor, los valores, mi educación...pero sobre todo les agradezco que me hayan ayudado a ser la mujer que soy.

#### **A MIS HERMANOS**

Aurora del Carmen, Ana Lilia y Miguel Angel.

Agradezco profundamente que sean mis hermanos, porque me han apoyado, me han querido y me han dado orientación en situaciones que no encontraba salida.

#### **A MIS FAMILIARES**

Mi prima Selene, Susana, mis abuelitas, a todos gracias.

#### **EN ESPECIAL**

Francisco Rosales Pérez, Sandra Mayra Rubio Marroquín y al M.C. Isaraín Chávez Guerrero

#### **A LA FAMILIA HUERTA HERNÁNDEZ**

Sra. María, Sr. Fernando y a Fer.

Les doy las gracias por tenderme la mano, recibirme en su casa y hacerme sentir parte de su familia, mil gracias.

#### **A MI NOVIO**

I.Q. Saúl Alejandro Huerta Hernández

Quiero agradecerte por todos los momentos que hemos vivido juntos, tu apoyo incondicional, alentarme a seguir adelante, tu sinceridad, tu amor...pero sobre todo te agradezco por ser quien eres, por ser parte de mi vida.

## **A MIS AMIGOS**

Xareeni Coral Camacho Carrasco  
Miriam Chávez Reyes  
Carmen Maciel Arreola  
Tamara Arechavala Monterrubio

Gracias por estar siempre presentes en mi lucha por esta vida.

# ÍNDICE

	PÁGINA
<b>TÍTULO Y RESUMEN</b> _____	1
<b>Capítulo 1. Introducción</b> _____	2
Generalidades _____	4
1.1 Justificación _____	5
1.2 Objetivo _____	8
1.3 Hipótesis _____	8
1.4 Alcance _____	9
<b>Capítulo 2. Marco Teórico</b> _____	10
2.1 Características del agua residual industrial _____	11
2.1.1 Contaminantes principales _____	12
2.1.2 Influencia del agua residual industrial en el agua residual municipal _____	14
2.2 Reactivo de Fenton _____	15
2.2.1 Electrogenación del reactivo de Fenton _____	20
2.2.2 Propiedades del reactivo Fenton _____	22
<b>Capítulo 3. Materiales y método</b> _____	23
3.1 Materiales, equipo y reactivos utilizados _____	23
3.2 Metodología general _____	24
3.3 Parámetros a medir _____	29
3.4 Pruebas con reactivo Fenton _____	30
3.4.1 Pruebas exploratorias _____	30
3.4.2 Pruebas finales _____	30
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión</b> _____	31
4.1 Resultados de la caracterización del agua residual municipal _____	31
4.2 Resultados de la caracterización del agua residual industrial _____	31
4.3 Resultados de las pruebas exploratorias _____	32
4.4 Resultados de las pruebas finales _____	47
4.5 Análisis de los resultados para las variables color, DQO, pH _____	49
4.5.1 Color _____	49
4.5.2 DQO _____	49
4.5.3 pH y conductividad _____	50

<b>Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>51</b>
---	-----------

5.1 Conclusiones	51
------------------	----

5.2 Recomendaciones	53
---------------------	----

Bibliografía	54
--------------	----

## **APÉNDICES.**

Apéndice A	55
------------	----

Apéndice B	58
------------	----

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
Tabla 1. Características promedio de la muestra del agua residual	14
Tabla 2. Poder oxidante de distintos agentes relativos al cloro	15
Tabla 3. Características del agua residual municipal	31
Tabla 4. Características promedio de la muestra de agua residual	31
Tabla 5. Características del agua residual al inicio de la prueba	32
Tabla 6. Volúmenes diferentes de $H_2O_2$ al 50% Vol	32
Tabla 7. Medición Final con diferentes volúmenes de $H_2O_2$ al 50%	34
Tabla 8. Condiciones iniciales del agua residual	34
Tabla 9. Medición de Color con volúmenes diferentes de $H_2O_2$ al 30% Vol	36
Tabla 10. Condiciones al final de la prueba con $H_2O_2$ al 30% Vol	36
Tabla 11. Valores de acidificación del agua	37
Tabla 12. Prueba con $H_2O_2$ al 50% vol. y solución de sulfato ferroso, 120 min	37
Tabla 13. Mediciones Finales Prueba con $H_2O_2$ al 50% vol. y solución de sulfato ferroso	38
Tabla 14. Condiciones iniciales	39
Tabla 15. Prueba con $H_2O_2$ al 30% vol. y solución de sulfato ferroso, 24hr	39
Tabla 16. Medición Final	40
Tabla 17. Condiciones iniciales del agua antes de añadir ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )	40

<b>Tabla 18.</b> Condiciones del agua después de añadir ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )	40
<b>Tabla 19.</b> Color aparente y real con 4V	42
<b>Tabla 20.</b> Medición final con 4V	42
<b>Tabla 21.</b> Valores de Color Aparente y Real con 6V	44
<b>Tabla 22.</b> Valores finales de la prueba con 6V	44
<b>Tabla 23.</b> Valores de Color Aparente y Real con 8V	46
<b>Tabla 24.</b> Mediciones finales	46
<b>Tabla 25.</b> Condición inicial del agua	47
<b>Tabla 26.</b> Parámetros del agua acidificada	47
<b>Tabla 27.</b> Valores de Color Real, para la electrogeneración de reactivo de Fenton con 4V	48
<b>Tabla 28.</b> Características Finales después de la prueba	48
<b>Tabla 29.</b> Valores de DQO	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
<b>Fig. 1.</b> Distribución global de la población sin mejoramiento en el suministro de agua, por región	6
<b>Fig. 2.</b> Distribución global de la población sin servicio del mejoramiento en el saneamiento del agua, por región.	6
<b>Fig. 3.</b> Suministro de agua, cobertura global, 2000	7
<b>Fig. 4.</b> Distribución del agua en México	7
<b>Fig. 5.</b> Contenido de la madera	12
<b>Fig. 6.</b> Estructura generalizada de la Lignina	13
<b>Fig. 7.</b> Equipo utilizado para la electrogeneración del reactivo de Fenton	23
<b>Fig. 8.</b> Diagrama de bloques de la metodología general	25
<b>Fig. 9.</b> Diagrama de bloques de las pruebas preliminares	26
<b>Fig. 10.</b> Agitador de proletas	27
<b>Fig. 11.</b> Diagrama de bloques de pruebas con solución de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	27
<b>Fig. 2.</b> Diagrama de bloques de prueba de electrogeneración de reactivo de Fenton	28
<b>Fig. 13.</b> Volúmenes diferentes de $H_2O_2$ al 50% Vol. en 120 min	33

<b>Fig. 14.</b> Volúmenes diferentes de $H_2O_2$ al 50% Vol. en 24hr	33
<b>Fig. 15.</b> Volúmenes diferentes de $H_2O_2$ al 30% Vol. de $H_2O_2$ en 120 min	35
<b>Fig. 16.</b> Volúmenes diferentes de $H_2O_2$ 30% Vol. de $H_2O_2$ en 24hr	35
<b>Fig.17.</b> Prueba con $H_2O_2$ al 50% vol. y solución de sulfato ferroso, 24hr	38
<b>Fig. 18.</b> Prueba con $H_2O_2$ al 30% Vol. sulfato ferroso, 24hr	39
<b>Fig. 19.</b> Color Aparente para electrogeneración del reactivo de Fenton con 4V	41
<b>Fig. 20.</b> Color Real para electrogeneración del reactivo de Fenton con 4V	41
<b>Fig. 21.</b> Color Aparente para electrogeneración del reactivo de Fenton con 6V	43
<b>Fig. 22.</b> Color Real para electrogeneración del reactivo de Fenton con 6V	43
<b>Fig. 23.</b> Color Aparente para electr-generación del reactivo de Fenton con 8V	45
<b>Fig. 24.</b> Color Real para electrogeneración del reactivo de Fenton con 8V	45
<b>Fig. 25.</b> Color Real para electrogeneración del reactivo de Fenton con 4V	47
<b>Fig. 26.</b> DQO de la prueba final con 4V	49
<b>Fig. 27.</b> Electrogeneración del reactivo de Fenton con 4V	51
<b>Fig. 28.</b> Comparación de pruebas con Reactivo de fenton	52

## ABREVIATURAS

<b>UVA</b>	Luz Ultra Violeta
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>Unidades Pt- Co</b>	Unidades de color Platino-Cobalto
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>NaCl</b>	Cloruro de Sodio
<b>NaOH</b>	Hidróxido de Sodio
<b>TLC</b>	Tratado de Libre Comercio
<b>NOM</b>	Norma
<b>Kraft</b>	Proviene del alemán, donde significa fuerte
<b>EDTA</b>	Ethylenediaminetetraacetic acid
<b>Ppm</b>	Partes por millon
<b>TDS</b>	Sólidos disueltos totales
<b>SST</b>	Sólidos Suspensidos Totales
<b>OD</b>	Oxígeno Disuelto

## NOMENCLATURA

<b>e<sup>-</sup></b>	Electrón
<b>R</b>	Radical
<b>H<sup>+</sup></b>	protón
<b>g</b>	Gramos
<b>ml</b>	mililitros
<b>m<sup>3</sup></b>	metros cúbicos
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>A</b>	Ampere
<b>%Vol</b>	Por ciento en Volumen
<b>V</b>	Voltios
<b>mg/L</b>	Miligramos por litro
<b>M</b>	mol/L
<b>ABS</b>	Absorbancia
<b>T</b>	Temperatura
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>μ</b>	Conductividad

## “EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON”

### RESUMEN

En el presente trabajo se muestra los resultados de un tratamiento electroquímico para aguas residuales, la electrogeneración del reactivo Fenton, para la remoción de algunos contaminantes tales como color y DQO en un agua residual industrial proveniente de una industria papelera de tipo kraft.

Como primera etapa se realizó una comparación entre el reactivo de Fenton y el reactivo de Fenton electrogenerado con el objeto de comprobar que el proceso electroquímico es más eficiente que el proceso químico.

Para el proceso químico se utilizó el peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ) al 50% y 30% Vol, encontrando primero la cantidad mínima necesaria para remover 1000 unidades de color y después añadiendo una solución de sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) a una agua residual industrial con un pH entre 2-4.

En el proceso de electrogeneración del reactivo de Fenton se construyó una celda de 1L de capacidad con electrodos concéntricos de hierro y grafito, el agua aireada y con un pH entre 2-3 a temperatura ambiente, se aplicaron diferentes voltajes de corriente.

La segunda etapa que son las pruebas finales, consisten en utilizar este proceso electroquímico para la remoción de color y de DQO, utilizando una intensidad de corriente de 2A y un pH entre 2-3, obtenidos de la etapa anterior.

Se encontraron resultados favorables en el proceso electroquímico, con remociones de color del 80 %, sin embargo, para la DQO no hubo tal éxito.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El agua destinada a consumo humano debe estar exenta de sustancias y microorganismos que puedan constituir un peligro para la salud; además, debe de presentar otras cualidades de fundamental importancia, como frescura, limpieza, ausencia de color y olor. Las aguas a disposición del hombre no siempre cumplen con estos requisitos y por esto se debe proceder al tratamiento de éstas.

El tratamiento es un conjunto de procedimientos y operaciones que tienen por objetivo mejorar los caracteres organolépticos, físicos, así como las propiedades químicas y la purificación desde el punto de vista bacteriológico de un agua.

Las etapas de tratamiento son: floculación, filtración, ablandamiento, nebulización, entre otros, desde luego no para todas las aguas, ya que algunas solamente requieren de una, según su grado de pureza.

En la actualidad, en la mayoría de los casos se utiliza cloro gaseoso para tal fin, sin embargo, dadas las circunstancias de manejo que presentan un alto costo en la inversión inicial y riesgo, es conveniente buscar otros métodos que produzcan los mismos efectos.

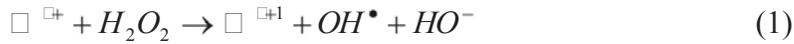
A pesar de los importantes logros en la búsqueda de una mayor eficiencia y productividad de los procesos químicos, el tratamiento de efluentes industriales conteniendo contaminantes orgánicos es todavía un serio problema a ser resuelto.

Los procesos químicos de oxidación avanzada usan oxidantes (químicos) para reducir los niveles DQO/DBO, y para separar ambos los componentes orgánicos y los componentes inorgánicos oxidables, está disponible una amplia gama de procesos de oxidación avanzada en el Apéndice A. Sin embargo, los procesos de oxidación avanzada a menudo tienen un capital y unos costos operacionales altos comparados con el tratamiento biológico.

La oxidación química (Reacción Fenton) emplea compuestos oxidantes para destruir la contaminación transformando las sustancias químicas en agua y dióxido de carbono. La oxidación química es capaz de destruir muchos tipos de sustancias químicas, como combustibles, solventes y plaguicidas.

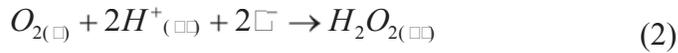
El oxidante de uso más común que se emplea en la descontaminación es el peróxido de hidrógeno o agua oxigenada. Cuya reacción se representa por la siguiente secuencia:

→ Descomposición de  $H_2O_2$  por reducción con un ión metálico



Donde  $M$  se refiere a cualquier ión metálico (en nuestro caso  $Fe^{2+}$ ).

→ Sin embargo la producción del peróxido se da a través de la siguiente reacción:



→ La generación del ión metálico viene dada por:



Las siguientes especies químicas se generan por la reacción del ión ferroso con peróxido de hidrógeno (Sawyer, 1997; Walling, 1975):



Es preciso tener en cuenta que la reacción es fuertemente exotérmica, por lo que provoca que parte de los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles puedan evaporarse y ser emitidos a la atmósfera, por lo que debe preverse su recolección y tratamiento en fase vapor. Por otra parte, el ambiente que se produce es oxidante y el pH puede bajar de forma importante, por lo que puede ser origen de corrosión en los elementos metálicos que puedan existir en la zona a tratar.

## Generalidades

En los últimos años, lo relacionado al medio ambiente ha enfocado principalmente su atención en los procedimientos para minimizar la contaminación de los efluentes líquidos y gaseosos.

En la industria del papel se hace uso extensivo del agua desde sus inicios, las plantas se han localizado casi exclusivamente a lo largo de los ríos más importantes. En las primeras plantas se usaba el agua no solo para la pulpa y papel sino también para obtener energía hidráulica al represar la corriente y producir la carga necesaria para accionar las ruedas hidráulicas que operaban las piedras del molino donde se convertía la madera en pulpa.

El agua requerida para una planta de este tipo varía considerablemente según el proceso de preparación de la pulpa, la disponibilidad del agua, la secuencia de blanqueado y las restricciones para la descarga de agua de desecho.

Actualmente las plantas modernas han cerrado sus sistemas para reducir la cantidad de agua requerida y por lo tanto reducir también el volumen de desechos por tratar.

Debido a que el agua es tan importante para la industria de pulpa y papel, es común encontrar en las fabricas plantas de tratamiento de aguas tan complejas como las mismas plantas municipales para el tratamiento de agua potable.

Anteriormente y aun en algunas plantas de celulosa desechan sus efluentes considerables como contaminantes a las aguas que reciben dichos efluentes. Estos efluentes no únicamente incluyen los contaminantes tradicionales tales como DBO, DQO y sólidos suspendidos, sino también un color oscuro proveniente de las plantas de blanqueo de pulpa Kraft, digestión y otras plantas.

Para el procedimiento de blanqueo de la celulosa, pueden usarse agentes selectivos de blanqueo que destruyan, al menos, una parte de los grupos cromofóricos sin ser materialmente consumidos por el cuerpo de la lignina. Otro método es una combinación de la eliminación casi total de la lignina, y de blanqueo, como se practica en relación a las pulpas al sulfito kraft, y a la sosa, que contienen sólo cantidades relativamente pequeñas de lignina residual.

## 1.1 Justificación

La preocupación por el equilibrio ecológico, conservación de los recursos acuíferos y áreas de cultivo; así mismo el ingreso de México al TLC y la consideración del tema relativo a los aspectos ambientales, permite prever la futura revisión y modificación de la legislación al respecto, con el fin de hacerla más estricta.

Por lo que los municipios en general, deberán realizar a la brevedad posible una valoración crítica acerca del uso y receptores, con una calidad que no cumple la NOM-001 SEMARNAT 1996. Por lo que es de suma importancia tomar acciones necesarias para mejorar éste aspecto.

Por una parte el ahorro de agua al poder rehusarla en los sectores agrícolas, frutícola, acuicultura, etc., y la mejora del equilibrio en el desarrollo de la flora y la fauna, son dos razones que justifican este estudio.

El agua es un recurso esencial en términos económicos y sociales. Su importancia es cada vez mayor, al punto de ser ahora uno de los factores críticos más importantes del desarrollo a nivel municipal, teniéndose zonas con superávit, como la región administrativa de la Frontera Sur con 28 453 m<sup>3</sup> / habitante, en donde la disponibilidad es mayor que la demanda, zonas en equilibrio, como la región administrativa del Golfo Centro con 11 077 m<sup>3</sup> / habitante, donde la disponibilidad es aproximadamente igual que la demanda y zonas con déficit, como la región administrativa de las Cuencas Centrales del Norte, en donde la disponibilidad es menor que la demanda.

Este problema que se nos presenta en la actualidad es un tema que cada día ocupa más la atención de científicos, técnicos, políticos y en general, de muchos de los habitantes del planeta.

La escasez de este vital líquido obliga a reiterar nuevamente una llamada a la moderación de consumo por parte de la población a nivel mundial, ya que sin su colaboración los esfuerzos técnicos que llevan a cabo algunas organizaciones resultarían insuficientes.

Sólo muy poca agua es utilizada para el consumo del hombre, ya que: el 90 % es agua de mar y tiene sal, el 2 % es hielo y está en los polos, y sólo el 1 % de toda el agua del planeta es dulce, encontrándose en ríos, lagos y mantos subterráneos.

Además el agua tal como se encuentra en la naturaleza, para ser utilizada sin riesgo para el consumo humano requiere ser tratada, para eliminar las partículas y organismos que pueden ser dañinos para la salud. Y finalmente debe ser distribuida a través de tuberías hasta tu casa, para que puedas consumirla sin ningún problema ni riesgo alguno.

En la siguiente figura se puede denotar que el incremento de la población en África es casi el doble de la población mundial promedio. La combinación del crecimiento acelerado y de la urbanización, el bajo abastecimiento y la cobertura del saneamiento del agua hacen a África especialmente vulnerable al riesgo de las enfermedades.

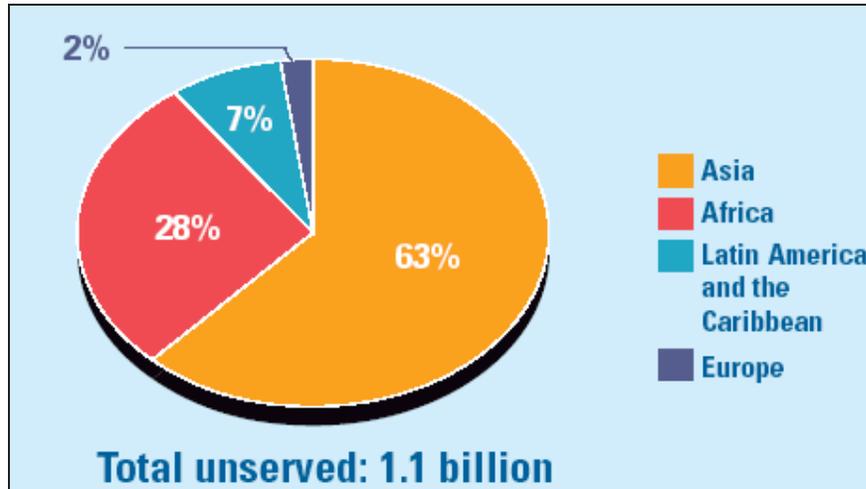


Fig. 1. Distribución global de la población sin mejoramiento en el suministro de agua, por región.

En la siguiente figura se puede observar el número de personas que no tienen el acceso al suministro de agua potable. Correspondiente a zonas urbanas y rurales; 1.1 billones de personas no tienen acceso al suministro de agua, pero 2.4 millones no tienen acceso a el saneamiento.

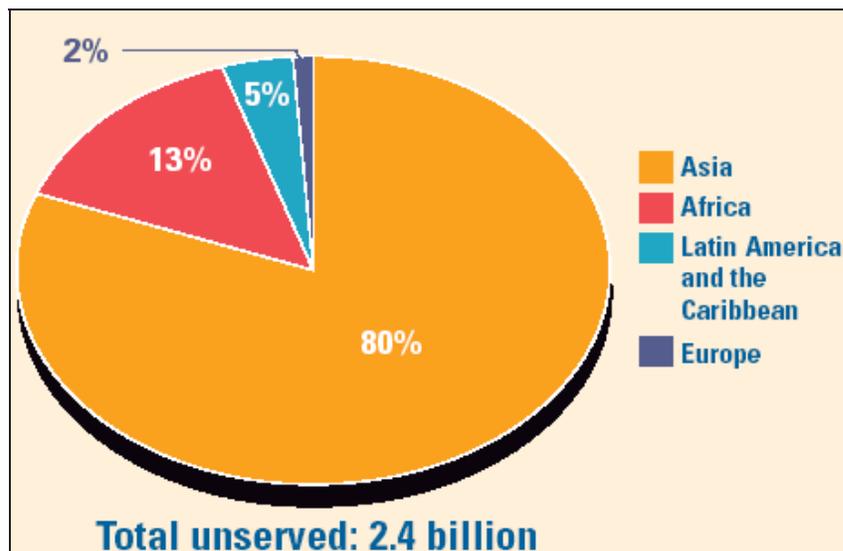


Fig. 2. Distribución global de la población sin servicio del mejoramiento en el saneamiento del agua, por región.

En el siguiente mapa se muestra la cobertura del suministro de agua a nivel mundial para el año 2000, donde la gran mayoría de los países no alcanzan porcentajes elevados del suministro de agua potable.

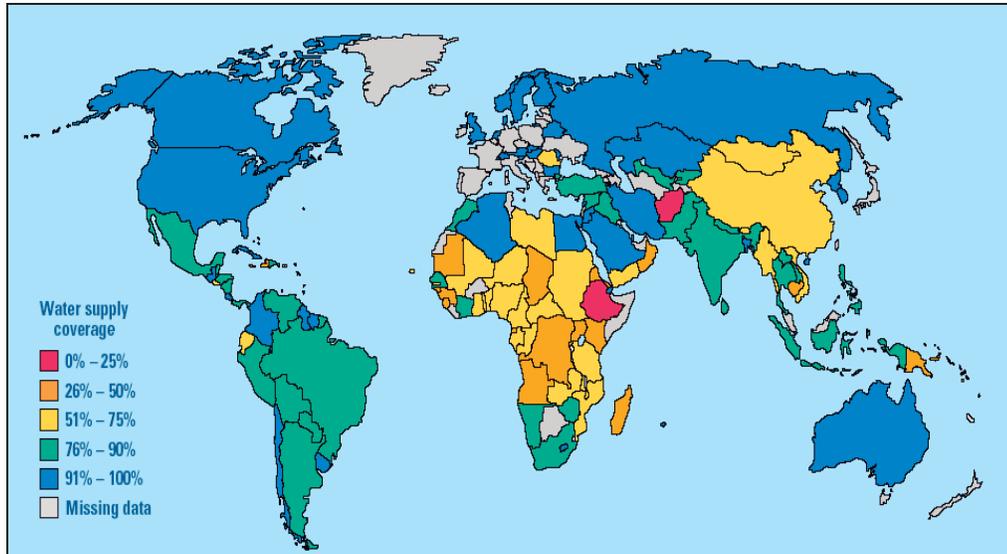


Fig. 3. Suministro de agua, cobertura global, 2000.

Cabe mencionar que México cuenta con más de 4 500 presas, de las cuales 840 se clasifican como presas grandes. El agua en México se distribuye principalmente en los siguientes conceptos: para el uso urbano-doméstico (13.0 %); para uso industrial (3.8 %) y para uso agropecuario (78.9 %).

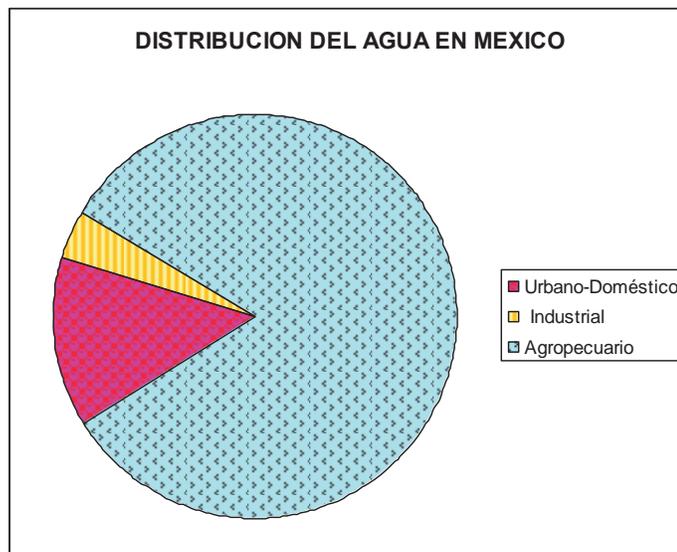


Fig. 4. Distribución del agua en México.

En las regiones con escasez de agua más y más compiten los diferentes usos entre sí. Existen ya conflictos por el agua entre zonas urbanas y rurales, entre ciudades o regiones vecinas.

Pero también se destaca, que la contaminación de aguas superficiales y aguas subterráneas, a causa del desagüe industrial y la filtración de materias tóxicas, representan un problema creciente, sobre todo para la agricultura y para el suministro de agua potable. El saneamiento inexistente o insuficiente de las aguas negras urbanas complica el problema de la contaminación todavía más.

## 1.2 Objetivo

### Objetivo General:

Evaluar el tratamiento de electrogeneración del reactivo de Fenton en el agua residual de una papelera tipo kraft.

### Objetivos Particulares:

1. Reducir la contaminación en el agua residual de la industria de celulosa tipo kraft, utilizando el reactivo Fenton electrogenerado.
2. Determinar el mecanismo de reacción, que se lleva a cabo en el tratamiento.
3. Estudiar como influye: tiempo de reacción y valores de diseño para la celda.
4. Diseñar y construir un prototipo a escala, de la celda electroquímica.
5. Valorar la eficiencia en la reducción de contaminantes.
6. Comparar este proceso de tratamiento con procesos que actualmente se tienen trabajando.

## 1.3 Hipótesis

La degradación de la materia contenida en un agua residual industrial puede ser mineralizada en su mayoría con el reactivo de fenton, no solo disminuyendo las unidades de color, si no también DQO, un factor importante en la caracterización del agua.

#### 1.4 Alcance

Los resultados que se desean alcanzar con esta agua residual son:

1. Disminuir las unidades de color del agua residual con fenton electrogenerado, de aproximadamente 2000 unidades Pt-Co a 1000 unidades Pt-Co.
2. Encontrar las condiciones óptimas de:
  - Tiempo
  - pH
  - Temperatura
  - Intensidad de corriente eléctrica
  - Cantidades de reactivos

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Los Procesos de Oxidación Avanzada, se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, incluso la desinfección por inactivación de bacterias y virus. Son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores.

El tratamiento de efluentes industriales por métodos electroquímicos es una de las muchas alternativas que existen para el tratamiento de las aguas residuales, éstos sistemas presentan ciertas ventajas sobre los procesos de tratamientos convencionales ya que son capaces de tratar aguas de origen industrial (Sáez et al; 1998) o municipal que posean altas temperaturas, sustancias orgánicas con baja biodegradabilidad (Panizza y Cerisola, 2001).

En dicho proceso se lleva a cabo una oxidación anódica indirecta o directa, para realizar una completa mineralización de los contaminantes en ánodos dimensionalmente estables (Chamarro et al; 2001) ayudando a la disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), (Kang y Hwang, 1999).

La oxidación de compuestos orgánicos disueltos en las aguas residuales, puede ser tratada por la generación de agentes químicos [ ] , tales como iones hipoclorito, ozono y peróxido de hidrógeno, obteniéndose remociones de contaminantes orgánicos tales como: formaldehído, anilina y fenol.

El grafito, el carbón reticular vítreo y fieltro de carbón son usados en muchos de los casos como cátodo para generar peróxido de hidrógeno, ya que exhiben intervalos de actividad electroquímica hacia la reducción del oxígeno, alto sobrepotencial para la evolución de hidrógeno y baja actividad catalítica para la descomposición del  $H_2O_2$  (Yeager et al; 1984).

Dichas propiedades pueden incrementarse o disminuirse por una superficie química o electroquímica dependiendo de la naturaleza del electrodo. El  $H_2O_2$  en presencia de  $Fe^{2+}$  conduce a la formación de un radical altamente oxidante acorde al mecanismo de Fenton (Kavitha et al; 2004).

Estos procesos poseen una mayor factibilidad termodinámica y una velocidad de oxidación muy incrementada por la participación de radicales, principalmente el radical hidroxilo,  $OH^\bullet$ .

Esta especie posee propiedades adecuadas para atacar virtualmente a todos los compuestos orgánicos y reaccionar  $10^6 - 10^{12}$  veces más rápido que oxidantes alternativos como el  $O_3$ .

El proceso de Fenton es un proceso de oxidación avanzada que no ha recibido una merecida atención. En este proceso la carga contaminante se trata con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo de Fenton), típicamente a presión atmosférica y temperatura ambiente (20°C a 40 °C). Siguiendo una apropiada política para el agregado del reactivo de Fenton en condiciones ácidas (pH 2-4) y con la temperatura adecuada, el proceso puede alcanzar una significativa degradación de los contaminantes orgánicos, comprendiendo:

- a) Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un eventual tratamiento biológico posterior.
- b) Una composición parcial que redunde en una disminución de la toxicidad del efluente.
- c) Se lleva a cabo una oxidación total de los compuestos orgánicos por lo que el contaminante se vuelve una sustancia menos agresiva para los cuerpos receptores.

El reactivo de Fenton puede ser clasificado como un tratamiento avanzado primario, compuesto por un proceso de coagulación-floculación con una etapa simultánea de oxidación avanzada (Duran-Moreno y col 2003).

El método del reactivo de Fenton con sales de ión ferroso, Ramírez-Zamora y col (2000, 2001) y Durán –Moreno (2002) demostró que este proceso es un tratamiento efectivo para aguas residuales industriales y municipales.

## **2.1 Características del agua residual industrial.**

La calidad del efluente final acuoso, presenta gran cantidad de cargas contaminantes, las cuales dependen del tipo de proceso utilizado, del tipo de materia prima, del grado de aprovechamiento de las aguas usadas, de los aditivos empleados, sin embargo, existen empresas que cumplen con las normas en los diferentes aspectos pero esto no aleja la posibilidad de que en un futuro se vuelvan más estrictas y se requiera disminuir en una mayor cantidad los contaminantes que se desechan.

La pigmentación del agua debido a la lignina y a los taninos que dan este color característico al agua residual, además cabe citar la dificultad de control de olores sulfurosos, los cuales aparecen a concentraciones de incluso partes por mil millones, y que son difíciles de evitar. Además,

### 2.1.1 Contaminantes principales.

Los trozos de madera se combinan con agua y productos químicos y se calientan hasta que se separan las fibras de celulosa, que a continuación se someten a un proceso de blanqueo. La principal razón del blanqueo de la pulpa es la de eliminar el contenido de lignina ya que ésta produce una decoloración marrón en el papel final. La eliminación de la lignina, que es un material químicamente complejo, produce una pulpa con un matiz más luminoso.

Además de la celulosa, también se distribuyen a través de las paredes de las células, la lignina y la hemicelulosa. La proporción relativa de estos tres componentes varía, siendo la más común en las maderas blandas un 28.0% lignina, 28.7 % hemicelulosa, 40.3% celulosa, y un 3% de materiales “extraíbles”.

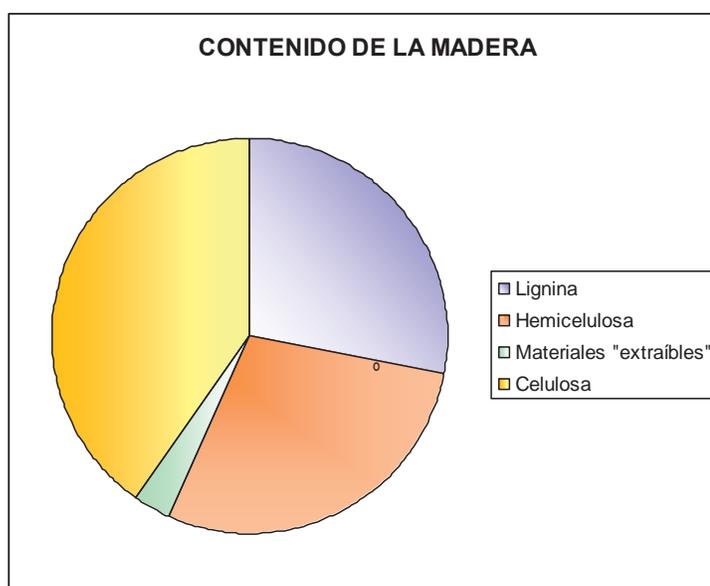


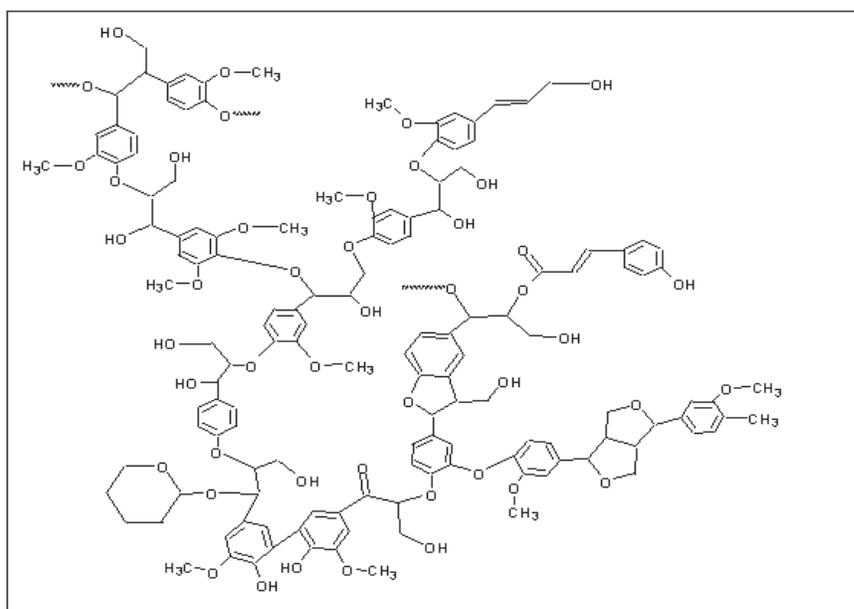
Fig. 5. Contenido de la madera.

Estos materiales extraíbles incluyen grasas, ésteres, materiales fenólicos y taninos, terpenos y ácidos resínicos, que pueden ser eliminados con disolventes orgánicos. Las cantidades traza de materiales inorgánicos la constituyen los metales pesados. En el proceso de obtención de pulpa, la lignina se degrada en sus grupos cromóforos (productores de color), que de otra manera causarían el 90% del color oscuro característico de la pulpa no blanqueada.

Los tratamientos de cloración hacen uso tanto de gas cloro como de sales de hipoclorito y dióxido de cloro. Este método da lugar a un papel blanco brillante, ocasiona problemas para el medio ambiente debido a la producción y liberación de compuestos organoclorados. Estos compuestos se forman por la reacción o por los compuestos orgánicos presentes en la pulpa en contacto con los agentes clorados de oxidación.

La reacción entre el cloro y la lignina da lugar a anillos aromáticos clorados, entre los cuales se encuentran la 2,3,6,7-tetraclorodibenzo- 4-dioxina (TCDD, también conocido por el término genérico de dioxina) y los furanos. La TCDD es la dioxina más común y tóxica producida en el proceso de fabricación del papel.

Se ha comprobado que los taninos y la lignina, son algunas de las especies químicas que se presentan generalmente como suspensiones coloidales en agua. Incluso el color, es una medición burda del contenido de taninos, lignina y otros compuestos orgánicos en aguas superficiales y de desecho; como las aguas residuales del pulpeo kraft.



**Fig. 6.** Estructura generalizada de la Lignina (reproducida con permiso de “Real-World Cases in Green Chemistry,” copyright 2000 de la Sociedad Americana de Química)

Los taninos en particular, presentan propiedades surfactantes, así que las aguas que los contienen aun en bajas concentraciones, exhiben una marcada tendencia a formar espuma. Los taninos tienen un ligero olor característico y un color que van desde el amarillo al castaño oscuro. La exposición a la luz oscurece su color. Todos los taninos tienen un sabor amargo y son astringentes. Se disuelven con facilidad en agua, acetona o alcohol y son insolubles en benceno, éter o cloroformo.

La ligninas alcalinas, por lo común, son solubles en soluciones acuosas alcalinas, pero no en las mismas soluciones ácidas ni en solventes orgánicos secos.

Por lo general las ligninas de más bajo peso molecular son más solubles que las de mayor peso molecular.

En la siguiente tabla se tienen valores de alguno parámetro del agua residual:

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Color (U.Pt-Co)	2280
DQO (ppm)	1368
pH	7.3
Conductividad eléctrica ( $\mu$ )	1866
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	37

**Tabla 1.** Características promedio de la muestra.

La composición química de los efluentes de las fábricas de papel que utilizan cloro elemental es sumamente compleja. Por cada tonelada de pulpa se produce aproximadamente 4 kg de cloro orgánicamente enlazado. Se han identificado más de 250 compuestos; 180 de los cuales son clorados. Se han reconocido varias clases de compuestos clorados, incluyendo clorofenoles, catecoles, guaiacoles y siringoles. Los fenoles clorados se conocen como los precursores de la dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDDs o dioxinas) y los dibenzofuranos.

### **2.1.2 Influencia del agua residual industrial en el agua residual municipal.**

Cabe señalar que no se cuenta con el inventario total de descargas industriales debido a que la Comisión Nacional del Agua sólo registra el volumen y características de descarga hacia los cuerpos de agua federales. Las industrias que están instaladas en zonas urbanas se abastecen de la red municipal y sus aguas residuales son vertidas al drenaje, correspondiendo a los organismos municipales operadores llevar la contabilidad correspondiente.

Se estima que el volumen de agua suministrado a la industria fuera de zonas urbanas, es de 78.7 m<sup>3</sup>/s. Este volumen corresponde a 1387 empresas consideradas como las más importantes por su nivel de consumo y descarga de agua residual. Actualmente, el volumen de descargas generadas por el uso industrial no urbano es de aproximadamente 64.5 m<sup>3</sup>/s, con 1.6 millones de toneladas de DBO al año.

El caudal de aguas residuales tratado actualmente es de 5.3 m<sup>3</sup>/s con una remoción de 0.12 millones de toneladas de DBO. El caudal sin tratar es de 59.2 m<sup>3</sup>/s, con 1.4 millones de toneladas al año de DBO.

## EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

La demanda de agua para uso industrial al año 2020, será de aproximadamente 95 m<sup>3</sup>/s, generando una descarga de aguas residuales de 76 m<sup>3</sup>/s y 1.88 millones de toneladas de DBO al año.

El agua residual industrial tiene un gran influencia en el agua municipal debido a que ésta agua procedente de las diversas industrias son desechadas a los efluentes municipales y por consiguiente la contaminación del agua municipal está presente en ésta.

Existen mil 374 plantas de agua residual industrial en el país. La industria genera 170 m<sup>3</sup>/s, lo que representa 7.66 millones de toneladas de DBO anual y de las cuales solamente se remueven 0.85 millones de toneladas en los sistemas de tratamiento existentes.

### 2.2 Reactivo de Fenton.

Investigaciones recientes han permitido comprobar que el agente responsable de la oxidación es el radical hidroxilo OH. Este radical libre es extremadamente reactivo y se forma por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno en un medio ácido. El poder de oxidación de este radical es únicamente superado por el flúor (Tabla 2).

<i>Fluor</i>	2.23
<i>Radical Hidroxilo</i>	2.06
<i>Oxígeno Atómico</i>	1.78
<i>Peróxido de Hidrógeno</i>	1.31
<i>Permanganato</i>	1.24
<i>Dióxido de Cloro</i>	1.15
<i>Acido Hipocloroso</i>	1.10
<i>Cloro</i>	1.00
<i>Bromo</i>	0.80
<i>Iodo</i>	0.54

**Tabla 2.** Poder oxidante de distintos agentes relativos al cloro.

Hay mecanismos químicos que proponen a los radicales hidroxilos como las especies oxidantes. Las reacciones en las cuales se encuentra presente el radical hidroxilo en agua se dividen en cuatro tipos.

#### Adición:



Adición de un radical hidroxilo a un compuesto insaturado alifático u aromático, el producto forma un radical libre (radical ciclohexadienil).

**Abstracción de hidrógeno:**



El radical libre y el agua son formados.

**Transferencia de electrón:**



El ión de un estado de valencia alto es formado, o un átomo o radical libre es un ion mononegativo y es oxidado.

**Interacción de radicales:**



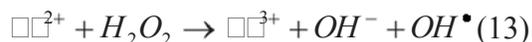
El radical hidroxilo reacciona con otro radical hidroxilo o con un no radical para formar un producto estable.

En la aplicación del reactivo de Fenton para el tratamiento de aguas residuales, las condiciones de reacción se ajustan a los primeros dos mecanismos predominantemente y las rapidezes típicas de reacción entre los radicales hidroxilo y la materia orgánica son de  $10^9 - 10^{10}$   $\square \text{L M}^{-1} \text{s}^{-1}$ ).

Investigaciones más recientes han demostrado que la rapidez de remoción de dichos compuestos generalmente obedece a ecuaciones de segundo orden que pueden ir de  $1 \cdot 10^7$  a  $1 \cdot 10^{10}$   $\square \text{L M}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) (De Laat et al, 1999).

No ha sido posible desarrollar un modelo cinético detallado sobre cada una de las reacciones, se sabe que las reacciones involucran un gran número de intermediarios y reacciones elementales, en que el agente responsable de la oxidación es el radical hidroxilo  $OH^{\bullet}$ , el cual se caracteriza por ser sumamente reactivo, formado por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno en medio ácido, (Szyrkowincz et al; 2000), cabe señalar que la rapidez de reacción se ve limitada, ya que está relacionada directamente con la concentración del catalizador (hierro) y las condiciones del medio.

El mecanismo propuesto para el radical hidroxilo y la especie oxidada genera la siguiente ecuación química:



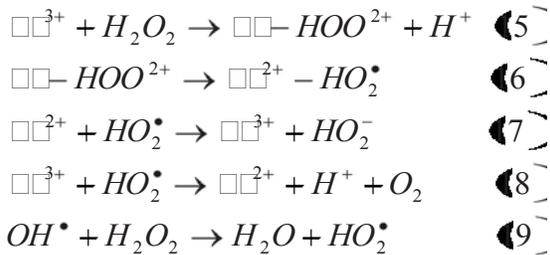
El radical hidroxilo puede reaccionar con otro  $\text{Fe}^{2+}$ .



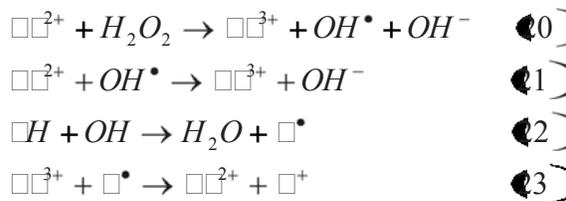
**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON**

---

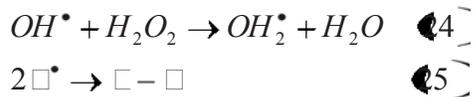
El  $Fe^{3+}$  descompone catalíticamente al  $H_2O_2$  siguiendo un mecanismo que involucra a radicales hidroxilo e hidroperóxido, de esta manera se tienen (Chamarro et al; 2001):



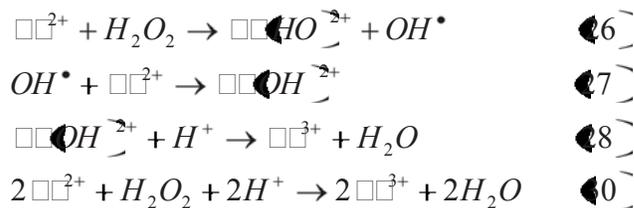
Existiendo una serie de reacciones en cadena:



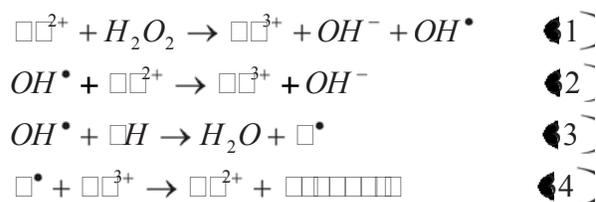
Efectuándose una serie de reacciones secundarias las cuales son:



Las ecuaciones anteriormente mostradas, no son las únicas ya que también existen las reacciones en la ausencia de un sustrato oxidable (Craig, W. Jones, 1999).

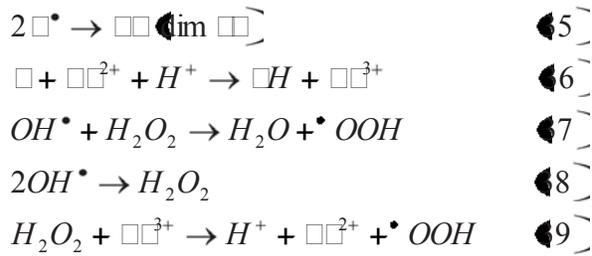


Las reacciones en presencia de sustratos orgánicos son las siguientes:

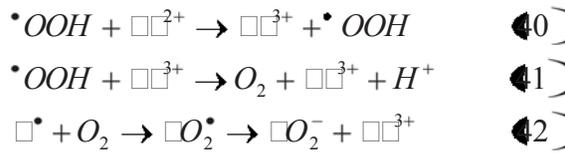


**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON**

---



Reacciones en competencia del poder oxidativa.



Algunos de los factores que influyen en el reactivo de Fenton pueden ser:

**1) Concentración de hierro**

No se encontraron reportes que presenten evidencias de la formación de radicales hidroxilo en ausencia de iones  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ , caso contrario cuando se adiciona cierta concentración de hierro la reacción se cataliza en el medio.

Existen ciertos intervalos óptimos para cada tipo de agua residual, la cual está relacionada directamente con la cantidad de hierro agregado. Según Kang y Hwang (1999) a valores superiores a 500 mg/L de sulfato ferroso no se incrementan los valores de remoción, considerando que se debe determinar la dosis óptima de acuerdo a los costos de operación y de capital.

La relación típica del  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$  se encuentra entre 1:5 y 1:10 (Masa/Masa) sin embargo a niveles de hierro menores de 25-50 mg/L se pueden requerir excesivos tiempos de reacción (10 a 24 horas) esto es en particular cierto para la oxidación de ácidos orgánicos que secuestran el hierro y lo remueven del ciclo de catálisis.

Cabe recalcar que la mejor dosis del reactivo de Fenton es variable de acuerdo a cada tipo de agua a tratar y está definida por tres factores:

- ◆ Umbral de concentración mínimo de 3-15 mg/L el cual permite que se lleve a cabo la reacción en un periodo razonable de tiempo para llevar a cabo la reducción de los contaminantes orgánicos.
- ◆ Una relación constante de Fe sustrato por encima del valor umbral mínimo, típicamente es 1 parte de Fe por 10 a 50 partes de sustrato lo que produce los productos finales deseados.

♦ Una dosis adicional de Fe satura las propiedades quelantes en las aguas residuales lo cual es necesario para poder compensar el efecto del hierro que es secuestrado e impedido para catalizar la formación de radicales hidroxilo.

La dosis de hierro puede ser expresada como una relación, con respecto al peróxido de hidrógeno, los rangos típicos son de 1 parte de Fe por 5 a 25 partes de peróxido de hidrógeno generalmente expresados peso Fe / peso  $H_2O_2$ .

## 2) Efecto del estado de oxidación del hierro ( $Fe^{2+}$ , $Fe^{3+}$ )

El tipo de sales de hierro empleados, así como la forma iónica en que se encuentren presentes ( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) serán un factor importante a considerar, ya que éste se encarga de catalizar los radicales hidroxilo en el reactivo de Fenton, dicha reacción se lleva a cabo en presencia del peróxido de hidrógeno y la materia orgánica a degradar, sin embargo si la dosis del reactivo es baja (10 – 25 mg/L de  $H_2O_2$ ) debe preferirse al sulfato ferroso, otros utilizan las sales de cloruro o sulfato de hierro, pero cuando se utilizan las primeras tienden a formar cloruros, a altas concentraciones del reactivo de Fenton.

## 3) Concentración del peróxido

La reactividad del radical hidroxilo es no selectiva a la degradación de materia orgánica, por lo que es necesario conocer los subproductos formados que se llevan a cabo en las aguas residuales que son tratadas.

## 4) Identificación de intermediarios

Como se mencionó anteriormente la formación de intermediarios es un aspecto muy importante a considerar para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica contaminante en el mecanismo de Fenton, ya que la formación de las diversas especies demandará una mayor cantidad de reactivo ya sea Fe o  $H_2O_2$ .

El proceso Fenton puede ser inhibido por agentes quelantes como fosfatos, EDTA, formaldehído, ácido cítrico y oxálico y también el proceso se ve afectado por la adición de sales como es el caso del NaCl (Alegría et al., 2003).

□

## 5) Temperatura

La rapidez de la oxidación química por parte del reactivo de Fenton se ve incrementada por la temperatura, generalmente la temperatura empleada se encuentra en los intervalos de 20 y 40°C a una atmósfera de presión pero en caso contrario de que la temperatura sea incrementada por encima de los 50°C se lleva a cabo una descomposición de peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno.

Es posible realizar incrementos de temperatura por encima de los 100°C, sin que se corra el riesgo de descomposición del peróxido cuando éste es sometido a operaciones en las cuales se tengan más de 3 atmósferas de presión (Martínez et al; 2000).

Un aspecto a considerar es la cantidad de peróxido de hidrógeno a reaccionar ya que la reacción es exotérmica y por razones de seguridad se recomienda no exceder de 10-20 mg/L, implementando mecanismos de control.

### **6) Potencial de hidrógeno (pH)**

Como se mencionó anteriormente en el proceso Fenton el nivel de acidez o pH debe mantenerse en un intervalo de 2 a 4 para evitar la precipitación del catalizador, que tiene lugar cuando se tienen valores de pH mayores de 5.

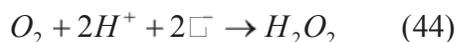
### **7) Tiempo de reacción**

El tiempo empleado para llevar a cabo la mineralización o transformación de la materia presente en las aguas residuales va a depender de varias variables, muchas de ellas estarán relacionadas directamente con la cantidad de dosis del catalizador y de las características propias del agua residual.

#### **2.2.1 Electro-generación del reactivo de Fenton.**

Este tratamiento basa su potencial en la electrogeneración de peróxido de hidrógeno y iones  $Fe^{2+}$  que originan diversas reacciones para la formación de iones  $OH^\bullet$  (Lloyd et al; 1996), llevándose a cabo reacciones de óxido reducción, teniendo aplicación en efluentes que se caracterizan en ser parcialmente o prácticamente nada biodegradables, donde los tratamientos convencionales (procesos biológicos) presentaría problemas de operación; para valores altos de DQO que puedan contener una alta concentración salina o incluso una alta toxicidad que impidiera el crecimiento biológico para un sistema de tratamiento de lodos activados (Chou et al; 1999).

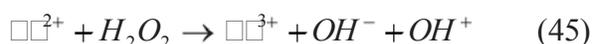
El reactivo de Fenton puede ser generado por métodos electroquímicos, conocido como electrogeneración del reactivo de Fenton, el cual consiste en conducir una corriente directa por medio de electrodos interconectados a una fuente de energía eléctrica, dicho electrodo de hierro (ánodo), y un electrodo de grafito(cátodo) los cuales son sumergidos en una solución electrolítica con un pH ácido en que se efectúa una disolución anódica del electrodo de hierro(ánodo de sacrificio), liberando en solución iones de  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$  los cuales estarán en función del potencial aplicado así como del potencial de hidrógeno en el medio y en la superficie del cátodo se realiza la reducción de oxígeno provocando la generación de peróxido de hidrógeno (Ventura et al; 2002).



Un grafito, carbón vítreo, fieltros de carbón son usados en muchos de los casos como cátodos para generar  $H_2O_2$ , ya que exhiben rangos de actividad electroquímica hacia la reducción del oxígeno altos sobre potenciales para la evolución del hidrógeno y una baja actividad catalítica para la descomposición del peróxido de hidrógeno (Yeager et al; 1984).

Dichas propiedades pueden incrementarse o disminuirse por una superficie química o electroquímica dependiendo de la naturaleza del electrodo.

La combinación del  $H_2O_2$  electrogenerado por reducción catódica, y la presencia de iones de  $Fe^{2+}$  conduce a la formación de un radical altamente oxidante acorde con el mecanismo de Fenton (Kavitha et al; 2004).



El radical hidroxilo que se forma ( $OH^\bullet$ ) es la especie química responsable de efectuar la oxidación del contaminante. Este radical se caracteriza por presentar una alta reactividad, al contener un electrón no apareado, formado por la ruptura de enlaces covalentes, confiriéndole un comportamiento muy agresivo que genera reacciones en cadena, por lo que es considerado como una de las especies químicas más reactivas con un poder de oxidación de 2.06 (Nesheiwat y Swanson, 2000).

Para el radical hidroxilo se ha reportado un potencial de 2.8 V con respecto al electrodo normal de hidrógeno NHE (He FENA y col. 2004, Kavitha y col. 2004) con una vida media de  $1 \times 10^{-4}$ s (Chun He y col. 2002). El radical hidroxilo puede reaccionar con  $Fe^{2+}$ .



O reaccionar en presencia de sustratos orgánicos:



En la mayoría de los casos el reactivo limitante es el  $H_2O_2$  por lo que permite incrementos de capacidad. Con lo que respecta a su manejo es sumamente fácil, ya sea para arrancar o parar, puesto que si no hay fuente de energía no funciona, siendo la energía eléctrica su único camino para la descontaminación del agua, de esta manera podría decirse que utiliza como materia prima a un “reactivo limpio” (Chávez Guerrero 2006).

Anteriormente se ha mencionado que la electrogeneración de  $H_2O_2$  se ve favorecida en solución ácida, ya que obedece a la reacción donde se efectúa la reducción del oxígeno en el cátodo y se da un consumo de protones, estos puede provenir de la solución en que se efectúa la electrólisis o del ácido presente en la solución.

Una alta concentración de protones puede promover la evolución del  $H_2$  y reducir la eficiencia de corriente, los resultados indican que un pH de 2 es óptimo, ya que con un pH arriba de 2 habrá una insuficiencia de protones y por debajo de pH 2 decrece la generación del peróxido, debido a la evolución de hidrógeno, por otra parte un pH 3 puede favorecer la descomposición del  $H_2O_2$  cuando hay trazas de metales, por lo que a un pH de 2 se obtienen eficiencias de 84% y a un pH = 3 se tiene 69% (Qiang et al; 2002).

### **2.2.2 Propiedades del reactivo Fenton.**

El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, fenoles, fenoles clorados, octacloro-p-dioxina y formaldehído. Son muy pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo, entre ellos la acetona, el ácido acético, el ácido oxálico, las parafinas y los compuestos organoclorados.

Es un buen oxidante de herbicidas y otros contaminantes de suelos tales como hexadecano o Dieldrin. Puede descomponer solventes para limpieza a seco y decolorar aguas residuales con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, reduciendo su DQO.

También se ha aplicado exitosamente el reactivo de Fenton en la reducción de DQO de aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de lixiviados. Es útil como pretratamiento de compuestos no biodegradables.

### CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODO.

#### 3.1 Materiales, equipo y reactivos utilizados.

La celda electroquímica utilizada fue similar a la de Durán et al., (2002), sin embargo, hay que hacer notar las diferencias que existen entre ambas.

Una celda de 1L (vaso de plástico), con un electrodo de grafito de forma cilíndrica (barra), con un área de contacto de  $44.31 \text{ cm}^2$  y un ánodo de hierro (cilindro hueco) con un área efectiva de  $117.114 \text{ cm}^2$ . En el fondo de ésta se proporciona oxígeno mediante una bomba de aire (Marca: Elite 802, Capacidad: 75.7 L) y con agitación constante para la homogenización (Parrilla con agitación, Marca: CIMAREC), se ajustó el pH del agua a un valor menor de 3 y mayor de 2 con  $\text{H}_2\text{O}_4$ , conductividad y temperatura (midiendo con el pHmetro Marca: HANNA instruments, Modelo: HI 991300). La corriente eléctrica suministrada fue de 2A en ambos electrodos (utilizando Regulador de corriente directa Marca: ZURICH Modelo: DOS-2512M y un Multímetro, Modelo: MUL-280 (auto-range) Marca: PROAM).

El tiempo máximo de reacción fue de 1 hora, tomando muestras cada 10 minutos y midiendo su color real y aparente (Espectrofotómetro, Marca: HACH, Modelo: DR/4000V) y el DQO para la prueba final (COD Reactor, Marca: HACH, Modelo: BOX 389).



Fig. 7. Equipo utilizado para la electrogeneración del reactivo de Fenton

En esta fotografía se muestra la celda utilizada y todo el equipo descrito con anterioridad.

### 3.2 Metodología general.

Como primera parte, la búsqueda de las mejores condiciones de reacción; para el fenton clásico se agregaron diferentes cantidades de  $H_2O_2$  a 100ml de agua residual industrial, agitando continuamente (Agitador de proletas, Marca: MAYASA Modelo: APPM, Serie: 2150) a 230 RPM durante 120 minutos, tomando mediciones de color aparente.

Una vez encontrada la cantidad mínima de  $H_2O_2$ , acidificar el agua como primera instancia después medir las condiciones iniciales, agregar a un mismo volumen de agua residual la cantidad mínima de  $H_2O_2$  y una solución  $1 \times 10^{-8} M$  de Sulfato Ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) agitar y leer unidades de color durante el mismo tiempo.

Para la parte de electrogeneración se miden las condiciones iniciales, se debe adecuar el pH del agua menor de 3 y se debe airear durante 30 minutos. Con la variación del potencial de celda se pretende encontrar la mayor eficiencia de remoción de color, haciendo mediciones de color aparente y real, éstas dos se realizaron debido a que existe una coagulación-floculación y hace que el color aparente incremente y midiendo el real se observa la disminución.

Para el proceso de electrogeneración, se efectuaron las pruebas finales con las mejores condiciones, haciendo las mediciones anteriores pero agregando la prueba de DQO.

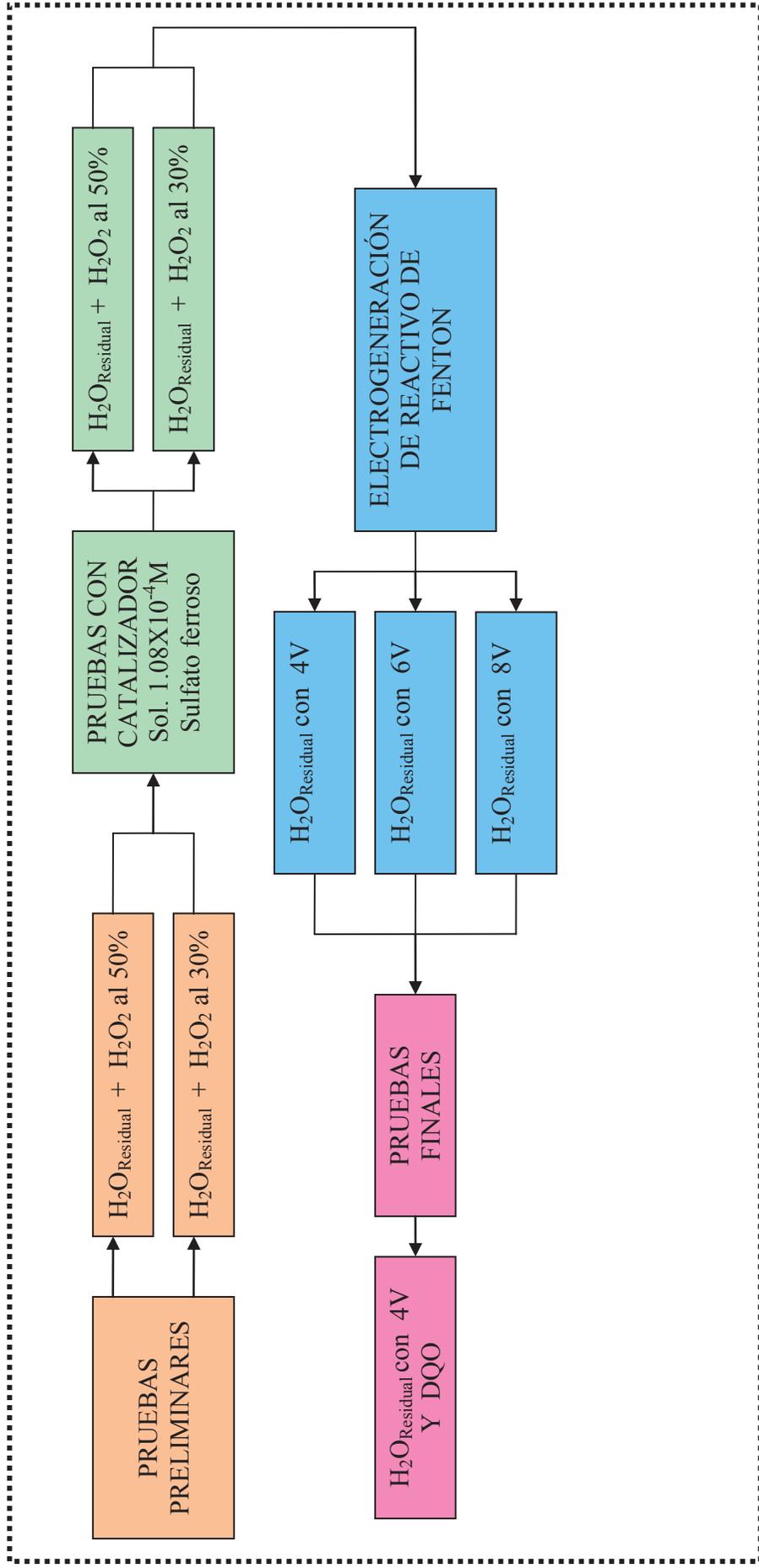


Fig. 8. Diagrama de bloques de la metodología general.

## Pruebas Preliminares

### $H_2O_{Residual}$ + $H_2O_2$ al 50% y 30% Vol.

Las pruebas preliminares que se realizan son con el peróxido de hidrógeno (50 y 30%Vol), con la finalidad de encontrar la cantidad mínima necesaria para disminuir las unidades de color inicial que están aproximadamente en 2000 unidades Pt-Co a 1000 unidades Pt-Co.

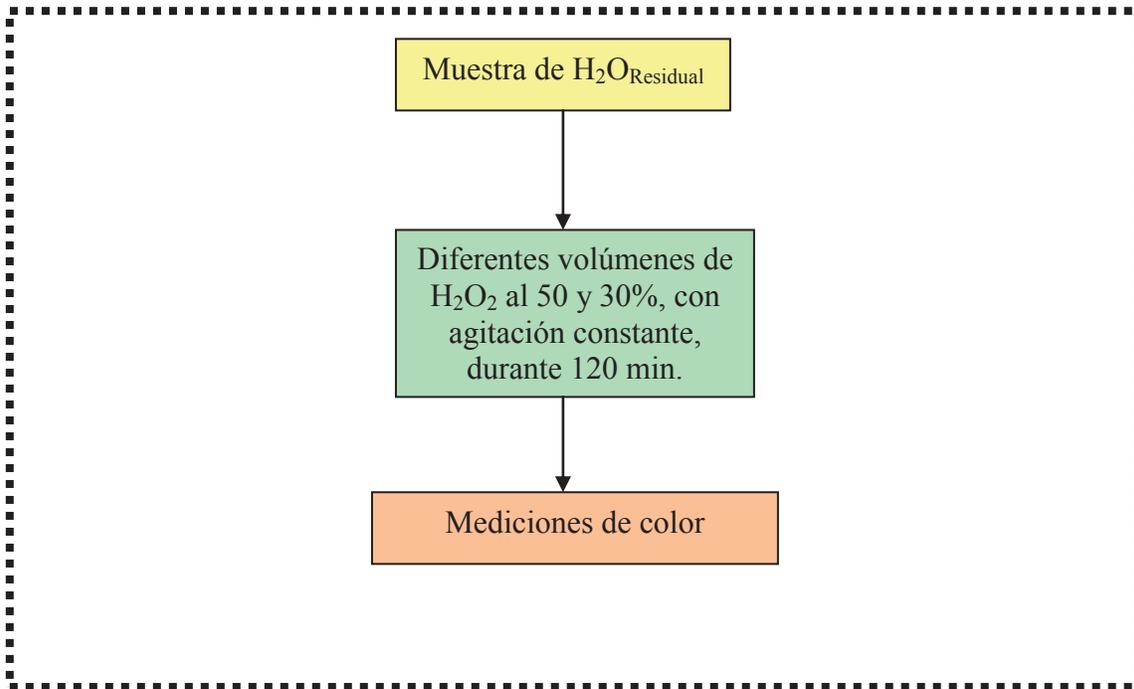


Fig. 9. Diagrama de bloques de las pruebas preliminares

1. En un vaso de precipitado limpio y seco, agregar 100ml de agua residual industrial, midiendo previamente las unidades de color aparente, debido a que el espectrofotómetro lee solo hasta 590 unidades Pt-Co, el agua se tiene que diluir en todas las mediciones, en el Apéndice B se pueden encontrar los detalles al respecto.

2. Posteriormente se agregar diferentes volúmenes (ml) de peróxido de hidrógeno.

3. Llevar las muestras al agitador de proletas durante 120 minutos.

4. La primera medición de color aparente se realizan a los 15 minutos y después cada 30 minutos hasta completar 120 minutos. Terminada la agitación se deja reposar durante 24 horas, al final de la cual se realiza la última medición.

5. Este procedimiento se realizó para las concentraciones de 50 y 30 % Vol de peróxido de hidrógeno, con la diferencia de los mililitros agregados a las muestras.

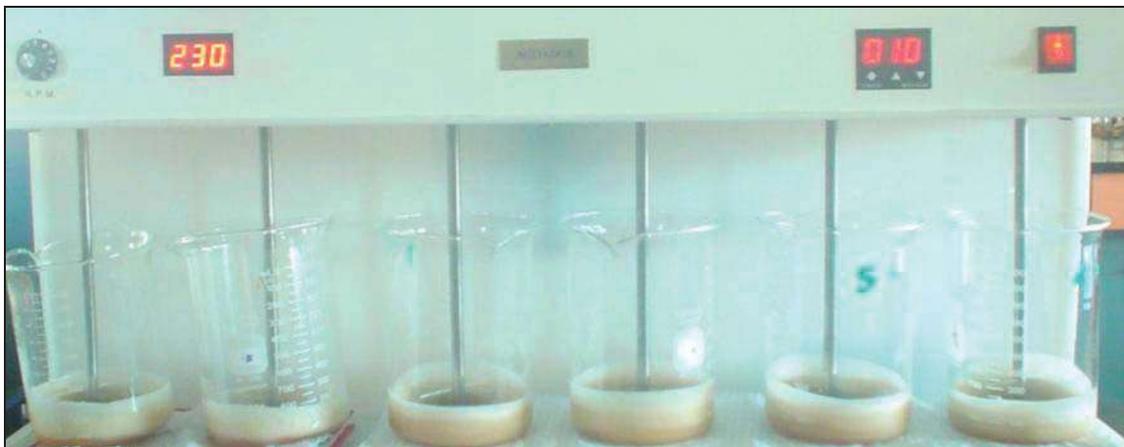


Fig. 10. Agitador de proletas

#### Pruebas Con Catalizador (solución $1.08 \times 10^{-4}$ M Sulfato Ferroso)

Una vez encontrada esta cantidad mínima de  $H_2O_2$ , procedemos a utilizar sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) como catalizador.

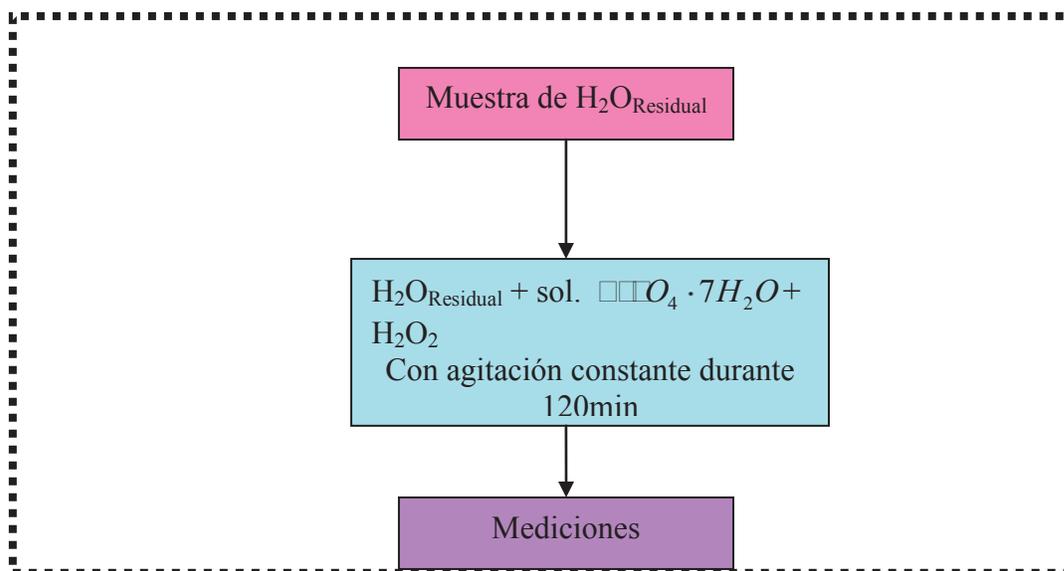


Fig. 11. Diagrama de bloques de pruebas con solución de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ .

1. Con 100ml de agua residual industrial en un vaso de precipitados de 1000ml, bajo condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica, medimos color aparente, ABS, T, pH, conductividad ( $\mu$ ).
2. Preparar un solución de sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )  $1.08 \times 10^{-4}\text{M}$  (E. Isarín y col., Revista IMIQ 2007).
3. Agregar 100ml de esta solución a la muestra de agua residual industrial.
4. Después se agrega la cantidad mínima necesaria de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , agitando constantemente (230 RPM) durante 2 horas.
5. La primera medición de color aparente se realiza a los 15 minutos y después cada 30 minutos hasta completar las 2 horas.
6. Al concluir con este tiempo, se procede a hacer medición de pH, T y conductividad.

### Electrogenación Del Reactivo De Fenton

Ahora con respecto a la electrogeneración del reactivo de Fenton, se sigue el siguiente procedimiento.

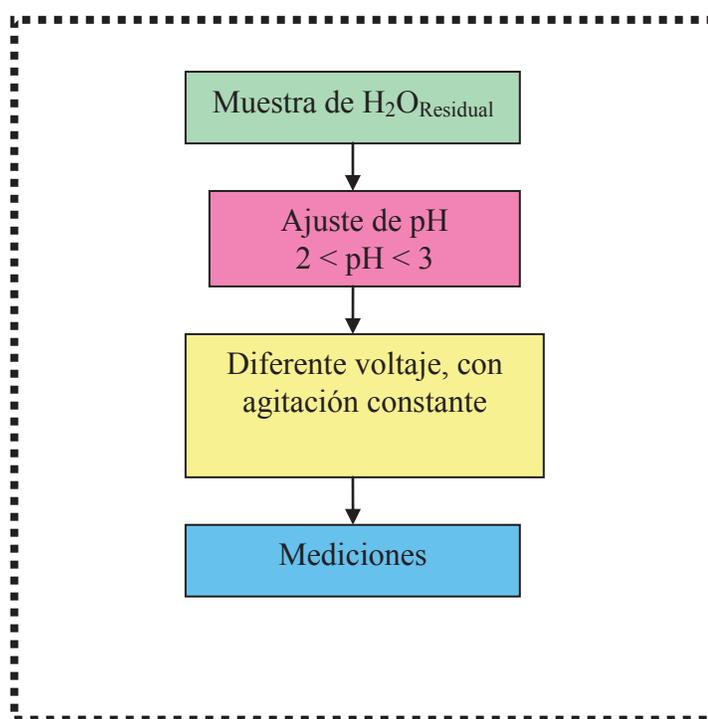


Fig. 12. Diagrama de bloques de prueba de electro-generación de reactivo de Fenton

1. Comenzar con la medición de 1000ml de agua residual, a su vez, temperatura, color real, conductividad, y pH del agua, para tener registro de las condiciones iniciales.
2. Posteriormente se continua con el ajuste de pH que debe ser  $2 < \text{pH} < 3$ , midiendo nuevamente todas las propiedades mencionadas con anterioridad.
3. Una vez ajustado el pH, se airea la muestra durante 30 minutos, esto para saturar de oxígeno el agua residual.
4. Al termino de esta, insertamos los electrodos dentro de la celda con el agua ya aireada y se conectan a la fuente de poder, sabiendo que el electrodo de fierro es el ánodo (+) y el de grafito el cátodo (-), la regulación del voltaje se realiza con un multímetro.
5. Manteniendo una agitación constante con una parrilla agitadora y la aireación durante toda la prueba, se toman muestras cada 10 minutos hasta completar una hora, midiendo color aparente y real.
6. Completado nuestro tiempo finalizamos con la medición de temperatura, conductividad y pH.

### 3.3 Parámetros a medir.

Los parámetros a medir son: pH, color, temperatura, conductividad y DQO.

**pH:** la alcalinidad de un agua puede decirse como su capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones hidrógeno. Y la acidez de un agua puede definirse como su capacidad para neutralizar bases.

**COLOR:** dos tipos de color se reconocen en el agua: el color verdadero, o sea, el color de la muestra una vez que se ha removido su turbidez, y el color aparente, que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido. El color aparente se determina sobre la muestra original, sin filtración o centrifugación previa, la técnica utilizada para la medición de color se indica en el Apéndice B.

**TEMPERATURA:** la determinación de la temperatura es importante para diferenciar procesos de tratamiento y análisis de laboratorio, puesto que, por ejemplo, el grado de saturación de OD, la actividad biológica y el valor de saturación con carbonato de calcio se relacionan con la temperatura.

**CONDUCTIVIDAD:** la conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y

en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de aguas para poder obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos.

**DQO:** Es un parámetro analítico de polución que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La determinación de DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte.

### 3.4 Pruebas con reactivo Fenton.

#### 3.4.1 Pruebas exploratorias.

La investigación requiere de pruebas preliminares con el objeto de reconocer si el método funciona, requerimiento de reactivos, tiempo de reacción, medición, conocimiento de los aparatos, etc.

Se comienza por reconocer las características físicas del agua que se va a tratar, pH, DQO, conductividad ( $\mu$ ), unidades de color, temperatura, para tener sus condiciones iniciales y saber que y como se modifican estas propiedades.

Los diferentes volúmenes de peróxido de hidrógeno dirán, cual de ellos es el que remueve a 1000 unidades de color, sabiendo esto, en las otras pruebas se sabrá que este es el volumen que llega a esas unidades de color; el tiempo que tarda en reaccionar es muy amplio, ya que, el peróxido de hidrógeno por si solo es muy lento en su reacción, puede tardar días y seguir reaccionando.

Esta prueba del Fenton clásico tiene el objeto de hacer una comparación con el reactivo de Fenton electrogenerado, sin ser esta nuestra estudio principal.

La electrogeneración del reactivo de Fenton dependerá de los electrodos, de las características del agua residual y principalmente de la intensidad de corriente eléctrica que se le suministre. Utilizando diferentes voltajes, conseguiremos tener uno solo que pueda remover la cantidad de color que deseamos y así poder hacer nuestros estudios en base a este.

#### 3.4.2 Pruebas finales.

Cabe destacar que las pruebas finales consisten en corroborar y determinar valores más precisos de los efectos que tienen el reactivo de Fenton en el agua residual, podremos cerciorarnos de su efectividad y también de la influencia en algunas de sus propiedades físicas y químicas.

Con los resultados podremos dar su interpretación y visualizar las fallas y los aciertos de la prueba, así como también, las mejoras que se pudieran hacer en un futuro.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados de la caracterización del agua residual municipal.

Estas son algunas de las propiedades iniciales del agua residual municipal, en la tabla podemos observar que el color del agua es de 1375 y que no es un número elevado comparado con la medición del agua residual industrial.

PARAMETRO	VALOR
Color Aparente (U. Pt – Co)	1375
pH	7.28
Conductividad Eléctrica ( $\mu$ )	801
Sólidos Disueltos Totales (ppm)	400
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	12.8

Tabla 3. Características del agua residual municipal

### 4.2 Resultados de la caracterización del agua residual industrial.

En la siguiente tabla podremos encontrar los valores numéricos de la caracterización del agua, tales como el color, DQO, pH, conductividad y algunas otras características.

PARAMETRO	AGUA RESIDUAL
Color Aparente (U. Pt-Co)	2280
DQO (ppm)	1368
pH	7.3
Conductividad eléctrica ( $\mu$ )	1866

Tabla 4. Características promedio de la muestra de agua residual.

### 4.3 Resultados de las pruebas exploratorias.

#### Agua residual + $H_2O_2$ al 50%.

Para las pruebas preliminares comenzamos con peróxido de hidrógeno a 50% Vol .

Al inicio de la prueba se tienen las siguientes mediciones.

<b>Color Aparente (U. Pt-Co)</b>	3000
<b>pH</b>	7.56
<b>Conductividad eléctrica (<math>\mu</math>)</b>	2043
<b>Temperatura (<math>^{\circ}C</math>)</b>	16.2

**Tabla 5.** Características del agua residual al inicio de la prueba.

Agregando diferentes cantidades de peróxido de hidrógeno tenemos los siguientes cambios en el color aparente. El tiempo, mililitros de  $H_2O_2$  y Unidades Pt-Co, nos indican la cantidad mínima necesaria de  $H_2O_2$  que se debe agregar

TIEMPO (min)	COLOR APARENTE (U. Pt-Co)					
	10ml	11ml	12ml	13ml	14ml	15ml
0	3000	3000	3000	3000	3000	3000
15	2425	2125	2250	2150	2325	2125
30	2150	2025	2050	2050	2000	2000
60	2100	2000	1975	1900	1950	1900
90	1925	1900	1825	1850	1875	1800
120	1900	1925	1800	1875	1850	1775
1440	1250	1275	1000	1125	1075	1000

**Tabla 6.** Volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 50% Vol.

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

En la siguiente figura se muestra la tendencia que tiene el color aparente del agua residual en 120 minutos, con distintos volúmenes de  $H_2O_2$ .

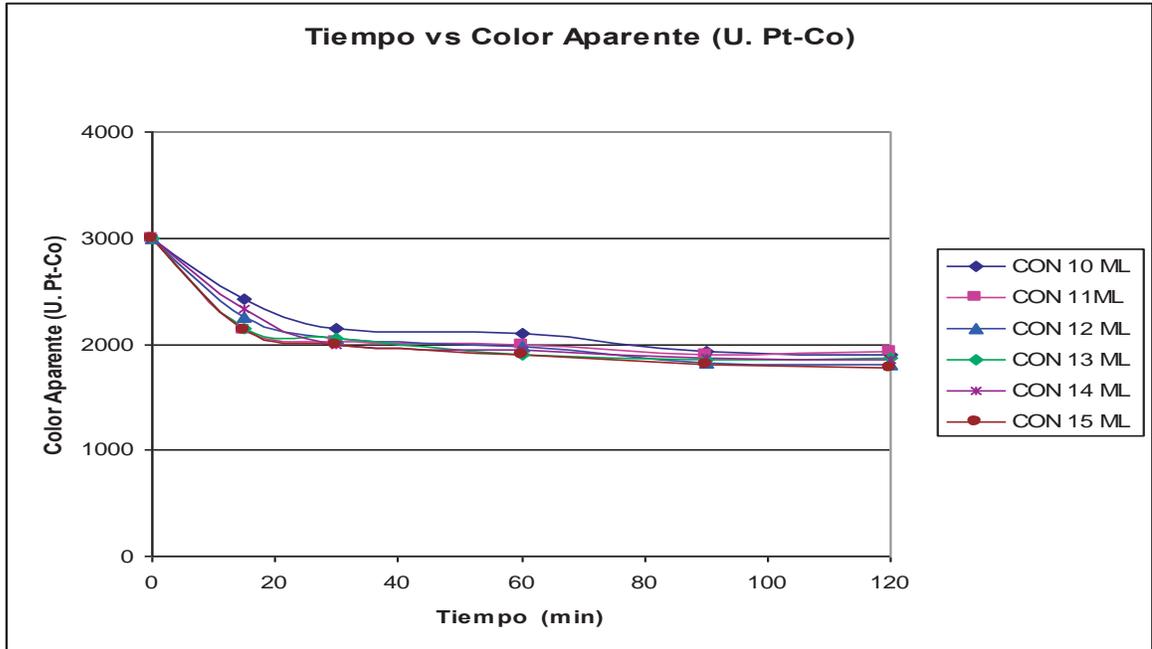


Fig. 13. Volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 50% Vol., 120 min.

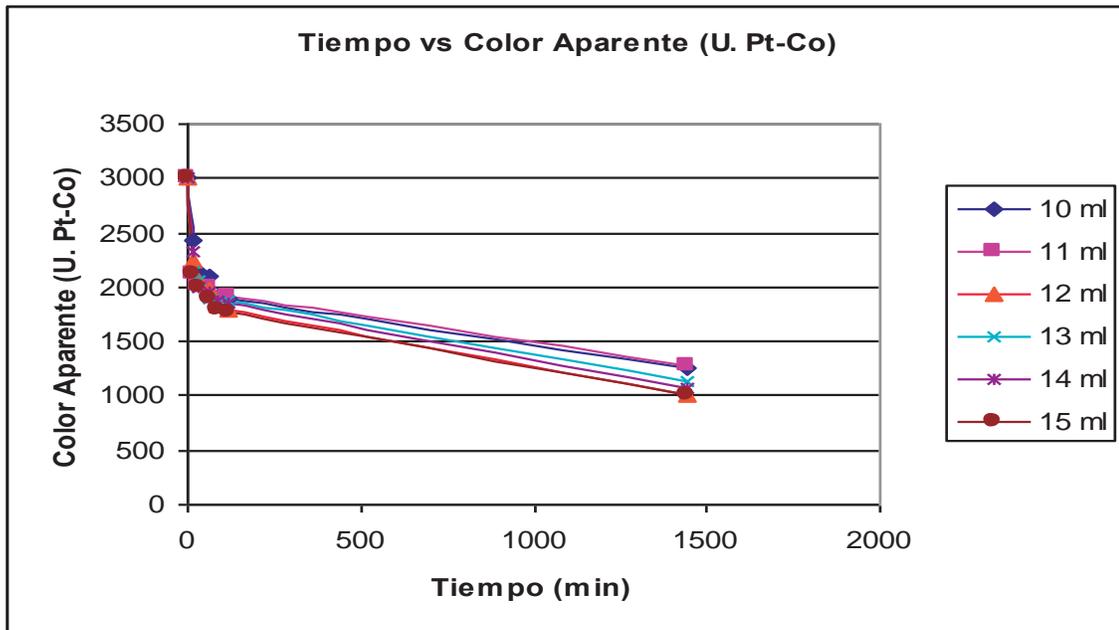


Fig. 14. Volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 50% Vol., 24hr.

## EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

---

Aquí se llega a un tiempo de 24 horas dando como resultado 12ml de  $H_2O_2$  para llegar a 1000 unidades de color aparente, en la siguiente tabla se muestran los valores de este resultado.

<b>pH</b>	8.17
<b>Conductividad Eléctrica(<math>\mu</math>)</b>	1957
<b>Temperatura (<math>^{\circ}C</math>)</b>	16.3

**Tabla 7.** Medición Final con diferentes volúmenes de  $H_2O_2$  al 50% Vol.

Al inicio de la prueba las unidades de color aparente eran muy elevadas, sin embargo, con 12 ml de  $H_2O_2$  se logran las 1000 unidades. El pH con un aumento de 0.61, y una disminución en la conductividad de 86.

### **Agua residual + $H_2O_2$ al 30%.**

La siguiente tabla nos muestra las condiciones a las que se encontraba el agua, el color aparente es elevado y el pH está dentro del rango.

<b>Color Aparente (U. Pt-Co)</b>	2650
<b>pH</b>	6.98
<b>Conductividad Eléctrica (<math>\mu</math>)</b>	1628
<b>Temperatura (<math>^{\circ}C</math>)</b>	17.2

**Tabla 8.** Condiciones iniciales del agua residual.

En la siguiente figura observamos la tendencia que tiene el color aparente en 120 minutos con agitación y distintas cantidades de  $H_2O_2$ .

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

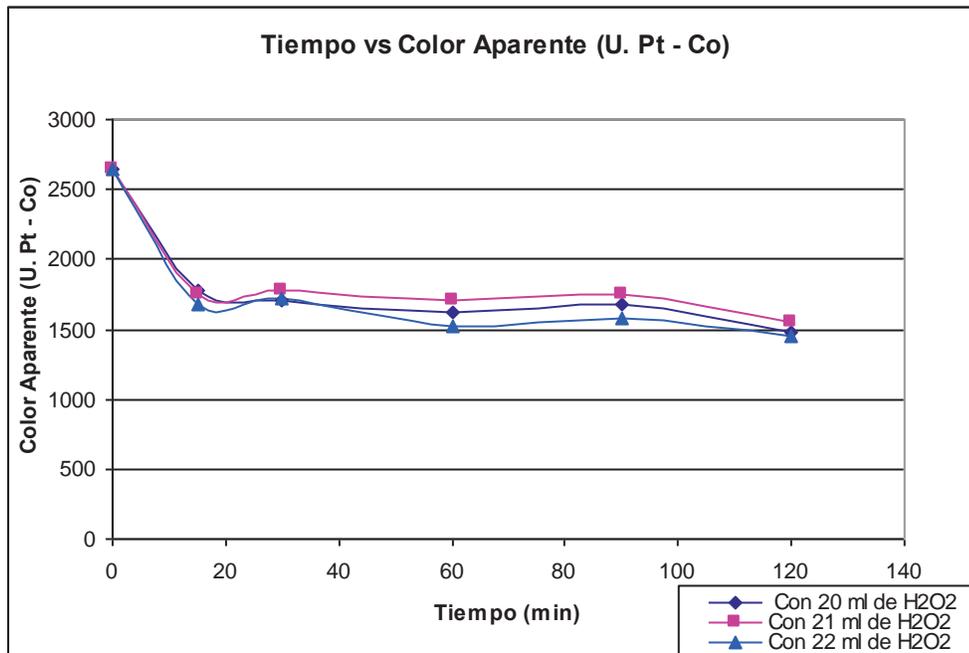


Fig. 15. Volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 30% Vol, 120 min.

A las 24 horas tenemos que con 22ml las unidades de color aparente son 1000 unidades Pt-Co, como se puede observar en la siguiente figura.

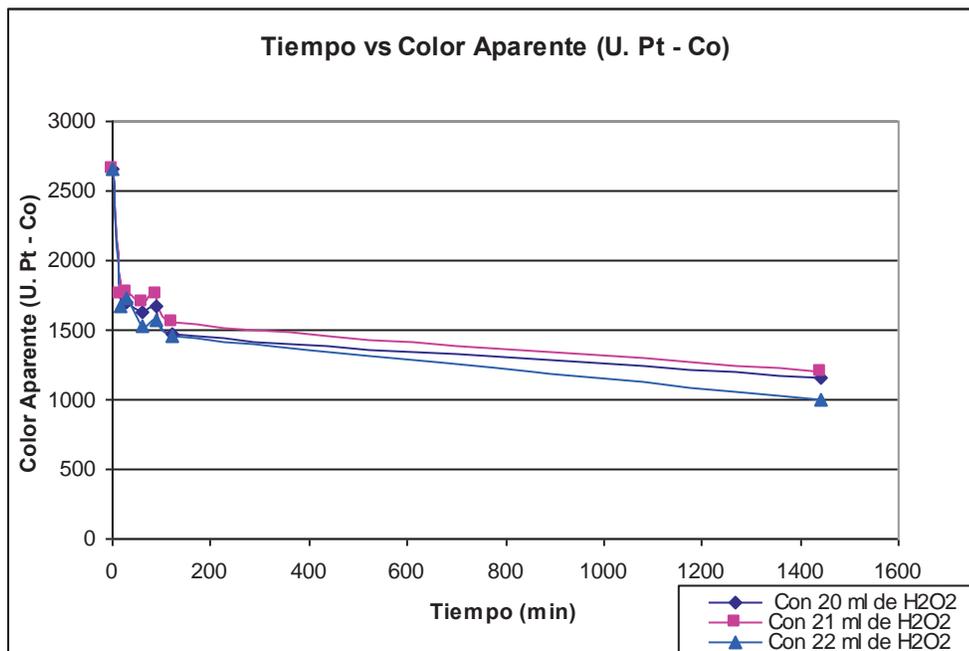


Fig. 16. Volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 30% Vol, 24 hr.

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON**

---

La siguiente tabla indica los valores numéricos de remoción de color aparente durante los primeros 120 min hasta llegar a las 24hr.

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>COLOR APARENTE (U. Pt-Co)</b>
0	3000
15	2125
30	2000
60	1900
90	1800
120	1775
1440	1000

**Tabla 9.** Medición de Color con volúmenes diferentes de  $H_2O_2$  al 30% Vol

En la siguiente tabla observamos que el pH aumentó, la conductividad disminuyó al igual que la temperatura.

<b>pH</b>	8.06
<b>Conductividad Eléctrica(<math>\mu</math>)</b>	1931
<b>Temperatura (<math>^{\circ}C</math>)</b>	16.6

**Tabla 10.** Condiciones al final de la prueba con  $H_2O_2$  al 30% Vol.

**Pruebas Con Catalizador (solución  $1.08 \times 10^{-4}$  Sulfato Ferroso)**

**$H_2O_{Residual} + H_2O_2$  al 50%**

Encontrada la cantidad mínima de  $H_2O_2$ , ajustamos el pH, agregamos el sulfato ferroso y después añadimos el  $H_2O_2$  al 50% vol.

Comenzamos con la acidificación del agua y los valores son:

Color Aparente (U. Pt-Co)	2450
pH	2.99
Conductividad Eléctrica ( $\mu$ )	3175
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	17.5

Tabla 11. Valores de acidificación del agua.

Ajustando el pH a 2.99 y después midiendo el color aparente tenemos los datos numéricos que se mencionan en esta tabla.

TIEMPO (min)	COLOR APARENTE (U. Pt-Co)
0	2450
15	1200
30	1250
60	1250
90	1250
120	680

Tabla 12. Prueba con  $H_2O_2$  al 50% vol. y solución de sulfato ferroso, 120 min.

Podemos observar que el reactivo de Fenton reacciona, removiendo el color en 120 minutos llegamos a medir menos de 1000 unidades de color aparente.

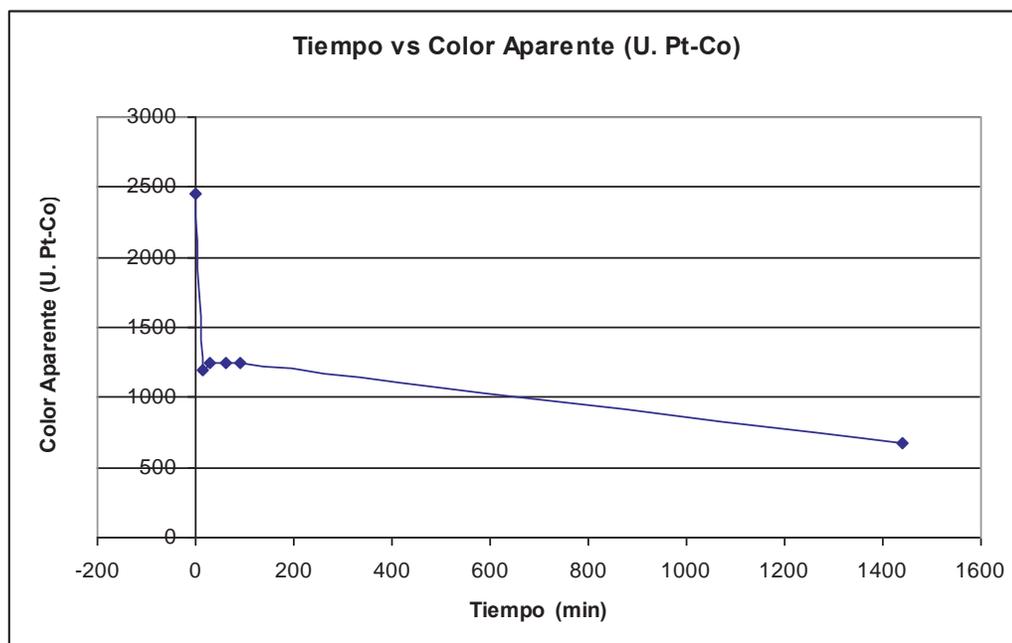


Fig.17. Prueba con  $H_2O_2$  al 50% vol. y solución de sulfato ferroso, 24hr.

La tabla que se muestra a continuación contiene los datos de la medición realizada al final de la prueba, y nos indica que el color bajó más de 1000 U. Pt-Co en color aparente, el pH que fue modificado aumentó 4.93, la conductividad continuo siendo la misma al igual que la temperatura.

<b>pH</b>	2.99
<b>Conductividad Eléctrica(<math>\mu</math>)</b>	3714
<b>Temperatura (<math>^{\circ}C</math>)</b>	17.4

Tabla 13. Mediciones Finales Prueba con  $H_2O_2$  al 50% vol. y solución de sulfato ferroso.

### $H_2O_{Residual} + H_2O_2$ al 30%

Encontrada la cantidad mínima de  $H_2O_2$  a 30% Vol., ajustamos el pH 3.05, agregamos el sulfato ferroso y después añadimos la cantidad mínima necesaria de  $H_2O_2$  al 30% vol., pero antes de comenzar medimos las condiciones iniciales del agua residual.

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

Color Aparente (U. Pt-Co)	2625
pH	3.05
Conductividad Eléctrica ( $\mu$ )	3343
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	18.5

Tabla 14. Condiciones iniciales

En la tabla que se muestra a continuación tenemos los valores obtenidos en la prueba con peróxido d hidrógeno al 30% Vol., la cual indica que no llego a las 1000 unidades de color en 24hr.

TIEMPO (min)	COLOR APARENTE (U. Pt-Co)
0	2625
15	1275
30	1200
60	1100
90	1100
1440	1075

Tabla 15. Prueba con  $H_2O_2$  al 30% vol. y solución de sulfato ferroso, 24hr.

En esta figura se puede observar que el color no alcanza a descender hasta las 1000 unidades de color.

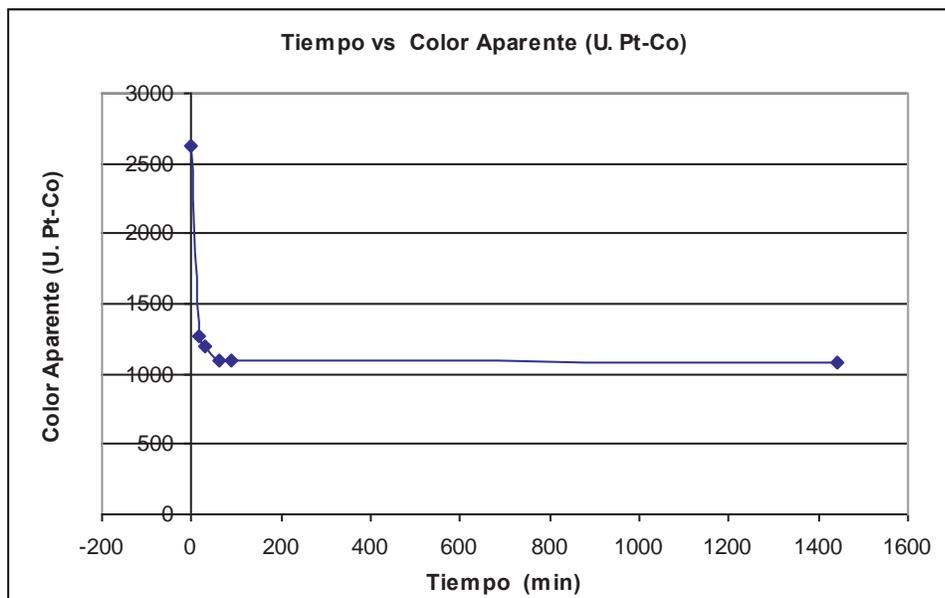


Fig. 18. Prueba con  $H_2O_2$  a 30% Vol. sulfato ferroso, 24hr..

## EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

---

Podemos observar en la tabla que se muestra en la parte inferior que el pH de ambas pruebas permaneció dentro del intervalo de la medición inicial y se muestra también la disminución en la conductividad de las dos pruebas.

<b>pH</b>	3.05
<b>Conductividad Eléctrica(<math>\mu</math>)</b>	1800
<b>Temperatura (<math>^{\circ}</math>C)</b>	18.3

Tabla 16. Medición Final.

### Electrogeneración Del Reactivo De Fenton

Para la electrogeneración del reactivo de fenton se realizaron 3 pruebas con voltajes de 4, 6 y 8 V.

#### $H_2O$ Residual con 4V

La tabla muestra las condiciones iniciales del agua residual sin acidificar, para los siguientes experimentos con 4V, 6V y 8V, son las siguientes.

AGUA SIN ACIDIFICAR	
<b>Color Aparente (U. Pt-Co)</b>	2700
<b>Color real (U. Pt-Co)</b>	675
<b>pH</b>	7.25
<b>Conductividad Eléctrica (<math>\mu</math>)</b>	1559
<b>Temperatura (<math>^{\circ}</math>C)</b>	16.9

Tabla 17. Condiciones iniciales del agua antes de añadir ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

La acidificación del agua es importante debido a que si se quiere tener una buena eficiencia en el proceso se debe proceder a ello.

AGUA ACIDIFICADA	
<b>Color Aparente (U. Pt-Co)</b>	2125
<b>Color Real (U. Pt-Co)</b>	525
<b>pH</b>	2.39
<b>Conductividad Eléctrica (<math>\mu</math>)</b>	1559
<b>Temperatura (<math>^{\circ}</math>C)</b>	17

Tabla 18. Condiciones del agua después de añadir ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

## EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

En la figura 19 se muestran los valores obtenidos en color real y se puede decir que el incremento del color es excesivo. En la fig. 20 se muestra la capacidad de remoción del reactivo de fenton, además un dato muy interesante, se realizó una medición extra a los 70 minutos después de dejar reposar (sin energía eléctrica, aireación y ni mezclado) dando como resultado un descenso muy considerable en el color, que nos da a corroborar que la coagulación – floculación existe.

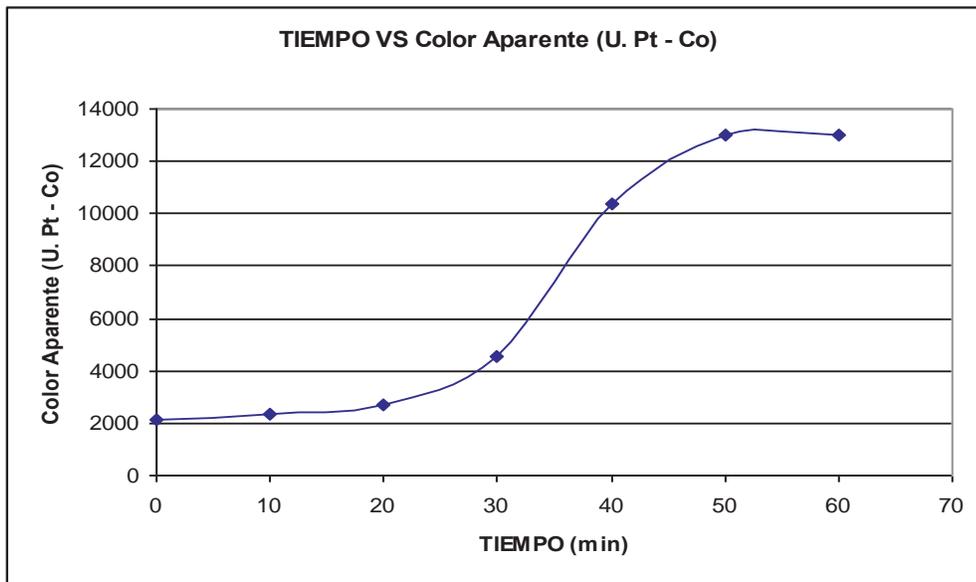


Fig. 19. Color Aparente para electro-generación del reactivo de Fenton con 4V.

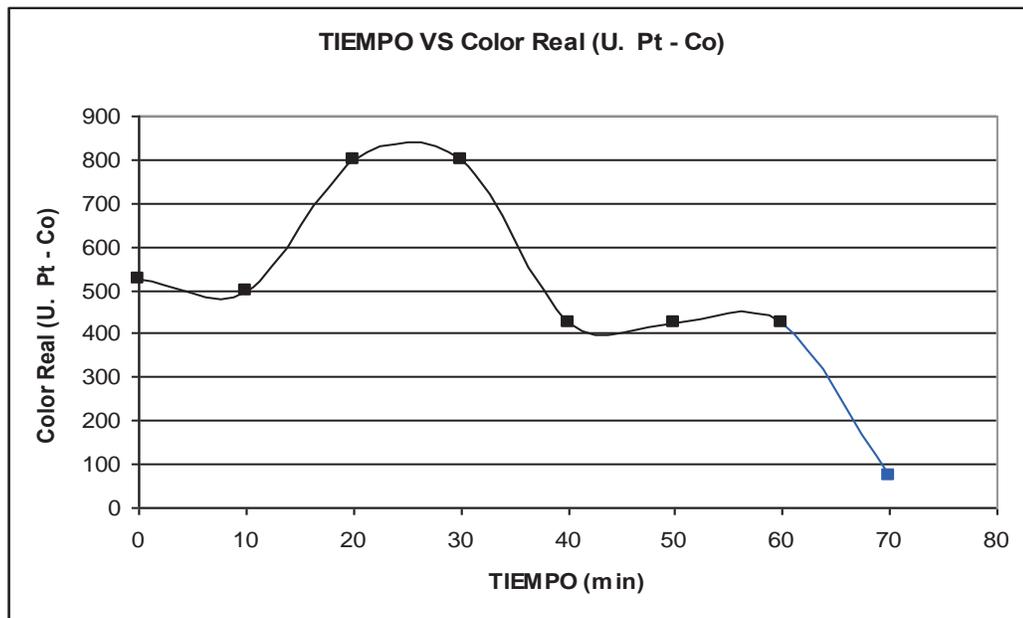


Fig. 20. Color Real para electro-generación del reactivo de Fenton con 4V.

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON**

---

Podemos observar con mayor precisión los valores de color aparente y real, a demás la medición extra que se realizó, en la siguiente tabla.

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>COLOR APARENTE (U. Pt-Co)</b>	<b>COLOR REAL (U. Pt-Co)</b>
0	2125	525
10	2325	500
20	2700	800
30	4550	800
40	10350	425
50	13000	425
60	13000	425
70	200	75

**Tabla 19.** Color aparente y real con 4V.

Aumento en el pH con 2.12 y la conductividad disminuyó al igual que la temperatura.

<b>pH</b>	4.51
<b>Conductividad Eléctrica (<math>\mu</math>)</b>	3546
<b>Temperatura (<math>^{\circ}</math>C)</b>	16.5

**Tabla 20.** Medición final con 4V.

### **H<sub>2</sub>O<sub>Residual</sub> con 6V**

Se observa en la siguiente figura 21 que el ascenso del color en los primeros 30 minutos es más arriba del color inicial, sin embargo, su descenso nos dice que el reactivo de fenton está actuando. De igual manera que en la prueba pasada, se hace referencia a una medición extra después de reposar 10 minutos y su descenso de color es notable.

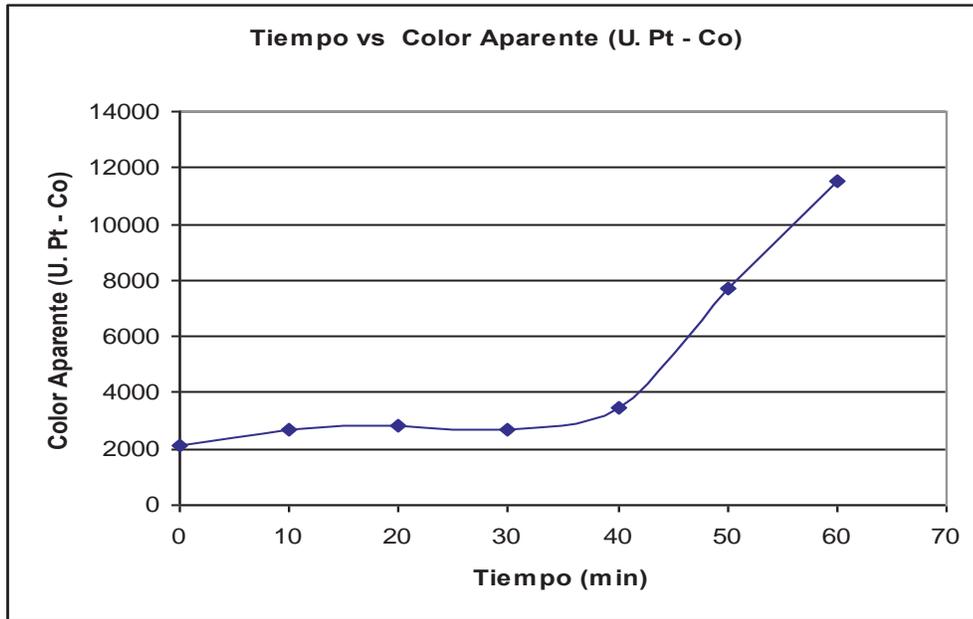


Fig. 21. Color Aparente para electro-generación del reactivo de Fenton con 6V.

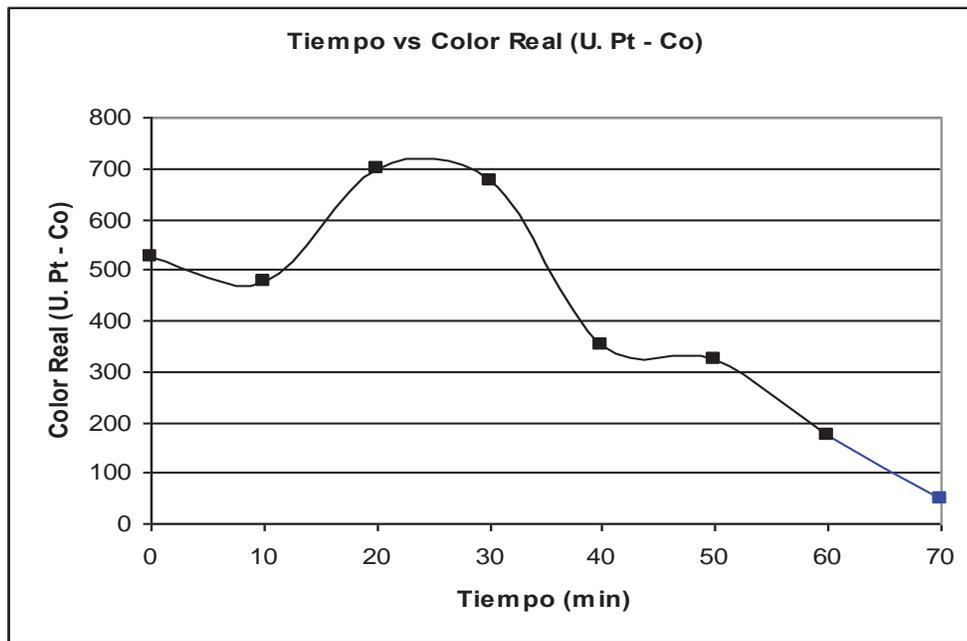


Fig.22. Color Real para electro-generación del reactivo de Fenton con 6V.

La tabla muestra los valores de color aparente y real obtenidos durante la prueba y nos muestran resultados por debajo de las 1000 unidades de color.

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON**

---

---

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>COLOR APARENTE (U. Pt-Co)</b>	<b>COLOR REAL (U. Pt-Co)</b>
0	2125	525
10	2700	475
20	2800	700
30	2700	675
40	3500	350
50	7725	325
60	11500	175
70	100	50

**Tabla 21.** Valores de Color Aparente y Real con 6V.

En la siguiente tabla podemos observar los cambios en los valores de pH y temperatura, al final de la prueba.

<b>pH</b>	5.29
<b>Conductividad Eléctrica (<math>\mu</math>)</b>	2269
<b>Temperatura (<math>^{\circ}</math>C)</b>	20.5

**Tabla 22.** Valores finales de la prueba con 6V.

### **H<sub>2</sub>O residual con 8V**

En la figura 23 se muestra que con 8V la disminución del color es muy rápida, sin embargo, el desgaste de los electrodos es mucho mayor y es por esto que la curva se muestra con esta tendencia y el poco tiempo de reacción. Después de 10 minutos de reposo la última medición muestra un descenso considerable de color.

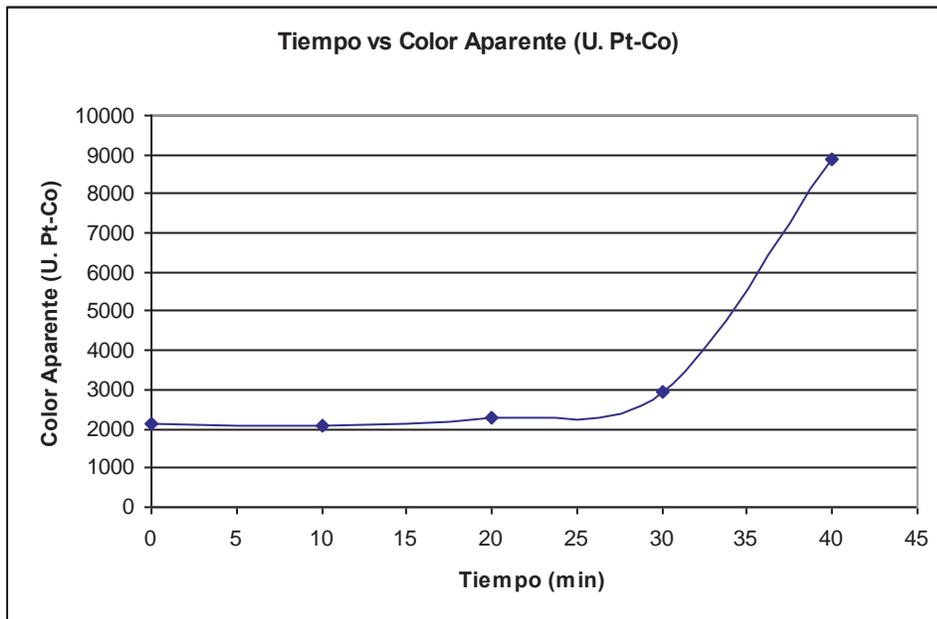


Fig. 23. Color Aparente para electro-generación del reactivo de Fenton con 8V.

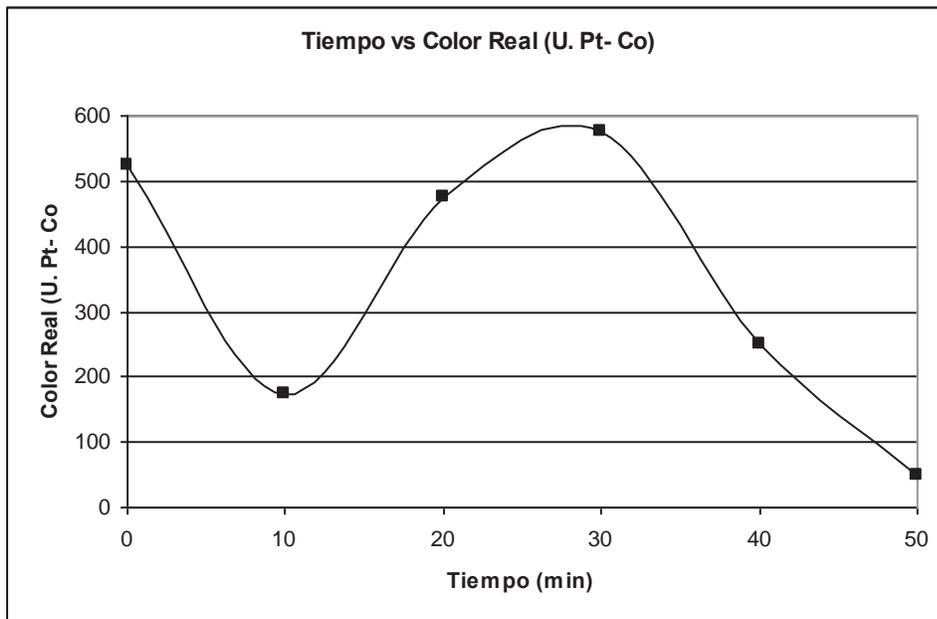


Fig. 24. Color Real para electro-generación del reactivo de Fenton con 8V.

Tenemos en la tabla siguiente más detallados los valores obtenidos en la prueba y la tendencia que tienen.

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

---

TIEMPO (min)	COLOR APARENTE (U. Pt-Co)	COLOR REAL (U. Pt-Co)
0	2125	525
10	2075	175
20	2300	475
30	2950	575
40	8900	250
50	150	50

Tabla 23. Valores de Color Aparente y Real con 8V.

El pH aumenta 2.81, la temperatura aumenta 3.9°C y la conductividad eléctrica disminuye.

pH	5.2
Conductividad Eléctrica ( $\mu$ )	2282
Temperatura (°C)	20.9

Tabla 24. Mediciones finales.

#### 4.4 Resultados de las pruebas finales.

En las tablas 25 y 26 se observan las condiciones iniciales sin acidificar el agua y ya acidificada.

Color Aparente (U. Pt - Co)	1820
pH	6.8
Conductividad ( $\mu$ )	1519
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	37

Tabla 25. Condición inicial del agua.

Color Real (U. Pt - Co)	1100
pH	2.34
Conductividad ( $\mu$ )	3999
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	18.9

Tabla 26. Parámetros del agua acidificada

Con una intensidad de corriente de 4V, observamos el mismo comportamiento que en las pruebas pasadas, tenemos un descenso muy rápido a los 10 minutos y a los 60 minutos logramos llegar a 0 unidades de color real.

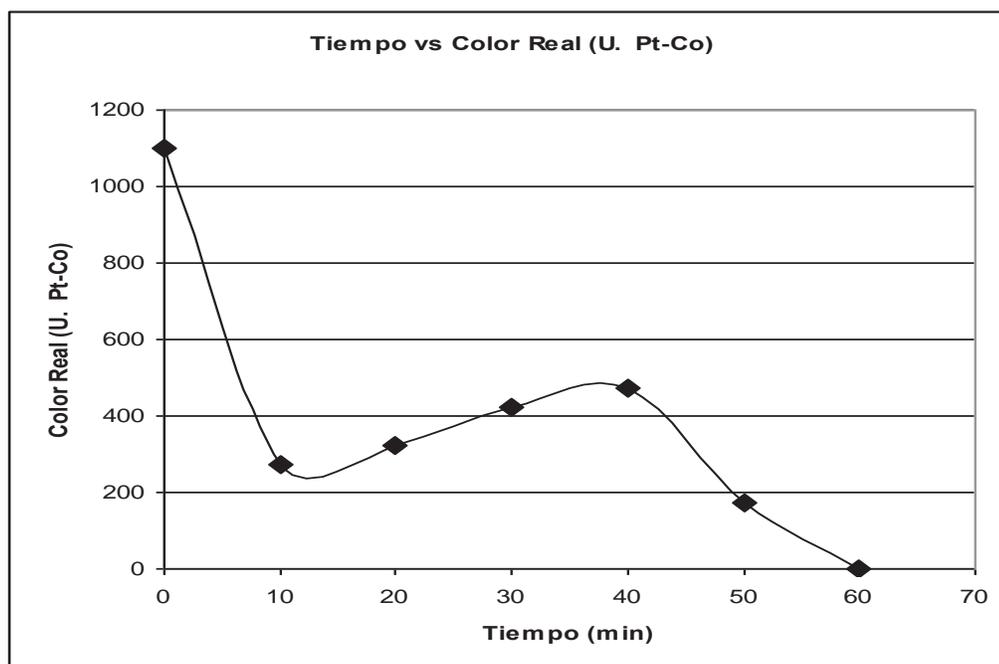


Fig. 25. Color Real para electro-generación del reactivo de Fenton con 4V.

## EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON

---

En la siguiente tabla se muestran los valores de color real en la prueba final con 4V, en un tiempo de 60 minutos, obteniéndose resultados de cero unidades de color al final de la prueba.

TIEMPO (min)	COLOR REAL (U. Pt-Co)
0	1100
10	275
20	325
30	425
40	475
50	175
60	0

**Tabla 27.** Valores de Color Real, para la electrogeneración de reactivo de Fenton con 4V.

pH	5.39
Conductividad Eléctrica ( $\mu$ )	3999
Temperatura ( $^{\circ}$ C)	29.2

**Tabla 28.** Las características finales del agua después de la prueba.

Después de la prueba de color se realizó la prueba de DQO, teniendo como resultados:

TIEMPO (min)	DQO
0	1368
10	1064
20	1332
30	1540
40	1252
50	1208
60	1196

**Tabla 29.** Valores de DQO.

Se denota en la figura que esta a continuación que el menor DQO que se alcanzó en la prueba fue a los 10 minutos igual que en la prueba de color, sin embargo, aquí no se logró un descenso a las 1000 unidades de DQO.

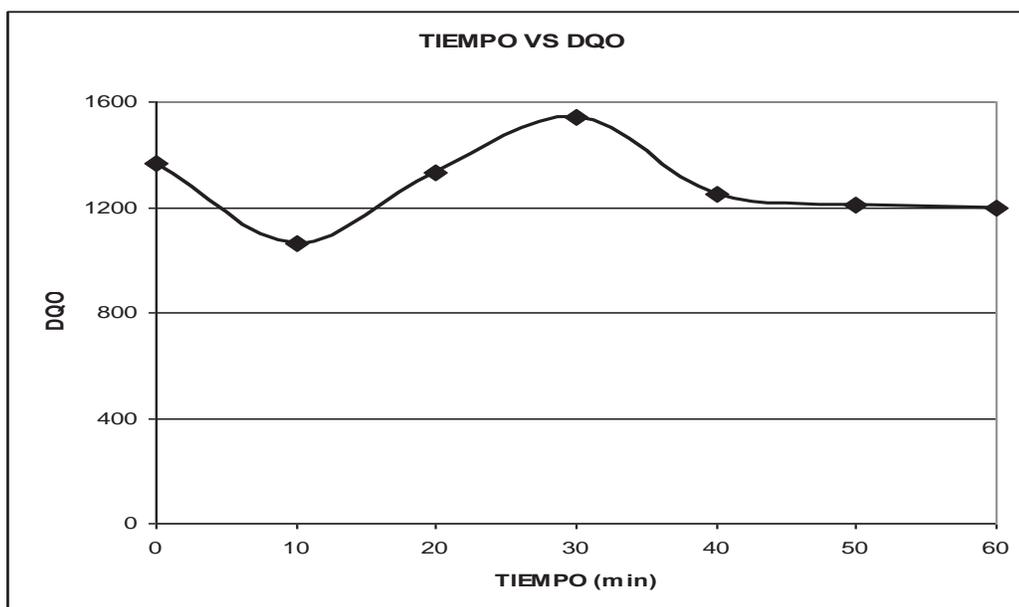


Fig. 26. DQO de la prueba final con 4V.

Las mediciones finales que se tienen para esta prueba son el aumento de pH, temperatura y la misma conductividad.

#### 4.5 Análisis de los resultados para las variables color, DQO, pH.

##### 4.5.1 Color.

El descenso de las unidades de color al minuto 10 es muy notorio y repentino, y el aumento de color al minuto 20, alcanzando un máximo de color pero menor que el inicial al minuto 40, debido a que comienza el proceso de coagulación – floculación, sin embargo, la caída de color, al minuto 50 y 60 nos indica que existe una remoción de color.

##### 4.5.2 DQO

La DQO comienza en un punto alto y baja repentinamente a los 10 minutos de igual manera que en la prueba de color, cabe mencionar que también en este tiempo es la DQO más baja que se obtiene en toda la prueba, lo cual no puede decirse para el color.

Después de esta baja en el DQO comienza de nuevo a aumentar en el minuto 20 y alcanzando un máximo al minuto 30 y finalmente para descender y mantener una línea continua al minuto 50 y 60, esto indica que la remoción de DQO ya no es factible en estos minutos, puede ser debido al aumento de pH, y la formación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

#### 4.5.3 pH y conductividad.

Comenzamos con un pH de 2.34 ácido para que haya una cantidad considerable de hidrogeno, y finalizamos con un aumento de pH de 3.04 dando lectura final de 5.39, esto debido a que el pH no fue regulado durante la prueba y además por la formación d algunos compuestos.

Con respecto a la conductividad inicial la del agua acidifica y la final son mayores que esta. Y la del agua acidificada y la final es la misma lectura de 3999.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

El objetivo de disminuir las unidades de color fue positivo, debido a que se obtuvieron resultados que satisficieron las expectativas, teniendo eficiencias por arriba del 80%.

Las condiciones para la disminución de color al inicio fueron las mejores debido a que se realizaron en un menor tiempo y tuvo una disminución de 825 U. Pt-Co en tan solo 10 minutos, sin embargo, no se puede dejar a un lado la disminución de color en el minuto 60 que es de 0 U. Pt- Co de color real.



**Fig. 27.** Electro-generación del reactivo de Fenton con 4V.

En esta imagen podemos observar la coagulación – floculación en la electrogeneración del reactivo de Fenton con 4V; En un intervalo de 30min se comienza a notar en la medición de color, la obstrucción de flóculos formados y por consecuencia el aumento del mismo en la medición de color aparente y debido a ello, se tiene que hacer medición de color real, sin embargo, el inicio de la floculación llega paulatinamente y comienza el aumento del color llegando a un máximo para después descender rápidamente, ya que, el tamaño de flóculo comienza a ser más grande en la parte final de la prueba y por lo tanto su filtración es más fácil.

En la siguiente fotografía podemos observar de derecha a izquierda el cambio que ha tenido el agua a diferentes intensidades de corriente, partimos de un estado inicial (primer vaso de la derecha), continuando con un intensidad menor de 1A y terminando con una intensidad mayor de 2A.



Fig. 28. Comparación de pruebas con Reactivo de fenton.

La formación de diferentes complejos de fierro no permite un descenso mayor de la DQO.

El aumento del pH nos indica que hay una mayor cantidad de OH y que existe una deficiencia de Hidrógeno.

La conductividad que tiene el agua es suficiente para realizar la prueba sin añadir algún electrolito que ayude a tener una mayor conductividad.

La electrogeneración del reactivo de Fenton constituye un tratamiento eficiente y que funciona para este tipo de aguas residuales de industria papeleras tipo kraft.

El costo de este tratamiento debe estudiarse con detenimiento y hacer notar su viabilidad, aunque cabe señalar que en Europa ya existen algunas plantas que comienzan con esta tecnología.

El método que se utiliza hoy en día son los lodos activados, esta es una manera muy eficiente y el costo de construcción de una planta de lodo activado puede ser competitivo con otros tipos de plantas de tratamiento que producen resultados comparables. Sin embargo, los costos unitarios de operación son relativamente altos. Ahora si comparamos este método con el método de electrogeneración, este último tiene una desventaja frente a lodos activados, ya que, cuando se utilizan los lodos activados no se requiere de un suministro de energía como el de la electrólisis.

## 5.2 Recomendaciones

Controlar el pH, no dejar que el pH aumente ni disminuya si no que se mantenga estable dentro de un rango de 2-3.

Añadir algún electrolito al agua residual para aumentar su conductividad eléctrica, esto debido a que puede disminuir considerablemente la intensidad de energía eléctrica consumida en este proceso.

El reactivo de Fenton electrogenerado debe estudiarse con mayor amplitud, por ejemplo, si se hiciera junto con un tratamiento biológico.

El estudio de electrofenton solar, es una alternativa más para el tratamiento de las aguas residuales, y sus resultados podrían ser muy interesantes debido a la utilización de la radiación solar, además de que a mostrado comportamientos favorables frente a los compuestos formados en el proceso y sobre todo en los ácidos oxálicos resultantes de la electrogeneración.

## BIBLIOGRAFIA

Jairo Alberto Romero Rojas. Calidad del Agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ernest W. Steel. Abastecimiento de agua y alcantarillado.

Juan Carlos Ayala Barajas. Caracterización de los efluentes contaminantes de una industria papelera y diseño de un asentador de celulosa para recuperar agua de proceso.

Roberto Guerra González. Alternativas para la eliminación de color de efluentes líquidos de la industria papelera crisoba industrial planta Morelia.

I.Q. Eloy Isaraín Chávez Guerrero. Construcción de dos celdas electroquímicas escala laboratorio para la electrogeneración del reactivo de fenton y para oxidación anódica.

Ing. Enrique Villareal Domínguez. Elementos de Electroquímica Formativa IPN.

C. L. Mantell Ingeniería Electroquímica. Editorial Reverté S.A.

Revista IMIQ; 48 (1-2):51-59, 2007

Tecnología Ciencia Ed. (IMIQ)18(1): 10-15, 2003

Xavieroménech, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes.

E C Martínez y G D López. **INGAR**-Instituto de Desarrollo y Diseño (**Conicet**) y Universidad Tecnológica Nacional (Fac. Reg. Santa Fe) Santa Fe, Argentina. Tratamiento Químico de contaminantes orgánicos – El proceso Fenton

TextosCientíficos. Com

C. Earl Lobby. Ciencia y tecnología sobre Pulpa y papel. 5ª edición. CECSA

López Zaragoza Nancy, Briceño Correa María Isabel. Análisis y evaluación de lagunas en sistemas de tratamiento de aguas residuales en una industria papelera.

Notas Brillas Coso.

## APENDICE A

Esta disponible una amplia gama de procesos de oxidación avanzada:

- Procesos de oxidación química usando peróxido de hidrógeno, ozono, peróxido y ozono combinados, hipoclorito, agente Fenton, etc.
- Elevación de la oxidación ultravioleta tanto UV/ozono, UV/peróxido de hidrógeno, UV/aire.
- Oxidación del aire húmedo y oxidación catalítica del aire húmedo (donde el aire es usado como oxidante).

Los procesos de oxidación avanzada son particularmente apropiados para aguas residuales que contienen recalcitrantes, tóxicos o materiales no biodegradables. Los procesos ofrecen algunas ventajas sobre los procesos físicos y biológicos incluyendo:

- Procesos de operabilidad.
- Operaciones desatendidas.
- La ausencia de residuos secundarios.
- La habilidad para manejar fluctuaciones de flujo impuestas y composiciones.

Algunas TAOs, como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, recurren además a reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados.

El cuadro que sigue da un listado de las TAOs, clasificadas en procesos **no fotoquímicos** y **procesos fotoquímicos**.

<i>Procesos no fotoquímicos</i>	<i>Procesos fotoquímicos</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ozonización en medio alcalino (<math>O_3/OH^-</math>)</li><li>• Ozonización con peróxido de hidrógeno (<math>O_3/H_2O_2</math>)</li><li>• Procesos Fenton (<math>Fe^{2+}/H_2O_2</math>) y relacionados</li><li>• Oxidación electroquímica</li><li>• Radiólisis <math>\gamma</math> y tratamiento con haces de electrones</li><li>• Plasma no térmico</li><li>• Descarga electrohidráulica - Ultrasonido</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Oxidación en agua sub/y supercrítica</li><li>• Procesos fotoquímicos</li><li>• Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)</li><li>• UV/peróxido de hidrógeno</li><li>• UV/<math>O_3</math></li><li>• Foto-Fenton y relacionadas</li><li>• Fotocatalisis heterogénea</li></ul>

### Ozonización en medio alcalino

El ozono puede reaccionar en forma directa con un sustrato orgánico a través de una reacción lenta y selectiva, o de una reacción radicalaria favorecida en medio alcalino (rápida y no selectiva).

El ozono es un poderoso oxidante y eficiente bactericida, aplicado exitosamente desde hace mucho tiempo como desinfectante de aguas potables. Su uso ha permitido un notable mejoramiento del gusto, color, características de filtración y biodegradabilidad de las mismas. Se ha empleado con éxito en la decoloración de caolín y de pulpa de celulosa y, en general, como tratamiento de efluentes acuosos extremadamente contaminados.

### Ozono/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

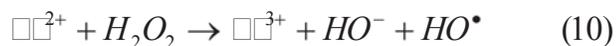
La ozonización transforma los contaminantes en compuestos más simples, más refractarios al reactivo. Se logra una mejoría agregando agua oxigenada. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable, que dismuta con una velocidad máxima al pH de su pK<sub>a</sub>.

El uso de dos o más oxidantes combinados permite aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica. Sin embargo, como existe una gran dosis de empirismo en el uso de mezclas oxidantes, es difícil prever el rendimiento, que debe determinarse en ensayos de laboratorio. 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 (y selectiva) del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales HO, con los compuestos orgánicos.

El proceso es caro pero rápido, y puede tratar contaminantes orgánicos presentes en muy bajas concentraciones.

### Reactivo de Fenton

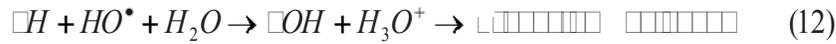
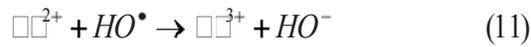
Los conocidos ensayos de Fenton de fines del siglo XIX demostraron que las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas eran capaces de oxidar los ácidos tartárico y málico, y otros compuestos orgánicos. Más tarde, Haber y Weiss sugirieron que se formaba HO• por la reacción:



Dichos radicales podían reaccionar luego por dos vías, la oxidación de Fe (II) (una reacción improductiva) y el ataque a la materia orgánica:

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON**

---



A pH < 3, la reacción es autocatalítica, ya que el Fe(III) descompone H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O a través de un mecanismo en cadena.

El proceso es potencialmente útil para destruir contaminantes, ya que es muy efectivo para la generación de HO<sup>•</sup>, pero un exceso de iones Fe<sup>2+</sup>, puede atraparlos, al igual que los halógenos, el mismo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> o el radical perhidroxilo.

Por lo tanto, este tratamiento hace disminuir apreciablemente la carga orgánica original, aumentando la biodegradación.

El agua residual que se pretende tratar, tiene en su mayoría compuestos orgánicos tales como, la lignina, los taninos, entre otros, que son los que dan ese color café-amarillento al agua.

Sus cadenas pueden ser modificadas por el HO<sup>•</sup> producido mediante electrólisis que se lleve a cabo entre los electrodos de hierro y grafito sumergidos en el agua residual, con inyección de aire para la saturar el agua de oxígeno y agitación constante para lograr una mejor mezcla. La aplicación de corriente eléctrica a los electrodos servirá para la electrogeneración del reactivo de Fenton y que este a su vez, reaccionará con las sustancias que el agua residual contiene, rompiendo cadenas hasta llegar a compuestos más simples y un agua con menor unidades de color

## APENDICE B

### TURBIDEZ:

La turbidez en un agua puede ser ocasionada por una gran variedad de materiales en suspensión que varían en tamaño, desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, entre otras arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos y microorganismos.

Cuando la luz incide en una suspensión de partículas en solución acuosa, éstas pueden remitirla, en varias direcciones, con la misma longitud de onda de la luz incidente. Una porción de luz puede emitirse con longitud de onda mayor que la de la luz incidente y una porción de energía puede emitirse enteramente como radiación de longitud de onda grande o calor. Así mismo, el material disuelto puede absorber y reemitir la luz. El tipo de emisión depende del tamaño de las partículas y de su forma, así como de la longitud de onda de la luz incidente.

En el pasado, la expresión estándar de turbidez más usada fue la unidad de turbidez de Jackson (UTJ), la cual es una cantidad empírica basada en el turbidímetro de bujía de Jackson. El aparato consta de un tubo de vidrio calibrado para obtener lecturas directas de turbidez, una bujía estándar y un soporte que alinea la bujía y el tubo.

La turbidez de la muestra se determina añadiendo la muestra de agua hasta lograr una imagen de la llama de la bujía justamente desaparezca. Sin embargo, la turbiedad más baja que puede medirse con dicho aparato es de 25 UTJ.

Actualmente el método más usado es el método nefelométrico, en el cual se mide la turbiedad mediante un nefelometro y se expresan los resultados en unidades de y turbidez nefelométrica(UTN). Con este método se compara la intensidad de luz dispersada por la muestra con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia en las mismas condiciones de medida. Cuanto mayor sea la intensidad de luz dispersada mayor será la turbiedad.

La determinación de la turbidez es de gran importancia en aguas para consumo humano y en un gran número de industrias procesadoras de alimentos y bebidas.

Los valores de la turbidez sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y, consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua.

**COLOR:** Las causas más comunes del color son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas madera, raíces, etc., en diferentes estados de descomposición, la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales. El color natural en el agua existe principalmente por efecto de partículas coloidales cargadas negativamente; debido a esto, su remoción puede lograrse con ayuda de un coagulante de una sal de ión metálico trivalente como el  $Al^{3+}$  o el  $Fe^{3+}$ .

Dos tipos de color se reconocen en el agua: el color verdadero, o sea, el color de la muestra una vez que se ha removido su turbidez, y el color aparente, que incluye no solamente el color de

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CELULOSA  
TIPO KRAFT EMPLEANDO EL REACTIVO FENTON**

las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido. El color aparente se determina sobre la muestra original, sin filtración o centrifugación previa.

En general, el término color se refiere al color verdadero del agua y se acostumbra medirlo junto con el pH, pues la intensidad del color depende de este último. Normalmente el color aumenta con el incremento del pH.

La unidad de color es el color producido por un mg/L de platino, en forma de ion cloroplatinato.

La determinación del color se hace por comparación visual de la muestra con soluciones de concentración de color conocida o con discos de vidrio de colores adecuadamente calibrados. Antes de determinar el color verdadero es necesario remover la turbidez; para ello, el método recomendado es la centrifugación de la muestra.

Una vez centrifugada la muestra, se determina su color por comparación con una serie de estándares de color preparados a partir de una solución patrón de  $K_2PtCl_6$ , la cual contiene 500 mg/L de Pt y 250 mg/L de cobalto para darle una tonalidad adecuada.

La remoción del color es una función del tratamiento del agua y se practica para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales. La determinación del color es importante para evaluar las características del agua, la fuente del color y la eficiencia del proceso utilizado para su remoción.; cualquier grado de color es objetable por parte del consumidor y su remoción es, por tanto, objetivo esencial del tratamiento.

Dilución de muestras.

Pipetear la cantidad de agua elegida en una probeta limpia (o matraz aforado) y rellenar la probeta al volumen deseado con agua desionizada. Homogenizar y utilizar esta muestra diluida para efectuar el análisis.

<b>VOLUMEN DE MUESTRA (ml)</b>	<b>AGUA PARA VOLUMEN DE 25ml</b>	<b>FACTOR DE MULTIPLICACIÓN</b>
25	0	1
12.5	12.5	2
10	15	2.5
5.0	15	5
2.5	22.5	10
1.0	24	25
0.25	24.75	100

$$\frac{\begin{array}{c} \square\square\square\square\square\square\square\square \\ \hline \square\square\square\square\square\square\square\square \end{array}}{\square\square\square\square\square\square\square\square} = \square\square\square\square\square\square\square\square\square\square$$

**CONDUCTIVIDAD:** La forma más usual de medir la conductividad en aguas es mediante instrumentos comerciales relectura directa en  $\mu\text{mho/cm}$  a  $25^\circ\text{C}$ , con un error menor del 1%. La conductividad leída es igual a la conductividad eléctrica de la muestra medida entre caras opuestas de un cubo de 1cm, como se demuestra a continuación.

La resistencia específica de un conductor es función de sus dimensiones y puede expresarse como:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Donde:

$R$  = resistencia específica, ohmio X cm

$R$  = resistencia, ohmio

$A$  = área de la sección transversal del conductor,  $\text{cm}^2$

$L$  = longitud del conductor, cm

La conductividad específica de un conductor es igual al inverso de su resistencia específica, o sea:

$$K = \frac{1}{R} = \frac{A}{\rho L}$$

Donde:

$K$  = conductancia específica, mho/cm

En otras palabras, es la conductancia de un conductor de 1cm de longitud y una sección transversal de  $1 \text{ cm}^2$ ; por tanto, numéricamente es igual a la conductividad.

Como en aguas el valor de la conductividad es muy pequeño, se expresa en  $\mu\text{mho/cm}$  o en unidades del sistema internacional  $\mu\text{siemens/cm}$ .

1 mho = 1 siemens

La conductividad está íntimamente relacionada con la suma de los cationes o aniones determinada en forma química; aproximadamente el producto de la conductividad en  $\mu\text{mho/cm}$  por diez es igual a la suma de los cationes en miliequivalentes por litro; en otras palabras, la conductividad en  $\mu\text{mho/cm}$  dividida por cien es igual al total de miliequivalentes por litro de los cationes o aniones. La medida de la conductividad constituye un parámetro básico de evaluación de la aptitud del agua para riego.

$$\sum \left( \frac{\text{mg/l}}{\text{meq/l}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{\mu\text{mho/cm}}{\text{meq/l}} \right)$$