



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**TESIS**

**OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA DE REMAZOL AMARILLO EN  
FUNCIÓN DEL pH EN AGUA USANDO ENERGÍA SOLAR  
FOTOVOLTAICA DIRECTA**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
*INGENIERO QUÍMICO***

**POR**

**MARÍA GUADALUPE GARCÍA SILVA**

**DIRECTORA**

**DRA EN I. THELMA B. PAVÓN SILVA**



México, D.F. a Febrero del 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



---

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	4
DEDICATORIAS .....	5
JURADO.....	6
RESUMEN .....	7
INTRODUCCIÓN .....	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
JUSTIFICACIÓN .....	9
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES .....	11
1.1. COLORANTES .....	11
1.2. COLORANTES AZÓICOS.....	13
1.3. COLORANTES COMO CONTAMINANTES DEL AGUA .....	14
1.4. TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS .....	15
1.5. PROCEDIMIENTO DE OXIDACIÓN AVANZADA PAO'S.....	17
1.6. ELECTROQUÍMICA.....	18
1.7. PROCESOS ELECTROQUÍMICOS.....	21
CAPÍTULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	36
2.1. MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPO .....	37
2.2. DIAGRAMA GENERAL DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	38
2.3. DISEÑO, FABRICACIÓN Y OPERACIÓN DEL REACTOR ELECTROLÍTICO.....	40
2.4. TÉCNICAS ANALÍTICAS .....	42
2.5. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE REMAZOL AMARILLO .....	44
2.6. TOC (DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO TOTAL) .....	44
2.7. CUANTIFICACIÓN DE pH .....	46
2.8 VOLTÍMETRO Y AMPERÍMETRO.....	47
2.9. MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR.....	48
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
3.1. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR ELECTROLÍTICO .....	50
3.2. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN .....	51



---

3.3. MONTAJE DEL REACTOR ELECTROLÍTICO .....	53
3.4. EXPERIMENTACIÓN EN JORNADAS DE 2 HORAS.....	55
3.5. EXPERIMENTACIÓN EN JORNADAS DE 8 HORAS CONTINUAS.....	59
3.6. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE dC .....	65
3.7 DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL .....	67
3.8. ESPECTROS DE REMAZOL Y DE RESIDUOS .....	69
3.9. ANÁLISIS DE RADIACIÓN SOLAR .....	71
ANEXOS .....	74
ANEXO 1. PRUEBA PRELIMINAR CON 24 PLACAS.....	75
GLOSARIO .....	77
REFERENCIAS .....	79



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo económico de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México del proyecto de investigación UEM 35815IEA “ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS ELECTROQUIMICO SORCIÓN PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES EN SOLUCIÓN ACUOSA”

Agradezco infinitamente a la Dra. THELMA B. PAVÓN SILVA, por su tiempo brindado, por su comprensión en las distintas etapas de vida, por su apoyo y por confiar en mi desde el primer momento. Dios la proteja

A nuestra máxima casa de estudios, por dejarme ser parte y hacerme sentir orgullosa de sus colores que permanecerán tatuados en mi piel. Y en especial a mi facultad FES ZARAGOZA



## DEDICATORIAS

Gracias virgencita de  
Guadalupe por interceder  
por mí, ante dios.  
Por ser mi guía y  
compañía en toda mi vida

A mis padres por querer  
que fuese una mujer  
profesionista que pudiera  
valerse de si misma, por ese  
esfuerzo físico, moral y  
económico, nunca tendré  
como pagárselo. Gracias pa  
por todas esas horas  
brindadas dándome consejos  
y a ti mami por tus  
desvelos y preocupaciones.  
Los amo.

A mi amor mauro por estar  
connmigo en las buenas y en  
las malas así como tu apoyo  
en este último peldaño, y a  
mi amorcito Pao por ser mi  
fuerza y el motivo para  
esforzarme para poder luchar  
en esta vida. Los amo mis  
amores.



---

**JURADO**

<b>PRESIDENTE</b>	<b>I.Q. FRANCISCO JAVIER MANDUJANO ORTIZ</b>
<b>VOCAL</b>	<b>DRA THELMA BEATRIZ PAVON SILVA</b>
<b>ECRETARIO</b>	<b>I.Q. ARTURO ENRIQUE MENDEZ GUTIERREZ</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>M en I. CRESENCIANO ECHAVARRIETA ALBITER</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>I.Q. CONSUELO MATIAS GARDUÑO</b>



## RESUMEN

El siguiente trabajo tiene como objetivo la evaluación de la eliminación de colorante tipo azo en agua residual en la industria textil mediante el uso de procesos de oxidación avanzada para de remoción del colorante presente en un 70% de la mayoría de los colorantes textiles que actualmente se utilizan, dicho proceso tiene variables que afectan proporcionalmente los resultados, entre los que está el pH por lo que se decidió analizar al Remazol bajo las tres escalas: ácido, neutro y básico

Siendo un proceso electroquímico conlleva el uso de energía eléctrica, lo que podría afectar el costo si se aplicara en la industria, para minimizar esto se decidió utilizarse celda fotovoltaica para conocer su efectividad. Durante la experimentación se mostró tener una mayor rendimiento en condiciones neutra con un porcentaje de remoción de 99% con un voltaje de entre 10V a 15V, posteriormente con un pH ácido de cuatro unidades se obtiene una remoción de entre 70 a 90% con un voltaje de entre 15V a 20V y por último bajo condiciones básica de 10 unidades se tiene una remoción de entre 40% a 60%, esta última se descartó ya que no cumple con el objetivo, y no se llevó a jornada continua de 8 horas.

Con estos resultados podemos concluir la efectividad de dicho proceso así como del uso de las celdas fotovoltaicas, también se analizaron otras variables electrolíticas, como fue la densidad de corriente y corriente eléctrica, así como las variables de transferencia de masa: adsorción, coagulación, absorción, etc.

Con todos estos resultados se comprobó y se conoció la efectividad de dicho proceso, sin embargo sería conveniente realizarse a nivel planta piloto para su comparación, y así posteriormente llevarlo a nivel industrial.

## INTRODUCCIÓN





Actualmente el agua dulce constituye un recurso escaso y su vulnerabilidad está siendo incrementada debido a los efectos del cambio climático. Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio, etc.). Sin embargo, en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por las normas, por lo que se deben de implementar nuevas tecnologías en los procesos.

En particular el uso generalizado de los colorantes en la industria, principalmente el textil, da lugar a la generación de enormes cantidades de efluentes que deben ser tratadas convenientemente antes de ser vertidas al medio. Esto genera la necesidad de investigar y desarrollar nuevas tecnologías que apunten a una mayor eficiencia y si posible incorporar alguna tecnología renovable como el uso de energía solar, esto con el objetivo de minimizar el costo en su proceso.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Este trabajo se basa en la aplicación del método de oxidación electrolítica, la propuesta de utilización de electrodos de hierro y como modelo el colorante sintético Remazol Amarillo (de



tipo azo) en un medio acuoso, las pruebas serán en un sistema continuo y se tendrán como parámetros de medición el pH, la concentración del colorante, voltaje e intensidad de corriente así mismo se evaluará la radiación solar, esta última variable será medida ya que se busca utilizar como fuente de poder un módulos fotovoltaico de 75 watts de potencia, conectados en directo, y en paralelo si es que se requieren más de uno.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la eliminación del colorante Remazol amarillo 3GL dye (DyStar S.A.), al aplicar el proceso de oxidación electrolítica en agua usando electrodos de hierro en un sistema continuo y como fuente de poder módulos fotovoltaicos.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Implementación de un sistema continuo de oxidación electroquímica usando celdas fotovoltaicas.
- Análisis del comportamiento de electrodos de Hierro y como degradante el colorante Remazol amarillo.
- Determinar la eficiencia de dicho sistema en forma continua, así como también de la eficiencia de usar las celdas solares en una jornada continua de 8 horas.

## **HIPÓTESIS**

La eficiencia de eliminación del colorante será superior al 80% en el sistema electrolítico, aplicando electrodos de hierro a un reactor alimentado con energía fotovoltaica directa

## **JUSTIFICACIÓN**

Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales. Sin embargo, en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por las normas de cada país. En estos casos y cada vez más crecientemente, se está recurriendo a las llamadas



Tecnologías o Procesos Avanzados de Oxidación (TAOs, PAOs), muy poco aplicados y, peor aún menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina. La mayoría de las TAOs puede aplicarse a la remediación y destoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña o mediana escala. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, permiten incluso la desinfección por inactivación de bacterias y virus.

Las TAOs se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{HO}\cdot$ ). Este radical puede ser generado a partir de una oxidación, usando medios fotoquímicos (luz solar) o por otras formas de energía, y posee alta efectividad.



# CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

## **1.1. COLORANTES**

Son aquellas sustancias que cuando son aplicadas a un sustrato imparten color a éste.

Los colorantes fabricados actualmente son muy variados y a menudo son sintetizados para resistir la degradación por exposición a la luz, agua, y otras condiciones ambientales extremas, esto hace el tratamiento de efluentes coloreados más difícil.

Los colorantes están hechos para dar color a diversas sustancias, como: fibras animales, vegetales o sintéticas y productos similares (tales como lana, seda, algodón, lino, rayón, nylon, papel, etc.);



u otros materiales como aceites, ceras o plásticos. Los colorantes utilizados para disolventes, aceites, ceras, elastómeros o plásticos son solubles en varios solventes, o bien se dividen en partículas tan pequeñas que se pueden dispersar eficazmente para dar fortaleza al color (Kirk-Othmer, 1990).

Desde el punto de vista ambiental es importante, considerando que durante el proceso de teñido entre el 15-50% de estos quedan remanentes y son vertidos como agua residual.

Cuando los residuos de colorantes reactivos son vertidos a los cuerpos de agua producen aminos como consecuencia del rompimiento del enlace azo, que causan efectos en algunos órganos del ser humano tales como el cerebro, hígado, riñones, sistema nervioso central y sistema reproductor. Asimismo los colorantes sintéticos afectan la actividad fotosintética de algunas plantas acuíferas.

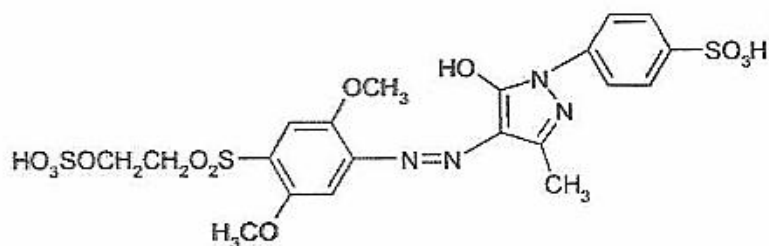
Los colorantes son solubles en algunas etapas del proceso de aplicación, lo cual lo diferencia de un pigmento, porque retienen generalmente su forma particulada o cristalina durante la aplicación. Se requiere usualmente una estructura de anillo aromático acoplada con una cadena lateral para que haya resonancia y así se pueda impartir color. Las estructuras resonantes que causan el desplazamiento o la aparición de las bandas de absorción en el espectro visible de luz son las responsables del color. La correlación de la estructura química con el color es la base para la síntesis de un colorante, el cual debe contener un cromógeno, cromóforo y un auxocromo. El cromógeno es la estructura aromática que contiene anillos de benceno, naftaleno o antraceno. Un grupo cromóforo es aquél que proporciona el color y es representado por los radicales presentados en la tabla 1.1, con base en los cuales se realiza la clasificación química de colorantes, cuando están acoplados con el cromógeno La estructura cromógeno-cromóforo a menudo es capaz de propiciar la solubilidad y causar la adherencia del colorante a la fibra, por lo cual se requiere de grupos con afinidad de enlace llamados auxocromos, los cuales son radicales amina, hidroxil, carboxil y sulfónicos o sus derivados (Kirk-Othmer,1990).

<i>Grupo</i>	<i>Estructura</i>
Azo	-N=N-
Carbonil	=C=
Carbón-Carbón	=C=C=
Carbono-Nitrógeno	>C=NH o -CH=N-
Nitrosos	-NO o -N-OH
Nitro	-NO <sub>2</sub> o =NO-OH
Sulfuro	>C=S, y otros grupos carbono-azufre

**Tabla 1.1.** Grupos cromóforo según estructuras de los colorantes (Kirk-Othmer, 1990)

## 1.2. COLORANTES AZÓICOS

Los colorantes azoicos forman la clase más numerosa y de más variadas aplicaciones de todos los colorantes. Es un grupo bien definido de compuestos característicos por la presencia de uno o varios grupos azo (-N=N-). Según el número de grupos azo, estos colorantes se clasifican en monoazoicos, bisazoicos, trisazoicos, tetraquisazoicos, pentaquisazoicos y hexaquisazoicos. La figura 1.1. muestra la estructura química del colorante monoazóico Remazol amarillo



**Figura 1.1.** Estructura química del colorante monoazóico Remazol amarillo.(Takeda, 2001)

Los colorantes azo son ampliamente utilizados en diferentes sectores industriales como la fabricación de textiles, alimentos, cosméticos y fármacos (dos Santos et al.,2007). El sector que más demanda colorantes azo es el textil, ya que representan más del 70% de los colorantes usados muchos de los cuales se emplearon desde hace durante la tinción de telas. Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial debido a su bajo grado de fijación en las telas (Van der Zee, 2002). La descarga de los colorantes azo al ambiente representa un serio problema por las implicaciones que tiene tanto para la salud pública como para el ecosistema ya que la presencia de color puede reducir la diversidad acuática al bloquear el paso de los rayos del sol a través del agua.

La industria textil mexicana se caracteriza por el alto volumen de agua que usa en sus procesos, la cual es contaminada durante la producción de hilos o telas. En el 2003 los cerca de 2,500 establecimientos textiles existentes generaron 0.7 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales y produjeron 14 mil toneladas de DBO (CNA, 2004).

La industria de colorantes está muy relacionada con la industria textil de manera que un incremento en la producción de fibras requerirá mayor producción de colorantes, aunque no en la misma proporción (Collishaw, et al. 1992). Sin embargo existen alrededor de 100,000 colorantes, y se producen anualmente 700,000 toneladas a nivel mundial (Supaca, et al. 2004) de estas el 70%



de los colorantes fabricados pertenecen al grupo de los colorantes azoicos, cuya característica básica es la presencia del grupo cromóforo  $-N=N-$  en la molécula..

### 1.3. COLORANTES COMO CONTAMINANTES DEL AGUA

La insaciable demanda del hombre por el color en su vida ha provocado una remarcada evolución de la industria de los colorantes y pigmentos. Uno de los principales problemas de las aguas contaminadas provenientes de las industrias es poseer un efluente colorido. Muchas industrias como la textil, la de la piel, alimentos, cosméticos y papel usan colorantes o pigmentos para teñir sus productos. Las aguas coloridas frecuentemente contienen metales pesados y otros contaminantes orgánicos tóxicos y la presencia de color puede indicar la existencia de agentes tóxicos (McKay, 1996).

La mayoría de los contaminantes, excepto el color, se pueden remover por métodos fisicoquímicos generales. Los colorantes insolubles en agua se pueden remover por métodos físicos o bien biológicos ya que se pueden adsorber en la biomasa (Henry y Heinke, 1999). La mayor parte de la industria textil en México no realiza procesos adecuados de tratamientos de aguas residuales ya que la normatividad que regulan la descarga de efluentes industriales no contempla ni al color, ni a DQO como parámetros a considerar, sólo fija condiciones particulares como son. DBO, sólidos sedimentables y suspendidos, entre otros.

En el caso del colorante Remazol amarillo reactivo que es un colorante monoazoico, puede causar sensibilidad respiratoria en algunas personas, no presenta olor, es muy soluble en agua y se encuentra en estado sólido; en cuanto a su uso, se recomienda sea en lugares muy ventilados y con protección ocular y respiratoria debido a que la exposición a partir  $10 \text{ mg/m}^3$  puede llegar a ser molesta para el ser humano.

Los colorantes azo son muy reactivos y forman enlaces covalente con grupos hidroxilo, aminas o sulfonatos en las fibras. Existen algunos estudios que relacionan al Remazol amarillo reactivo con problemas de contaminación por la existencia de altas concentraciones del compuesto en el agua; (Takeda, 2001) emplearon una nueva técnica de análisis de aguas residuales coloreadas, donde descubrieron que el Remazol amarillo reactivo es uno de los colorantes que más predominaba en sus muestras. La presencia del grupo sustituyente **sulfatoetilsulfonato** ( $\text{HO}_3\text{SOCH}_2\text{CH}_2\text{O}_2\text{S}-$ ) en la molécula del colorante actúa como surfactante que sirve como agente dispersor en agua del compuesto, lo cual aumenta la solubilidad del colorante en agua. En otras descargas coloridas de agua residual industrial se ha comprobado la existencia del colorante, por lo que se han realizado estudios para removerlo del ambiente por medio de tecnologías de diversa naturaleza.



#### 1.4. TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS

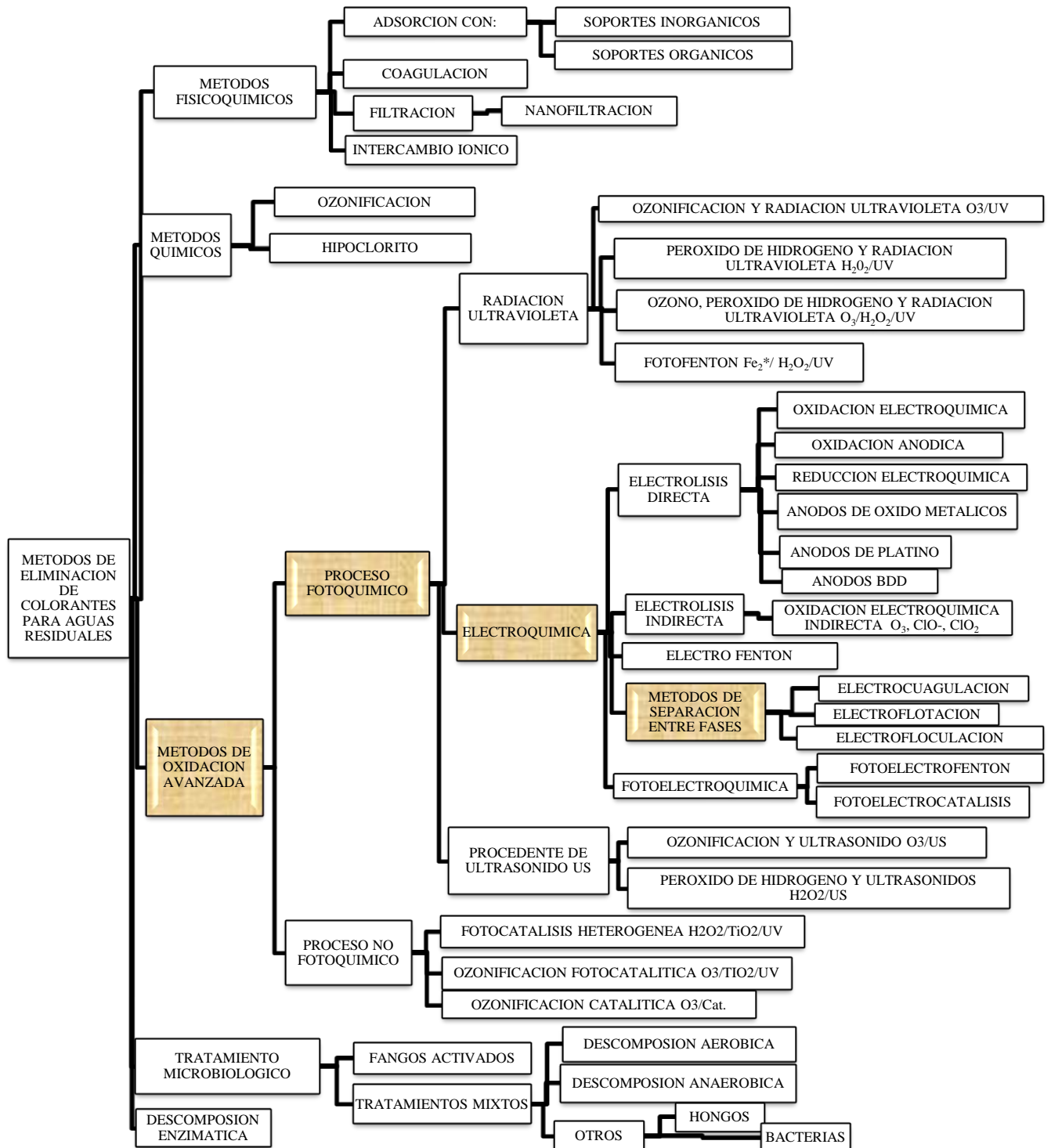
En los últimos años los tratamientos de aguas residuales se han ido implantando con fuerza. Debido a que es el principal insumo tanto para la población como para la industria.

En definitiva, la falta de recursos hídricos es preocupante y, además, los efluentes residuales tienen un efecto muy negativo en el medio ambiente si son devueltos directamente, se requiere el desarrollo y aplicación de tecnologías de tratamiento de aguas que posibiliten la reutilización en condiciones seguras.

Los esfuerzos por conseguir métodos y procesos para el tratamiento de aguas naturales y residuales se centran en conseguir métodos oxidativos potentes que logren la mineralización completa de contaminantes orgánicos en el medio acuoso (es decir, la conversión total de la materia orgánica en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e iones inorgánicos), sin olvidar pues que hace falta optimizar los procesos por tal que sean económicamente viables. Son muchos los métodos utilizados en la actualidad para la descontaminación de aguas que contienen sustancias orgánicas tóxicas y no biodegradables. Algunos de ellos se basan en la acción biológica natural de microorganismos capaces de degradar la materia orgánica contaminante y otros requieren de acciones tecnológicas específicas. Estos métodos los podemos clasificar en cuatro tipos: métodos físicos, métodos químicos, métodos biológicos (tratamientos convencionales) y métodos electroquímicos.

En la tabla 1.2 se muestra la clasificación de los métodos de eliminación de colorantes para aguas residuales.





**Tabla 1.2.** Clasificación de los métodos de eliminación de colorantes para aguas residuales (recopilación de Blanco, 2012; Juárez, 2008)



## 1.5. PROCEDIMIENTO DE OXIDACIÓN AVANZADA PAO'S

Los procedimientos avanzados de oxidación o Advanced Oxidation Proceses, AOPs se basan en procesos fisicoquímicos generando in situ produciendo cambios profundos en la estructura química de los contaminantes e involucran la generación y uso de especies químicas transitorias poderosas de carácter radicalario, tales como el radical Hidroxilo ( $\text{HO}\cdot$ ) el cual es un poderoso agente oxidante, logrando la degradación de agentes contaminantes en soluciones incluso a bajas concentraciones. Implican la generación de dichos oxidantes químicos en cantidades suficientes para interactuar con los contaminantes del medio. Además este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica.

Estos procesos tienen grandes ventajas ya que se logra la mineralización completa del contaminante, y con ello se mejoran las propiedades organolépticas consumiendo una menor cantidad de energía, además elimina los riesgos a la salud provocados por residuos de oxidantes desinfectantes residuales como el cloro (Domènech, 2001).

En los procesos electroquímicos de oxidación avanzada habitualmente se refiere a la oxidación electroquímica con la presencia de catalizadores ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ) y/o luz UV con la finalidad de degradar los compuestos y/o intermedios difícilmente oxidables, obteniendo de esta manera procesos más efectivos.

La idea que se impone en la actualidad es combinar una serie de tecnologías que sucesivamente vayan acondicionando los efluentes contaminantes y disminuyan su toxicidad, de cara a la destrucción total de los mismos, ya que ésta es una manera de operar más efectiva y económica.

Una consecuencia de la elevada reactividad del agente oxidante es que los procesos avanzados de oxidación se caracterizan también por su baja selectividad, lo que sin embargo es una característica deseable en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales.

Estas tecnologías involucran métodos diferentes de activación y pueden utilizar diferentes mecanismos para la destrucción de contaminantes orgánicos (Rosal, 2003).



### 1.5.1. VENTAJAS DE LOS PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN.

Los PAO's presentan ciertas características que los definen como una tecnología prometedora de cara al tratamiento de aguas:

- a) No sólo cambian de fase al contaminante, sino que lo transforman químicamente.
- b) Generalmente se consigue la mineralización completa del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- c) Usualmente no generan lodos que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- d) Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- e) Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
- f) No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- g) Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pre-tratamientos alternativos, como la desinfección.
- h) Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- i) En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).
- j) Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos como el tratamiento biológico.
- k) Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro, (CYTED, 2001).
- l) Son capaces de conseguir la conversión a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e iones inorgánicos, mostrando una reactividad, del agente oxidante, no selectiva que minimiza la acumulación de intermedios de degradación tóxicos, procedentes de los contaminantes originales, que sí pueden originarse mediante otros métodos que no consiguen la oxidación hasta sus últimas consecuencias.
- m) Presentan buena eficiencia en la destrucción de contaminantes.

### 1.6. ELECTROQUÍMICA

Es una parte de la química que está relacionada con los cambios químicos producidos mediante la transferencia de electrones y de la producción de electricidad mediante reacciones químicas

### Aspectos fundamentales de la electroquímica.

Todas las reacciones electroquímicas comprenden la transferencia de electrones y, por lo tanto, son reacciones de óxido-reducción la cual ocurre a la vez en la misma reacción y no puede producirse una sin la otra. Los sitios de oxidación y reducción están separados físicamente, por un ánodo y un cátodo respectivamente.

**Oxidación:** Un elemento se oxida cuando su número de oxidación aumenta, por lo que tiende a perder electrones

**Reducción:** Un elemento se reduce cuando su número de oxidación disminuye, por lo que tiende a ganar electrones.

#### 1.6.1. CELDA ELECTROQUÍMICA

Es un dispositivo en el que toma lugar una reacción química de oxidación y de reducción. La celda consiste, fundamentalmente, en dos conductores llamados electrodos, en contacto con una solución adecuada de un electrolito. Cuando los dos conductores son conectados, a través de un circuito eléctrico externo, una corriente eléctrica fluye entre ellos proporcional a la diferencia de potencial existente entre ellos.

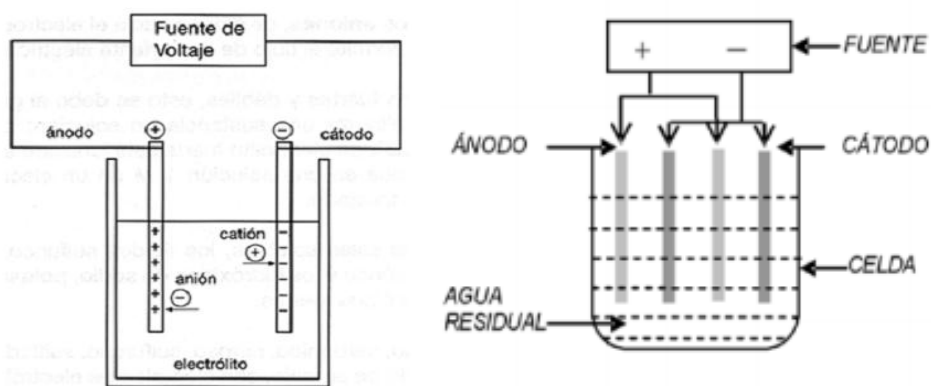


Fig.1.2. Celda electroquímica

Las celdas electroquímicas se clasifican en 2 tipos:

- **Celdas electrolíticas** Es un sistema en el cual se realiza una reacción oxidación-reducción no espontánea. En ella se coloca un electrolito, el cual es una sustancia que se encuentra en solución acuosa.



Y en donde el cátodo (-) es negativo y el ánodo (+) positivo. Se aplica una fuerza electromotriz en contraposición a la pila galvánica que forman los dos electrodos.

- **Celdas galvánicas o voltaicas:** Son aquellas celdas electroquímicas en las que reacciones químicas de oxidación y reducción espontáneas producen electricidad que puede ser empleada en un circuito externo (ejemplo: Baterías o pilas).

Y en donde el cátodo (+) es positivo y el ánodo (-) negativo. La pila aporta una fuerza electromotriz y se produce una corriente hasta que se descarga (el sistema alcanza el equilibrio).

En ambos casos de celdas se toman los signos de tal forma que el potencial sale positivo, así como que en el ánodo se da la oxidación y en el cátodo la reducción.

### 1.6.2. IDENTIFICACIÓN DE LOS ELECTRODOS

Los electrodos son superficies en la cuales tienen lugar las semi-reacciones de oxidación o de reducción, y pueden o no participar en las reacciones. Los electrodos que no reaccionan reciben el nombre de electrodos inerte y su contraparte recibe el nombre de electrodos activos. Sin importar el tipo de celda, electrolítica o voltaica, los electrodos se identifican de la manera siguiente.

- **Ánodo:** Electrodo hacia donde migran los aniones y en donde se genera la oxidación y la especie pierde electrones.
- **Cátodo:** Electrodo hacia donde migran los cationes y en donde ocurre la reducción, por lo que la especie gana electrones.

**OXIDACIÓN EN ÁNODO:** En el ánodo se puede producir la oxidación de los compuestos a eliminar, tanto orgánicos como inorgánicos. Esta oxidación se puede producir directamente por una transferencia de electrones en la superficie del ánodo o bien por la generación de un agente oxidante in-situ. En este último caso se evita manipular agentes oxidantes. Entre las aplicaciones de la oxidación directa cabe destacar el tratamiento de cianuros, colorantes, compuestos orgánicos tóxicos (en algunas ocasiones haciéndolos más biodegradables).

**REDUCCIÓN EN CÁTODO:** La principal aplicación de esta posibilidad es la reducción de metales tóxicos. Se ha utilizado en situaciones, no poco frecuentes de reducción de metales catiónicos. Hay una primera etapa de deposición del metal sobre la superficie del cátodo que ha de continuarse con la remoción del mismo.



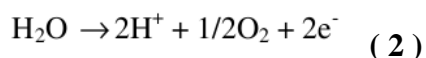
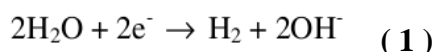
**ÁNODO DE SACRIFICIO:** Es aquel electrodo que provee iones metálicos, por lo que esta se va disolviendo conforme siga reaccionando.

### 1.6.3. ELECTRÓLISIS DEL AGUA

La electrólisis es el proceso de descomposición de una sustancia por medio de la electricidad. La palabra electrólisis significa "destrucción por la electricidad".

La mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos; es decir, sus moléculas se disocian en especies químicas cargadas positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica. Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrolito (compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo. Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado.

Las reacciones electroquímicas producidas en el cátodo y en el ánodo se presentan a continuación.



Estas reacciones no se producen espontáneamente. Para que tengan lugar es necesario aportar energía eléctrica mediante una pila galvánica o un generador de corriente continuo. Es por este motivo que la reacción se lleva a cabo en una celda electrolítica, en la cual ocurren cambios químicos por la acción de un flujo de electrones suministrado por la fuente de voltaje externa.

## 1.7. PROCESOS ELECTROQUÍMICOS

Esta basado en técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito), provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo.

La aplicación de los procesos electroquímicos está tomando un auge importante en el tratamiento de aguas residuales industriales, a través de una oxidación o reducción directa.



Una desventaja de este sistema es el uso de energía eléctrica, siendo su costo elevado, pero este se podría sustituir por energía solar.

### 1.7.1. ELECTROFLOTACIÓN

Es un sistema donde circula una corriente eléctrica que provoca la electrólisis del agua con la consiguiente formación de pequeñas burbujas de hidrógeno (en el cátodo). Dichas burbujas arrastrarán en su trayectoria ascendente hacia la superficie, las pequeñas partículas contaminantes y los coagulantes que se encuentren en suspensión en el efluente a tratar, por un proceso de flotación.

Una de las principales ventajas de la flotación por gases electrolíticos es el pequeño tamaño de burbujas producidas, es importante destacar que el hidrógeno se produce en el cátodo y el oxígeno en el ánodo.

### 1.7.2. ELECTROFLOCULACIÓN

La electrofloculación y electrocoagulación son técnicas que involucran la adición electrolítica de iones metálicos coagulantes directamente del electrodo de sacrificio. Estos iones permiten que los contaminantes se aglomeren de la misma forma que si se adicionara un producto químico como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, etc. y permitir con ellos su remoción. La adición electrolítica de los iones metálicos tiene una gran ventaja con respecto a la adición de los químicos, por ejemplo: no aumenta el número de sales en el agua a tratar; produce la mitad o una tercera parte de lodos.

La electrofloculación, se favorece la remoción de los contaminantes debido a que son arrastrados por las burbujas de gas que se generan en el sistema ( $H_2$  y  $O_2$ ), por lo que tienden a flotar en la superficie. Para tener mejores rendimientos es necesario instalar un sistema que garantice la remoción de la espuma que flota.

Electrocoagulación-flotación.- Este procedimiento implica la inyección de iones metálicos para aglutinar los contaminantes dispersos en un agua sacrificando directamente a uno de los electrodos (Ánodo) complementado con el barrido por arrastre del gas generado.



### 1.7.3. ELECTROCOAGULACIÓN

La coagulación química es un fenómeno para desestabilizar suspensiones coloidales, que puede conseguirse especialmente a través de la neutralización de cargas eléctricas con la adición de un coagulante. Los coagulantes más usados han sido sales de hierro, aluminio, cal, polímeros, y otros. Combinada con la floculación química, logran la precipitación de especies metálicas, y otras especies inorgánicas eliminándolas así, mediante sedimentación y/o filtración, de las corrientes líquidas.

La electrocoagulación es una tecnología electroquímica que aplica los principios de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico y tiene la capacidad para eliminar una amplia gama de contaminantes incluyendo sólidos en suspensión, metales pesados, colorantes, grasas y aceites, material orgánico es decir para el tratamiento de agua y de aguas residuales así como también ha sido probada en la potabilización de aguas. O bien, es la formación de coagulante que se forma de las reacciones oxido-reducción que ocurren entre los electrodos y el medio acuoso. Ya que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto que destruye a microorganismos, presentes en agua, en porcentajes por encima del 99%. Se ha venido estudiando la electrocoagulación con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano. (Castillo, 2010)

Este método involucra la generación de coagulación in situ por disolución del metal por un ánodo con formación simultánea de ion hidroxilo e hidrógeno gas en el cátodo, esto lo diferencia con la coagulación química, en donde el coagulante es adicionado como agente químico.

Este proceso produce el correspondiente hidróxido de aluminio o hidróxido de hierro y/o polihidroxidos con la adición de gas generado, produciendo la floculación de partículas formadas a partir del arrastre, por la formación del gas, trayendo las partículas a la superficie mientras se proporciona la adición de agua en la superficie.

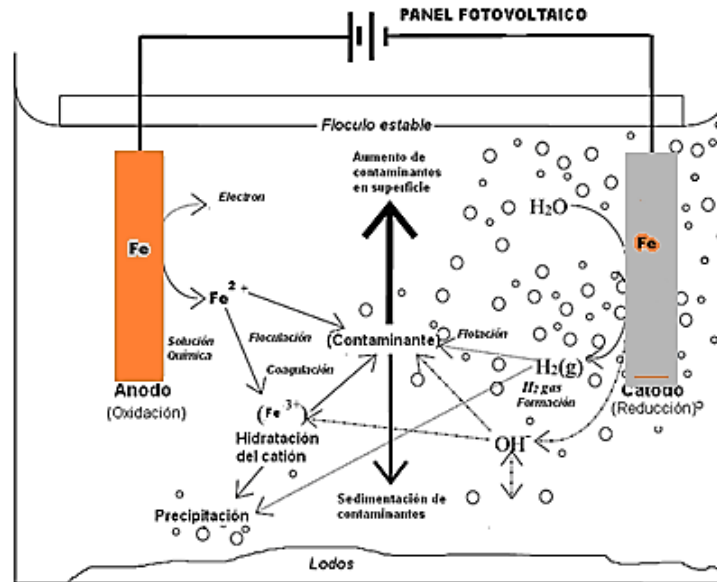
La electrocoagulación presenta ventajas como alta eficiencia para remover partículas, es un método simple, no requiere ninguna adición de productos químicos ni posibilidad de automatización.

#### 1.7.3.1. MECANISMO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Una gran cantidad de opciones existen en literatura para un óptimo diseño del reactor aunque no hay ningún reactor de electrocoagulación que domine uso en el mercado, debido que las condiciones de operación marcan una gran diferencia en el desempeño de este equipo (Holt.



2002). Los procesos físico-químicos que ocurren en un reactor de electrocoagulación se describen en la figura presentada a continuación.



**Fig.1.3.** Interacción que ocurren dentro de un reactor de electrocoagulación (Holt, 2002).

Debido al paso de la corriente, los iones de hierro actúan como un coagulante. Al mismo tiempo, la materia orgánica se electro-oxida directamente, en la superficie del ánodo. Las burbujas generadas por el gas  $H_2$  en el cátodo, ayudan a la flotación de los flocos producidos y los lodos generados se separan por filtración.

### 1.7.3.2. REACCIONES INVOLUCRADAS EN LA ELECTROCOAGULACIÓN

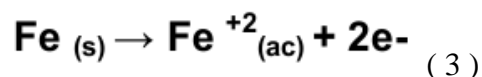
En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse.

Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado, los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación.

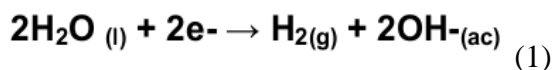


Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera por reacciones químicas y precipitación, y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar. Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua-contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua.

La disolución del hierro en la superficie del ánodo queda descrita a través de la siguiente ecuación, en la cual el Fe(s) en fase sólida es transferido en forma de iones a la solución acuosa.



Mientras que en el cátodo se desarrolla la formación de hidrógeno, la cual tiene una dependencia directa con el pH de la solución como lo muestra la reacción 1.



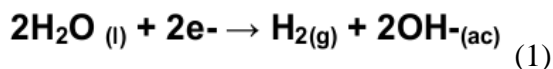
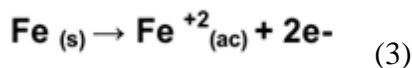
De esta forma los iones  $\text{Fe}^{+2}_{(\text{ac})}$  se combinan con los iones hidroxilos para formar hidróxido ferroso y férrico,

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  o hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

El óxido es un producto de corrosión de color marrón rojizo de hierro idealmente que consta de tres capas de óxido de hierro en diferentes estados de oxidación:

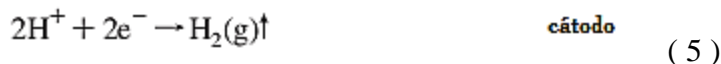
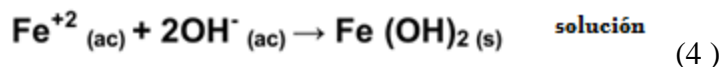
### **HIDRÓXIDO FERROSO $\text{Fe}(\text{OH})_2$**

El primer producto de la corrosión del hierro es  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  pero la acción del oxígeno y el agua genera otros productos. Si relacionamos las reacciones 3 y 1.

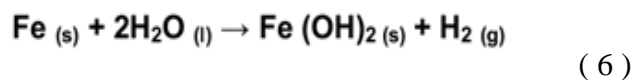




Obtendremos los siguientes productos:



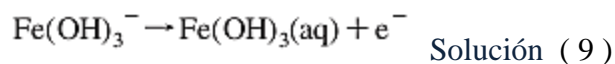
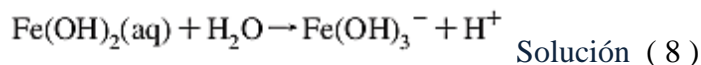
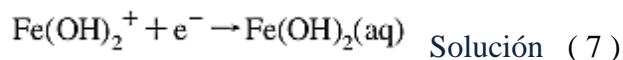
En conclusión:



El  $\text{Fe} (\text{OH})_2$ , presenta un color que normalmente es verde, que se vuelve a negro verdoso debido a la oxidación por aire incipiente.

### HIDRÓXIDO FÉRRICO $\text{Fe}(\text{OH})_3$

En la superficie exterior de la capa de corrosión, el acceso al oxígeno disuelto convierte el óxido ferroso a óxido férrico hidratado o hidróxido férrico de acuerdo con la siguiente reacción:



Este óxido es de color naranja a rojo-marrón en color y comprende la mayoría de óxido ordinaria.

### DEGRADACIÓN DE COLORANTE AZO

La degradación de los colorantes se lleva a cabo en dos pasos: En el primero se da la reducción del enlace azo mediante cuatro electrones y como resultado de esto los protones reaccionan con el grupo nitro, formando dos aminas aromáticas. La mineralización de los intermediarios corresponde al segundo paso (Fitz Gerald y Bishop, 1995).





### 1.7.3.3.FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad, algunos de estos tienen mayor influencia sobre el proceso. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante.

#### a) pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido (Chen 2004), se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar (Ge, 2004), (Koby, Can Bayramoglu 2003), (Bayramoglu 2004), (Holt 2002), (Kumar, 2004), (Zinola, 1999).

El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, cuyo efecto es atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio.

En términos generales, las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. (Koby, Can Bayramogly, 2003) (Bayramogly, 2004). Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil a un pH de 7. (Koby, Can Bayramogly, 2003) (Bayramogly, 2004)

#### b) DENSIDAD DE CORRIENTE

Se define como una magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie. Matemáticamente, la corriente y la densidad de corriente se relacionan según la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{I}{S} \quad (10)$$



En donde:

- $I$  es la corriente eléctrica en amperios mA
- $\delta$  es la densidad de corriente en mA/cm<sup>2</sup>
- $S$  es la superficie en cm<sup>2</sup>

La densidad de corriente es un parámetro que afecta directamente a la eficiencia en la remoción y el consumo de energía, ya que si la densidad aumenta, su consumo energético aumenta. (Adhoum, Monser, 2004) (Yilmaz, 2005) Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de hierro Fe<sup>+2</sup> liberados por los respectivos electrodos.

“En general, un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante, si una densidad de corriente es demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. Así como también si los lodos formados se sedimentan en la celda, se dice que su densidad de corriente es baja, y si su densidad es alta tienden a flotar, es decir la densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas en el cátodo, es decir la liberación de hidrogeno. Se ha podido observar de la experimentación que a bajas corrientes se producen bajas densidades de burbujas, obteniéndose un bajo flujo de impulso hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente, pues la densidad de burbujas aumenta resultando en un aumento del flujo de impulso hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes.

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una pasivación, lo que causa una menor eficiencia en la remoción.

Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso.



### c) CONDUCTIVIDAD

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, y manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado.(Chen, Chen, Yue, 2002).

### CORRIENTE ELECTRICA

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general, este estado produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario

### INTENSIDAD DE CORRIENTE

Característica de la corriente eléctrica que representa la relación entre la cantidad de carga que pasa desde un punto a otro del circuito y el tiempo empleado. Su unidad de medida es el amperio (A), que corresponde a la intensidad de una corriente eléctrica debida al paso de una carga de un coulombio durante un segundo.

### 1.7.4. LAS LEYES DE LA ELECTRÓLISIS DE FARADAY

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, “la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema”. (Rajeshwar, 1997).

La descomposición de las soluciones electrolíticas por medio de la corriente eléctrica, se conoce como electrólisis. Al estudiar los fenómenos de la electrólisis, M. Faraday (1833) descubrió ciertas relaciones entre la cantidad de electricidad que pasa a través de un electrólito y la cantidad de cualquier material depositado en el electrodo. La cantidad de electricidad es igual al producto de la intensidad de la corriente por el tiempo durante el cual pasa. Los resultados obtenidos por Faraday se pueden enunciar en las dos leyes siguientes:



I. La magnitud de la transformación química producida por una corriente eléctrica, es decir, la cantidad de cualquier sustancia depositada o disuelta, es proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado.

II. Las cantidades de sustancias diferentes que se depositan o se disuelven por el paso de la misma cantidad de electricidad son proporcionales a sus pesos equivalentes químicos.

La combinación de las dos leyes lleva a la conclusión de que el peso  $w$  en gramos de material depositado o disuelto en un electrodo.

$$w = \frac{I \cdot t \cdot e}{F} \quad (11)$$

Donde:

- $e$  es el peso equivalente del material (peso atómico del elemento).
- $I$  es la intensidad de corriente, expresada generalmente en amperes.
- $t$  es el tiempo en segundos
- $F$  es la constante de Faraday, que es igual a 96500 C (es la cantidad de electricidad que debe pasar para depositar o disolver 1 equivalente, gramo de cualquier sustancia).

Es importante notar que esta cantidad de electricidad es siempre la misma, cualquiera sea la naturaleza de la sustancia que se deposita o se disuelve.

En las leyes de Faraday; se ha encontrado que son válidas tanto a elevadas como a bajas temperaturas, y en condiciones normales, tanto para soluciones no acuosas y sales fundidas como para soluciones acuosas.

Estas leyes se aplican también a las transformaciones químicas en el ánodo y en el cátodo que no comprenden depósito o disolución del electrodo; por ejemplo, con frecuencia se producen oxidaciones de los iones en el ánodo o reducciones en el cátodo. Aún en estas reacciones se puede emplear la ecuación si se emplea el peso equivalente apropiado; así, en la reducción de los iones férricos ( $\text{Fe}^{+3}$ ) a ferrosos ( $\text{Fe}^{+2}$ ), o en el proceso de oxidación inverso.



---

## 1.7.5. MÉTODOS DE SEPARACIÓN ENTRE FASES

### 1.7.5.1. SORCIÓN:

La sorción implica la unión entre coagulante y la superficie contaminante en sitios específicos de la superficie. Si esta unión se da por la interacción de carga, entonces el mecanismo de la coagulación es la neutralización de carga.

Es la vía hacia la sedimentación o en su defecto a la flotación que describe la interacción del contaminante con el precipitado del metal hidróxido. A medida que el coagulante precipita pueden reaccionar con las partículas contaminantes generando, una unión entre ellos al precipitar. Cualquier exceso de coagulante precipita como hidróxido de metal, formando flóculos de hidróxido de polímero que "barre" a través de la solución enredando las partículas de los contaminantes.

Alternativamente, el coagulante puede permanecer predominantemente como una especie soluble hidrolizada en la solución. Es difícil generalizar aquí, con un especial dominio dependiendo de la concentración del coagulante, las propiedades de las partículas contaminantes y la interacción entre el coagulante y contaminantes. (Holt, 2002).

### 1.7.5.2. ADSORCIÓN

Se considera que es el mecanismo principal en la mayoría de los procesos de coagulación. Este proceso puede ser favorecido por la adición de reactivos iónicos monoméricos o poliméricos. En el último caso, la agregación de partículas también puede ser causada por un polímero enlazado (adsorción de diferentes grupos funcionales de un polímero sobre coloides diferentes).

### 1.7.5.3. PASIVACIÓN

Es la formación de una capa de inhibición, por lo general un óxido, en la superficie del electrodo y evita la disolución del metal y la transferencia de electrones, lo que limita la adición del coagulante a la solución. Con el tiempo, la capa de pasivación típicamente aumenta, generando la reducción de la eficacia del proceso de electrocoagulación. Se han investigado diversos métodos para prevenir y/o controlar pasivación - incluyendo el cambio de la polaridad de los electrodos, la introducción de agente de inhibición e hidro-mecánicos de limpieza de los electrodos. Por lo que



en la mayoría de los métodos eficientes y fiables era el de mantenimiento de electrodos es decir limpiar periódicamente los electrodos por medios mecánicos.

La presencia del ion cloruro en la solución disminuye la pasivación y por lo tanto aumenta la eficiencia de remoción de contaminantes en la electrocoagulación (Holt, 2002).

### 1.7.6. VARIABLES ELECTROQUÍMICAS

Para el monitoreo de un reactor o celda electrolítica, intervienen los siguientes factores:

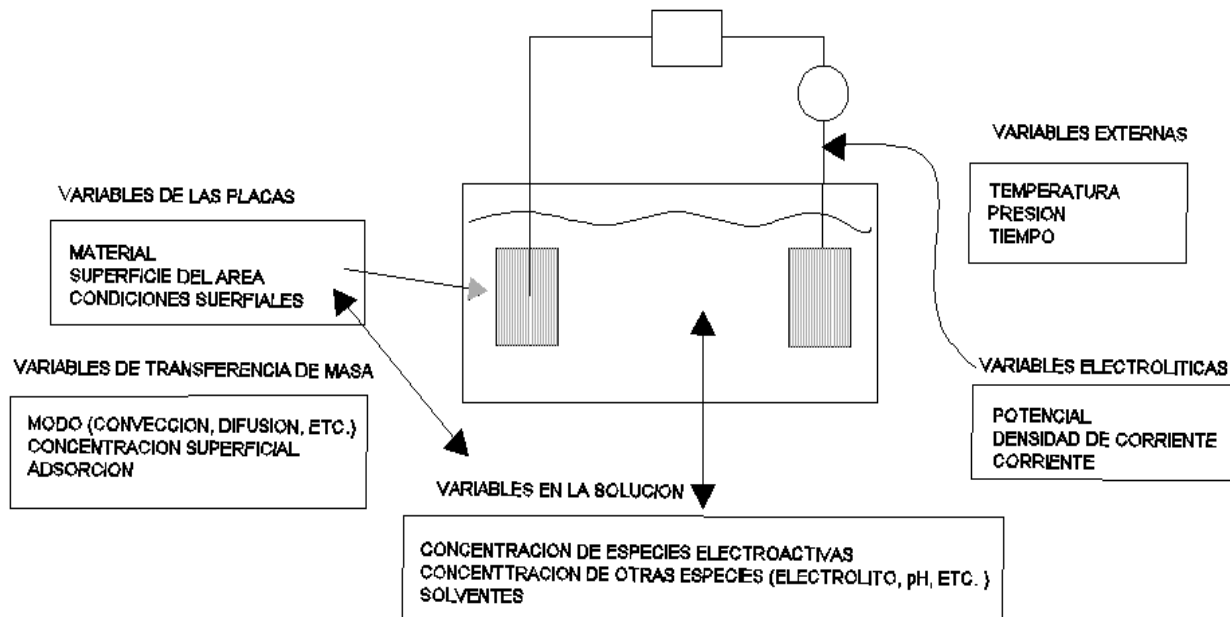


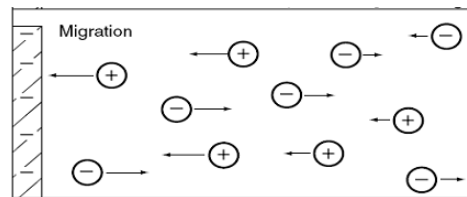
Fig. 1.5. Variables electroquímicas

#### 1.7.6.1. VARIABLES DE LA PLACA

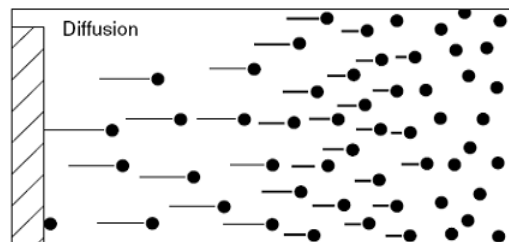
El tipo de material es de suma importancia para que un proceso de electrocoagulación se lleve a cabo, los electrodos de hierro, aluminio o cobre son de los más utilizados teniendo sus antecedentes en los procesos de coagulación (Arboleda, xx), junto con esto el área de la superficie del electrodo será el punto de partida para, a través de la ecuación de Faraday se pueda calcular los iones producidos, y a su vez la distancia entre las placas para que el fenómeno oxidación-reducción se lleve a cabo de manera eficiente.

**1.7.6.2. VARIABLES DE TRANSFERENCIA DE MASA:** Cuando se produce una reacción electroquímica sobre un electrodo, se consume la sustancia electro-activa que está en sus proximidades, de forma que la reacción se detendría si no interviniesen fenómenos de transporte encargados de reponer la materia consumida. La materia puede acercarse al electrodo de tres formas: migración, difusión y convección.

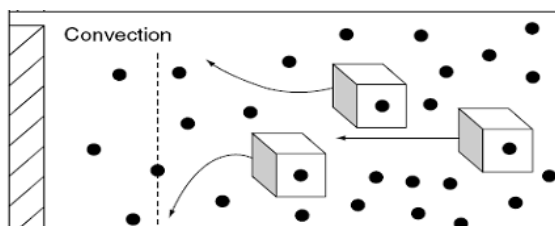
**1.7.6.2.1. MIGRACIÓN:** Se produce por el movimiento de una especie cargada bajo la influencia de un campo eléctrico. Afecta, pues, a las especies iónicas en disolución: desplazamiento de aniones y cationes hacia el electrodo positivo y negativo respectivamente.



**1.7.6.2.2. DIFUSIÓN:** Es el movimiento de una especie bajo la influencia de un gradiente de potencial químico; por ejemplo, un gradiente de concentración. La reacción electroquímica produce una variación de la concentración de las especies electrolizadas en las proximidades del electrodo, lo cual origina el movimiento de esas especies desde zonas más concentradas a zonas menos concentradas. Esta forma de transporte se presenta siempre en todo proceso electroquímico.



**1.7.6.2.3. CONVECCIÓN:** Consiste en el desplazamiento de sustancias bajo la influencia de agitación o cualquier otra forma de transporte hidrodinámico, como diferencias de densidad, de temperatura, choques, vibraciones, etc. Todos estos fenómenos se incluyen bajo la denominación de convección.



### 1.7.6.3. VARIABLES DE SOLUCION

Dentro de estas variables se encuentra la concentración de especies electroactivas, encontrándose estas en mayor o menor concentración dependiendo de la energía con la que se trabaja en el sistema. En ocasiones se adicionan otras especies como electrolitos soporte (iones sulfato de sodio, hidróxido de sodio, cloruro de sodio, etc.) que aumentan la conductividad del medio y por ende el proceso electroquímico. En este caso partiendo de agua potable y adicionando el contaminante se alcanza una conductividad adecuada para que el proceso electrolítico funcione de manera adecuada (Valdés, 2014). Sin embargo hay que tener cuidado con un efecto adverso por otros iones como carbonatos, sulfatos, que pueden formar una capa aislante e insoluble sobre la superficie de los electrodos, lo cual produce una ineficiencia en el proceso, se pasiva.

### 1.7.6.4. VARIABLES EXTERNAS

**TEMPERATURA:** Puede influir en el proceso de electrocoagulación valores mayores a 60°C, decrecen la eficiencia debido a que el incremento de temperatura acelera rápidamente la reacción de destrucción de la película de óxido en la superficie del electrodo, se puede considerar que la temperatura ideal para la electrocoagulación esta entre los 35 y los 60°C (Valdes, 2014)

### 1.7.7. PANELES FOTOVOLTAICOS

Hoy en día, la tecnología de la energía solar más reconocida es la de los sistemas solares fotovoltaicos (FV) Dicho reconocimiento se deriva de sus múltiples aplicaciones, de una considerable publicidad, y de numerosos programas de incentivos de apoyo para la producción de electricidad. Aunque ciertamente es la más costosa de las tecnologías solares en términos de su producción energética, es la más versátil, la más simple de instalar y la más barata de mantener.



**Fig. 1.6.** Panel voltaico



## CAPÍTULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL



## 2.1. MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPO

### EQUIPO

- Espectrofotómetro modelo SHIMADZU UV-160<sup>a</sup>
- Analizador de Carbono Orgánico Total Tekmar Dohrmann Apollo 9000
- Parrilla de agitación Cimarec
- Multímetro Steren Mul-050
- Voltímetro AC/DC Clamp tester
- Potenciómetro digital portátil Conductronic
- Panel fotovoltaico PV de 75W
- Piranometro Li Cor

### REACTIVOS

- Remazol amarillo 3GL dye (DyStar S.A)
- Agua potable o de grifo
- Ácido Clorhídrico HCl
- Hidróxido de sodio NaOH

### MATERIALES

- Papel filtro No. 4
- Embudo tallo corto
- Pipeta graduada de 5 ml y 10 ml
- Agitador magnético
- Vasos precipitados de 100 ml, 1000 ml
- Manguera reforzada de nivel transparente de ¼ in
- Válvulas de ajuga para gas de 3/8 in

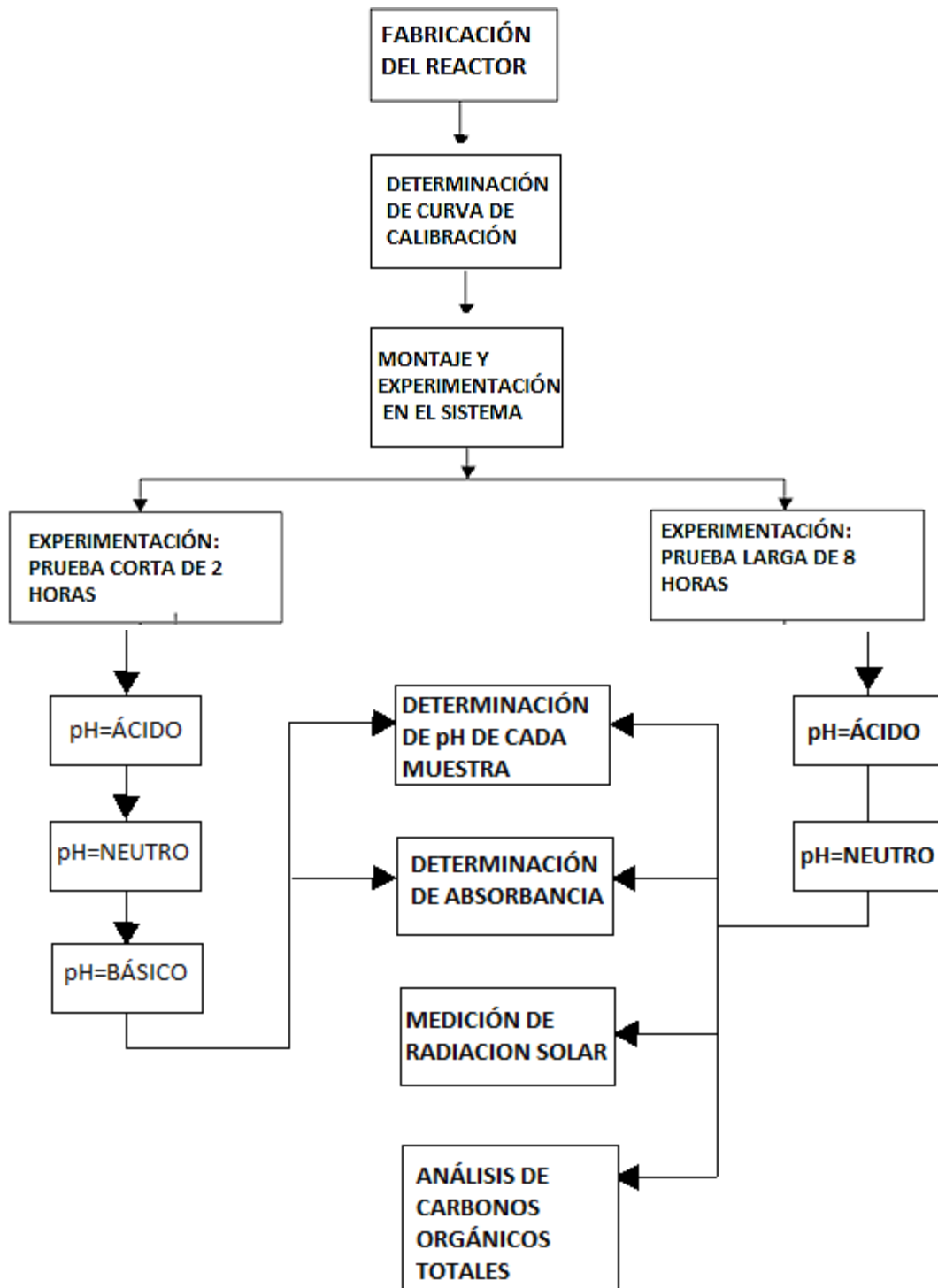


## 2.2. DIAGRAMA GENERAL DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología tiene como antecedentes a los siguientes autores (Moreno,2009) (Divagar,2009) (Holt, 2002) entre otros, desde el diseño y construcción del reactor, su eficiencia, así como su análisis de parámetros fisicoquímicos como son pH, densidad de corriente conductividad y demás variables, los cuales afectan significativamente su eficiencia.

Dicha solución de agua con el colorante Remazol amarillo se desea conocer el índice de remoción a diferentes valores de pH, considerando cada una de sus escalas: ácido, básico y neutro, partiendo de valores más específicos. Sin embargo lo que hace diferente a este trabajo es el uso de celda fotovoltaica como fuente de poder, esto con el objetivo de reducir el costo de operación.

En el diagrama 2.1 se muestran las principales etapas del desarrollo experimental. Dicha se divide en dos etapas, en la primera la experimentación se realizó durante un tiempo de dos horas continuas, con el objetivo de obtener los resultados más satisfactorios, y poder desarrollar la segunda etapa en donde la experimentación se realiza durante ocho horas continuas en ambas situaciones se monitorea la radiación solar.



**Diagrama 2.1** Etapas de la experimentación creación propia con datos de (Moreno,2009) (Divagar,2009) (Holt, 2002)



### 2.3. DISEÑO, FABRICACIÓN Y OPERACIÓN DEL REACTOR ELECTROLÍTICO

La literatura no revela ningún método sistemático para el diseño y funcionamiento de un reactor de electrocoagulación solo se reportan rangos de diseños a través de laboratorio, piloto y escala industriales, tanto como soporte a las unidades de reactores por sí solos completamente integrados en un sistema de purificación de agua residual. Ciertamente, no hay el denominante "reactor de electrocoagulación" en uso hoy en día. Por ejemplo, los electrodos utilizados varían en el material, el diseño y modo de operación,

Los reactores para la electrocoagulación están conformados por una celda electrolítica y pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo, para ambos casos se disponen de placas paralelas conectadas en serie y estas a su vez a una fuente de voltaje. El volumen de la celda ocupada por los electrodos se definen como zona de reacción, en esta se presentan los proceso de coagulación - floculación y/o adsorción.

La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar

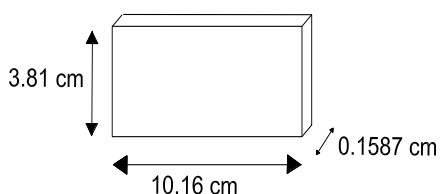
El reactor electrolítico, fue construido con un recipiente de plástico de una capacidad de 4.5 litros cuyas dimensiones son las siguientes:

DIMENSIONES DEL TANQUE		
<b>Largo</b>	27	cm
<b>Ancho</b>	18	cm
<b>Alto</b>	10	cm
<b>Volumen</b>	4.5	lt



Fig. 2.1. Dimensiones del reactor

Para las celdas, se seleccionó una solera (placas de acero) de 1/8 in de espesor, dichas se dividieron en 10 placas (5 trabajando como cationes y las otras como aniones fig. 2.3) entre ellas generan un espacio de 2 cm, con las siguientes dimensiones cada una fig. 2.2.



DIMENSIONES POR PLACA		
<b>ESPESOR</b>		
1/8"	0.1587	cm
<b>Ancho</b>	10.16	cm
<b>Alto</b>	3.81	cm

Fig. 2.2. Dimensiones de las placas

Las placas se soldaron de una esquina con un tubo del mismo material, quedando conectados en paralelo como se muestra en la figura 2.3

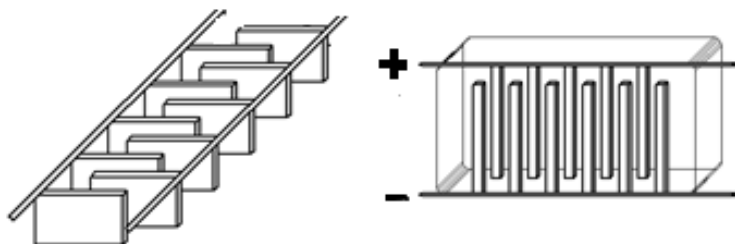


Figura 2.3. Arreglo en paralelo de placas de reactor electroquímico

### 2.3.1. MONTAJE DEL SISTEMA

En el diagrama de flujo se muestra las entradas y salidas tanto de energía proveniente de las celdas, así como del colorante diluido.

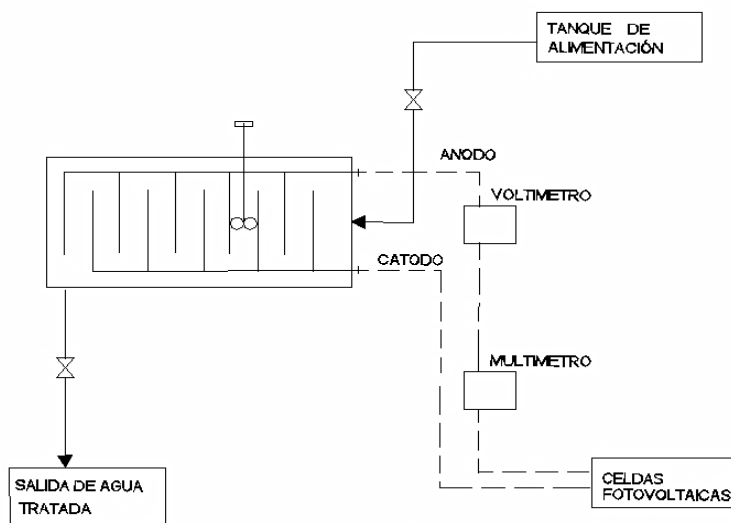


Fig. 2.4. Diagrama de flujo y estructura física de los equipos



## 2.4. TÉCNICAS ANALÍTICAS

### 2.4.1. ESPECTROFOTOMETRÍA

Es un método cuantitativo químico que mide la concentración de una sustancia química utilizando la luz. La concentración desconocida a medir, se mide observando la radiación absorbida o transmitida de la muestra problema, frente a la obtenida por una muestra conocida. Este método se le conoce como espectrofotometría de adsorción visible o colorimetría, ultravioleta e infrarroja.

Este método es correcto al tener en cuenta en que fundamentalmente todos los cuerpos, sin importar al espectro de luz que pertenezca absorben radiación de energía, aunque esta captación sea de una muestra transparente y aparentemente limpia.

El color característico de cada sustancia es debido a la cantidad de radiación absorbida a ciertas longitudes de onda de la luz blanca que incide entre ellas dejando pasar una porción que no puede absorber.

La absorción de la radiación visible, infrarroja o ultravioleta depende siempre de la estructura molecular del compuesto en el que incide la radiación y es característico de cada sustancia. Cuando la radiación incide a una sustancia cualquiera, parte de esa energía es absorbida y así podemos medir la concentración de una sustancia en una muestra.

A la hora de calcular la absorbancia y la transmitancia hay que tener en cuenta que son dependientes de la distancia recorrida del haz de luz y de las concentraciones de la muestra

### 2.4.2. SELECCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA

La longitud de onda de trabajo corresponde, generalmente, a la longitud de onda en la cual la absorbancia del analito (sustancia a analizar) es máxima, y recibe la denominación de Lambda máximo ( $\lambda_{max}$ ). Para seleccionar el  $\lambda_{max}$ , se hace un espectro de absorción o curva espectral, y consiste en una gráfica de la absorbancia de una solución de la sustancia absorbente de concentración adecuada, medida a distintas longitudes de onda y en ella se determina el  $\lambda_{max}$ .

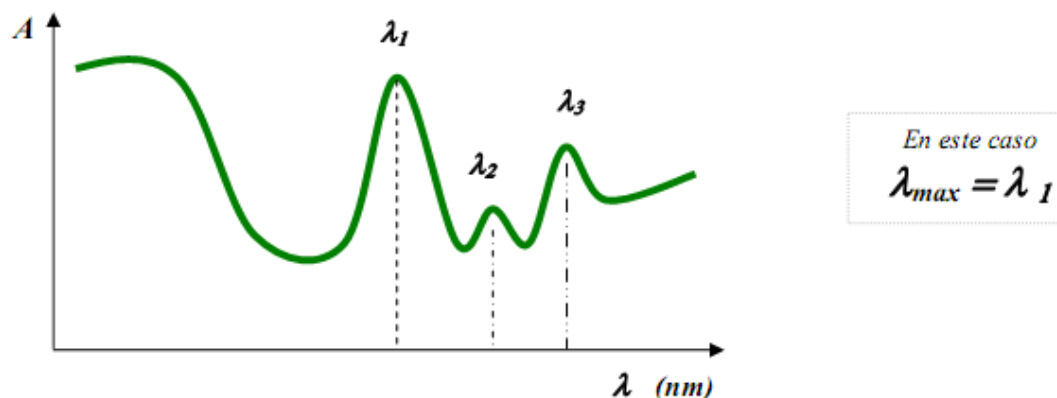


Fig. 2.5 Ejemplificación de las curvas espectrales

Si se trata de sustancias coloreadas, las mediciones se realizan en la zona visible del espectro electromagnético (380 a 800nm). En el caso de sustancias no coloreadas, las mediciones se realizan en la región ultravioleta del espectro electromagnético (200 a 380nm)

### 2.4.3. CURVA DE CALIBRACIÓN

Un procedimiento analítico muy utilizado en análisis cuantitativo es el llamado de “calibración” que implica la construcción de una “curva de calibración”. Una curva de calibración es la representación gráfica de una señal que se mide en función de la concentración de un analito. La calibración incluye la selección de un modelo para estimar los parámetros que permitan determinar la linealidad de esa curva y en consecuencia, la capacidad de un método analítico para obtener resultados que sean directamente proporcionales a la concentración de un compuesto en una muestra, dentro de un determinado intervalo de trabajo. En el procedimiento se compara una propiedad del analito con la de estándares de concentración conocida del mismo (o de algún otro con propiedades muy similares a éste). Para realizar la comparación se requiere utilizar métodos y equipos apropiados para la resolución del problema de acuerdo al analito que se desee determinar.

La etapa de calibración analítica se realiza mediante un modelo de línea recta que consiste en encontrar la recta de calibrado que mejor ajuste a una serie de “n” puntos experimentales, donde cada punto se encuentra definido por una variable “x” y una variable “y” en este caso. La recta de calibrado se encuentra definida por una ordenada al origen (b) y una pendiente (m), mediante la ecuación  $y = mx + b$ .

A partir de la curva de calibración (conjunto de concentraciones que describen el intervalo en el cual se deberá cuantificar el compuesto por analizar) y a fin de asegurar que la recta encontrada



con los puntos experimentales se ajuste correctamente al modelo matemático de la ecuación se calculan los valores de la ordenada al origen, la pendiente y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

## 2.5. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE REMAZOL AMARILLO

Para calcular el porcentaje de remoción, puede calcularse de la siguiente manera (Valero, 2010)

$$\% R = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (12)$$

Donde:

$C_i$  es la concentración inicial (mg/L)

$C_f$  es la concentración final (mg/L)

## SEPARACIÓN DE LODOS

En el proceso electrolítico se genera una electrocoagulación y una flotación de partículas, al retirar la muestra del reactor trae consigo lodos, los cuales hay que retirar mediante un sistema de filtración, con el uso de un embudo y de papel filtro. Durante la operación se puede generar rompimiento de partícula, generando color en la muestra y por siguiente un porcentaje de remoción grande

## 2.6. TOC (DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO TOTAL)

El Carbono Orgánico Total (COT: TOC) es un parámetro que se utiliza para valorar la calidad de las aguas de un determinado lugar. Su fundamento se basa en la combustión de muestras (se necesitan aproximadamente 20 ml de muestra para completar toda la secuencia de lavados del sistema de medida y la posterior cuantificación), se inyectan en una cámara de reacción, a 680°C, rellena con un catalizador oxidante, este catalizador es de platino soportado sobre bolas de alúmina, que se encuentra en un horno de cuarzo con forma de tubo. La muestra se evapora y el carbono (orgánico e inorgánico) se oxida a  $CO_2$ . Este  $CO_2$  se transporta, en corriente de aire, y se mide en un analizador de infrarrojos no dispersivo. La señal analógica de salida del detector de infrarrojos genera un pico y el procesador de datos calcula su área, que es proporcional a la concentración de carbono.



El Carbono orgánico en aguas limpias y residuales corresponde a diversidad de compuestos orgánicos en varios estados de oxidación. A diferencia de otros métodos como DBO y DQO, el TOC es independiente del estado de oxidación de la materia orgánica. Tampoco mide otros elementos orgánicos como el N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, ni los inorgánicos que pueden contribuir al requerimiento de O<sub>2</sub> medido por DBO y DQO.

Este método es aplicable a pequeñas concentraciones de materia orgánica. Un contaminante fuerte se da por arriba de los 290 mg/L y una media de 160 mg/L

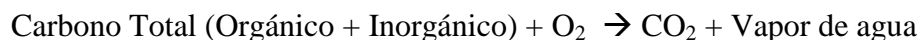
La determinación de la cantidad de Carbono Orgánico, se genera a partir de una previa rotura de las moléculas en varias unidades de Carbono simple, que son convertidas posteriormente a CO<sub>2</sub> que se mide por analizador infrarrojo.

La medición del TOC no se hace directamente sino por diferencia de TC y del IC:

$$TOC = TC - IC \quad (13)$$

En donde:

- TC (Carbono Total): Combustión a 680°C en un horno mufla con catalizador de Platino: El CO<sub>2</sub> se lleva a un analizador de Infrarrojos: Pt



- IC (Carbono Inorgánico): a Temperatura ambiente pasa a CO<sub>2</sub> en la cámara de acidificación:



La mineralización del colorante Remazol amarillo también se sigue mediante el descenso del carbono orgánico total TOC en un analizador de carbón, en donde a partir de dichos datos se calcula la eficiencia de la mineralización MCE para cada experimento a cada tiempo e intensidad, como lo muestra la siguiente ecuación (Blanco 2012) (Brillas, 2008)

$$MCE(\%) = \frac{nFV_S \Delta(TOC)_{exp}}{4.32 \times 10^7 mIt} \times 100 \quad (14)$$

En donde:

- $F$  es la constante de Faraday  $96487 \text{ C mol}^{-1}$
- $V_s$  es el volumen de la solución (L)
- $\Delta(\text{TOC})_{\text{exp}}$  es la variación experimental de TOC ( $\text{mg L}^{-1}$ )
- $4.32 \times 10^7$  es un factor de conversión ( $=3600 \text{ s h}^{-1} \times 12000 \text{ mg de C/mol}$ )
- $m$  es el número de átomos de carbono del colorante
- $I$  es la intensidad de corriente en amper
- $t$  tiempo (h)
- $n$  núm. de electrones consumidos por cada molécula ( $140e^-$  asumiendo que es mineralizada por completo)

El equipo que se ocupó para analizar los carbonos totales fue Tekmar Dohrmann Apollo 9000, que se muestra en la Fig. 2.6



**Fig.2.6.** Analizador de Carbonos Orgánicos Totales Tekmar Dohrmann Apollo 9000

## 2.7. CUANTIFICACIÓN DE pH

Para una medición más exacta, se utilizó un potenciómetro digital en el cual, se manejaron 3 diferentes valores de pH's ; 4, 7 y 10, ácido, neutro y básico respectivamente, en la solución de 100ppm de Remazol amarillo, esta se midió con un potenciómetro en el tanque de alimentación, así como en cada muestra. El potenciómetro se calibró con la solución buffer a los diferentes pH.

Los valores específicos de pH se basan en la experimentación de algunos autores como son (Koby, Can Bayramogly, 2003) ( Bayramogly, 2004) quienes trabajan con un pH de 7, (Moreno, 2009) experimento con distintos pH y concluye tener un buen rendimiento para el tratamiento de aguas residuales de un rango de pH 4 a pH 10, en ambos casos con placas de hierro.



Fig. 2.7. Potenciómetro

## 2.8 VOLTÍMETRO Y AMPERÍMETRO

Son dos aparatos de medidas eléctricas, el primero se utiliza para medir diferencias de potencial entre dos puntos cualesquiera cuya unidad se describe como voltios y el segundo para medir intensidades, cuyas unidades son amperes



a) Voltímetro de pinza AC/DC

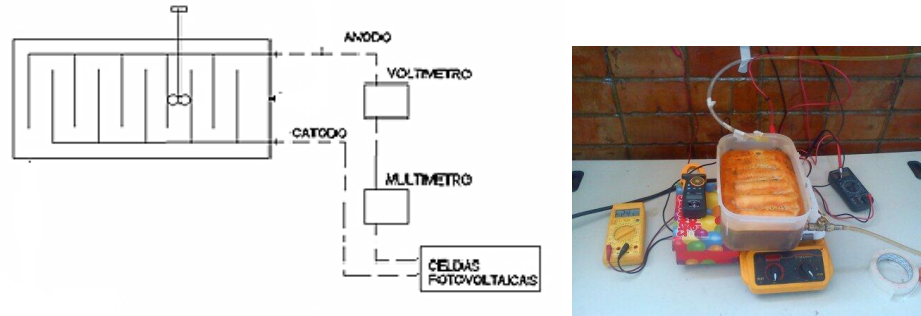


b) Multímetro Stern Mul-050

Fig. 2.8. Voltímetro y amperímetro respectivamente

El multímetro se conectó en serie entre el PV y el reactor, así como el voltímetro de pinza media el voltaje que llegaba al reactor, como se muestra en la figura 2.9.





**Fig.2.9.** Instalación de equipos de medición de voltaje y amperaje

## 2.9. MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR

### 2.9.1. FUENTE DE VOLTAJE

Considerando que nuestra fuente de voltaje es un panel fotovoltaico de 75W, este tiene las siguientes especificaciones

CARACTERISTICAS	VALORES
Voltaje máximo a circuito abierto	21.33 V
Corriente máxima en corto circuito	4.7 A
Potencia máxima específica	150W
Largo	126cm
Ancho	80cm
Área	$1.008\text{m}^2 = 1\text{m}^2$
Angulo de inclinación	$16^\circ$
Eficiencia	15%



**Figura 2.10** Panel fotovoltaico



## CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN



### 3.1. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR ELECTROLÍTICO

El planteamiento de Levenspiel (1999), de un sistema continuo es el que mejor se adapta a procesos industriales para grandes cantidades a altas tasas de producción, tales como agua a gran escala plantas de tratamiento, un proceso continuo a menudo se encontrado ser más económico que los sistemas por lotes. Por tal motivo el reactor es tipo continuo, cuyas dimensiones se manejaron el apartado 2.3 capítulo anterior también cabe señalar que se manejaron diferentes cantidades de números de placas, la primera experimentación consistió en 24 placas cuyos resultados se muestran el anexo A1 así como en el tema 3.4.2 operación y análisis del reactor electrolítico, bajo estos criterios se reduce a 10 placas, recordando que no existe diseño específico de un reactor electrolítico. Ya definido el número de placas es necesario conocer la densidad de corriente por lo que es necesario determinar el área superficial ya que al aumentar o disminuir el número de placas esta tiende a variar, como se muestra en la tabla 3.1

ÁREA POR PLACA		77.4192 cm <sup>2</sup>
		área total cm <sup>2</sup>
NO PLACAS	5	387.096
	<b>10</b>	<b>774.192</b>
	24	1858.06

**Tabla 3.1.** Área total y por placa

Planteando un área superficial para 10 placas y que la fuente de poder es una celda foto voltaica se presenta variaciones en la intensidades de corriente y por consiguiente cambios en la densidad de corriente, como se muestra en la tabla 3.2.

No placas	10
corriente mA	mA/cm <sup>2</sup>
2000	2.58
3000	3.88
4000	5.17

**Tabla 3.2.** Densidades de corriente a distintas intensidades de corriente

Para el control del fluido, al reactor se le instaló una válvula de ajuga para gas de 3/8" para la salida del electrolito, así como también se conectó la misma válvula para la cubeta de alimentación. Dicha solución fue transportada por una manguera reforzada de nivel transparente de 1/4 in, como se ilustra en la figura 3.1.



**Figura 3.1.** Válvula de control de flujo

### 3.2. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN

#### 3.2.1. CUANTIFICACIÓN DE COLORANTE DE REMAZOL AMARILLO EN SOLUCIÓN

Considerando que el colorante azoico Remazol amarillo es un modelo como contaminante en el  $H_2O$  se preparó una concentración de 100ppm (mg/L) como muestra madre, considerando que dicha concentración sería el color que no reacciono durante el proceso de producción.

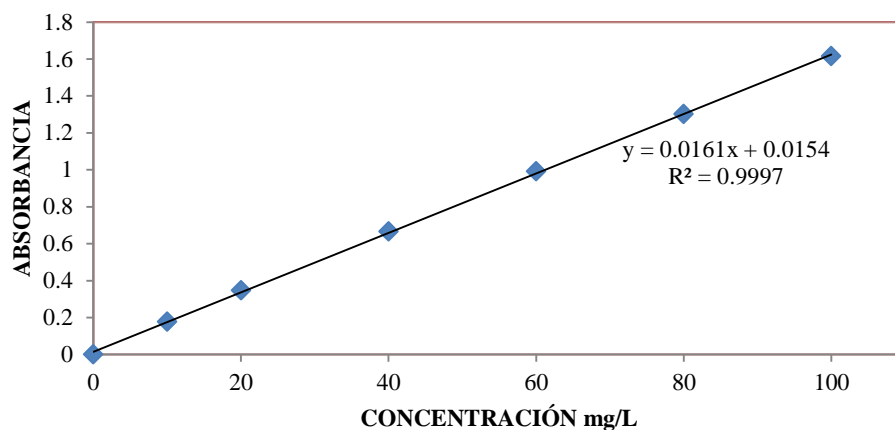
Dicha muestra se metió en el espectrofotómetro UV-VIS modelo SHIMADZU UV-160 figura 3.2 para la realización de una curva de calibración para la determinación de decoloración del colorante, el cual se sigue mediante el descenso de la absorbancia en la longitud de onda máxima registrando su espectro en el espectrofotómetro en función de concentración, con el fin de obtener la longitud de onda. Obteniéndose la siguiente:  $429nm$ , dicho valor servirá para especificarle al espectrofotómetro la longitud de onda del colorante, y mida el nivel de absorbancia en cada muestra procesada en el reactor electrolítico.



**Fig. 3.2.** Espectrofotómetro UV-VIS Shimadzu



La curva de calibración se obtuvo a partir de la medición de la absorbancia a distintas concentraciones; 0, 10, 20, 40, 60, 80 y 100mg/L. Generando la gráfica 1 y la ecuación de la recta (15) así como su coeficiente de correlación.



**Gráfica 1.** Curva de calibración, ecuación de la pendiente y el coeficiente de determinación

<b>LONGITUD DE ONDA</b> <b>429nm</b>	( 15 )
$y = 0.0161x + 0.0154$	
$R^2 = 0.9997$	

En donde las variables:

Y = absorción      X= concentración

Con la línea de tendencia tenemos la recta de calibrado se encuentra definida por la ecuación  $y = mx + b$ , la cual denotamos como la ecuación 15.

Conociendo la absorbancia se determina el porcentaje de remoción en cada muestra, como lo muestra la ecuación 12 y de la cual se mencionó en el capítulo 2.5.

$$\% R = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (12)$$

### 3.3. MONTAJE DEL REACTOR ELECTROLÍTICO

#### 3.3.1. CALCULO DE CAUDALES Y TIEMPO DE RETENCIÓN EN EL REACTOR

En la tabla 3.3. se muestran los cálculos de los caudales para diferentes volúmenes y flujos, durante la experimentación el caudal se mantuvo constante tanto de la alimentación como el de la salida del reactor, considerando que es un sistema continuo. También se manejaron los gastos por hora y por día en jornada de 8 horas.

T retención (min)	V (ml)	Q (ml/min)	Q (ml/hr)	Q (lt/hr)	Q (lt/día)
50	2000	40	2400	2.4	16.8
50	4000	80	4800	4.8	33.6

Tabla 3.3. Calculo de los caudales

Primeramente se había trabajado con un volumen en el reactor de 2L así como un flujo de 40 ml/min con un número de placas 24 placas (anexo A1), sin embargo se observó que bajo estas condiciones las muestras presentaban mayor cantidad de flóculos (hidróxido ferroso), como se muestra en la figura 3.3 y 3.4, así también como al filtrar presentaba mayor cantidad de partículas en suspensión los cuales llegaban a fracturarse durante la filtración, generando color en la muestra, sin embargo el porcentaje de remoción para la experimentación de 2 horas se encuentra en un rango de 94% a 99.5% en condiciones de pH neutro. por esta razón se decidió disminuir el número de placas y aumentar al doble el volumen.



Fig. 3.3. Filtración y muestras obtenidas con 24 placas

#### 3.3.2. OPERACIÓN Y ANÁLISIS DEL REACTOR ELECTROLÍTICO

La distribución de los electrodos fueron conectados en paralelo como se muestra en la figura 2.3. primeramente se colocaron 12 placas en cada carga con una separación de 1 cm entre placas

(ánodo, cátodo), es decir 24 placas en total, sin embargo se pudo observar que se generaba mucho hidróxido ferroso, es decir tenía una coloración verde oscura como se muestra en la figura 3.4. a) b), esto se generaba al tener mayor número de placas se generaba mayor cantidad de Hidrógeno (generando por la oxidación del aire insipiente) y mayor desprendimiento de iones hierro, por eso la coloración.



**Fig. 3.4.** a) Muestra con presencia en exceso de hidroxido ferroso      b) Reactor con 24 placas

En el anexo A1 se muestran, las condiciones de operación, gráficas del porcentaje de remoción, así como las imágenes correspondientes.



**Fig.3.5.** a) Generación de hidrogeno en cátodo

### 3.3.3. REDISEÑO DEL REACTOR ELECTROLITICO

Por la experimentación anterior (24 placas) se decidió disminuir la cantidad de electrodos (10 placas), así como aumentar el volumen del analito (4L), el flujo de entrada y salida, generando las siguientes condiciones de operación, tabla 3.4. a partir de estas condiciones se realizara las pruebas cortas a distintas unidades de pH.



Es importante también señalar que el sistema presenta agitación continua mediante un agitador magnético y una parrilla de agitación, con el objetivo de homogenizar la solución a reaccionar.

CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Volumen tratado	4000ml	Número de electrodos: 10
Tiempo de tratamiento	50 min	Separación entre electrodos 2 cm
Tipo de operación	continua	Cátodo: 5 electrodos de Hierro
Flujo de entrada	80 ml/min	Ánodo: 5 electrodos de Hierro
Flujo de salida	80 ml/min	Tamaño de electrodos: 10.16 X 3.81 cm
pH	4 , 7 , 10	Área superficial por electrodo: 77.4192 cm <sup>2</sup>

**Tabla 3.4.** Condiciones de Operación para un número de placas de 10

Ya establecido el diseño del reactor electrolítico se realizan 1 corrida de 2 horas continuas, a los distintos pH establecidos, y cuyos resultados se presentan a continuación. A los que mejor rendimiento presenten se proseguirá a una experimentación de 8 horas.

### 3.4. EXPERIMENTACIÓN EN JORNADAS DE 2 HORAS

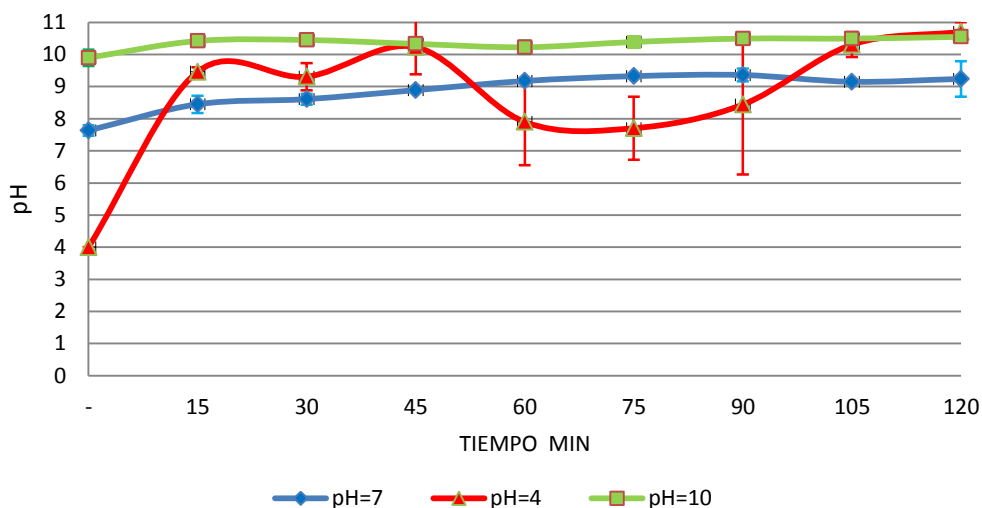
A continuación se muestran los resultados del porcentaje de remoción (gráfica 3) y el pH (gráfica 2) obtenido de las muestras después de haber pasado por el reactor en condiciones de pH en la alimentación, cabe señalar que para la medición de la absorbancia se filtró cada muestra con papel filtro, con tiempos de análisis de 15 min entre cada muestra. Posteriormente dichas muestras fueron analizadas en electrofotómetro a su respectiva longitud de onda: 429nm, obteniéndose los siguientes resultados.

#### 3.4.1. DETERMINACIÓN DEL pH

El pH de la solución de colorante azo Remazol amarillo en agua se bajó a pH 4 con una solución de ácido clorhídrico, y para subir el pH se utilizó una solución de hidróxido de sodio de 0.5 M para obtener un pH 10, ambas adicionadas y homogenizadas al tanque de alimentación, antes de entrar al reactor electroquímico. Cabe mencionar que el agua con la que se disolvió el colorante es agua de potable del valle de Toluca, cuya agua presenta niveles de contaminación nulos, debido que es agua de pozo.



La variable pH se midió con un potenciómetro al salir del reactor electrolítico en un rango de tiempo de 15 min y después de haberla filtrado, con papel filtro y embudo, obteniéndose los siguientes resultados a diferentes pH, La grafica 2 muestra el pH promedio (de 2 prácticas en las mismas condiciones) así como la desviación estándar entre resultados.



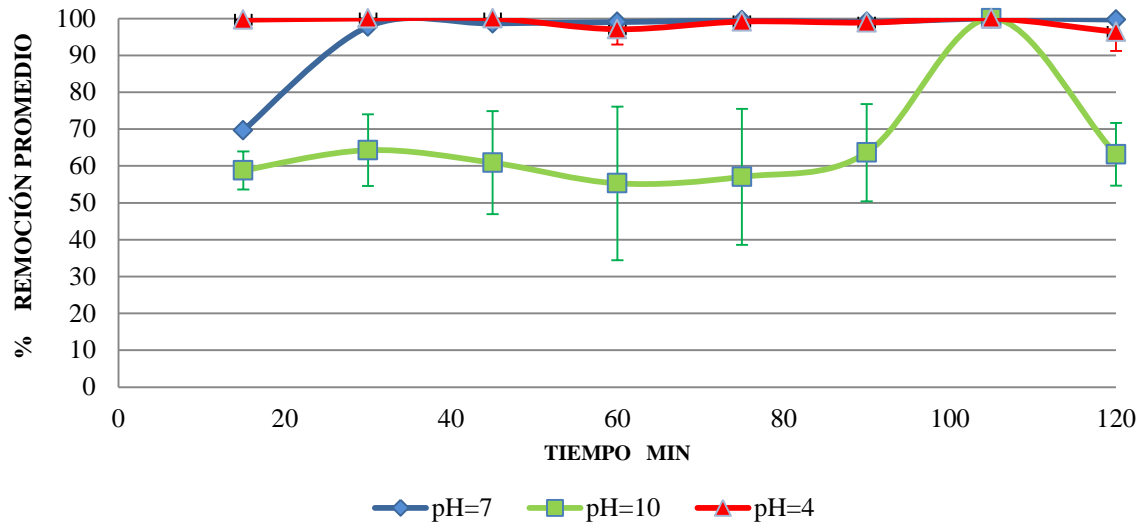
**Gráfica 2.** Comportamiento del pH promedio después de la oxidación electrolítica

Observamos en la gráfica 2 que bajo las condiciones ácidas y neutra, el pH aumenta, y a condiciones básicas se mantiene relativamente constante, esto se debe a la descomposición electrolítica del agua es decir la generación de ion hidroxilo, así como la formación de hidróxido ferroso y férrico, alterando y subiendo el pH.

### 3.4.2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN

Posteriormente de la medición de pH y la filtración, se analiza la absorbancia con el espectrofotómetro UV-VIS Shimadzu y apoyándonos con la ecuación 15, obtendremos la concentración y por consiguiente con la ecuación 12 obtendremos el porcentaje de remoción en cada muestra. A su respectiva longitud de onda de 429nm.

Obteniéndose los siguientes porcentajes de remoción promedio, con su respectiva desviación estándar.



**Gráfica 3.** Desviación estándar del porcentaje de remoción promedio en prueba corta

Por lo tanto para las pruebas cortas y cómo podemos observar en la gráfica 3, se obtuvo un porcentaje de remoción de entre 90 a 99% en condiciones ácidas, en condiciones neutras de entre un 70% a un 95% de remoción y a condiciones básicas su remoción es baja comparada con las dos anteriores, de entre un 40 al 70%.

En la figura 3.6 se presentan las muestras obtenidas bajo condiciones ácidas y neutras, en las cuales notamos que hay una disminución notable de color, si lo denotamos como porcentaje de remoción sería de entre 0%, 70% a 98% por los resultados de la remoción, si la comparamos con la muestra inicial que se encuentra de lado izquierdo en ambas imágenes.



a) pH= 4

b) pH= 7

**Fig. 3.6.** Muestras obtenidas

Podríamos resumir en un cuadro, el promedio del porcentaje de remoción obtenida de los 3 valores de pH que dando de la siguiente manera.

<b>Pruebas cortas</b>	<b>con agitación</b>	<b>pH= 4</b>	<b>% R prom.</b>	98.9
		<b>pH = 7</b>	<b>% R prom.</b>	95.42
		<b>pH = 10</b>	<b>% R prom</b>	65.38

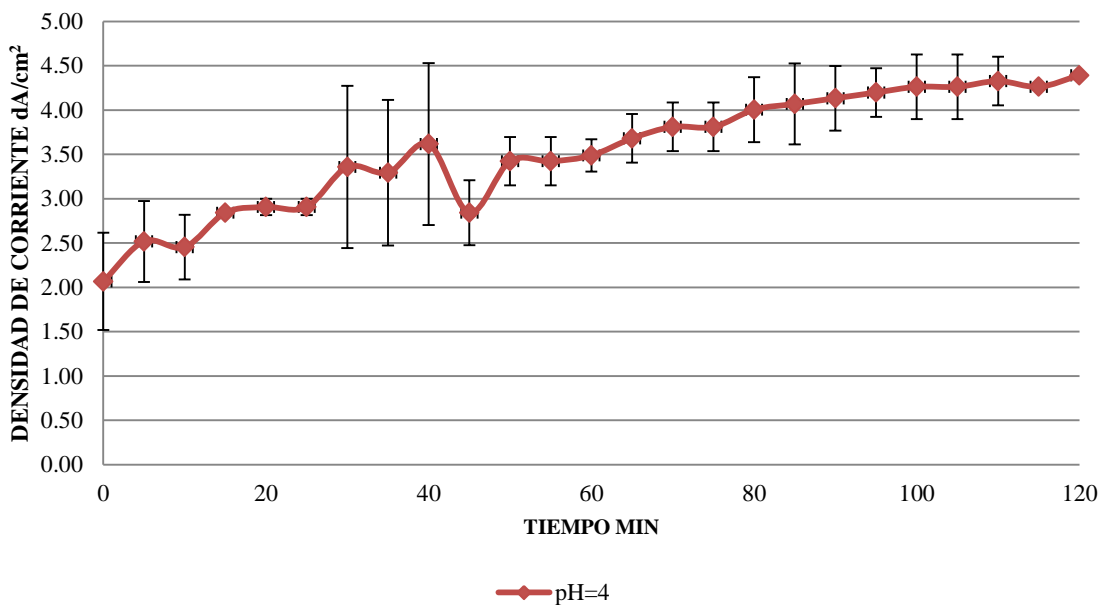
**Tabla 3.5.** Promedio de los resultados de remoción a diferentes pH's

Con estos resultados podemos concluir que se tiene un mejor rendimiento bajo condiciones ácidas y neutras, por lo que se dará lugar a realizar 2 pruebas de jornadas continuas de 8 horas para dichos pH's.

### 3.4.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE $dC$

Recordemos que la densidad de corriente está denotada como la intensidad de corriente en relación sobre el área superficial ecuación (10), para la prueba corta, con 10 placas, su área en las placas la se tiene ya cuantificada en la tabla 3.1, y en la tabla 3.2 observamos la densidad de corriente esperada para diferentes variaciones en el amperaje.

En la gráfica 4 se muestra la densidad de corriente promedio obtenida sólo a pH 4, generada a partir de la intensidad de corriente (amperaje) en función de tiempo. Con el mismo rango de 15 min. Solamente se midió, en dicha prueba



**Grafica 4.** Densidad de corriente promedio en prueba corta



Como nuestro objetivo es analizar la oxidación electrolítica del colorante Remazol amarillo a diferentes pH se elige al que tenga mejor % de remoción y en te caso es a pH ácido y neutro, por lo que se realizara dos prácticas en jornadas de 8 horas continuas.

### 3.5. EXPERIMENTACIÓN EN JORNADAS DE 8 HORAS CONTINUAS

En la tabla 3.8 se muestran las condiciones de operación del reactor, la metodología va hacer la misma como fueron para las prácticas cortas, se va determinar las pruebas de pH pero solo será aplicada para pH ácido y neutro, absorbancia, con una diferencia de 15 min entre ellas, Se anexara el monitoreo el valor del voltaje durante la operación, con diferencias de tiempos de 5 min así como la medición de la intensidad de corriente (amperaje), esto con el fin de obtener la densidad de corriente en el reactor electrolítico.

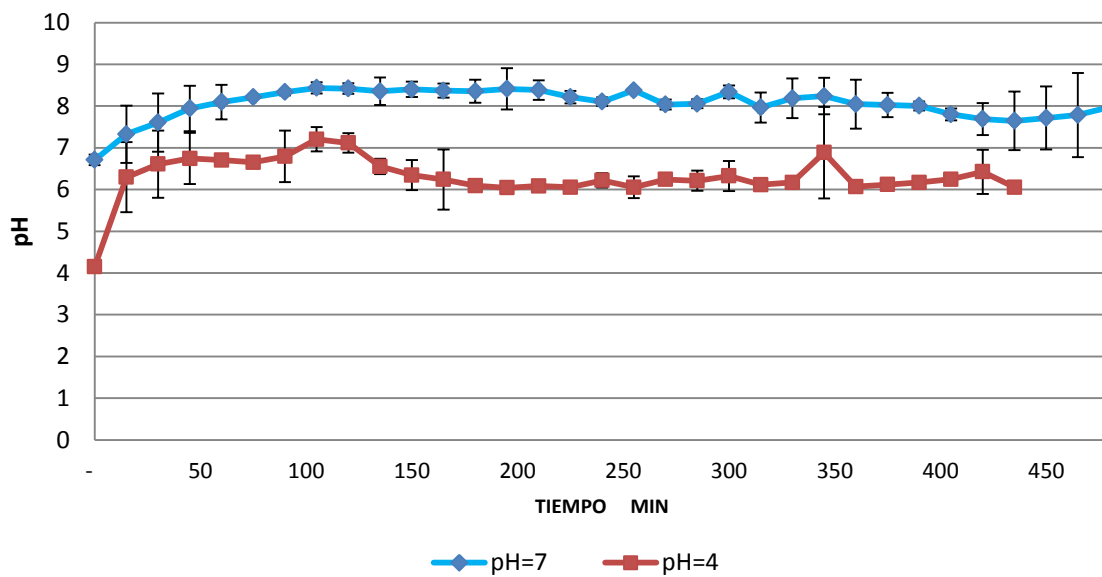
Para conocer la mineralización obtenida en las muestras, se va hacer uso del analizador de carbono orgánico totales COT, por lo que se van a presentar los resultados, en esta sección.

CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Volumen tratado	4000ml	Número de placas: 10
Tiempo de tratamiento	50 min	Separación entre electrodos 2 cm
Tipo de operación	continua	Cátodo: 5 electrodos de Hierro
Flujo de entrada	80 ml/min	Ánodo: 5 electrodos de Hierro
Flujo de salida	80 ml/min	Tamaño de electrodos: 10.16 X 3.81 cm
pH	4 , 7	Área superficial por electrodo: 77.4192 cm <sup>2</sup>
Agitación	Continua	
Variables a medir	Amperaje, voltaje, pH	

**Tabla 3.6.** Condiciones de operación para pruebas en jornadas de 8 horas continuas

### 3.5.1. DETERMINACIÓN DEL pH

La determinación del pH se hizo posterior a la filtración y en una diferencia de 15 min entre cada muestra. En la gráfica 5 se muestra los resultados promedio con su respectiva desviación estándar, en la cual se vuelven a repetir los resultados que se habían obtenido en la prueba corta, en donde el pH de ambas pruebas, suben, en el caso de pH 4, hay un incremento de 2 unidades, manteniéndose entre 6 y 7. Para el caso de pH 7, no incrementa significativamente, pero lo tenemos en un rango de base.



**Gráfica 5.** Resultados de pH promedio con su respectiva desviación estándar

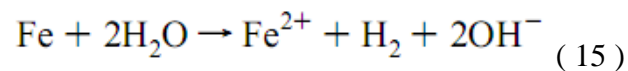
Presentamos a continuación una imagen de la apariencia de las muestras, bajo un pH ácido de 4 unidades. Dichas están ordenadas de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en donde podemos observar que hasta la muestra 16, se tiene una reducción de color, pero de la 17 (minuto 255) hasta la 28, a excepción de la 23 (minuto 345), aumentó su color. Estos resultados se analizarán posteriormente en el apartado 3.6.3.1. los cuales son comparados con el voltaje (gráfica 7).



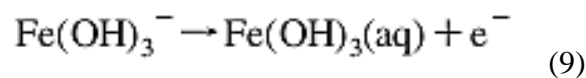
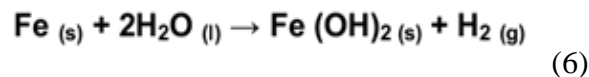
Fig. 3.7 Muestras a pH ácido

En conclusión:

Se aprecia el aumento de pH, esta variable se mantiene constante comparado con las pruebas cortas generando para un pH ácido aumento a un rango de 6 y 7, en promedio 6.3; y para condiciones neutras aumenta de entre 7 a 9, en promedio 8, ya que como se había mencionado anteriormente tienden a aumentar esto se debe a presencia de hidróxido en la reacción, como se muestra en la siguiente reacción, en donde la molécula de agua se disocia en el cátodo, en donde el hidrógeno es desprendido como gas como lo muestra la figura 1.3 o bien en la imagen 3.5a) y el ion hierro es desprendido de la placa en el ánodo.



Posteriormente se genera el hidróxido férrico e hidróxido ferroso, generado por la descomposición del agua y el desprendimiento del  $\text{Fe}^{+2}$  de la celda, como lo muestra la reacción 6 y 9.



Debido al paso de la corriente, los iones de hierro actúan como un coagulante y al unirse al hidróxido, generan flóculos, los cuales con las burbujas generadas por el gas  $\text{H}_2$  en el cátodo, ayudan a la flotación de los flóculos producidos así mismo si existe una disminución de burbuja los flóculos generados tienden a sedimentar y se separan por filtración.

Las siguientes imágenes 3.8.a y 3.8.b que demuestran la generación de dichos flóculos.



a)

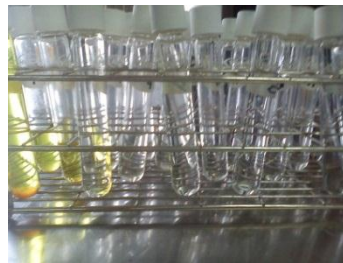


b)

**Figura 3.8.** Generación de flóculos

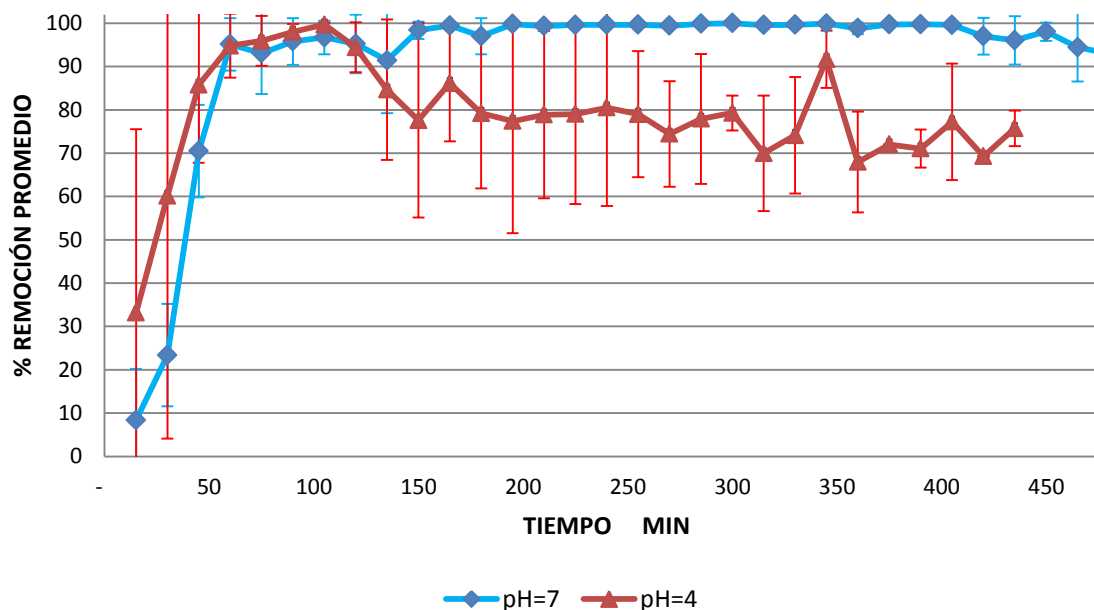
### 3.5.2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN

Para calcular la remoción se necesita determinar la absorbancia, como se realizó en las pruebas cortas, se muestra una imagen de las muestras obtenidas antes de tomar lectura en el espectrofotómetro



**Figura 3.9.** Muestras obtenidas posteriormente de filtrar

A continuación se muestra la gráfica 6 el comportamiento de remoción del colorante azoico Remazol amarillo, la cual muestra su comportamiento promediado, junto con su desviación estándar.



**Grafica 6.** Porcentaje de remoción promedio en jornada de 8 horas continuas

Como se puede apreciar en la grafica 6 y comparando con la grafica 3, de la prueba corta, los resultados en pH 7 presenta un porcentaje de remoción de entre un 90 y 99%, pero en comparación con pH 4, presentama una variación de 30 unidades es decir, de un 60 a 90% de remoción, por lo que hay que compararlo con la intensidad de corriente o con la radiacion solar.

Estos resultados los analizaremos más adelante con respecto a la densidad de corriente y el voltaje obtenido. Por el momento pudiéramos concluir que:

pH	Longitud de onda $\lambda$	Rango %R
Neutro	429nm	99%
Acido		60- 90%

**Tabla 3.7.** Resultados de porcentaje de remoción a pH 7 y pH 4

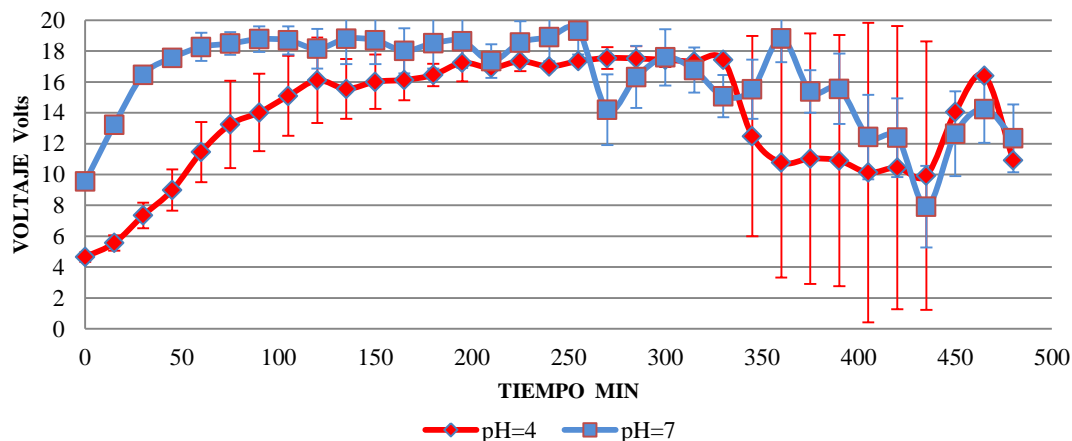
### 3.5.3. DETERMINACIÓN DE VOLTAJE

Este parámetro se determinó con el uso del voltímetro de pinza AC/DC, esto con el objetivo de conocer la influencia del voltaje en la remoción a los diferentes pH.



Recordemos que se tenía un solo panel fotovoltaico de 75W, con un máximo de potencial de 20V, el cual se tenía conectado directo al reactor electrolítico, por lo que su variación podía modificar el rendimiento de la experimentación. Este equipo se utilizó como alternativa de fuente de energía. Y así cumplí con el objetivo de la experimentación.

Se obtuvieron los siguientes resultados, esquematizados en la siguiente gráfica 7



**Grafica 7.** Comportamiento del voltaje promedio de la celda fotovoltaica en jornadas de 8 horas

Como podemos apreciar en la gráfica 7, existió variación en el voltaje a partir del min 345 con respecto de un día y otro, por lo que esto probablemente haya afectado a la remoción, para verificar estos puntos, el siguiente tema los aclarara.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación se discute algunos factores que afectan la electrocoagulación

### 3.5.3.1. RELACIÓN DE PORCENTAJE DE REMOCIÓN Y VOLTAJE

Comparando las gráficas 6 y 7 en pruebas largas, es decir jornadas de 8 horas continuas, se observa que a condiciones acidas teniendo un voltaje de entre 15V a 20V se tiene un porcentaje de remoción del Colorante Reactivo Remazol Amarillo de entre el 70 y 90 %. Sin embargo para condiciones neutras, teniendo un voltaje de entre 10V a 20V encontramos una remoción de entre

el 80 y 90%, por lo tanto, con un voltaje pequeño podemos tener una buena remoción solo en condiciones neutro en el analito.

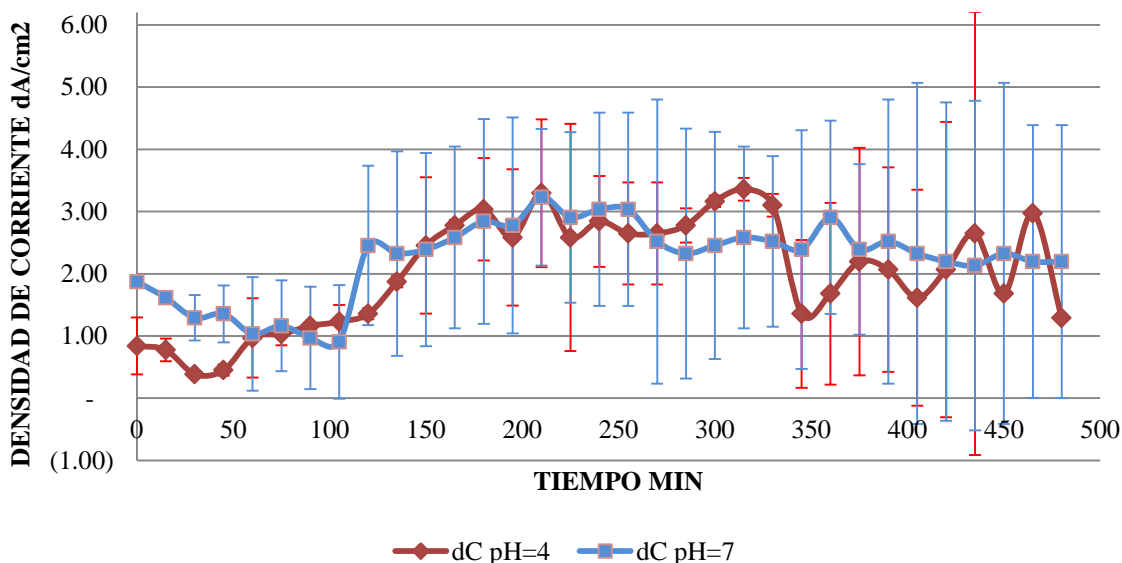
En conclusión que mientras el sistema este entre un rango de 10V a 20V tendremos una remoción arriba del 80% tanto para condiciones acidas o neutras. Y con esto se cumpliría nuestra hipótesis “La eficiencia de eliminación del colorante será superior al 80% en el sistema electrolítico aplicando electrodos de hierro a un reactor alimentado con energía fotovoltaica directa.”

Citando esta condición de (Alonso–Vante, 2003) al aumentar el voltaje se incrementa la intensidad de corriente la cual se le atribuye un incremento de iones  $Fe^{+2}$ , producto de la disolución de ánodo de sacrificio

### 3.6. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE dC

Para la obtención de la densidad, recordemos que la expresión matemática corresponde a la ecuación 10 vista en el capítulo uno. Por lo que la intensidad de corriente (ampere) medida con el equipo Multímetro Steren Mul-050 y la determinación del área de las placas vista en la Tabla 3.1 de este mismo capítulo. En donde dicha área por placa es de 77.419, si se tienen 10 placas en el reactor electroquímico, se tendría un área total de 774.192  $cm^2$

Se presenta en la gráfica 8 las densidades obtenidas con respecto al amperaje medido. Estos resultados se encuentran promediados y se muestra la desviación estándar de los resultados., tanto para pH 4 y pH 7.



**Gráfica 8** Densidad de corriente promedio, con su desviación estándar correspondiente



### 3.6.1. EFECTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL REACTOR ELECTROLÍTICO

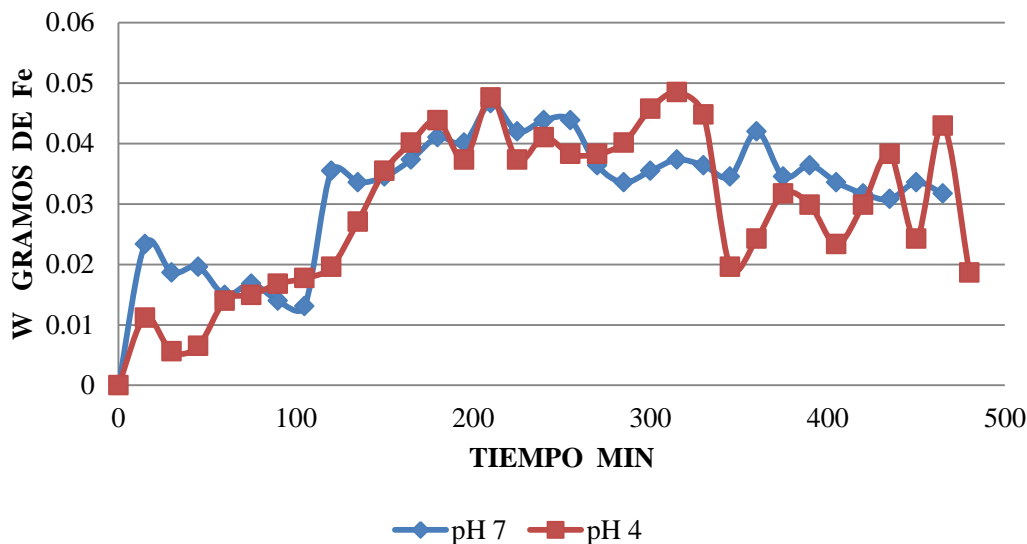
Si bien el voltaje juega un rol importante dentro de un proceso electroquímico, la densidad de corriente juega un rol de igual o mayor importancia que el voltaje. Esto se debe a que el flujo de corriente que circula por una determinada área de los electrodos controla la velocidad del proceso electroquímico producido en el ánodo y el cátodo. Los procesos de electrocoagulación son beneficiados al aumentar el voltaje, ya que es directamente proporcional con la densidad de corriente, de esta forma se incrementa la cantidad de carga transportada por los iones presentes en el medio. (Hani, 2009)

Si citamos que “Si la densidad de corriente, aumenta da como resultado un mayor flujo de impulso hacia arriba generando flotación así como de lo contrario, si existe una disminución en la densidad de corriente genera su sedimentación” (Holt, 2002)

Entonces dichos resultados explican que si existe un aumento en la densidad de corriente, se generó mayor cantidad de hidrogeno en el cátodo, y por lo tanto las partículas coaguladas tendieron a flotar. De igual manera si la densidad de corriente disminuyo dichos flóculos precipitados, aunque no se cuantificaron en peso, sería bueno considerarlos, sin embargo apoyándonos en la ley de la electrolisis de Faraday, que cita lo siguiente: **“la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema”**. Y la ecuación 11 (capitulo 1), pudiéramos conocer a  $w$  el cual es la cantidad en gramos de material depositado o disuelto en un electrodo.

$$w = \frac{I \cdot t \cdot e}{F} \quad (11)$$

Sustituyendo las distintas variables en la ecuación 11, con respecto a los cambios de la intensidad de corriente, peso atómico y demás variables se obtendrá la gráfica 9.



**Grafica 9** Cantidad de flocúlos depositado o disuelto en la reacción

Realizando la sumatoria total de los resultados promediados de las jornadas de 8 horas, obtendríamos los siguientes resultados

CONDICIONES	W (gr)	W (kg)
<b>pH 4</b>	0.954093264	0.000954093
<b>pH 7</b>	1.038031088	0.001038031

**Tabla 3.8** Sumatoria de gramos de Fe liberado de ánodo

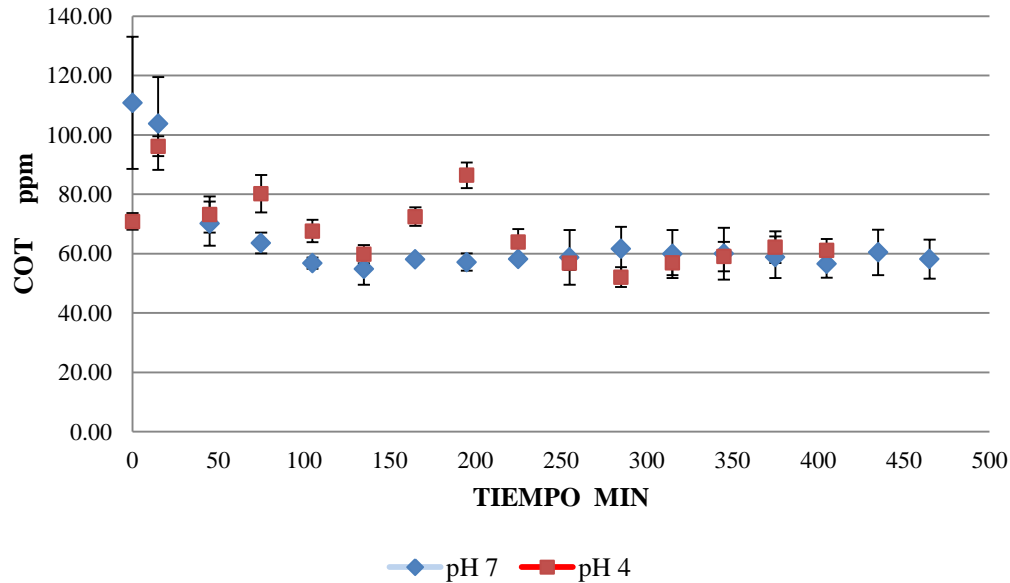
Los resultados muestran mayor cantidad en gramos disueltos de Fe en pH 7, lo que concluye que hubo mayor cantidad de flujo de energía pasando por los electrodos y lo podemos verificar con el voltaje, grafica 7, la cual confirma esta conclusión, así como también esta pequeña diferencia afecto a la eficiencia de la remoción.

### 3.7 DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

El analizador funciona a partir de la acción oxidante de los radicales  $\bullet\text{OH}$ , el contaminante se deshidrogena e hidroxila y se rompe la cadena carbonada originándose ácidos orgánicos de cadena progresivamente cada vez más corta. En última instancia, el contaminante revierte a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e iones inorgánicos (combustión completa del contaminante o mineralización). Esto se explica en el capítulo 1.

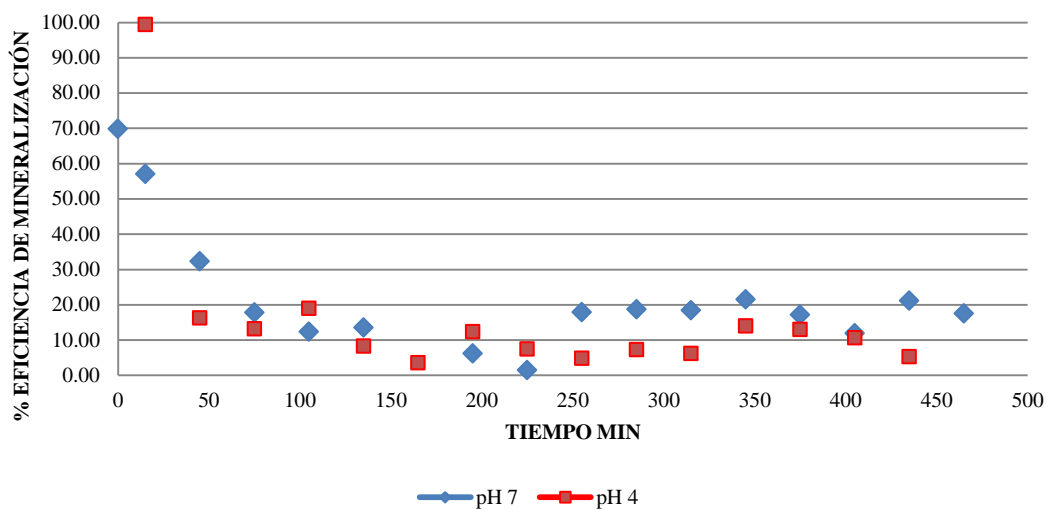
La mineralización del colorante se mide con el descenso del carbono orgánico total TOC en un analizador de carbono Tekmar Dohrmann Apollo 9000, que nos muestra los resultados en ppm de C/N. A partir de estos datos se calcula la eficacia de la mineralización denota como el %MCE para cada experimento a cada tiempo y la intensidad según la ecuación 14.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el analizador de carbono.



**Gráfica 10** Resultados de análisis de carbonos totales promediados

Podemos observar en la gráfica 10, presenta que la muestra inicial es de 110ppm de material orgánico, y durante la remoción se mantiene arriba del 60ppm, lo cual indica que la eficiencia del sistema un cuanto a la materia orgánica presente, es del 54%.



**Gráfica 11.** Porcentaje de mineralización

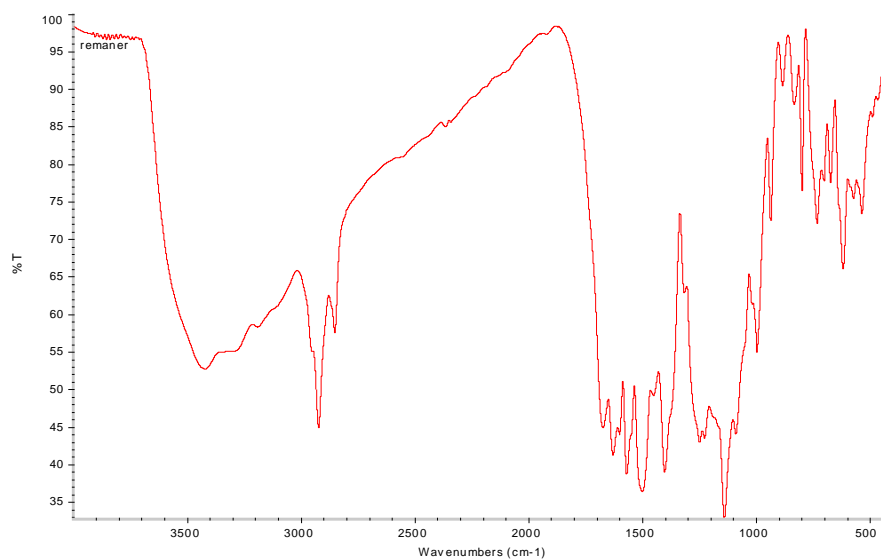
Para constatar la pérdida total del colorante, se realizó un análisis en el infrarrojo para evaluar la modificación completa de las señales presentes por la molécula de Remazol en solución y en el producto final, confirmando así el rompimiento total del enlace azo presente en la molécula, dichos resultados podrán observarse en los siguientes resultados.

### 3.8. ESPECTROS DE REMAZOL Y DE RESIDUOS

Espectros de colorante Remazol Amarillo, los cual indica las señales proporcionadas por el colorante, que de acuerdo a su estructura química, representa las siguientes señales:

Esteres	1000nm – 1100 nm y 600nm - 650 nm
Grupos metilo	3000nm – 2900nm y 1350nm – 1450nm
-SO <sub>3</sub> M	1200nm -1150nm, 1000nm- 1100nm
C=N estiramiento	1600nm - 1700nm
-R-SO <sub>2</sub> -R	1300nm-1350nm, 1100nm-1200nm, 600nm - 500nm

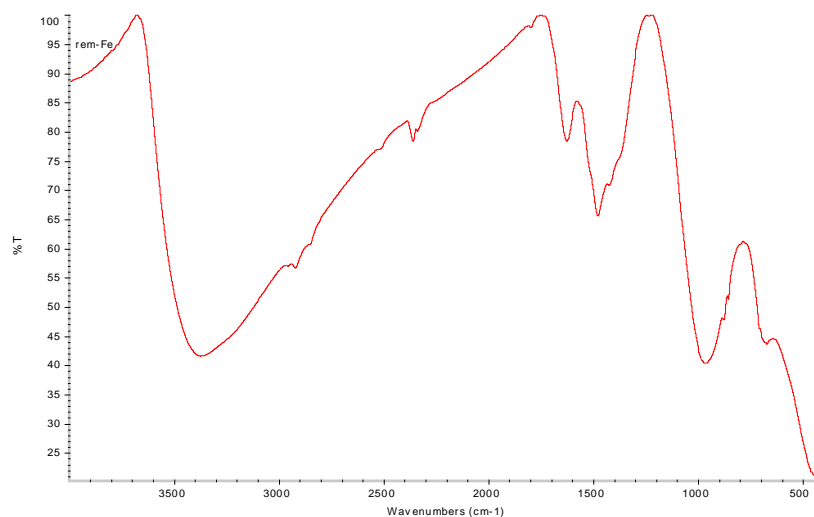
En la gráfica 12 se muestran el comportamiento de los grupos presentes en la molécula.



**Grafica 12** Espectros de Remazol amarillo

## PRODUCTO FINAL

En el segundo espectro se han perdido las señales correspondientes a la doble ligadura N=N, las señales de los esteres y la señal de la cadena azufrada en la molécula de Remazol, por lo que se puede decir en acuerdo con las absorbancias reportadas del espectrofotómetro UV-Vis que la molécula de Remazol ha perdido su propiedad de colorante.

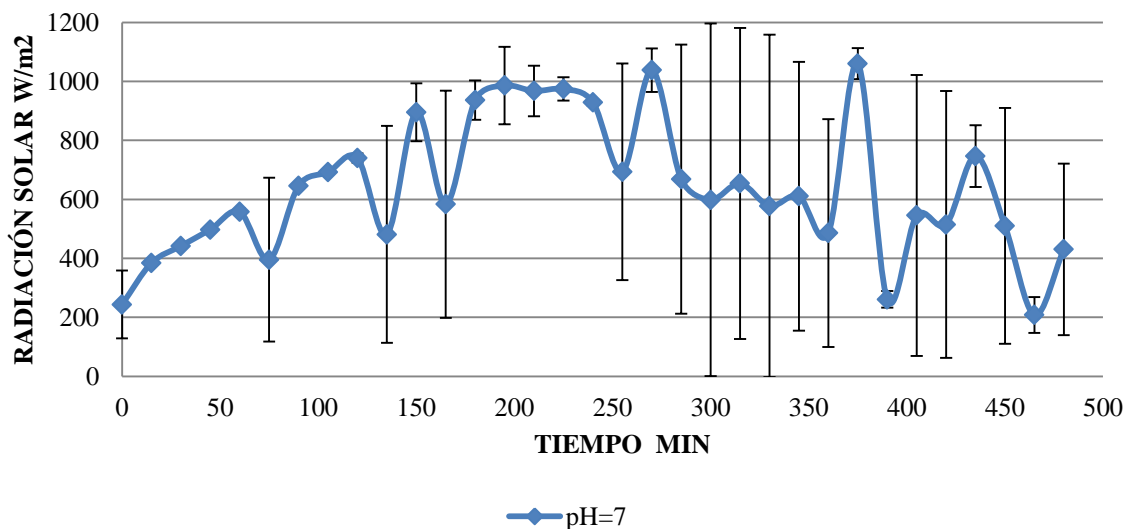


**Grafica 13.** Espectros de analito tratado por oxidación electroquímica

La Normatividad Mexicana en materia de agua residuales Norma Oficial Mexicana **NOM-002-SEMARNAT-1996**, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Norma Oficial Mexicana **NOM-003-SEMARNAT-1997**, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Norma Oficial Mexicana **NOM-001-SEMARNAT-1996**, En estas normas encontramos las especificaciones de las descargas de aguas residuales entre las que vamos a encontrar: DBO, solidos sedimentables, etc. Sin embargo en ninguna de ellas establece los valores de DQO.

### 3.9. ANÁLISIS DE RADIACIÓN SOLAR

Los datos de radiación, solo se tienen para pH 7 y fueron proporcionados por la estación meteorológica de la Universidad Autónoma del Estado de México y se representa en la gráfica 14.



**Gráfica 14** Radiación solar

Se observa en la gráfica 14 existió una gran variación en el comportamiento de la radiación solar, sin embargo esto no afecto la remoción, aunque la eficiencia del sistema es directamente proporcional a la radiación, si se tiene entre un rango de 600 a 1000 W/m<sup>2</sup> se tendrá el porcentaje de remoción del 95%, pero si desciende de 600 a 200w/m<sup>2</sup> se tendrá una remoción inferior de un 70%, como lo muestra la gráfica 6.





Lamentablemente, no se tiene valor de radiación solar del día que se realizó la prueba de pH ácido, para comprobar la variación que se tuvo durante la experimentación, comparada con la prueba corta, en donde presentamos una eficiencia del 90%, y en prueba larga se obtuvo el 80% de remoción. Aunque la densidad de corriente y el voltaje coinciden, hubiera sido conveniente conocer el valor de la radiación solar.



---

## CONCLUSIONES

- Los módulos fotovoltaicos fueron satisfactoriamente eficiente para el proceso, a nivel laboratorio ya que el porcentaje de remoción es superior al 80%
- Se confirmó la efectividad de las celdas de hierro, como lo mencionan otros autores, y estas tienen buen rendimiento en un sistema continuo.
- Para un sistema electrolítico continuo con placas de hierro se obtiene buen rendimiento usando celdas fotovoltaicas como fuente de poder, incluso en día nublado con una eficacia menor pero satisfactoria.
- Se puede tener un % remoción mayor al 80% para un pH ácido de 4, y un % de remoción de casi el 99% para un pH 7, siempre y cuando no baje de 10V.
- Cuando se genera un exceso de hidróxido ferroso (coágulos verdes oscuros) se debe aumentar la cantidad de volumen, caudales e incluso disminuir el número de placas en el sistema.
- Una disminución en la densidad de corriente afecta directamente a la eficiencia de remoción.
- Al aumentar el voltaje se incrementa la intensidad de corriente al cual se le atribuye un incremento de iones hierro, producto de la disolución del ánodo de sacrificio.
- El uso de paneles solares como fuente de energía, en un reactor electroquímico, no afecta la remoción de colorantes.
- Si se tiene un analito básico, el pH se mantiene constante debido a la generación de iones hidronio, producto de la disociación del agua por el paso de energía eléctrica.
- Bajo condiciones pH básicos, no se tiene eficiencia satisfactoria, ya que esta se encuentra entre 40 y 60% de su remoción al color.
- Los espectros muestran la eliminación total de estructuras orgánicas en la molécula, principalmente la del enlace N=N, lo cual concluye que el objetivo principal, sin embargo no se llegó a la mineralización completa.



## **ANEXOS**

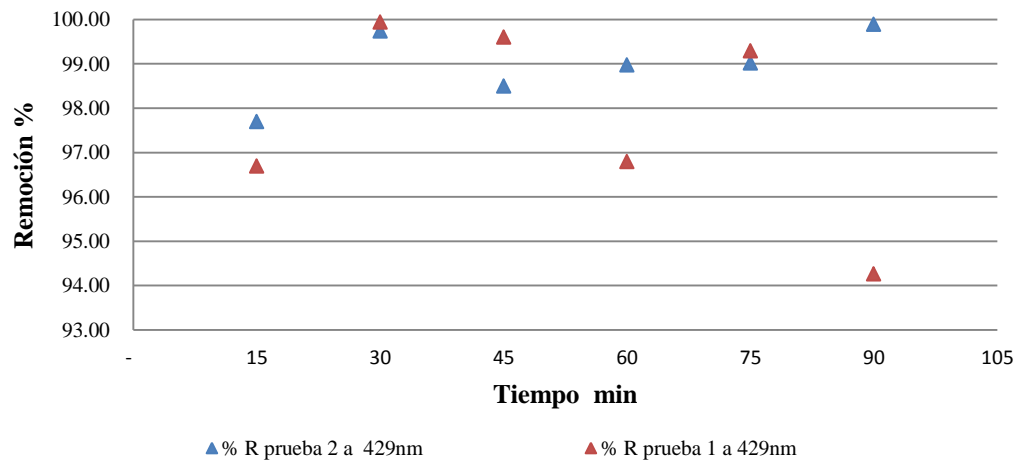
## ANEXO 1. PRUEBA PRELIMINAR CON 24 PLACAS

Para este reactor de 24 placas se manejaron con las siguientes condiciones:

CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Volumen tratado	2000ml	Número de placas: 24
Tiempo de retención	50 min	Separación entre electrodos 1 cm
Tipo de operación	continua	Cátodo: 12 electrodos de Hierro
Flujo de entrada	40 ml/min	Ánodo: 12 electrodos de hierro
Flujo de salida	40 ml/min	pH neutro
Tiempo de operación	120 min	

**Tabla A.1** Condiciones de operación para el reactor con 24 placas

Comportamiento de la remoción usando 24 placas en el reactor, a un pH neutro



**Gráfica A.** Resultados del % de remoción para 24 placas

Las siguientes imágenes muestran la apariencia física de cada muestra obtenida, la coloración que se distingue es la presencia de hidróxido de hierro sedimentado el cual con el papel filtro no llegaba a retener, pero ya sedimentado se volvía a reembarar y su tono es mas translucida.



Como se puede observar se tiene una remoción entre 94-100%, pero se generaba demasiado Hidróxido ferroso en la superficie por lo que se optó por quitar placas, quedando 10 placas; 5 con carga positiva y 5 con carga negativa, así como aumentar el volumen y duplicando el flujo de entrada y de salida.



---

## GLOSARIO

**ANALITO:** Especie química que se analiza

**AUXOCROMOS:** Este grupo por sí solo no produce color a una molécula, sin embargo cuando se encuentra en conjugación con un cromóforo aumenta la intensidad del color, Son los responsables de la fijación al sustrato a teñir

**COAGULACIÓN:** Desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos.

**COLORANTE:** pueden ser definidos como sustancias que cuando son aplicadas a un sustrato, imparten color al sustrato. Los colorantes son retenidos en el sustrato por absorción, retención mecánica, o por un enlace iónico o covalente, los colorantes son usados comúnmente en textiles, papel y piel.

**COLORANTE REACTIVO** son sustancias de estructuras no saturadas, orgánicas solubles en agua se preparan comercialmente para tener uno o dos átomos de cloro que reaccionen con la celulosa formando enlaces covalentes con los grupos nucleofílicos de la fibras cuando los colorantes reactivos son vertidos a los cuerpos de agua producen aminas como consecuencia de la escisión del enlace azo

**CORRIENTE CONTÍNUA, (CC) :** Tipo de flujo de corriente eléctrica en un circuito eléctrico simple. La corriente fluye desde el polo positivo al negativo del generador de voltaje.

**CORRIENTE ALTERNA, (CA):** Describe el tipo de voltaje generado por un generador de corriente alterna. La medida real del voltaje generado indicaría que la cantidad generada varía en el tiempo con una frecuencia uniforme.

**CROMOFORO:** imparten color a la molécula y contienen uno o varios dobles enlaces por lo que estos compuestos tienen electrones resonando a determinada frecuencia y por eso absorben luz y al unirse refuerzan la absorción de radiación.

**CROMOGEN:** Es una estructura aromática que contiene anillos de benceno, nafteno o antraceno

**FLOCULACIÓN:** Aglomeración de partículas desestabilizadas primero en microfloculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos.

**FOTOQUÍMICO:** Estudio de las reacciones químicas y los cambios físicos que resultan de las interacciones entre materia y luz visible y ultravioleta.



**PIGMENTO:** puede ser definido como una partícula sólida que es insoluble en un vehículo líquido en el cual es dispersado. Este imparte color mediante absorción de luz visible

**SURFACTANTE:** También conocidos como tensoactivos o tensioactivos son sustancias que influyen por medio de la en la superficie de contacto entre dos fases

**MINERALIZACION:** Es la degradación completa de un compuesto a sus constituyentes minerales, en donde el carbono orgánico es oxidado hasta  $\text{CO}_2$

**PROPIEDADES ORGANOLEPTICAS:** son todas aquellas descripciones de las características físicas que tiene la materia en general, según las pueden percibir los sentidos, por ejemplo su sabor, textura, olor, color.

**PASIVACIÓN:** Pérdida de reactividad química de un metal bajo ciertas condiciones ambientales. Se debe principalmente a la formación, de capas de óxido protectoras.

**POLIHIDROXIDO:** Presencia de más de 3, hidroxilos

**REACCIÓN ESPONTÁNEA:** Es una reacción que ocurre naturalmente cuando se ponen en contacto los reaccionantes. En la mayoría de los casos, mas n siempre las reacciones espontaneas son exotérmicas, es decir liberan energía a los alrededores.

**REACCIÓN NO ESPONTANEA:** Es una reacción en la cual ocurren cambios en los números de oxidación de átomos de algunas de las sustancias involucradas.

**VOLTAJE:** Diferencia de potencial entre dos electrodos; medida del potencial químico para que tenga lugar una reacción



---

## REFERENCIAS

1. **Adhoum**, Nafaá and **Monser**, Lotfi. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation, In; Chemical Engineering and Processing. Vol. 43, No.10 (oct. 2004); p. 1281- 1287.
2. **Bayramoglu**, Mahmur et al. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. In; Separation and Purification Technology Vol. 37, No. 2 (jun. 2004); p. 117-125.
3. **Blanco** Llorca Alexandra procesos electroquímicos de oxidación Avanzada aplicados a la recuperación de Aguas contaminadas con el colorante azoico Direct yellow - 4.Universidad de Barcelona, pag 13-14, Junio 2012.
4. **Brillas** Erick Mineralization of the biocide chloroxylenol by electrochemical advanced oxidation processes, Laboratori d'Electroquímica dels Materials i del Medi Ambient, Departament de Química Física, Facultat de Química, Universitat de Barcelona, Martí Franque 1-11, 08028 Barcelona, Spain, Dicieembre 2007.
5. **Bolton**, James R; Bircher, Keith G; Tumas, William y Tolman, Chadwick A. 1995. Figures-of-merit for the Technical Development and Application of Advanced oxidation processes. J. Advanced Oxidation Technologies, Vol. 1 No. 1, 1995
6. **Castillo** Ledezma J.H., Desinfección de agua mediante el uso de tecnologías emergentes basadas en procesos de oxidación avanzada, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de las Américas, Puebla, 2010.
7. **Chen**, Xueming, **Chen** Guohua, and **Yur**, Po Lock. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation, In; Chemical Engineering Science. Vol. 57, No. 13 (Jul. 2002); p. 2449-2455.
8. **CNA** Comisión Nacional del Agua, [www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx) 2004
9. **CYTED**. Eliminación de Contaminantes por Catálisis Heterogenea. Texto Colectivo elaborado por la Red CYTED. Capítulo I. 2001
10. **Divagar** Lakshmanan, Dennisa Clifford and Gautam samanta, Ferrous and ferric ion generation during iron electrocoagulation department of civil and environmental engineering, university of houston, houston, texas, 77204-4003, received january 20, 2009. Revised manuscript received march 17, 2009. Accepted march 19, 2009.
11. **Dos Santos** AB, Bisschops IAE & Cervantes FJ (2006b) Closing process water cycles and product recovery in textile industry: perspective for biological treatment. In: Advanced Biological Treatment Processes for Industrial Wastewaters: Principles & Applications. Cervantes FJ, Pavlostathis SG & van Haandel A (eds). IWA Publishing. pp. 298-320.
12. **Fitz Gerald** S.W. and **Bishop** L.P., (1995). Two stage anaerobic/aerobic treatment of sulfonated azo dyes. J. Environ. Sci. A (30):(6), pp 1251-1276.





13. **GE**, Jiantuan et al. New bipolar electrocoagulation, electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. In: Separation and Purification Technology. Vol.36, No. 1(apr. 2004); p.33–39.
14. **Hani**, Rodrinez Mauricio, Utilización de un Sistema hibrido basado en filtración como membranas y electroxidacion avanzada para depurar efluentes complejos, pag. 13-39, Marzo 2009
15. J. Glynn **Henry** y Gary W. **Heinke** Ingeniería ambiental 2da edición, edit Pearson Educacion, 1999
16. **Holt**, Peter , Electrocoagulation: unravelling and synthesizing the mechanisms behind a wather treatment process, Departament of chemical engineering , University of Sydney, 2002, pag. 4- 44,
17. **Juarez**, Manuel Eloy, tesis Tratamiento de efluentes generados por la industria textil aplicando sistemas biotecnológicos, químicos, y electroquímicos, junio 2008, pag. 18-29.
18. **Kirk-Othmer**, Enciclopedia de tecnología química, 1era ed. edit. Hispanoamericana, 1990, pág.: 131-159, 287- 328
19. **Koby**a, Mehmet, **Can** Orham Taner and **Bayramoglu**, Mahmut, Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. In: Journal of Hazardous Materials. Vol. 100, No. 1-3 (Jun. 2003); p. 163-178.
20. **Kumar**, P. Ratna, et al. Removal of arsenic from wáter by electrocoagulation. In: Chemosphere. Vol. 55, No.9 (jun. 2004); p.1245–1252
21. **Levenspiel**, O. (1999) *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley and Sons, New York.
22. **McKay**, G. Industrial pollutansts in use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewater. Ed. CRC Press Inc. Boca Raton, New York, London, 1996. Pag. 31- 38.
23. **Moreno** Héctor, Electrochemical Reactions for Electrocoagulation Using Iron Electrodes Instituto Tecnologico de la Laguna, Department of Chemical Engineering, ZC 27000, Torreon, Coahuila, Mexico,2009.
24. **Rajeshwar**, Krishnan and **IBANEZ**, Jorge. Environmental electrochemistry: Fundamentals and Applications in pollution abatement. San Diego, California: Academic Press limited, 1997. pag. 776
25. **Rosal**, Roberto. 2003. Procesos Avanzados de Oxidación. Universidad de Alcalá.
26. **Takeda**, S., Kanda A., Yamane M., Shibutani, Y., Wakida S. Analysis of colored wastewater and related dyes by micellar electrokinetic choromatography, Analytical Sciences, 2001, pag. 17, 1319-1321
27. **Valdez** Cerecero Mario Agustín, Tratamiento de aguas residuales de una industria de bebidas mediante un proceso acoplado electrocoagulación-electroxidación, septiembre del 2014, pag. 22
28. **Valero** David, Juan Ortiz , electrochemical Wastewater Treatment Directly Powered by Photovoltaic Panels: Electrooxidation of a Dye-Containing wastewater Grupo de



- 
- Electroquímica Aplicada y Electrocatalisis, Departamento de Química, Física, Instituto Universitario de Electroquímica, Universidad de Alicante, Spain , June 4, 2010.
29. **Van der Zee** FP (2002) Anaerobic azo dye reduction. Tesis de grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Wageningen University, The Netherlands, pp. 142.
30. **Yilmaz**, A. Erdem et. Al. The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method- In: Journal of Hazardous Materials, Vol. 125, No. 1-3 (oct. 2005): p. 160-165.
31. **Zinola**, C.F. Electroquímica fundamental. Uruguay: DIRAC, Universidad de la República. CSIC,1999