



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**DEGRADACIÓN ELECTROQUÍMICA DE UN COLORANTE
ARTIFICIAL EN UN REACTOR TIPO BATCH**

TESIS

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

**PRESENTA:
ANGÉLICA GUTIÉRREZ LÓPEZ**

**DIRECTOR:
DR. CARLOS EDUARDO BARRERA DÍAZ**

**ASESOR:
DRA. GABRIELA ROA MORALES**



TOLUCA, MÉXICO

NOVIEMBRE, 2013

ÍNDICE GENERAL

Resumen	7
Introducción	9
CAPÍTULO I.- El agua	12
Contaminación del agua	12
Aguas residuales.....	13
Tipos de contaminación.....	13
Depuración de aguas.....	14
Parámetros de la calidad del agua	14
Parámetros físicos.....	15
Parámetros químicos.....	15
Parámetros biológicos.....	16
Demanda química de oxígeno (DQO).....	16
CAPÍTULO II.- Generalidades de los procesos electroquímicos	17
Electroquímica.....	19
Reacciones de oxidación-reducción (reac. redox).....	20
Celda electroquímica.....	21
Electrolitos.....	23
Electrocoagulación.....	24
Constitución y construcción de un reactor electroquímico.....	27
Electrolito soporte	28
Mecanismo de funcionamiento en el reactor.....	31
Leyes de Faraday relativas a la electrolisis.....	32
Velocidad de las reacciones electroquímicas	33
Hipótesis.....	35
Objetivos.....	35
CAPÍTULO III.- Metodología	36
Materiales.....	38
Reactivos.....	38
Parámetros de control.....	39
Caracterización fisicoquímica del agua sintética	39
Curva de calibración	39
Diseño y construcción de la celda electrolítica	40
Pruebas realizadas en el tratamiento	43
Evaluación de pH	43

Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)	43
CAPÍTULO IV.- Resultados y discusión	45
Espectros de absorción de Azul.....	45
Determinación de las condiciones óptimas del tratamiento	47
Tratamiento A en ambos reactores (reactor 1: aluminio y reactor 2: hierro)	47
Tratamientos B y C en el reactor 1 (electrodos de aluminio).....	48
Tratamientos B y C en el reactor 1 (electrodos de hierro).....	53
Pruebas adicionales realizadas a partir de las condiciones óptimas del tratamiento de este trabajo.....	59
Demanda química de oxígeno en el reactor más eficiente.....	59
Tratamiento electroquímico para la mezcla de colorantes	61
Conclusiones.....	66
Referencias.....	67
Anexos.....	70
Leyes de Faraday.....	71
Espectrofotometría.....	73

INDICE DE FIGURAS

- FIGURA 1 Esquema básico de un celda electroquímica
- FIGURA 2 Celda con electrodos de aluminio y hierro que con agua solamente a) y luego de someterla a una determinada corriente provoca un precipitado de color café b)
- FIGURA 3 Mecanismo en el reactor electroquímico
- FIGURA 4 Preparación de catalizadores
- FIGURA 5 Reactor conectado a la fuente de poder, vista de los electrodos y distancia entre ellos.
- FIGURA 6 Vista de las placas de hierro por la que pasa la corriente eléctrica.
- FIGURA 7 Velocidad de una reacción $A \rightarrow B$
- FIGURA 8 Metodología utilizada para el tratamiento
- FIGURA 9 Dimensiones de las placas de aluminio para la celda de tratamiento
- FIGURA 10 Disposición de las placas de aluminio en la celda de tratamiento
- FIGURA 11 Dimensiones de las placas de hierro para la celda de tratamiento
- FIGURA 12 Disposición de las placas de hierro en la celda de tratamiento
- FIGURA 13 Procedimiento de uso del equipo HACH en el tratamiento de agua residual
- FIGURA 14 Espectro de absorción del colorante comestible azul
- FIGURA 15 Curva de calibración del colorante azul
- FIGURA 16 Resultados de las pruebas utilizadas para determinar la intensidad de corriente más eficiente para ambos reactores (Reactor 1 con electrodos de aluminio, Reactor 2 con electrodos de hierro)
- FIGURA 17 Diagrama de distribución de especies para el aluminio considerando 0.12 M de Al^{3+}
- FIGURA 18 Gráfica del tratamiento realizado sin electrolito y con electrolito a 2 A y pH 7, en el reactor de electrodos de aluminio.
- FIGURA 19 Resultados del tratamiento C aplicado en el reactor 1
- FIGURA 20 Gráfica del tratamiento realizado con electrolito y sin electrolito a 2 A y pH 7, en el reactor de electrodos de hierro.
- FIGURA 21 Espectro de absorción del colorante comestible azul durante el tratamiento de electrocoagulación con electrodos de hierro.
- FIGURA 22 Diagrama de distribución de especies para el hierro considerando 0.018M Fe^{+2} .
- FIGURA 23 Diagrama de distribución de especies para el aluminio considerando 0.018M de Fe^{3+}

- FIGURA 24 Resultados del tratamiento C aplicado en el reactor 2
- FIGURA 25 Gráfica de resultados obtenidos en pruebas realizadas luego de la optimización del tratamiento midiendo DQO
- FIGURA 26 Promedio de resultados que se obtuvieron en la determinación de DQO a condiciones óptimas de tratamiento.
- FIGURA 27 Gráfica de la cinética que sigue el tratamiento de electrocoagulación en la remoción del colorante azul.
- FIGURA 28 Espectro de absorción de los colorantes comestibles azul, amarillo y verde.
- FIGURA 29 Gráficos de absorbancia en función de la concentración del colorante a) azul y b) amarillo.
- FIGURA 30 Gráfico de concentración de colorante en función del tiempo para el tratamiento electroquímico aplicando una intensidad de corriente de 4A sin adición de peróxido.
- FIGURA 31 Gráfico de concentración de colorante en función del tiempo para el tratamiento electroquímico aplicando una intensidad de corriente de 4 A, adicionando peróxido de hidrógeno.

INDICE DE TABLAS

TABLA 1	Parámetros físicos del agua utilizados en el control de procesos
TABLA 2	Parámetros biológicos del agua utilizados en el control de procesos
TABLA 3	Tratamientos de aguas por métodos electroquímicos
TABLA 4	Materiales utilizados y sus características
TABLA 5	Reactivos utilizados y sus características
TABLA 6	Resumen de parámetros fisicoquímicos del agua sintética
TABLA 7	Fórmulas para el cálculo de la densidad de corriente de los electrodos
TABLA 8	Condiciones óptimas para eliminar el color artificial presente en el agua sintética.
TABLA 9	Resultados de la remoción de color para cada una de las pruebas, después de un tiempo de 60 minutos de electrocoagulación.
TABLA 10	Velocidad de disolución de los metales basada en las leyes de Faraday.
TABLA 11	Volumen de material (cm^3/s) eliminado al pasar una intensidad constante

RESUMEN

La crisis ambiental sin duda es uno de los retos más importante que enfrenta la sociedad actualmente, por lo que la educación ambiental para el desarrollo sustentable se convierte en un eje fundamental para revertir el deterioro ambiental.(SEMARNAT 2011)

El país presenta un desequilibrio entre la disponibilidad hídrica y demanda, existen cuencas donde se utiliza un bajo porcentaje del agua total disponible, y la otra se utiliza más del 100%.

Hasta el 2010 a nivel nacional se colectan mediante los sistemas de alcantarillado el 89.9% de aguas residuales generadas y reciben tratamiento el 43.4% de las aguas residuales colectadas, al 2012 lo anterior se incrementa al 60%.(SEMARNAT 2011)

En este escenario, el principal problema de calidad del agua en el país la falta de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales debido a los altos costos de los métodos convencionales.

La elevada concentración de materia orgánica del agua residual de la industria alimenticia representa un gran problema ambiental. El establecimiento de regulaciones más estrictas en relación al tratamiento de aguas residuales, esto ha sido de gran interés en la investigación de nuevas tecnologías y procedimientos para la descontaminación del agua. (Roa, 2007)

En este trabajo se presenta una propuesta para el tratamiento de agua sintética particularmente utilizando colorantes de la industria alimenticia. Esta propuesta se basa en las Técnicas o Procesos Electroquímicos las cuales brindan una gran utilidad para el tratamiento de aguas residuales industriales y compiten eficientemente con los tratamientos convencionales. (Roa, 2007)

Para comprobar en general la viabilidad del tratamiento mediante un proceso electroquímico se realizaron dos pruebas en diferentes reactores, el primero con electrodos de aluminio y el segundo con electrodos de hierro. Se efectuaron ensayos para determinar la intensidad de corriente a utilizar, así como el pH, al igual que la distancia entre electrodos y el área de contacto total en el reactor.

Con el uso del reactor tipo batch de electrodos de aluminio se obtiene una remoción del 15.6% del color presente en el agua en un tiempo de 15 minutos, lo que no indica un buen resultado

comparado con lo que se obtiene posteriormente con el reactor de electrodos de hierro como se muestra en las siguientes líneas.

Se obtiene una remoción del 99.9% de color presente en el agua, un 99.9% de Demanda Química de Oxígeno (DQO), utilizando un reactor electroquímico tipo batch de 500mL de capacidad con electrodos de hierro.

Una vez que se muestran resultados favorables al tener una eficiencia de 99.9% en la remoción del colorante en el reactor de electrodos de hierro, se efectúa una aplicación de dicho tratamiento a una mezcla de colorantes.

Se realizaron pruebas con intensidades de corriente de 2 y 4 A, y con adición de peróxido de hidrógeno en uno de las pruebas, lo cual da como resultados una eficiencia mayor a 4A de intensidad de corriente y sin la adición de peróxido, donde se observó alrededor de un 96% de remoción de color azul y de un 93% aproximadamente para el color amarillo.

Por lo que este tratamiento de electrocoagulación en un reactor electroquímico es una técnica útil para remover satisfactoriamente el color en el agua sintética con colorantes de la industria alimentaria.

INTRODUCCIÓN

Una de las mayores necesidades de la sociedad moderna es el de disponer abundante agua para las actividades cotidianas y el consumo; ante el aumento constante de la población, la enorme expansión de la industria y la falta de protección al ambiente, la disponibilidad de agua en el planeta ha ido disminuyendo porque la mayor parte de esta se encuentra contaminada. Del total de agua disponible en ríos y pozos de la República Mexicana, el 85% es para uso agrícola, 5% para uso doméstico, 5% para uso industrial y el 2% consumimos. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

El agua se considerada el disolvente universal por lo que todo lo que tenga contacto con ella podrá contaminarla o afectarla de alguna manera, es una sustancia altamente reactiva con propiedades poco usuales y muy diferentes física y químicamente de otros líquidos, propiedades físicas tales como densidad, punto de ebullición, punto de fusión, tensión superficial, transparencia, olor, color y sabor. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

La calidad del agua se determina a partir de análisis químicos, físicos y bacteriológicos, éstos puede variar desde análisis sencillos donde se determinan los principales elementos hasta análisis más complejos donde se determinan gran variedad de especies presentes en agua. El deterioro de la calidad es consecuencia directa del vertido sin previo tratamiento de las aguas residuales municipales, agrícolas e industriales que contienen grandes cantidades de sustancias contaminantes que afectarán los cuerpos de agua dependiendo del origen de las aguas, el tipo de contaminantes y los volúmenes descargados. (PROY-NMX-AA-003SCFI-2006)

El sector alimenticio produce una gran cantidad de aguas residuales con altas concentraciones de compuestos orgánicos tales como azúcares, carbohidratos y productos fermentados, que no son eliminados totalmente por tratamientos fisicoquímicos previos como la coagulación – floculación y sedimentación, o por procesos biológicos.

Por otro lado, se ha probado que las técnicas electroquímicas representan una manera eficiente de remover los contaminantes orgánicos además de ser métodos amistosos ambientalmente que otros métodos químicos usados en el tratamiento de agua residual. (Carbajal, et. al. 2012)

Una de las características del agua residual y que representa un problema es el color, y es objeto de grandes esfuerzos en mejorar las tecnologías de tratamiento, la coloración en las descargas de agua no es solo de la industria textil sino también se produce en otras operaciones

industriales como la absorción de café. La elevada concentración de color y la turbiedad de los efluentes de aguas residuales son particularmente alarmantes ya que tienen un efecto visual negativo. (Barrera, et. al. 2002)

Se puede considerar como agua potable a aquélla cuyo uso y consumo no causa efectos nocivos al ser humano ya que cumple con el reglamento oficial, mientras que el agua purificada es sometida a procesos físicos y químicos y se considera óptima para el consumo humano su ingestión no causa daños a la salud, y cumple con los requisitos de las Normas Oficiales Mexicanas. (SEMARNAT, 2006)

Los desafíos del agua son grandes y complejos, pero superables, si actuamos con determinación y unidad y si el esfuerzo se despliega de forma consistente y continuada. Tenemos que sumar voluntades, capacidades y recursos. Tenemos que cambiar nuestro modo tradicional de relacionarnos con el agua; no podemos seguirla viendo como un recurso inagotable, sino como un bien escaso y costoso que es necesario manejar responsablemente para nuestro beneficio y para el de las futuras generaciones. (CNA, 2011)

En esta investigación se presenta una propuesta novedosa para el tratamiento de aguas que contengan colorantes de la industria alimentaria, la idea es realizar un tratamiento del agua sintética utilizando un colorante de alimentos (azul), determinar las mejores condiciones de eliminación y posteriormente aplicarlo a una mezcla de colorantes azul y amarillo incrementando en este caso la concentración inicial de la mezcla para verificar si el tratamiento es eficiente también para este otro color o mezcla de colores .

Se muestran además los fundamentos teóricos, así como el resumen de la experimentación realizada para obtener agua con DQO del 0.01% a partir de agua sintética la cual contiene agua potable y una determinada concentración de colorante alimenticio.

Los objetivos principales son aplicar los fundamentos de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) en el desarrollo de una metodología para remover color de agua con colorante alimenticio así como comprobar que la técnica desarrollada es más eficiente respecto a los tratamientos convencionales de aguas residuales y que además se puede acoplar a éstos.

En el capítulo I se desarrolla la importancia y cantidades de agua presentes en el planeta, así como la contaminación y el origen de ésta, además se menciona brevemente lo que son las

aguas residuales, sus características y cómo es posible depurarlas consiguiendo la calidad requerida.

En el capítulo II se presentan de manera general los conceptos de los procesos electroquímicos, electroquímica y lo referente a las celdas electroquímicas, incluyendo algunas normas implicadas en la propuesta de este proyecto.

En el capítulo III se expone la metodología y fundamentos para el diseño de los experimentos que corresponden al presente trabajo de tesis.

Finalmente en el capítulo IV se muestran los resultados obtenidos en la fase del trabajo experimental los cuales se discuten y se formulan conclusiones que permiten afirmar la hipótesis planteada así como cumplir los objetivos propuestos en la degradación electroquímica del colorante alimenticio.

En los anexos podremos apreciar los fundamentos correspondientes a la espectrofotometría y leyes de Faraday.

CAPÍTULO I

El Agua

La vida comenzó en el agua, al volverse más complejas y especializadas las cosas vivas, abandonaron el mar y se asentaron en la Tierra tomando el agua como componente principal de sus cuerpos, el agua es vida. La molécula del agua no explica por sí misma las propiedades extraordinarias que resultan de su arreglo molecular.

Las tres cuartas partes de la superficie terrestre se encuentran cubiertas de aguas, sin embargo de la cual el 97.2 % de encuentra en océanos y mares, 2.15% en hielos y glaciares, 0.62% son aguas subterráneas, 0.017%, está en lagos y ríos, 0.001% en la atmósfera y 0.0001% en los seres vivos. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

El agua ha sufrido una migración constante en la superficie de la Tierra desde tiempo inmemorial. Las abundantes fuentes de agua llevaron a los colonizadores a ubicarse al lado de ríos. Las cataratas se volvieron las fuentes principales de potencia en la antigua industria. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

Contaminación del agua

La contaminación del agua es la incorporación de materias extrañas a ésta, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y de otros tipos, o aguas residuales; dichas materias extrañas deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos que se pretendan. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

El agua contiene sustancias químicas, físicas y biológicas disueltas o suspendidas en ella, además de organismo vivos que reaccionan con sus elementos físicos y químicos.

El color, la espuma y el calor son contaminantes que causan problemas a la calidad del agua ya no son objetables por razones estéticas, también limitan la penetración de la luz y pueden reducir los niveles de oxígeno disuelto, lo cual altera el equilibrio ecológico natural del agua. (Glynn, and Heinke, 1999)

Además está demostrado que la introducción de contaminantes en las fuentes acuíferas está relacionada con la lluvia, la naturaleza geológica del manto acuífero, así como las actividades de la naturaleza y la actividad humana. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

Aguas residuales

Son las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas. (PROY-NMX-AA-003-SCFI-2006)

Las aguas residuales de acuerdo a la NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado o municipal, se definen como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicio, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Tipos de contaminación

Se puede clasificar la contaminación del agua de diferentes maneras pero en este caso se consideran las más generales y son dos tipos de contaminación, la natural y la artificial.

Contaminación natural: es la que existe siempre originada por restos de animales y vegetales y por minerales y sustancias que se disuelven cuando los cuerpos de agua atraviesan los diferentes terrenos.

Contaminación artificial: ésta va apareciendo a medida que el ser humano interactúa con el ambiente (contaminación antropogénica) y surge con la inadecuada aglomeración de las poblaciones y como consecuencia del crecimiento desmesurado y sin control alguno de industrias, desarrollo y progreso. Es gravísima, ya que al ser utilizada para lavado, enfriamiento de equipos, refrigeración y diversos procesos industriales etcétera, el agua regresa a su ciclo con altos niveles de contaminación.

Los efectos de la contaminación del agua afectan ambiente y consecuentemente al ser humano, debido a que el ser humano la utiliza para sus diversas actividades contaminándola sin tener conciencia de la importancia de tratarla adecuadamente para volverla a utilizar, esta situación

ha ocasionado que la cantidad de agua dulce en el planeta vaya disminuyendo al pasar los días. (Gutiérrez, 2007)

Depuración de aguas

Es el nombre que se le da a los distintos procesos implicados en la extracción tratamiento y control sanitario de los productos de desecho que son arrastrados por el agua y procedentes de viviendas e industrias.

En el tratamiento de aguas residuales tradicionalmente se tiene un tren de tratamiento en el cual se reduce la carga de contaminantes del vertido y convertirlo en inocuo para el ambiente.

Parámetros de la calidad de las aguas

Las descargas de agua industrial, de servicios o comercios, deben cumplir con una serie de parámetros de acuerdo a la normatividad del lugar donde se realice ésta. Una de las pruebas más importantes de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual se encontró que es muy utilizada para evaluar procesos fisicoquímicos de tratamiento de aguas (Gutiérrez, 2007) esto debido a que es una prueba rápida (de 2.5 a 3 horas) sencilla y económica.

Algunos de estos parámetros se utilizan en el control de procesos de tratamiento realizando mediciones de forma continua y discreta; se pueden clasificar en cuatro grupos: físicos, químicos, biológicos y radiológicos. (Lapeña, 1999)

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor. (NOM-127-SSA1-1994)

Parámetros físicos

La Tabla 1 muestra la descripción de lo que son los parámetros físicos que se consideran para la calidad del agua.

TABLA 1.- Parámetros físicos del agua utilizados en el control de procesos (Lapeña, 1999)

Parámetro	Descripción
Sabor y olor	Son determinaciones organolépticas de determinación subjetiva, para las cuales no existen instrumentos de observación y medición.
Color	Es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible, no se le atribuye ningún constituyente exclusivo, aunque ciertos colores en aguas indican la presencia de ciertos contaminantes, por ejemplo el color amarillento inducidos por materiales orgánicos como los ácidos húmicos, la presencia de hierro puede darle un color rojizo.
Turbidez	Es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos que presentan generalmente las aguas superficiales son difíciles de decantar o filtrar.
Conductividad y resistividad	La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad, por lo tanto es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua, proviene de un ácido, una base o una sal disociada en iones. La temperatura modifica mucho la conductividad de una solución. La resistividad es la medida recíproca de la conductividad

Parámetros químicos

Dureza, pH, alcalinidad, coloides, acidez mineral, sólidos disueltos, sólidos en suspensión, sólidos totales, residuo seco, cloruros, sulfatos, nitratos, fosfatos, fluoruros, sílice, bicarbonatos y carbonatos, otros componentes aniónicos, sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, metales tóxicos, gases disueltos, (Lapeña,1999)

Parámetros biológicos

La Tabla 2 muestra los parámetros biológicos utilizados para el control de procesos y determinar la calidad del agua.

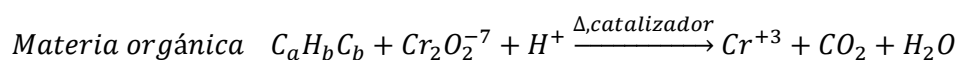
TABLA 2.- Parámetros biológicos del agua utilizados en el control de procesos (Lapeña,1999)

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Se obtiene mediante una prueba empírica estándar y mide la cantidad de oxígeno utilizado para la biodegradación de materia orgánica e inorgánica contenida en una muestra, la prueba usa tiempo fijo de incubación, en un período 5 días (DBO5) es la más empleada. Puede medirse el oxígeno hasta que no haya modificación alguna en la concentración de éste, lo que puede tomar 30 y 90 días de incubación (DBO última). Se determina el oxígeno disuelto al inicio y al final del tiempo de incubación preestablecido, la DBO es la diferencia entre la concentración inicial y final del oxígeno.
Carbón Orgánico Total	Es una medida del contenido de materia orgánica del agua, especialmente aplicable a pequeñas concentraciones; el carbón orgánico se oxida a CO2 en presencia de un catalizador y se mide en un analizador infrarrojo.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es la medida del oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación contenida en una muestra, su determinación se basa en la oxidación energética de la materia orgánica e inorgánica que se encuentra en el agua, en un medio fuertemente ácido con una solución valorada de dicromato de potasio. Los valores de éste parámetro se asocian al grado de avance de oxidación de los contaminantes por lo que la determinación seriada de la DQO es una herramienta útil de seguimiento del proceso.

La reacción principal sin balancear para este proceso es la siguiente:



CAPÍTULO II

Generalidades de los procesos electroquímicos

La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de aguas contaminadas de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado al desarrollo de nuevas tecnologías de purificación.

La aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar. Las aguas contaminadas por la actividad humana generalmente pueden tratarse eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, etc.)

Sin embargo en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por la ley o el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos es posible utilizar un proceso electroquímico el cual actualmente es muy poco aplicado y difundido. (Curso- taller, CIRA, 2005)

Actualmente los tratamientos de agua residual requieren adaptarse a la legislación vigente, los métodos electroquímicos resultan una interesante opción al observar las reacciones simultáneas que ocurren mientras se realizan dicho métodos.

En México, la calidad de las aguas residuales que pueden ser vertidas a los diferentes cuerpos de agua está reglamentada por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). A continuación se explica de manera breve el contenido de cada una de ellas:

- NOM-001-SEMARNAT-1996: Trata de los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996: Trata de los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1996: Trata de los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicio al público.

Principios similares son usados para remover contaminantes de diferente naturaleza usando algunas técnicas como se muestra en la Tabla 3:

TABLA 3.- Tratamientos de aguas por métodos electroquímicos (Barrera, 2003)

TÉCNICA	PRINCIPIO
Electrodiálisis	Emplea bajas corrientes eléctricas como agente limpiador. Buen removedor de flujos de iones metálicos así como componentes orgánicos, y algunos que contienen contaminantes sólidos.
Electrocoagulación	El proceso electroquímico genera numerosos flocs que permiten alcanzar alta eficiencia en la limpieza del agua residual.
Electro-ósmosis	La electricidad es aplicada para dirigir la migración de los iones disueltos en el agua, forzándolos a moverse a través de los capilares.

La mayoría de los procesos electroquímicos pueden aplicarse a la remediación y desintoxicación de aguas especiales a pequeña y mediana escala, los métodos pueden usar se solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados a contaminantes de aire y suelos además permiten la desinfección por inactivación de bacterias y virus. (Barrera, 2003; Koene and Janssen, 2002)

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

Otra alternativa con los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs) que consiste en generar el radical hidroxilo (OH^{\bullet}) que por tener un alto potencial redox degrada o mineraliza materia orgánica refractaria. (HOLT, 2006)

Muchos son los estudios que comprueban la eficiencia de los métodos electroquímicos y Procesos de Oxidación Avanzados (PAOs). (Brillas, et.al., 2003; Spyrkowicz, et. al., 2000; Giomo, et. al., 2000; Bandala, et. al.2002)

Las ventajas de los procesos electroquímicos son:

- No solo cambian la fase del contaminante, sino que lo transforman químicamente.
- Generalmente se consigue la mineralización completa del contaminante.
- Usualmente se controla la generación lodos o en ocasiones no hay presencia de éstos.
- Muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento.

- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (ppb).
- No se forman subproductos de reacción o se forman en baja concentración.
- Ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por tratamientos alternativos.
- Mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- Consumen menor energía que otros métodos.
- Permiten transformar contaminantes refractarios en productos disponibles para aplicar un método más económicos como el tratamiento biológico.
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.
- Se considera un proceso que ayuda a la desinfección.

La tecnología electroquímica contribuye de muchas formas a la purificación del ambiente y cubre un amplio rango de tecnología. Por ejemplo, la generación de energía usando baterías, celdas electroquímicas, remoción de impurezas de procesos líquidos, aire y tierra, reciclando las corrientes de los procesos y los sensores. La electroquímica ambiental abarca técnicas o métodos que remueven impurezas para prevenir o minimizar la contaminación ambiental; particularmente emisión a la atmósfera, descargas contaminantes en aguas y disposición de sólidos en suelos.

Para comprender adecuadamente los procesos de electroquímica a continuación se presentan algunos fundamentos.

Electroquímica

Durante la década pasada, algunos investigadores se han dado a la búsqueda de mejores tecnologías aplicables en el tratamiento de aguas residuales, es así como las técnicas electroquímicas han ganado especial atención, sobre todo en los países desarrollados. (Aplin and Waite, 1998; Ibañez et. al., 1998; Mollah, 2001; Can et.al, 2003)

Éstas se han aplicado para la remoción de grandes cantidades de sustancias fundamentalmente orgánicas e inorgánicas, ya que las reacciones involucradas, facilitan la oxidación de los contaminantes y permiten el eficaz aprovechamiento de la energía puesto que se puede controlar adecuadamente la cantidad que se necesita añadir al sistema lo que resulta en una menor cantidad de lodos producidos. Una ventaja adicional a lo anterior, es que este tipo de metodologías tienen también cuantiosos efectos bactericidas. (Rajeshwar et.al., 1994; Brillas and Casado, 2002)

Es el estudio de las relaciones entre la electricidad y las reacciones químicas, es decir es la rama de la química que estudia los cambios químicos que produce una corriente eléctrica y la generación de electricidad mediante reacciones químicas. (Brown and Lemay, 2004)

Los procesos electroquímicos son reacciones redox (reacciones de oxidación-reducción) donde la energía liberada por una reacción espontánea se transmite en forma de electricidad, o bien; la electricidad se utiliza para inducir una reacción química no espontánea a lo cual se le conoce como electrólisis. (Chang, 1998)

Antes de abordar las tecnologías electroquímicas, es necesario explicar de manera general en qué consisten los cambios químicos de oxidación-reducción, para que de este modo sea más fácil la comprensión de las reacciones que ocurren en las aguas residuales que son sometidas a este tipo de tratamientos.

Reacciones de oxidación reducción (reacción redox)

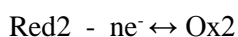
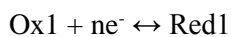
Son las reacciones en las que un material se oxida y otro se reduce, con un cambio neto de cero en el balance eléctrico del sistema debido a que hay el mismo número de cargas negativas y positivas. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

En toda reacción redox debe haber una especie química que se oxide y otra que se reduzca, decir; si una sustancia que pierde electrones se oxida y la que gana electrones se reduce. La sustancia que hace posible que otra sustancia se oxide es el agente oxidante y este entonces se reduce, por el contrario, un agente reductor es una sustancia que cede electrones y entonces se oxida. (Brown and Lemay, 2004)

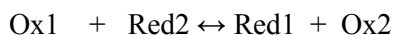
Sea cual fuere el proceso redox (donde la energía liberada por la reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aproveche para provocar un cambio no espontáneo), se presenta una modificación en el estado de oxidación de las especies involucradas. (Kiely, 1999)

Especie Oxidada + ne^- ↔ Especie Reducida

Donde ne^- representa la transferencia de “n” unidades de carga “e⁻”, de tal modo que un sistema completo de oxidación-reducción, está formado por un par de semirreacciones individuales:



Por lo tanto la reacción completa es:



En electroquímica es importante resaltar que las reacciones en una celda las cuales son llamadas semirreacciones por lo que se explica en el siguiente texto.

Celda electroquímica

Es un dispositivo que posee dos electrodos sumergidos en una solución electrolítica apropiada, su aplicación más común es la galvanotecnia y también es usada en los procesos electroquímicos. La Figura 1 muestra un esquema básico de una celda electroquímica. (Molera, 1989)

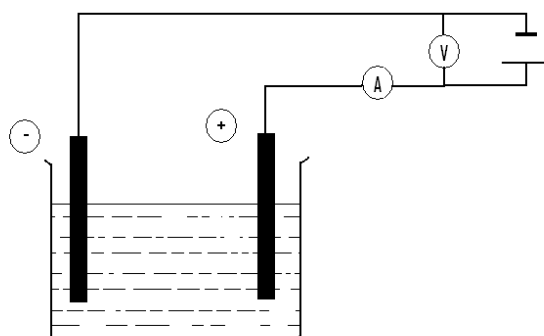


Figura1. - Esquema básico de una celda electroquímica. (Molera, 1989)

Con su utilización, se persigue maximizar el transporte de masa desde las especies electroactivas hasta la superficie tanto del cátodo como del ánodo. Básicamente consisten de un contenedor para la solución conductora (llamada celda), los electrodos y las conexiones externas entre éstos y la fuente de poder o potenciómetro.

Muchas características de una celda electroquímica se pueden explicar en función de si la reacción química es o no espontánea y de los requerimientos de conducción de electrones a través del circuito, en donde es necesario evitar la acumulación de carga en cualquier punto del sistema.

Es importante recordar que los electrodos al ser metálicos poseen la característica de ser buenos conductores de calor y electricidad, presentan el efecto fotoeléctrico que consiste en la emisión de electrones cuando son sometidos a la radiación de una determinada energía y; de acuerdo a la Teoría del mar de electrones los electrones se mueven con libertad por todo el metal entre los iones positivos, lo que les da una alta conductividad eléctrica al aplicarles un potencial eléctrico. Lo anterior ocasiona que puedan combinarse uniéndose a especies inestables que posean carga positiva y con ello el desgaste de las placas del electrodo. En la Figura 2 se muestra una celda con electrodos de hierro y aluminio, primero con agua del grifo y luego de un tiempo de aplicarle corriente se forma un precipitado de color café, dado que existe una reacción la cual es promovida por la presencia de iones en el agua.

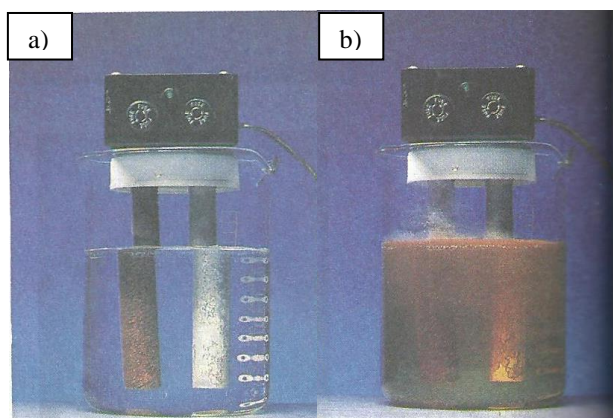


Figura 2. Celda con electrodos de aluminio y hierro que con agua solamente a) y luego de someterla a una determinada corriente provoca un precipitado de color café b) (Chang, 2006)

De acuerdo con ello existen dos tipos de dispositivos electroquímicos, los cuales son:

Celdas galvánicas: en éstas se da la transformación de energía obtenida durante una reacción química a energía eléctrica, con el consiguiente movimiento de los electrones.

Celdas electrolíticas: son las más empleadas en estudios electroanalíticos, su funcionamiento se basa en la transformación de energía eléctrica a energía química, cuando la primera se aporta por medio de un generador de voltaje externo a través de una diferencia de potencial. (Núñez and Peláez, 1997)

Para ambos casos, resulta importante considerar las cargas en los electrodos: en el ánodo de una celda galvánica (donde la oxidación es espontánea) hay un exceso de e^- , contrariamente en una celda electrolítica (en la cual el proceso de oxidación es forzado) existe una pequeña cantidad de e^- y por ende, carga positiva, de tal manera que los signos se invierten.

Independientemente del tipo de celda electroquímica de la que se trate, la interfase cátodo y/o ánodo-electrolito es el componente más importante, ya que funciona como vínculo entre el conductor electrónico (electrodo) y el iónico (electrolito). Al mismo tiempo sirve para completar el circuito eléctrico limitando sus propiedades la respuesta de la celda y su función como sensor analítico. (Brett y Oliveira, 1994)

Electrolitos

Es posible clasificar a los solutos según si existen o no como iones en disoluciones acuosas, los que se encuentran como iones en las soluciones acuosas se denominan electrolitos, por ejemplo el cloruro de sodio tiene iones de Na y Cl⁻, esta sustancia se disuelve en agua para formar los iones hidratados de Na⁺ y Cl⁻ y se dice que los compuestos que se ionizan (o disocian) por completo en el agua son electrolitos fuertes. La mayoría de las sales son electrolitos fuertes, algunos metales pesados forman electrolitos débiles, la mayoría de los ácidos son electrolitos débiles. (Brown and Lemay, 2004)

Se le conoce así a las soluciones iónicas, y esta existen cuando el agua disuelve a un mineral, lo que sucede es que el mineral sufre una ruptura en forma de aniones y cationes con carga negativa y carga positiva respectivamente. Dichos iones le dan al agua la capacidad de conducir la electricidad, ya que si se sumergen dos electrodos en la solución electrolítica y se aplica una corriente continua entonces habrá conducción de electricidad por la forma en que se comportan los iones en solución. (Kemmer and Mc Callion, 1997)

Cuando ambos sistemas electroquímicos se acoplan, un electrodo suministra los electrones y el otro los admite. Mediante la variación del potencial aplicado a través de la fuente externa, se puede controlar de manera precisa la proporción en la cual las cargas eléctricas son intercambiadas. Esto puede ocurrir a través de dos diferentes mecanismos mediante una transferencia forzada (situación que se presenta en las celdas electrolíticas) o de manera natural como sucede en las baterías y celdas galvánicas. (Pletcher, 1991; Crow, 1994; Chang, 1999)

Con estos conceptos es más fácil explicar los procesos electroquímicos que suceden en una celda de electrolisis como la electrocoagulación que se presenta a continuación.

Electrocoagulación

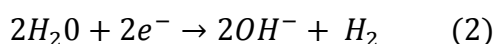
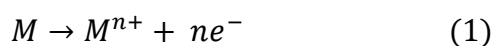
En esencia la electrocoagulación es un método electroquímico que involucra la generación de coagulantes in situ por disolución eléctrica de los iones Al^{3+} o Fe^{2+} de sus respectivos electrodos. La generación de los iones metálicos toma lugar en el ánodo, mientras que en el cátodo se lleva a cabo la liberación de hidrógeno. El gas hidrógeno liberado podría ayudar a la flotación de los flóculos fuera del agua, este proceso es llamado electroflotación. (Chen, 2004; Holt, et. al. 2005)

La corriente eléctrica suministrada proporciona al sistema la fuerza electromotriz (FEM) que desencadena una serie de reacciones que buscan desestabilizar las moléculas contaminantes, produciendo partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Esto ocurre cuando los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. (Lai and Lin., 2004; Holt, et. al. 2006)

El proceso de electrocoagulación es utilizado en la remoción de contaminantes de diversos orígenes, tales como la industria de la galvanoplastia, industria del papel, industria metalúrgica en la eliminación de trazas de plomo, cromo, mercurio y arsénico, de igual manera es utilizado en la remoción de grasas y aceites provenientes de la industria petroquímica, efluentes de la industria textil y alimentaria y finalmente en los últimos años ha sido utilizada para la remoción de contaminantes en aguas de consumo humano. (Mollah et. al., 2001)

La electrocoagulación presenta una novedad y una alternativa innovadora en la cual existe un sacrificio del metal en el ánodo. Esta es la mayor ventaja de proveer cationes activos requeridos para la coagulación, sin un incremento de salinidad en el agua.

Electrocoagulación involucra la oxidación del metal del ánodo con la formación simultánea de iones hidroxil y la formación de hidrógeno gaseoso en el cátodo. La electrocoagulación ha sido propuesta como un método de tratamiento de aguas. En 1909 en los Estados Unidos, J. T Harries recibió la patente por tratamiento de aguas residuales por medio de la electrólisis con el empleo de ánodos de hierro y aluminio (ecuación 1 y 2).



Matteson describe en los 40's el "Coagulador Electrónico" con disolución electroquímica de Al (del ánodo) en solución, la reacción de este ion hidroxil (del cátodo) resulta en la formación de hidróxido de aluminio. El hidróxido flocula y coagula los sólidos suspendidos purificando el agua. Un proceso similar fue utilizado en Inglaterra en 1956 donde se utilizaron electrodos de hierro en el tratamiento de agua de río.

El proceso de electrocoagulación en la actualidad ha recobrado gran interés debido a la amplia posibilidad de aplicaciones y las ventajas que presenta ante los procesos de tratamiento de efluentes convencionales, entre las cuales se pueden mencionar:

- Los equipos son simples y de fácil operación
- Elimina uso o reduce los productos químicos
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes
- Purifica el agua y permite su reciclaje
- Genera lodos mas compactos y en menor cantidad
- Los contaminantes son elevados a la superficie del agua por las burbujas, donde pueden ser removidos con facilidad
- El agua trata por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos, los cual reduce el costo de tratamiento en caso de tratarse de efluentes de reuso.

Sin embargo presenta algunos inconvenientes los cuales están relacionados con el suministro de energía y la vida de los electrodos.

- Puede ser un tratamiento costoso si no se suministra correctamente la energía eléctrica
- Es necesario reemplazar los electrodos debido a su sacrificio
- El óxido formado en el ánodo, en ocasiones puede disminuir la eficiencia del uso de energía eléctrica y del proceso. (Chen, 2004; Holt, et. al.,2005)

En la actualidad la electrocoagulación es regida por un pequeño número de compañías alrededor del mundo, una gran variedad de diseños han sido probados pero no existe un diseño predominante.

Pero es claro que la electrocoagulación tiene la capacidad de remover una gran cantidad de contaminantes bajo condiciones específicas en el contenido de: sólidos en suspensión, metales pesados, productos derivados del petróleo, color, etc.

La electrocoagulación se ve claramente influenciada por variables como el pH, el tipo y la concentración del contaminante, la estabilidad del floculo y los aglomerados. El mecanismo dominante que se presenta en este tipo de reacciones es el siguiente: (Holt, 2006)

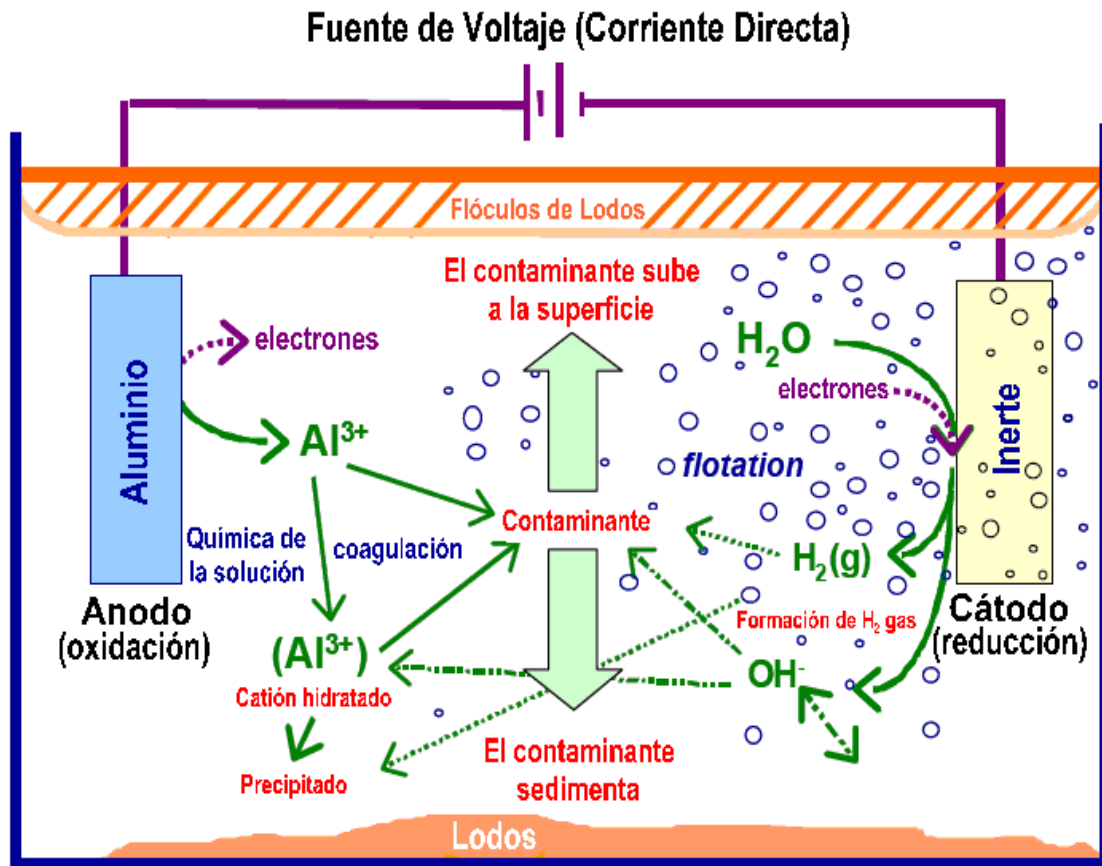
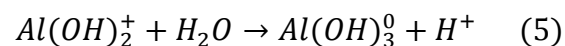
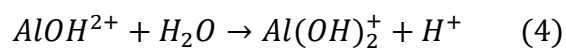
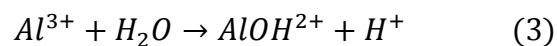


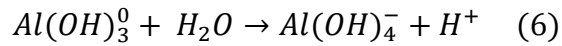
Figura3. Mecanismo en el reactor electroquímico (Holt, 2006)

Una corriente de agua es pasada a través de un electrodo del metal correspondiente oxidando el metal (M) a su catión (Mn^+) (ecuación 1), simultáneamente el agua es reducida a hidrógeno gas y al ion hidroxil (OH^-) (ecuación 2).

Los cationes hidrolizados en agua forman un hidróxido con las especies determinadas por el pH en solución. Ecuaciones 3-6 ilustran lo anterior para el caso de aluminio.

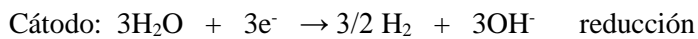
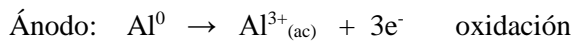
↓
pH





Durante la electrocoagulación mediante el uso de electrodos de aluminio, ocurren fundamentalmente tres procesos:

1. Reacciones electrolíticas en la superficie de los electrodos, las cuales se observan en las siguientes ecuaciones:



2. Si el potencial anódico es suficientemente alto: formación de sustancias coagulantes en la fase acuosa.
3. Adsorción o precipitación de los contaminantes coloidales o solubles, sobre los coagulantes electrogenerados y su posterior remoción por sedimentación o flotación.

Constitución y construcción de un reactor electroquímico

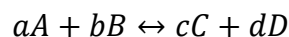
La base teórica para diseñar un reactor es la cinética de la reacción, el estudio de una reacción química puede hacerse desde el punto de vista termodinámico o el cinético; el estudio termodinámico permite conocer la posición en la cual la reacción alcanzará el equilibrio, mientras el estudio cinético permite conocer la velocidad con la que ocurre la reacción química.

Si la reacción es reversible, entonces la velocidad está en función de la concentración de los reactivos.

Ley de acción de masas: la velocidad a la que se produce una reacción química es proporcional a la concentración de cada uno de los reactivos, todo esto considerando que todas las reacciones son reversibles.

En cuanto al enfoque termodinámico, un sistema está en equilibrio si cualquier desplazamiento por pequeño que sea causa un aumento de energía o disminución de entropía.

Y se llega a un punto en el que la velocidad de reacción directa es igual a la velocidad de reacción inversa, llegando a un equilibrio dinámico (estudiado por Gibbs), de acuerdo a la reacción:



Existen diferentes diseños de reactores electroquímicos que operan en lote o de manera continua pueden estar elaborados con electrodos de aluminio o hierro, electrodos de malla o electrodos en forma de plato. (Holt et. al, 2002)

En el caso del reactor tipo batch o el lote, éste opera a un volumen definido de agua a tratar en un ciclo y generalmente los reactivos son precargados, por lo que tiene la ventaja de ser de fácil operación y bajo costo para el tratamiento localizado de aguas, tienen como desventaja las condiciones del sistema cambian respecto al tiempo (temperatura, pH).

Otra cuestión importante en el diseño de un reactor es el uso de la flotación o sedimentación para la separación del contaminante una vez que se ha realizado el proceso de coagulación. Son llamados reactores solo de coagulación aquellos que no aprovechan las burbujas liberadas en la electrocoagulación para separar los agregados del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar este proceso reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación. (Holt et. al, 2005)

Electrolito soporte

El uso de un electrolito soporte el cual funcionará como catalizador, cabe mencionar que existen catalizadores sólidos no soportados y catalizadores sólidos soportados (Figura4).

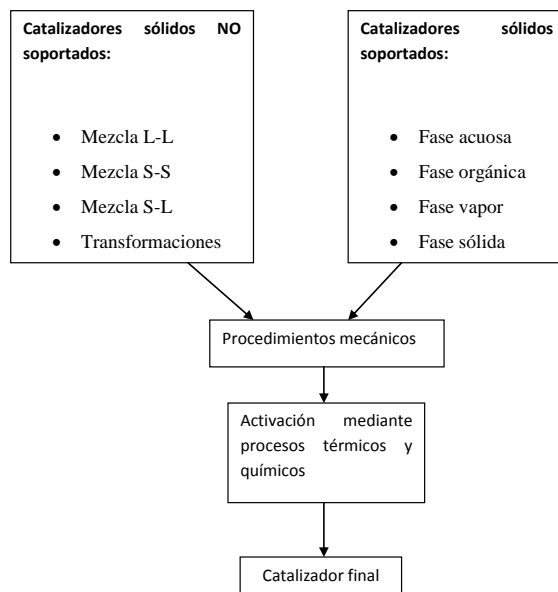


Figura4. Preparación de catalizadores

Dentro de los catalizadores sólidos soportados se tiene que en fase acuosa se utiliza un procedimiento mecánico para activarlo mediante un proceso químico y que éste funcione, tal es el caso del soporte de precursores disueltos en fase acuosa donde se encuentra el de intercambio iónico que consiste en tomar un soporte que contenga iones y se sustituyen esos cationes o aniones por lo que se quiere soportar.

El reactor electrolítico, donde se realiza la electrocoagulación, es un recipiente de termoplástico como en que observa en la Figura 5, consta de una fuente de energía para inducir la corriente eléctrica y de electrodos dispuestos en forma intercalada dentro del reactor, éstos van cubiertos por el agua a tratar. El material de los electrodos varía de acuerdo al tipo de sistema utilizado, éstos pueden ser de aluminio, cobre acero o aleaciones de aluminio y magnesio. Los electrodos son de sacrificio, según Faraday, debido a que en el proceso electrolítico desprenden en el agua iones que desestabilizan los coloides. (Holt et. al, 2002; Cañizares et. al., 2006; Molera, 1989)

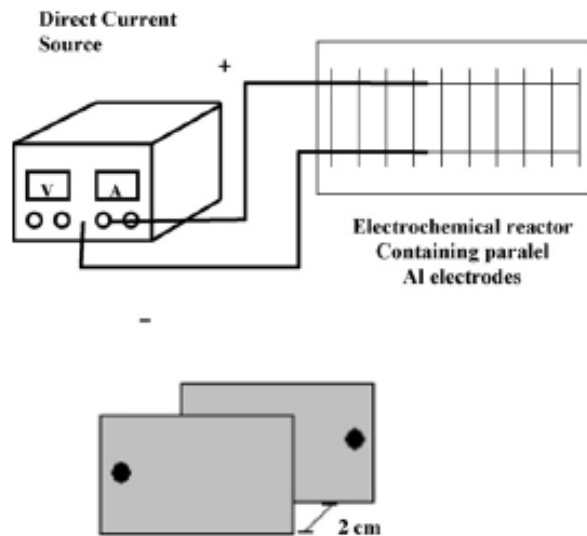
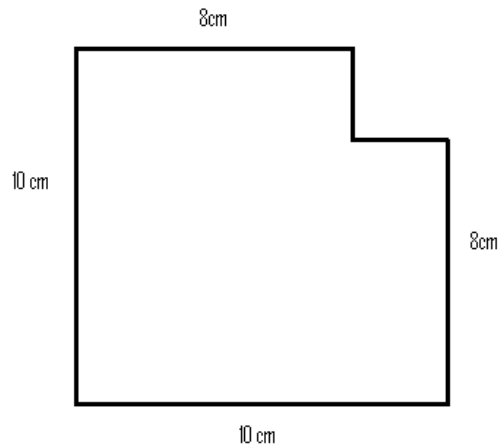


Figura5. Reactor conectado a la fuente de poder, vista de los electrodos y distancia entre ellos (I. Linares-Hernández et al., 2007)

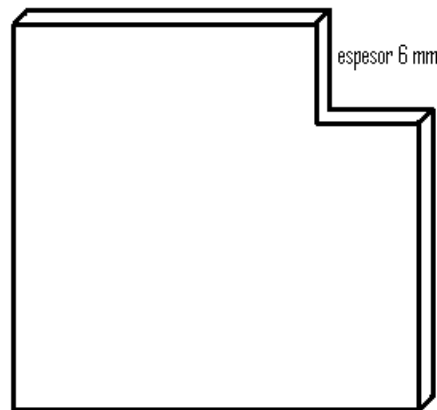
En los electrodos se generan microburbujas de hidrógeno y oxígeno que chocan y se adhieren a los flocúlos, arrastrándolos a la superficie del líquido donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. También las burbujas dentro del reactor ayudan a que los contaminantes floten. (Morante, 2002)

Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes, por ejemplo de los iones orgánicos e inorgánicos son probablemente electroprecipitados mientras que los sólidos suspendidos son adsorbidos por el coagulante. (Holt et. al, 2002)

Es muy importante el diseño del reactor ya que de las características de éste depende la eficiencia del proceso. En general entre menor es la distancia entre los electrodos mayor será la actividad de las moléculas involucradas en la reacción electroquímica. En la Figura 6 se muestran las dimensiones de las placas montadas en el reactor electroquímico de electrodos de hierro, primero (inciso a) se observa la vista frontal de la placa y en el inciso b) se observa el espesor de la placa utilizado en el reactor 2 con electrodos de hierro. (Robinson 1974)



Medidas de la placa de hierro



Espesor de la placa de hierro

Figura6- Vista de las placas de hierro por la que pasa la corriente eléctrica.

Mecanismo de funcionamiento en el reactor

Se han utilizado diversos reactores electroquímicos para este estudio los cuales funcionan debido a los principios de una celda electroquímica y Leyes de Faraday y se diferencian por el material de los electrodos. (Molera, 1989)

El tratamiento electroquímico consiste en hacer pasar una corriente de 2A en los electrodos sumergidos en el agua residual el llamado ánodo de sacrificio se desgasta liberando iones ferrosos (Fe^{2+}) el agua, desestabilizando así coloides que permiten que se remueva la materia suspendida y coloidal del agua residual, ya que los iones Fe^{2+} reaccionan con los sulfuros y

sulfatos formando compuestos insolubles que son eliminados del agua residual por el efecto de las pequeñas burbujas de hidrógeno y oxígeno producidas durante la hidrólisis del agua, las cuales tienen un tamaño promedio de 100 micrómetros, éstas se adhieren a las partículas suspendidas y las arrastran hasta la superficie del volumen de control formando una espuma que puede ser removida por medios mecánicos; este proceso es conocido como electroflotación. (Martínez., 2004)

Es importante considerar que en aguas dulces los coloides se estabilizan por sorción de materia orgánica que les impone una gran carga negativa, la floculación y la agregación (coagulación) se da pues la fuerza iónica y las concentraciones de Ca^+ y Mg^+ neutralizan parcialmente la carga negativa superficial. (Rodríguez, Mellado Et. Al. 1999)

Además de que la electroflotación tiene sus bases en la coagulación – floculación. Así como también el mecanismo se basa en los principios de las Leyes de Faraday y la electroquímica, donde se tiene un ánodo de sacrificio que es el que desgastará durante el proceso para formar las partículas coloidales que permiten remover el color del agua residual.

Leyes de Faraday relativas a la electrolisis (anexo 1)

Primera: Las cantidades de sustancia separada por electrólisis son proporcionales a la cantidad de electricidad que atraviesa la disolución.

$$m_s = A$$

Donde:

m_s = masa de la disolución

A= amperes

Segunda: La masa depositada de una sustancia es directamente proporcional al equivalente químico del ión, es decir, al peso atómico del ión dividido por su valencia.

$$m_D = (\text{peso atómico ion}) / \text{valencia}$$

Donde:

m_D = masa depositada

Este proceso explicado por Faraday tiene dos partes la primera mitad es la electrodeposición o galvanotecnia y la otra es el desprendimiento de partículas de metal.

Estas leyes cumplen rigurosamente con el patrón internacional para la medida de la unidad de corriente eléctrica, el amperio, se basa en estas leyes. La intensidad de un amperio es aquella corriente invariable que en un segundo de tiempo deposita 0.00111815 gramos de plata de una disolución de nitrato de plata. La relación entre la masa de la plata depositada y la corriente es rigurosamente lineal, con que es posible calcular la cantidad de material desprendido o depositado, cuando el proceso se acelera debido al paso de una corriente mucho más intensa. (Molera, 1989)

En una celda electroquímica la energía química se transforma en energía eléctrica. Lo cual se relaciona en la siguiente expresión:

$$Q = it$$

$$ne^- = \frac{it}{F} = \frac{Q}{Fz}$$

Donde:

z: es el número de oxidación del ion formado

F: constante de Faraday igual a 96500

Q: carga (C)

t: tiempo (s)

n: número de moles

i: intensidad de corriente (A)

Para evaluar el funcionamiento de las celdas electroquímicas es importante estudiar con que velocidad se eliminan los contaminantes, a continuación se presenta un resumen de este tema.

Velocidad de las reacciones electroquímicas

Recordando que una reacción química es un proceso mediante el cual se genera un cambio químico, y que éste ocurre con diferente velocidad, es entonces que se define a la velocidad de reacción como el cambio en la concentración de un reactivo o de un producto respecto al tiempo (M/s).

De manera general en una reacción química $A \rightarrow B$ se puede hablar de una disminución en la cantidad de moléculas de A y el incremento de moléculas de B respecto al tiempo, es decir:

$$velocidad = -\frac{\Delta A}{\Delta t} \quad \text{o} \quad velocidad = \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Donde $\Delta[A]$ y $\Delta[B]$ son los cambios en la concentración (molaridad) en un determinado periodo Δt , debido a que la concentración de A disminuye en un determinado tiempo $\Delta[A]$ es una cantidad negativa, por otro lado la velocidad de reacción o en este caso la velocidad de formación de B en una cantidad positiva (Figura 7). Estas velocidades son velocidades promedio porque representan en promedio en cierto periodo Δt . (Chang, 1999)

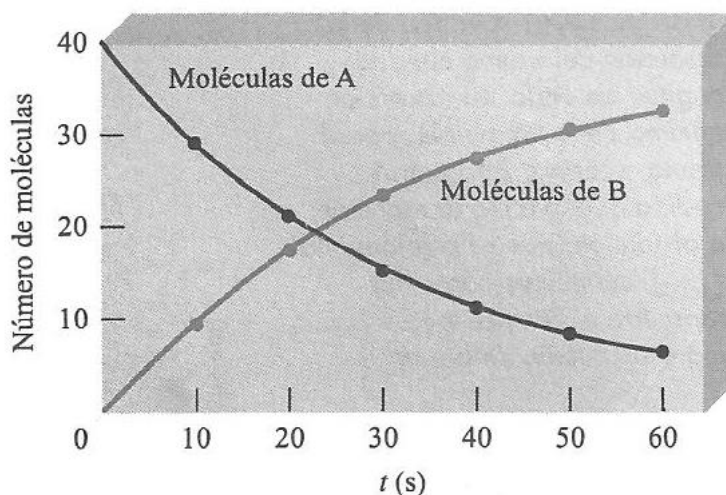


Figura 7. Velocidad de una reacción $A \rightarrow B$

Experimentalmente la velocidad de una reacción se mide por la concentración del reactivo o del producto como una función de tiempo. Para las reacciones en disolución, la concentración de algunas especies se puede medir por métodos espectroscópicos. Si están involucrados iones también se puede medir por conductividad eléctrica. Al utilizar métodos espectroscópicos se realizan graficas de absorción (eje vertical) contra longitud de onda (eje horizontal).

Cabe destacar que cada molécula en movimiento posee energía cinética y cuanto más rápido se mueva ésta será mayor. Pero una molécula que se mueve con rapidez no se romperá en fragmentos por sí misma. Para reaccionar debe chocar con otra molécula. Cuando las moléculas chocan parte de su energía cinética se convierte en energía vibracional. Si la energía cinética inicial es grande, las moléculas que chocan vibrarán tan fuerte que se romperán algunos enlaces químicos. Esta fractura es el primer paso hacia la formación del producto. Si la energía cinética inicial es pequeña, las moléculas rebotarán entre sí intactas. Pues las fuerzas intramoleculares de los enlaces en las sustancias requieren de una gran cantidad de energía comparada con la requerida para la misma sustancia en sus fuerzas intermoleculares.

Para que haya una reacción, las moléculas que chocan deberán tener una energía cinética total igual o mayor que la energía de activación (E_a), que es la mínima cantidad de energía que se

requiere para iniciar una reacción química. Cuando las moléculas chocan forman un complejo activado, una especie formada temporalmente por las moléculas de los reactivos, como resultado de la colisión antes de formar el producto. (Chang, 1999)

El complejo activado es una especie inestable porque tiene una energía superior tanto a la de los reactivos como a la energía de los productos.

Con base en lo anterior el objetivo es la eliminación de un colorante artificial comestible utilizando electrodos de hierro y aluminio para aplicar un tratamiento de electrocoagulación, con la finalidad de dar una alternativa para eliminar color en medios acuosos.

HIPÓTESIS

Empleando un tratamiento electrocoagulación será posible degradar en un 90% el color presente en el agua sintética con colorantes en un reactor tipo batch.

OBJETIVOS

1. Construir dos reactores electroquímicos: uno con electrodos de aluminio y otro con electrodos de hierro.
2. Realizar en cada reactor pruebas de remoción de color en agua sintética.
3. Caracterización fisicoquímica del agua sintética antes y después del tratamiento.
4. Obtener las mejores condiciones de tratamiento en la eliminación de color evaluando corriente, pH y tiempo de tratamiento.

CAPÍTULO III

Metodología

Tomando como sustento el fundamento científico adoptado por la norma oficial, para la determinación de la DQO en las muestras de agua residual, y sin tener que hacer uso de reactivos de elevado costo, la marca HACH pone a disposición una alternativa sencilla y económica de determinar la DQO; la cual consiste en tubos de ensayo que contienen una cantidad específica de los reactivos necesarios para oxidar la materia orgánica presente en la muestra, la cual se somete a un proceso de digestión durante dos horas, se cuantifica con un espectrofotómetro UV-Vis, a una determinada longitud de onda, para obtener así los mg/L de materia contaminante presente en la muestra (Gutiérrez, 2007)

La metodología que se siguió se muestra en la Figura 8, en el cual puede apreciarse de manera general los pasos del desarrollo experimental, que se siguieron de acuerdo a los tratamientos A, B y C que se describen en esta sección y los cuales ayudarán a la caracterización del agua sintética a tratar.

En cuanto a la espectrofotometría UV-Vis, es una técnica analítica, la cual está basada en la medición de la radiación UV o visible por determinadas moléculas; la radiación correspondiente a estas regiones del espectro electromagnético provoca transiciones electrónicas a longitudes de onda características de la estructura molecular de un compuesto. (Gutiérrez, 2007)

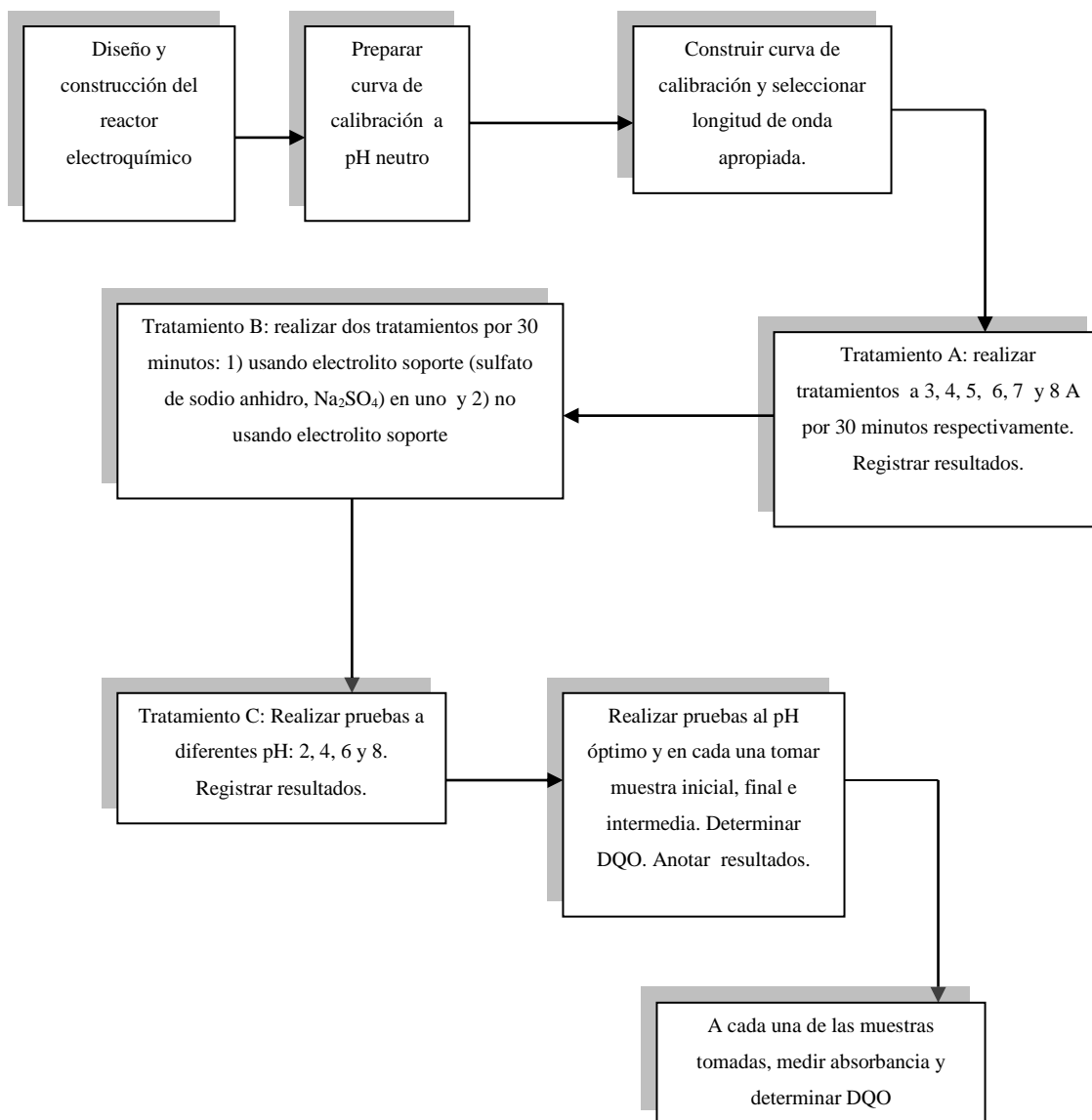


Figura 8.- Metodología utilizada para el tratamiento.

Materiales

La Tabla 4 muestra la descripción de los materiales utilizados en el tratamiento electroquímico.

TABLA 4. Materiales utilizados y sus características

Material	Características	Observaciones
Reactor electroquímico 1	Elaborado en recipiente de plástico(HPDE) y electrodos de aluminio	Elaboración propia
Reactor electroquímico 2	Elaborado en recipiente de plástico(HPDE) y electrodos de hierro	Elaboración propia
Potenciómetro	OAKTON Waterproof 300 series	
Espectrofotómetro UV-Vis	Lamba 25 de Perkin Elmer	
Espectrofotómetro	HACH DR/3000	Mide porcentaje de transmitancia, absorbancia, concentración.
Digestor	HACH	

Reactivos

En la Tabla 5 es posible observar las características de los reactivos utilizados para obtener la caracterización del agua residual mediante el tratamiento electroquímico.

TABLA 5. Reactivos utilizados y sus características

Reactivo	Características	Observaciones
Agua potable	pH 7, 20°C	Contiene iones Cl ⁻
Agua destilada	pH 7, 20°C	
Ácido sulfúrico	PM 98g/mol	95 % vol. Solución [1M]
Sulfato de sodio anhidro	PM 142.048 g/mol	Solución [1M]
Hidróxido de sodio	PM 40 g/mol	Solución [1M]
Colorantes azul y amarillo	Solución concentrada frasco gotero Mc Kormick	1.61 % vol.

Parámetros de control

Concentración del colorante, pH, un factor importante es la distancia entre los electrodos, ya que dicha distancia afecta drásticamente en la velocidad de disolución del ánodo de sacrificio. El pH inicial se ajustó previo al tratamiento y se estuvo ajustando durante el tratamiento, así como al final de este para que el agua tuviese las características de la Tabla 6; dicho control se llevo a cabo con dos soluciones: ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio NaOH ambos en concentraciones uno molar (mol/L).

Caracterización fisicoquímica del agua sintética

En la caracterización fisicoquímica del agua sintética es necesario realizar una serie de pruebas en las cuales se deben tomar en cuenta los parámetros que demanda la calidad del agua tales como pH, DQO, color, etcétera. Los parámetros de control utilizados en el tratamiento electroquímico se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de parámetros fisicoquímicos del agua sintética

Parámetros antes del tratamiento	Valor	Parámetro después del tratamiento	Valor
Concentración del colorante (g/mL)	1.17 E-06	Concentración del colorante	0
pH	4.0	pH	7.0
DQO	179	DQO	0

Curva de calibración

Las curvas de calibración son determinadas experimentalmente preparando una serie de soluciones de concentración conocida y midiendo la absorbancia de cada una de ellas, con los datos obtenidos se construyen curvas absorción–concentración. (Robinson, 1974)

Es necesario preparar soluciones a diferentes concentraciones, a las cuales se les determinará la absorbancia, dato que servirá posteriormente para el cálculo de la concentración del colorante en la disolución patrón para conocer el valor numérico de la concentración del colorante en las disoluciones preparadas. Se recomienda hacer un barrido para elegir la longitud de onda

adecuada a la que se va a trabajar, pero en este caso se realizó el barrido completo en todas las longitudes de onda para cada una de las muestras preparadas.

El procedimiento a seguir para construir la curva de calibración es el siguiente:

1. Preparar una solución patrón de 100 mL de agua y 600 microlitros de colorante azul. Donde la concentración resultante es de $9.7 \times 10^{-5} \text{ g mL}^{-1}$.
2. En un vaso de precipitados colocar 10 mL de agua, agregar a este volúmenes sucesivos de 100 microlitros de colorante con una concentración de $9.7 \times 10^{-5} \text{ g mL}^{-1}$ para obtener 9 puntos. Mantener el agua en agitación.
3. A cada adición se lee la absorbancia.

Cálculo de la concentración del colorante

La curva de calibración fue diseñada con dilución por lo que es necesario calcular las concentraciones en cada adición como se muestra en la siguiente ecuación:

Concentración del colorante = $((9.7 \times 10^{-5} \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}) * \text{volumen muestra}) / (\text{volumen inicial} + \text{volumen muestra})$

Diseño y construcción de la celda electrolítica

Reactor con electrodos de aluminio

En la construcción de la celda se utilizó un recipiente de plástico de 0.5 L de capacidad y 8 placas de hierro de 10 cm de ancho y 5 cm de alto, conectada a una fuente de poder.

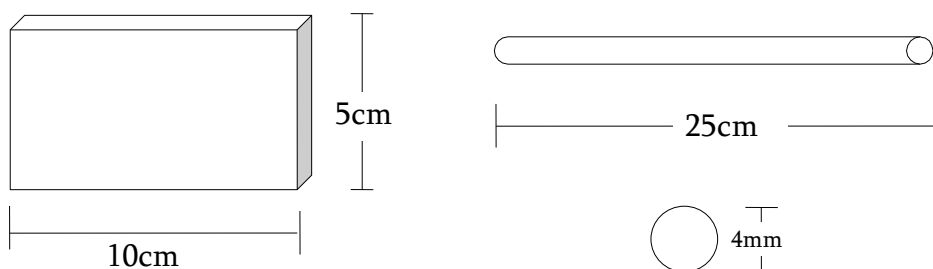


Figura 9. Dimensiones de las placas de aluminio para la celda de tratamiento.

Las barras de aluminio que sostienen las placas tienen un espesor de 0.4 cm. La distancia entre las placas es de 4 cm. Tiene un espacio libre de 3cm sin placas en uno de los extremos para permitir la inserción del potenciómetro y el muestreo; y un espacio entre las placas y el fondo de la celda.

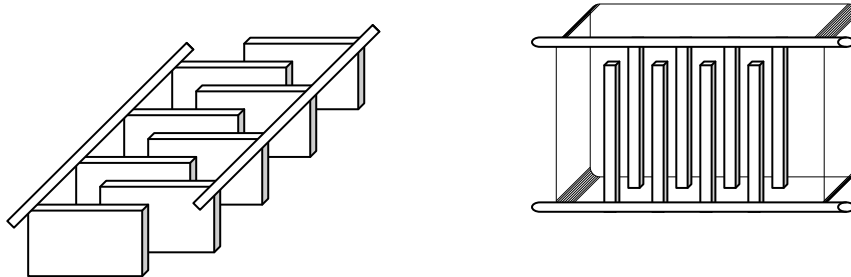


Figura 10. Disposición de las placas de aluminio en la celda de tratamiento.

Reactor con electrodos de hierro

En la construcción de la celda se utilizó un recipiente de plástico de 0.5 L de capacidad y 6 placas de hierro de 10 cm de ancho y 10 cm de alto, conectada a una fuente de poder.

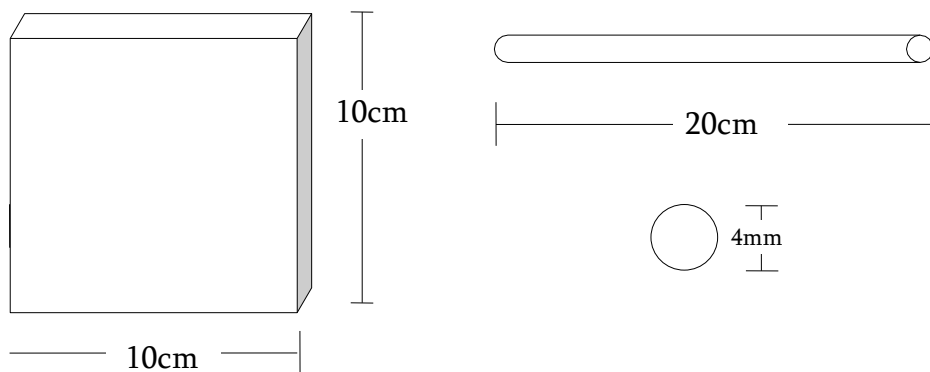


Figura 11. Dimensiones de las placas para la celda de tratamiento.

Las barras de hierro que sostienen las placas tienen un espesor de 0.4 cm. La distancia entre las placas es de 1.2 cm. Tiene un espacio libre de 2 cm sin placas en uno de los extremos para permitir la inserción del potenciómetro y el muestreo; y un espacio entre las placas y el fondo de la celda.

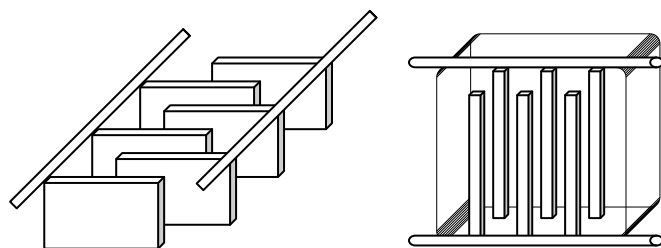


Figura 12. Dimensiones de las placas para la celda de tratamiento.

Una corriente elevada provoca que las soluciones se calienten excesivamente. Para que el sistema opere adecuadamente por un largo periodo, es recomendable que la densidad de corriente no exceda en el rango de 0.5 a 300 mA cm⁻² (Holt, 2003).

Para los fines del diseño experimental se calcularon densidades de corriente de 4.6 y 3.5 mA cm⁻² para los reactores con electrodos de aluminio e hierro respectivamente, usando las fórmulas de la Tabla 7.

Tabla 7. Fórmulas para el cálculo de la densidad de corriente de los electrodos		
Parámetro	Símbolo	Fórmula
Densidad de corriente (mA cm ⁻²)	δ	$\delta = i / S$
Área de la placa (cm ²)	A_p	$A_p = B h$
Área del orificio (cm ²)	A_o	$A_o = \pi D^2 / 4$
Área efectiva de cada placa (cm ²)	A_e	$A_e = A_p - A_o$
Área efectiva total de las placas (cm ²)	A_{et}	$A_{et} = A_e (\# \text{ de placas})$
Área del tubo (cm ²)	A_t	$A_t = 2 \pi r L$
Área superficial del electrodo (cm ²)	S	$S = A_{et} + A_t$
Donde: i (intensidad de corriente eléctrica), B (base), h (altura), D (diámetro), r (radio) y L (longitud).		

Pruebas realizadas en el tratamiento

TRATAMIENTO A.- En esta prueba se consideran para ambos casos diferentes intensidades de corriente (2, 4, 6, y 8 amperes) durante un tiempo de tratamiento de 30 minutos, para comparar y obtener la intensidad de corriente adecuada para ambos reactores.

TRATAMIENTO B.- Esta prueba consiste en la adición de un electrolito como soporte (Na_2SO_4 , sulfato de sodio) el cual estará actuando como catalizador en la disolución acuosa, y se realiza con la finalidad de conocer si es necesario utilizarlo en el proceso que se efectuara en los reactores ya mencionados.

TRATAMIENTO C.- En estos experimentos se pretende encontrar un pH óptimo al cual se obtenga una remoción de color del 90% en el menor tiempo posible considerando que la velocidad de reacción estará dada por el negativo del diferencial de concentración de reactivos respecto al tiempo expresando así la conversión de reactivos en productos y con ello la remoción del contaminante que en este caso es el color (NMX-AA-008-SCFI-2001)

Para determinar las condiciones óptimas del tratamiento por electrocoagulación en un reactor electroquímico tipo batch fue necesario controlar parámetros tales como la intensidad de corriente, pH, DQO, así como la distancia entre las placas

Evaluación de pH

Para la evaluación de los parámetros del agua sintética se midieron estos en el agua sin tratar y en el agua ya tratada, para el pH se considera la NMX-AA-008-SCFI-2000 que implica el método que se fundamenta en la existencia de una diferencia de potencial entre las dos caras de una membrana de vidrio (electrodo), expuestas a disoluciones acuosas que difieren en su valor de pH. El electrodo cuyo potencial depende del pH de la disolución en la que se sumerge, está constituido por un tubo de vidrio de alta resistencia cuya extremidad es de vidrio especial en forma de bulbo que contiene una disolución interna de pH invariable en la que se encuentra sumergido un electrodo interno de referencia.

Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)

El equipo HACH se utilizó para determinar la DQO presente en el agua antes de realizar el tratamiento, durante y después de éste, las muestras se tomaron en intervalos de 5 minutos, y a

cada muestra se le realizó el procedimiento correspondiente. Se colocó una alícuota de 3mL de muestra en los tubos HACH especialmente diseñados para determinar la DQO; se agitó y luego se colocaron las muestras por lotes en el digestor HACH, el digestor trabaja por un periodo de 2 horas, al finalizar el proceso de digestión se dejaron enfriar las muestras para luego leer el valor de DQO en el equipo HACH. Éste procedimiento se aprecia mejor en la Figura 9.

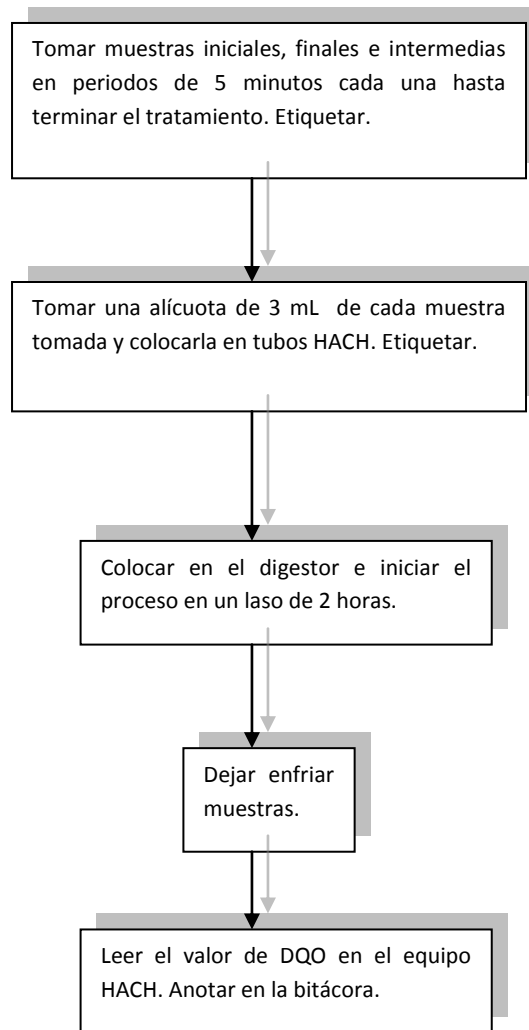


Figura 13.- Procedimiento de uso del equipo HACH en el tratamiento de agua sintética.

CAPÍTULO IV

Resultados y discusión

Espectros de absorción de Azul

Dentro del área de cinética y catálisis existen técnicas de caracterización de las sustancias, se seleccionó la espectrofotometría (anexo 2) UV-Vis para la evaluación de la eficiencia del tratamiento electroquímico.

En la Figura 14 se observa el espectro de absorción de una serie de soluciones del colorante azul. Se observa tres bandas de absorción una en 620 nm característica del color azul posteriormente en 420 nm y en 320 nm.

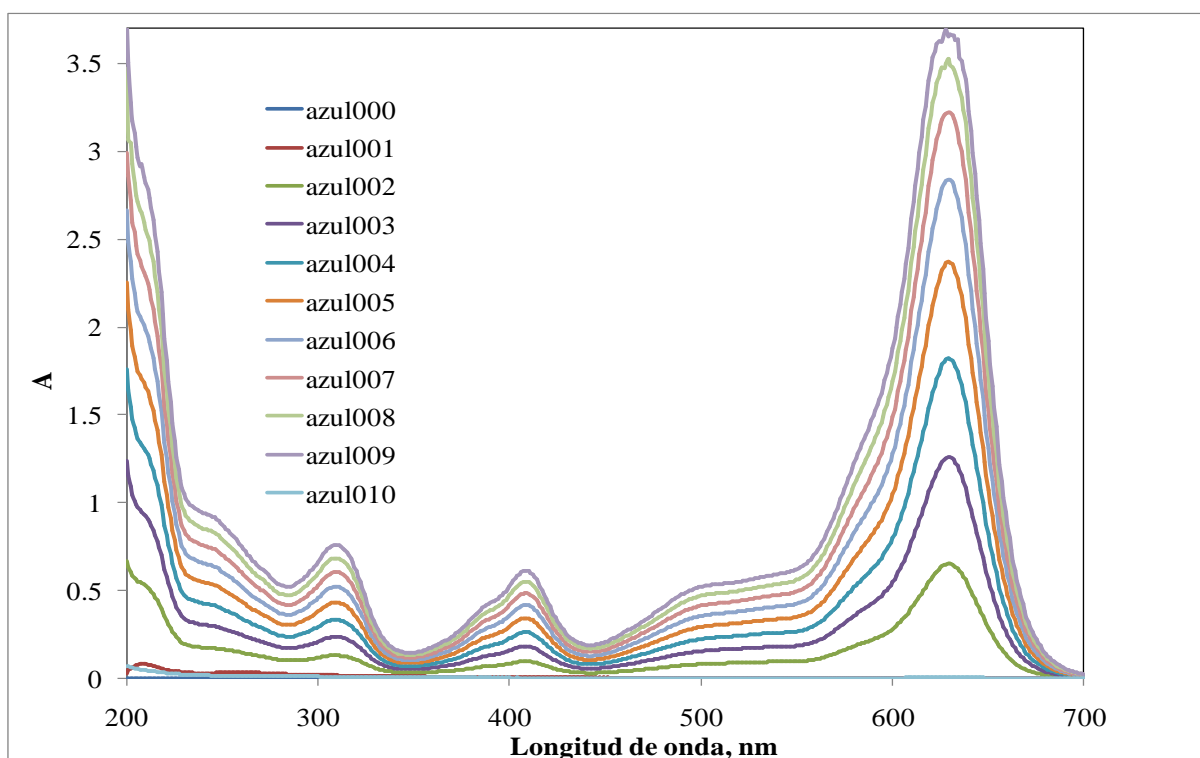


Figura 14. Espectro de absorción del colorante comestible azul

Se seleccionó la banda de absorción de 620 nm por ser la que presenta mayor absorbancia y por lo tanto su coeficiente de absorptividad específico $0.3331 \text{ mL } \mu\text{g}^{-1}\text{cm}^{-1}$ para realizar la curva de calibración.

En la Figura 15 se muestra el gráfico de A en función de la concentración donde se observa una tendencia lineal debido a que el coeficiente de determinación (r^2) fue de 0.996 y la ecuación que representa la línea recta es:

$$A^{620\text{nm}} = 0.202 \pm .054 + 0.309 \pm 0.010 [\text{Azul}]$$

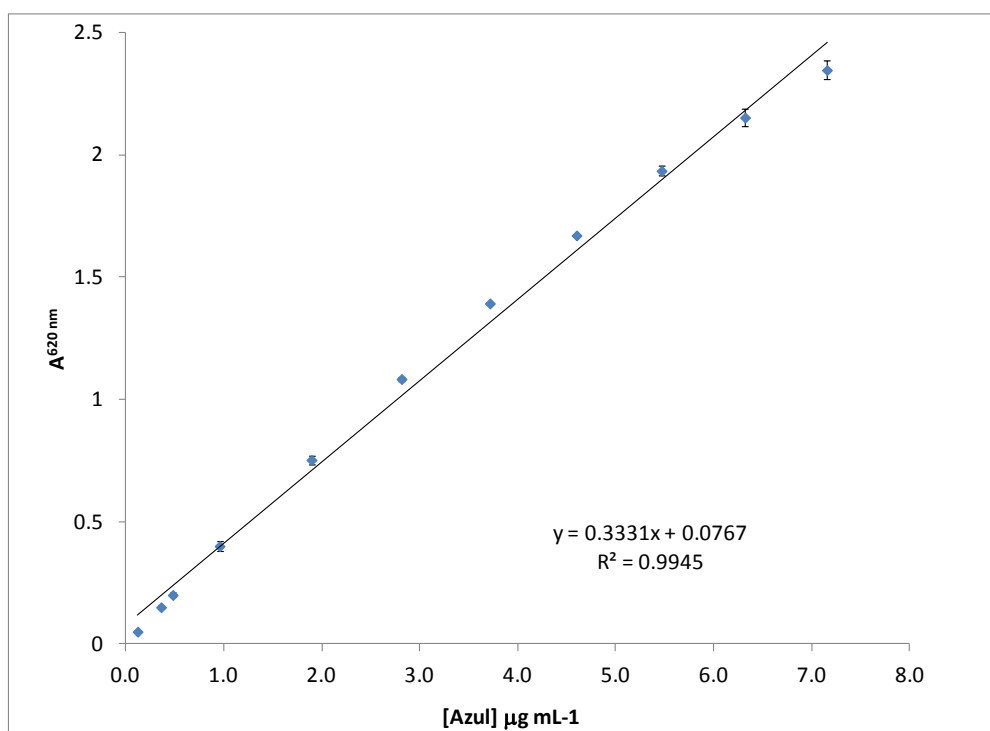


Figura 15.- Curva de calibración del colorante azul

Una vez caracterizado el colorante se procede a realizar las pruebas electroquímicas de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro.

Los resultados obtenidos al aplicar los métodos propuestos en capítulos anteriores para realizar este trabajo de investigación son analizados en este capítulo con la finalidad de comparar los dos reactores utilizados (uno con electrodos de aluminio y otro con electrodos de hierro), resaltando las características de cada uno; para comparar la eficiencia de ambos en la eliminación de color azul presente en el agua sintética preparada.

Antes de iniciar cada tratamiento se realizaron pruebas para determinar la intensidad de corriente más eficiente la cual juega un papel muy importante en el desprendimiento del metal que participa como electrodo, como se menciona en el anexo 1.

Determinación de las condiciones óptimas del tratamiento

En ambos reactores tanto el de aluminio como el de hierro, se realizaron los tratamientos A, B y C expuestos anteriormente en la metodología, con que se permite apreciar lo siguiente en las gráficas que reportan los resultados obtenidos.

Tratamiento A en ambos reactores (reactor 1: aluminio y reactor 2: hierro)

En la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos en el tratamiento A, donde se han considerado diferentes intensidades de corriente (2, 4, 6 y 8 amperes) para efectuar el tratamiento en cada reactor sin electrolito soporte, donde la absorbancia inicial en cada caso es de 0.338 equivalente a una concentración de $1.26 \mu\text{g mL}^{-1}$ y el tiempo de tratamiento de 15 minutos; y como puede observarse la absorbancia final es variable dependiendo de la intensidad de corriente aplicada.

Para el reactor de electrodos de aluminio (reactor 1) se muestra que para una corriente de 2 A se obtiene el 99.9% de eliminación del colorante. Por otro lado, para el reactor 2 se observa una eliminación de 99.9% a las corrientes de 2, 4 y 6. Esto es debido a que no se tienen suficientes iones en la celda para que tenga un adecuado funcionamiento.

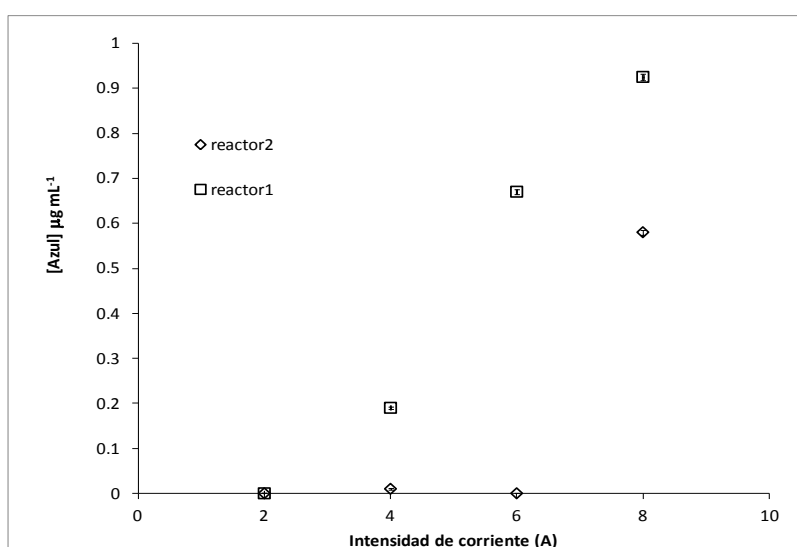


Figura 16. Resultados de las pruebas utilizadas para determinar la intensidad de corriente más eficiente para ambos reactores (Reactor 1 con electrodos de aluminio, Reactor 2 con electrodos de hierro)

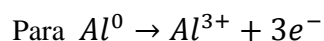
Por lo anterior se selecciona 2 amperes como intensidad de corriente en el tratamiento de ambos reactores, donde los tratamientos B y C se efectúan como se describe en los siguientes párrafos.

Tratamientos B y C en el reactor 1 (electrodos de aluminio)

Las condiciones operativas que se tomaron en cuenta para iniciar con el experimento son de 2A, un volumen de 500mL, tiempo de tratamiento de 15 minutos.

Cálculo de número de moles Al^{3+} :

$$t = 15 \text{ minutos} = 900 \text{ segundos}$$



$$\text{moles } Al^{3+} = \frac{I \cdot t}{F \cdot q} = \frac{(2A)(900s)}{(96500)(3)} = 0.06$$

Los 0.06 moles de Al^{3+} obtenidos equivalen a una concentración de 0.12 M por lo que se elabora el diagrama de distribución de especies a estas condiciones de concentración para conocer las especies que se forman a los diferentes pH que se trabajaron.

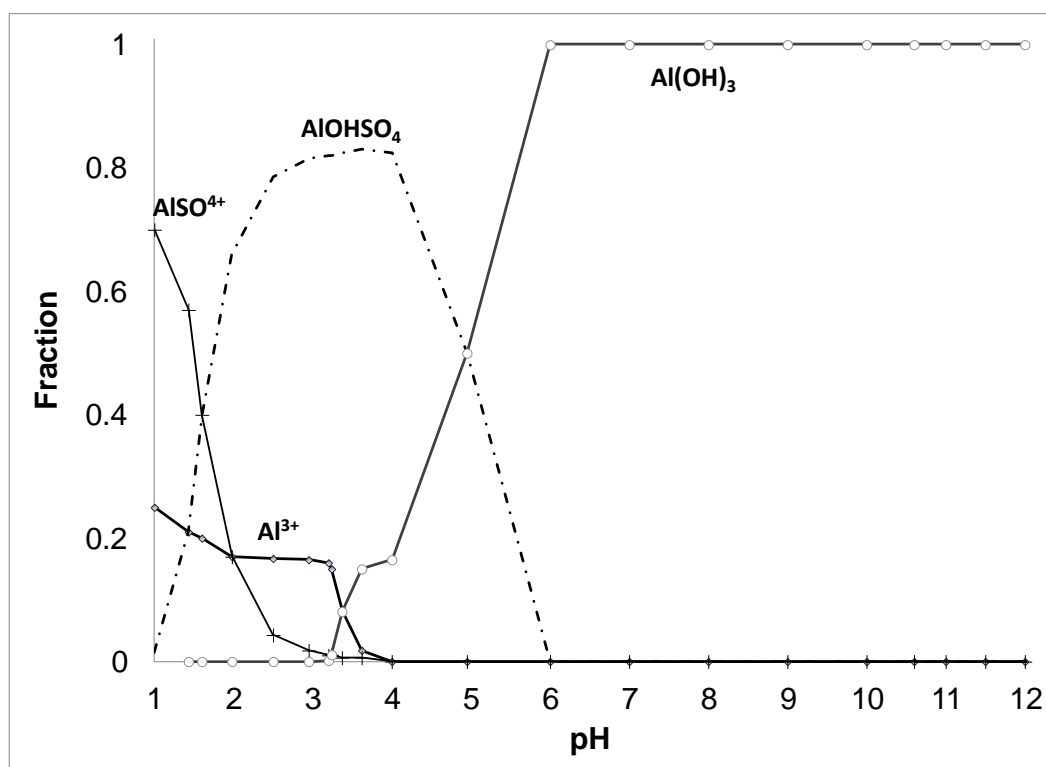


Figura 17.- Diagrama de distribución de especies para el aluminio considerando 0.12 M de Al^{3+} .

En la Figura 17 se observa que a pH 4 se presenta la especie insoluble $AlOHSO_4$ que puede ayudar a iniciar la coagulación; y a partir de pH 3.2 y hasta 12 se garantiza la producción de otra especie insoluble que es el $Al(OH)_3$ que ayuda a la eliminación del colorante en el agua. Se considera la presencia de iones sulfato pues en la solución se han disociado los iones que conforman al sulfato de sodio.

Considerando el tratamiento B las pruebas corresponden a la adición de sulfato de sodio como electrolito en la solución y posteriormente sin la adición de electrolito, las cuales se realizan con la finalidad de conocer la efectividad del proceso electroquímico en relación al tiempo de tratamiento, usando sulfato de sodio 0.1 M en cada carga del reactor, 2 A, 13.1 V y pH 7.

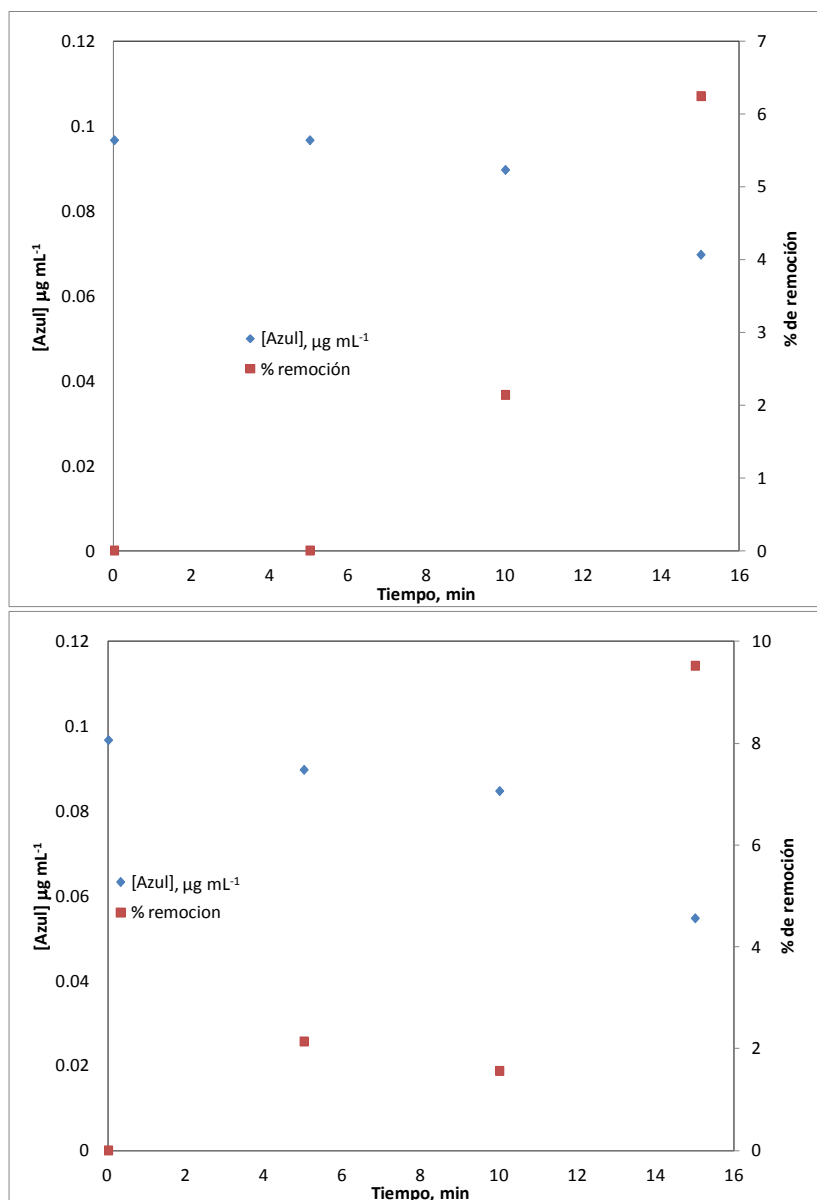


Figura 18.- Gráfica del tratamiento realizado sin electrolito y con electrolito a 2 A y pH 7, en el reactor de electrodos de aluminio.

En la Figura 18 se observa que durante el tiempo de tratamiento de 15 minutos que se puso como límite debido a que no se obtuvo más del 15 % de remoción después de ese tiempo. Los

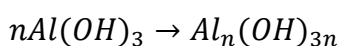
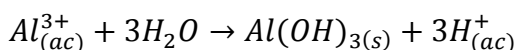
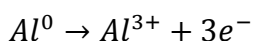
resultados en la remoción del colorante comestible no son favorables, sin importar si se le adiciona o no el electrolito soporte (sulfato de sodio, Na_2SO_4), debido a que el aluminio es poco conductor ya que de manera espontánea se puede formar una capa pasivante de Al_2O_3 .

Es importante mencionar que la distancia entre los electrodos de este reactor es de 5 cm de separación entre cada electrodo, lo que propicia menos movimiento entre los átomos que no permite que éstos se conviertan en iones y se desprendan con facilidad para poder adherirse al colorante.

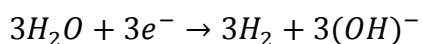
Por lo expresado en el párrafo anterior, se ha agregado el electrolito soporte el cual cierra el circuito de la celda formada en este reactor con electrodos de aluminio, pues el sulfato de sodio que en este caso es el electrolito soporte se disocia logrando que la conductividad se incremente.

En el reactor con electrodos de aluminio a remoción del contaminante ocurre de acuerdo a las siguientes reacciones:

En el ánodo



En el cátodo



Los iones Al^{3+} al combinarse con los iones $(\text{OH})^-$ reaccionan formando algunas especies como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, las cuales se presentan al inicio cuando las concentraciones de aluminio son menores de $1 \times 10^{-7}\text{M}$, posteriormente al incrementar el tiempo de electrólisis se incrementa la concentración de aluminio y la formación de OH^- ; forman $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ que tiene la característica de ser una sustancia insoluble con gran área superficial y de carácter absorbente, donde es de importancia recordar además que los complejos formados poseen una energía cinética mayor a los reactivos y los productos, que tienen cargas que permiten la atracción entre varias moléculas formando una disolución de tipo heterogénea; lo que cede la remoción del contaminante, por un método de separación de mezclas que puede ser

la filtración, que normalmente es el método recomendado para separar los precipitados formados por los elementos del grupo 3. (Comminelis, et. al., 1991)

De acuerdo a los tratamientos planteados en la metodología el tratamiento C éste consiste en realizar pruebas a diferentes pH para observar si existe un incremento en la eficiencia del tratamiento considerando que la intensidad de corriente sigue siendo de 2 A, y que de acuerdo a la Figura 18 la adición de sulfato no marca una diferencia considerable en el porcentaje de remoción dado que el agua sintética que se ha preparado contiene iones en solución en mínimas cantidades pero suficientes para cerrar el circuito de la celda; por lo que no se usará electrolito soporte.

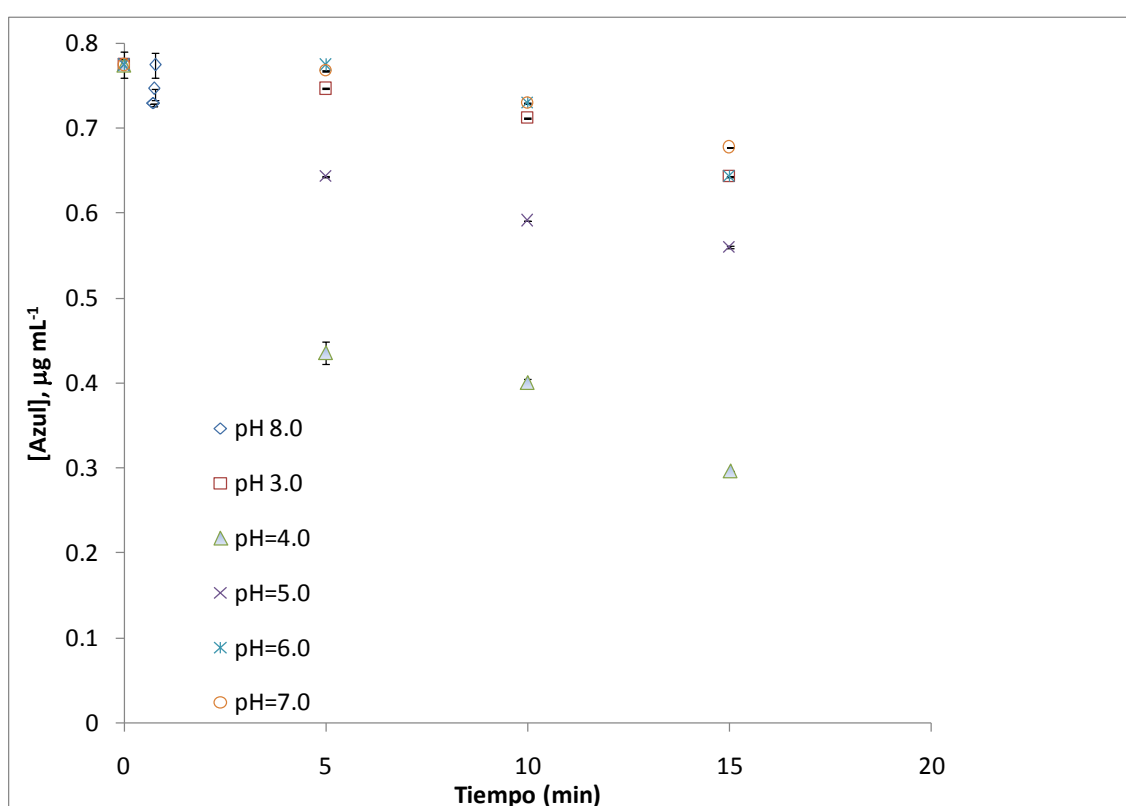


Figura 19.- Resultados del tratamiento C aplicado en el reactor 1.

Los resultados obtenidos de lo descrito en el párrafo anterior se observan en la Figura 19. A pH 4 la eficiencia de la remoción del color expresado es favorable en un 40.8 %; y de manera muy marcada en pH 3, 6, 7 y 8 no ocurre así; excepto en pH 5, sin embargo una vez que pasan los 15 minutos establecidos para este tratamiento la remoción de color aun no termina.

En el presente estudio se observa de acuerdo a los resultados mostrados en las gráficas anteriores, que la remoción del contaminante se ve afectada por la distancia entre los electrodos

y el espesor de éstos, luego de un tiempo de tratamiento superior a los 15 min, se consideró que el tratamiento con electrodos de aluminio no sería adecuado por el tiempo que se tardaba dicho tratamiento sin tener los resultados esperados en cuanto a la remoción del colorante del agua sintética. Lo anterior se observa mediante la comparación de la Figura 19 y la Figura 24 donde con el mismo tiempo de tratamiento los resultados no son los mismos, cabe destacar que para obtener mejores resultados se le realizó un lavado a los electrodos y al reactor, sin embargo no se obtuvo lo deseado en el tiempo esperado de acuerdo a lo que reportan algunas fuentes. (Holt, 2006)

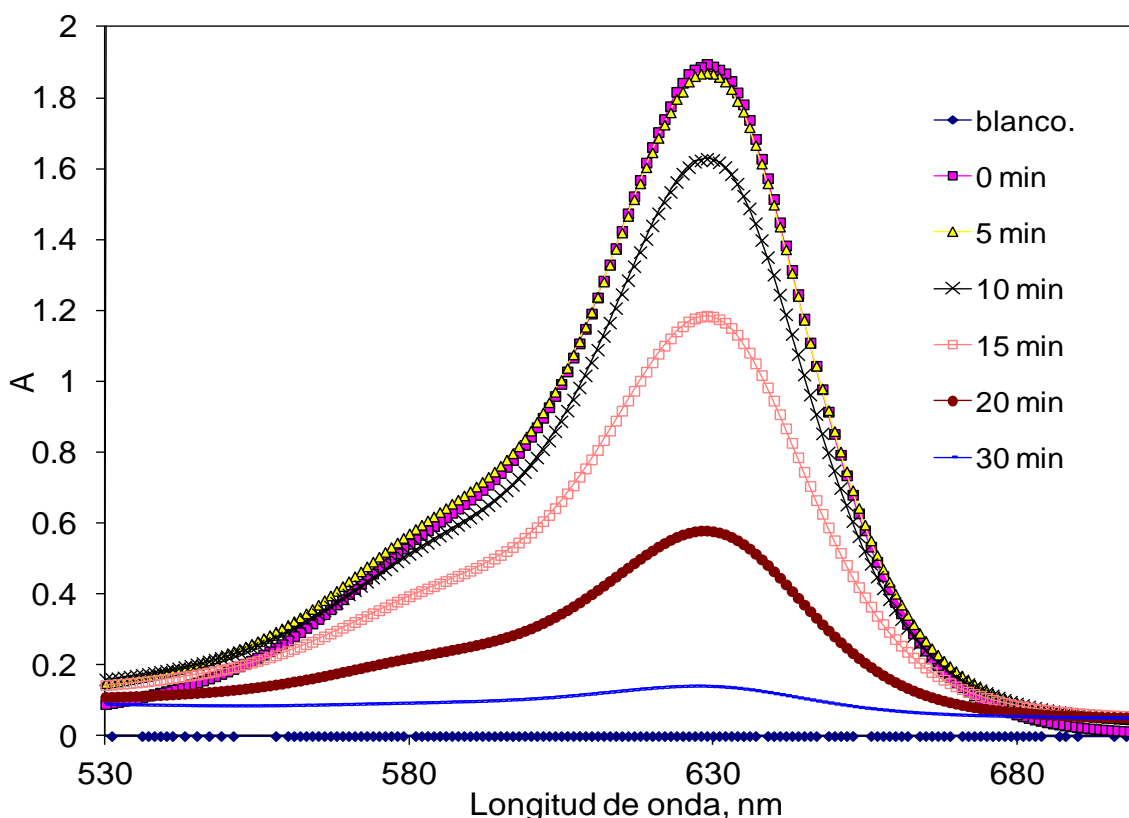


Figura 21.- Espectro de absorción del colorante comestible azul durante el tratamiento de electrocoagulación con electrodos de aluminio.

Es importante destacar que el reactor que se construye con electrodos de aluminio no tuvo resultados favorables para la degradación del color a pesar de la variación de pH, la adición de electrolito soporte para promover la reacción, dichos resultados se atribuyen a la distancia a la que se encontraban los electrodos (5cm) así como las dimensiones de cada uno de éstos, lo cual se debe a la distancia entre electrodos, que en el caso del reactor 2 que es el de los electrodos de hierro hay menor distancia entre éstos (1.2 cm).

Reducir la distancia entre los electrodos ocasiona una mayor actividad en las interfases de los electrodos. (Molera, 1989)

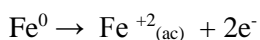
Tratamientos B y C en el reactor 2 (electrodos de hierro)

En este caso las condiciones de operación en el segundo reactor que se tomaron en cuenta para iniciar con el experimento son de 2A, un volumen de 500mL, tiempo de tratamiento de 15 minutos.

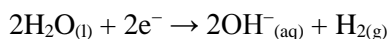
En el caso del reactor con electrodos de hierro, se consideran características que se pretende mejoren los ensayos realizados con el reactor 1, esto es básicamente en el espesor de cada placa y en la distancia entre los electrodos, que al colocarse más cerca, esto es 1.2 cm entre cada placa, se pretende que además de que no sea necesario el electrolito soporte.

La remoción de color en el agua residual ocurre cuando el metal que actúa como ánodo de sacrificio en esta caso de Fe^0 pierde partículas reduciéndose a Fe^{+2} y posteriormente a Fe^{+3} éste al unirse con el ion $(\text{OH})^-$ del agua ocasiona la formación del precipitado $\text{Fe}(\text{OH})_3$ se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones:

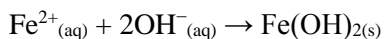
Reacción anódica



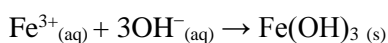
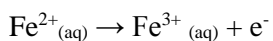
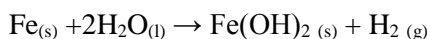
Reacción catódica



Reacción de la solución



Reacción completa



En la Figura 23 (diagrama de distribución de especies) se observa que a pH 3.2 se garantiza la producción de una especie insoluble de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que ayuda a la eliminación del colorante en el agua debido a que es un coagulante muy utilizado.

Cálculo de número de moles de electrones para el hierro:

$$t = 15 \text{ minutos} = 900 \text{ segundos}$$



$$n = \frac{I \cdot t}{F \cdot q} = \frac{(2A)(900s)}{(96500)(2)} = 0.009 \text{ moles de electrones} \quad (7)$$

Los 0.009 moles de electrones obtenidos que equivalen a 0.018M. Con el oxígeno disuelto en el agua y la luz el Fe^{2+} pasa a Fe^{3+} y con la producción de OH^- en el cátodo se pueden.

Una vez que se forma el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ los coloides se aglomeran debido a su carga negativa arrastrando con ellos al color presente en la muestra sintética, nuevamente bajo el concepto de lo que es un complejo activado, dichos complejos activados se aprecian en el diagrama de distribución de especies que se muestra a continuación:

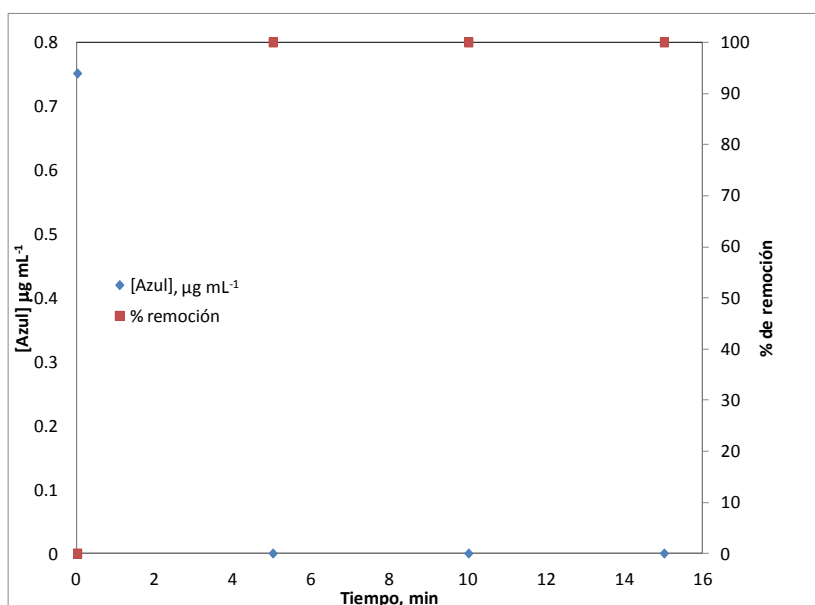


Figura 21.- Gráfica del tratamiento realizado con electrolito y sin electrolito a 2 A y pH 7, en el reactor de electrodos de hierro.

Como puede apreciarse en la Figura 21, la adición de un electrolito soporte (Na_2SO_4) en este caso no tiene diferencia significativa, debido a que muestran el mismo comportamiento en la remoción del colorante, como puede apreciarse en la gráfica los puntos que indican el tratamiento sin adición de electrolito soporte muestran una eficiencia del 100% en el tiempo 5 minutos, lo que desde este momento indica que la cercanía que presentan las placas hace que el

proceso ocurra de manera espontánea sin necesidad de otra sustancia, recordando que el hierro se oxida fácilmente permitiendo que la electrocoagulación ocurra.

Cabe destacar que en el tiempo 10 minutos la concentración comienza a incrementar su valor y con ello se observa la apariencia de que el colorante no se remueve. Esto es asociado a que después del tiempo óptimo de remoción que es de 5 minutos y sea removido totalmente, sucede que a mayor tiempo de tratamiento se tiene un exceso de producción de iones Fe^{3+} , los cuales ya no tienen colorante por arrastrar y empiezan a depositarse en el reactor, lo que afecta el valor de la concentración de las muestras en ese tiempo de tratamiento.

En la gráfica siguiente que correspondiente a la Figura 21, se muestra el comportamiento del espectro de absorción que presenta el colorante durante un tratamiento realizado a las condiciones de corriente de 2 A y sin electrolito, además como puede observarse se ha colocado un incremento en concentración del colorante lo que muestra que el tratamiento requiere de incremento en el tiempo de tratamiento que es directamente proporcional al incremento en la concentración del colorante.

Lo anterior se fundamenta en el Principio de Le Chatelier el cual sostiene que existen factores que afectan la velocidad de una reacción y que dentro de dichos factores se encuentra la concentración, explicando que un cambio en la concentración de los reactivos implica un cambio en el proceso químico que se esté efectuando. (Chang, 2006)

Dentro de los tratamientos que se plantearon en la metodología se tiene el tratamiento C el cual consiste en realizar el tratamiento a diferentes pH, con lo que se espera obtener un pH óptimo.

Para tener una idea de las posibles especies que se esperan, se construyeron los diagramas de distribución de especies para Fe(II) y Fe(III).

En el diagrama de distribución de especies para Fe(II) de la Figura 18 se observa que en el intervalo de pH que va de 0 a 7.8 predomina la especie de FeSO_4 , posteriormente de 7.8 hasta 12 se tiene la formación del $\text{Fe}(\text{OH})_2$. El diagrama se considera con iones sulfato debido a que se utilizó H_2SO_4 para ajustar el pH.

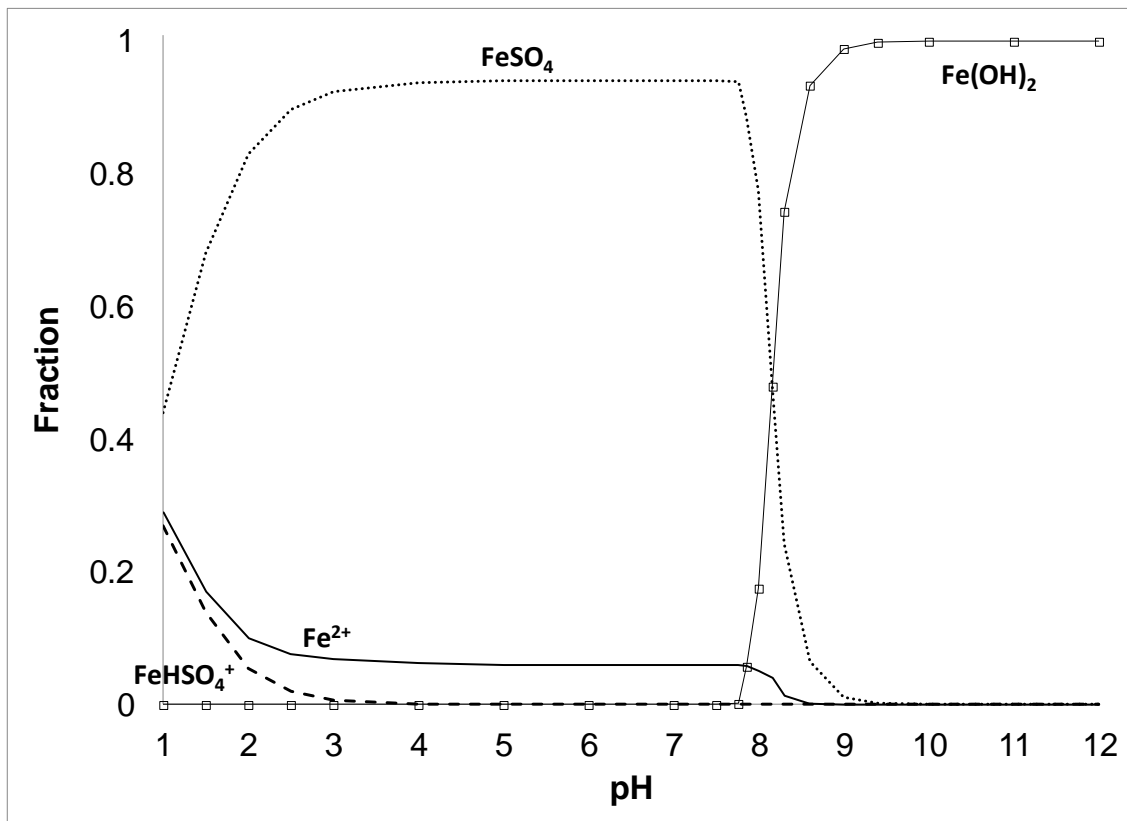


Figura 22.- Diagrama de distribución de especies para el hierro considerando 0.018M Fe²⁺.

La presencia de Fe(III) es debida a la oxidación del Fe(II) por la presencia del oxígeno en el agua; por lo que es importante presentar el diagrama de distribución de especies de éste. En la Figura 23 se aprecia la formación de Fe(OH)₃ a partir de un pH de 3.2 en adelante lo cual es evidente en la experimentación debido a que el color de los flocs son de color amarillo característico del Fe(III).

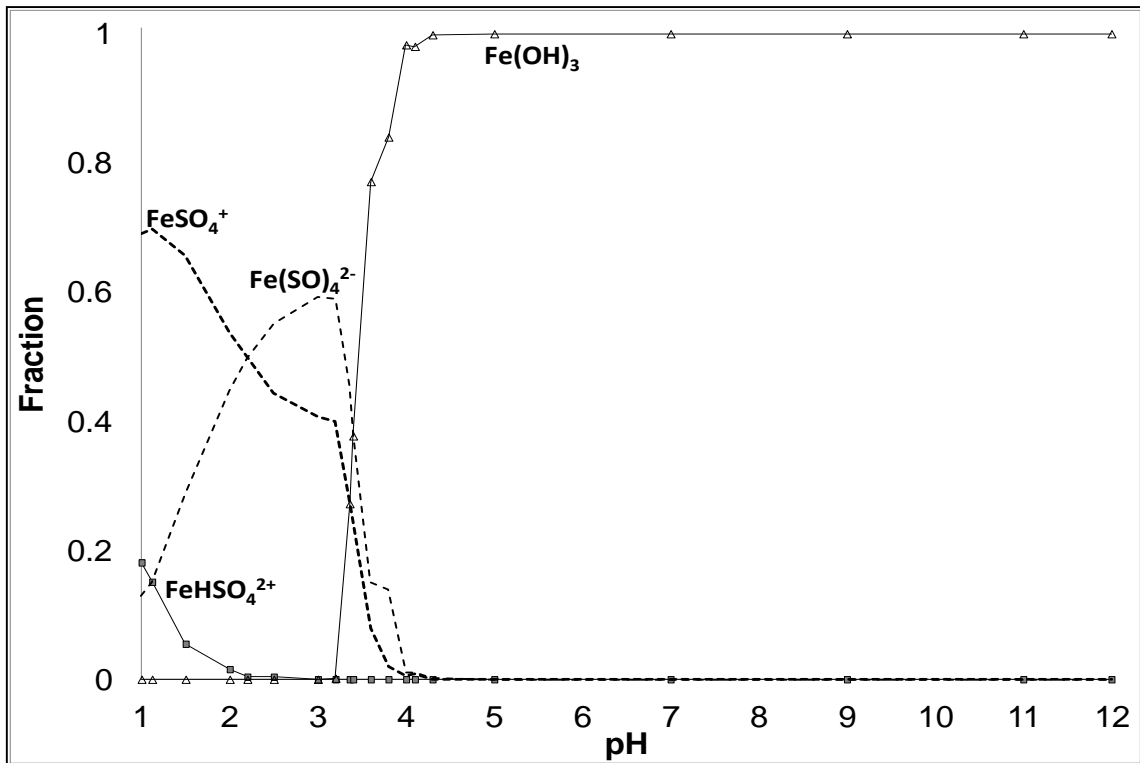


Figura 23.- Diagrama de distribución de especies para el hierro considerando 0.018M de Fe^{3+} .

En las Figuras 17, 22 y 23 correspondientes a los diagramas de distribución de especies como puede observarse están en función del pH y de la fracción molar del ion, y permite apreciar los intervalos de pH de las sustancias formadas dentro de las cuales las especies coagulantes.

De hecho cuando el hierro comienza a oxidarse a Fe(III) la concentración de este es alta, esto tiende a afectar la remoción de los contaminantes. (Barrera, 2011)

Lo anterior justifica la razón por la cual el primer reactor no permitió la remoción del color en el agua sintética y la razón por la cual al incrementar el tiempo de tratamiento en el reactor 2 se producía de Fe^{3+} , lo comenzaba a afectar las lecturas en el espectrofotómetro, Figura 20.

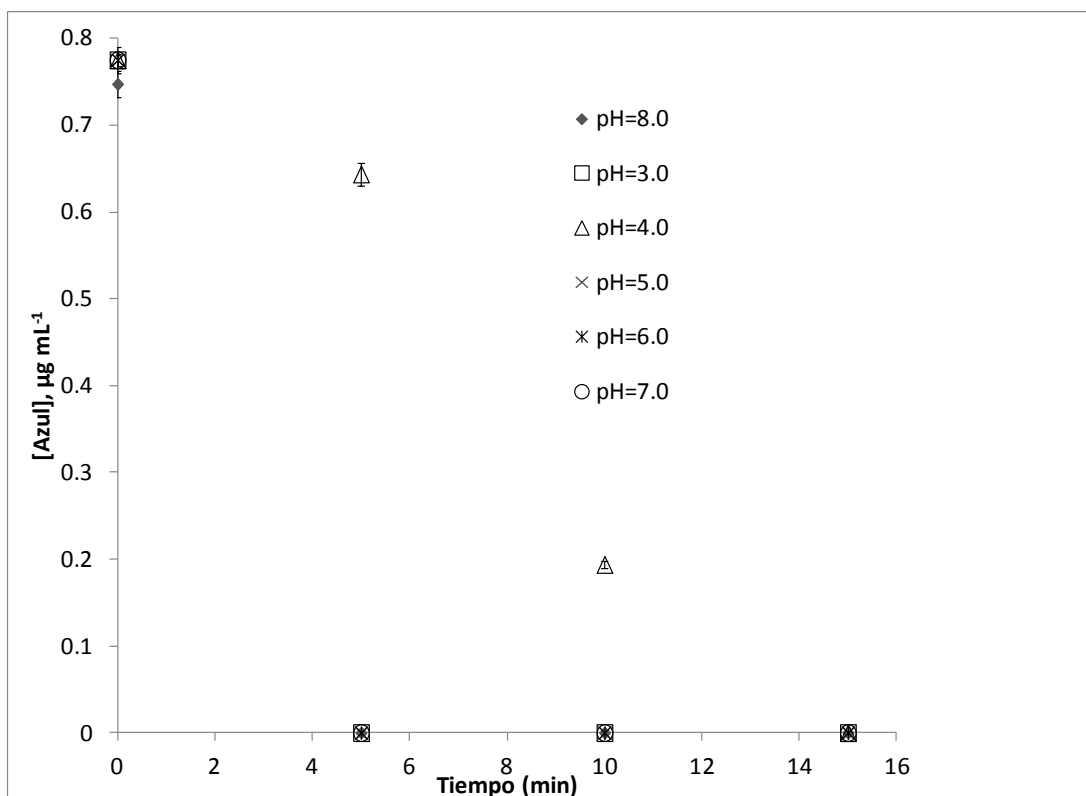


Figura 24.- Resultados del tratamiento C aplicado en el reactor 2.

Si se observa detenidamente los dos diagramas de distribución de especies, se destaca que la baja concentración de hierro forma especies en solución acuosa. El pH influye en la formación de especies insolubles, mientras a pH alto hay solo dos especies químicas en la solución a pH ácido las especies insolubles aumentan, como se observa en las Figuras 20 y 23.

De acuerdo con el tipo de enlace que posee la molécula del agua éste le aporta propiedades importantes dentro de las cuales se encuentra la capacidad de conducción de electricidad cuando en ésta se encuentran disueltos iones como es el caso del agua utilizada para preparar el agua sintética que se sometió a los tratamientos A, B y C.

Tabla 8. Condiciones óptimas para eliminar el color artificial presente en el agua sintética.

Parámetro	Valor	Unidades
pH	7.0	
Intensidad de corriente	2.0	Amperes
Distancia entre electrodos	1.2	cm
Densidad de corriente	3.5	mAcm ⁻²

En cada tratamiento C aplicado a cada uno de los dos reactores, se ajustó el pH con la adición paulatina de una solución [1M] de H₂SO₄ o NaOH [1M] según fuese necesario y la medición de dicho ajuste con el potenciómetro, con lo que se observó de manera general que en pH 7 existe eficiencia del tratamiento pues la absorbancia y tiempo de tratamiento fueron menores que en los demás pH.

Pruebas adicionales realizadas a partir de las condiciones óptimas del tratamiento de este trabajo.

1) Demanda química de oxígeno en el reactor más eficiente

Una vez obtenidas las condiciones óptimas del tratamiento las cuales fueron 2 A de corriente, un pH de 7.0, así como una distancia entre electrodos reducida a 1.2cm; todo esto en el reactor de electrodos de hierro; se realizan pruebas en dicho reactor tomando alícuotas cada 5 minutos a las cuales se les determina la DQO. Los resultados obtenidos en dichas pruebas se resumen en la gráfica de la Figura 25, en la cual puede observarse que si bien en 5 minutos se logra reducir la DQO a cero con ello el colorante comestible.

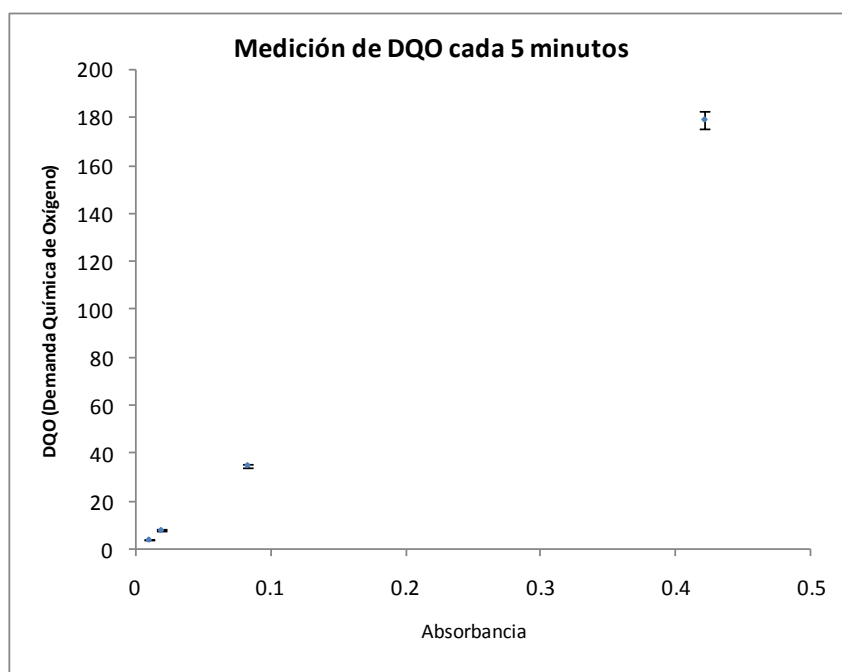


Figura 25.- Gráfica de resultados obtenidos en pruebas realizadas luego de la optimización del tratamiento midiendo DQO.

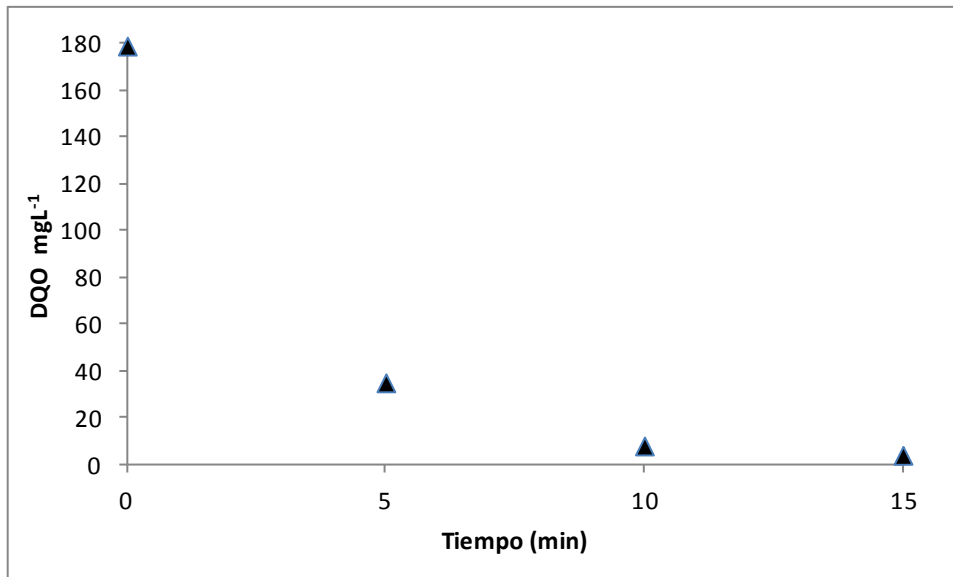


Figura 26.- Promedio de resultados que se obtuvieron en la determinación de DQO a condiciones óptimas de tratamiento.

En la realización de los experimentos del reactor de hierro se observa que existe una eficiencia en la remoción del color azul presente en el agua sintética que se preparó; alcanzando un porcentaje de remoción de 99.9%. Así mismo el comportamiento que presenta la gráfica de la Figura 26 expresa que la DQO respecto al tiempo se remueve en un porcentaje del 99.9% del colorante durante un tiempo de 15 minutos.

La gráfica que expresa la cinética del proceso se indica en la siguiente Figura, cabe destacar al respecto que la cinética es en todos los pH la misma, indicando que la concentración del colorante disminuye respecto al tiempo.

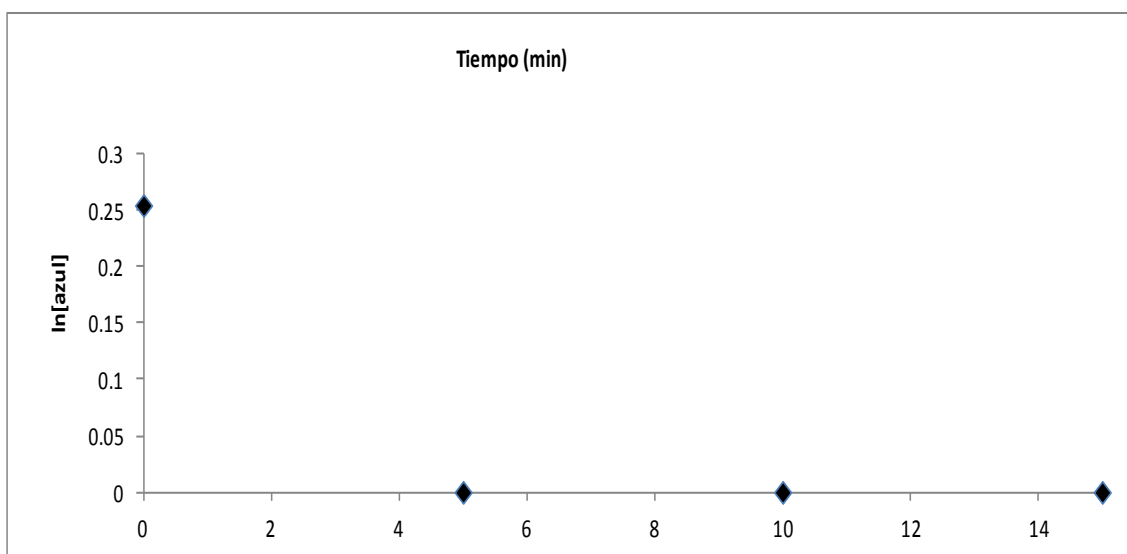


Figura 27. Gráfica de la cinética que sigue el tratamiento de electrocoagulación en la remoción del colorante azul.

Lo anterior permitió realizar un tratamiento adicional a una mezcla de colorantes como una aplicación demostrativa de que éste método es útil para la remoción de otros colorantes; además es posible aplicar los tratamientos avanzados de oxidación al agregar peróxido de hidrógeno.

2) Tratamiento electroquímico para mezcla de colorantes.

Caracterización espectrofotométrica de colorantes azul y amarillo.

Para el estudio de eliminación del color verde vegetal mediante un método electroquímico, fue necesario caracterizar el sistema por espectrofotometría y realizar curvas de calibración para evaluar el sistema de tratamiento.

La Figura 28 muestra el espectro de absorción de los colorantes amarillo, azul y verde. Se puede observar que las bandas de absorción tienen un máximo de absorción en una longitud de onda de 631 nm que corresponde al color azul y en 415 nm para el color amarillo. Como es sabido, el color verde es la combinación de los colores amarillo y azul, lo cual se comprueba con el espectro de absorción obtenido para el colorante verde, ya que presenta las bandas de absorción antes mencionadas de los dos colorantes.

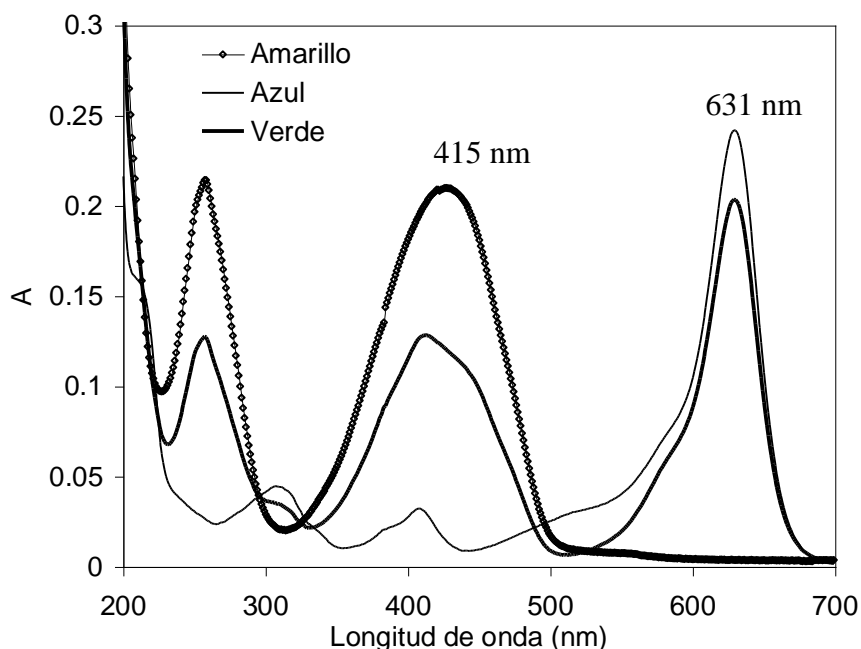
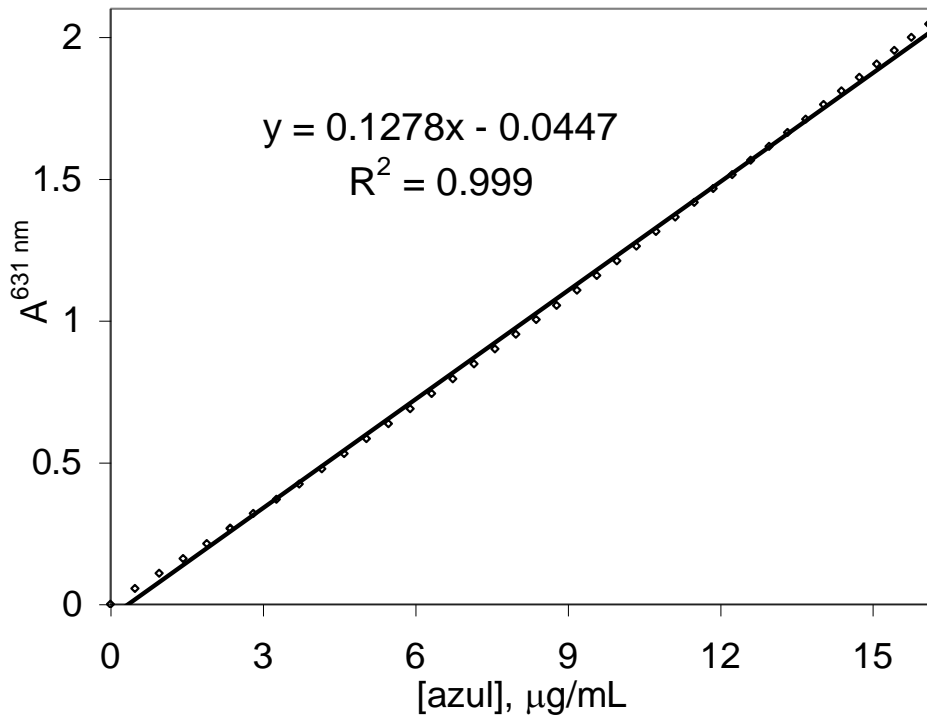


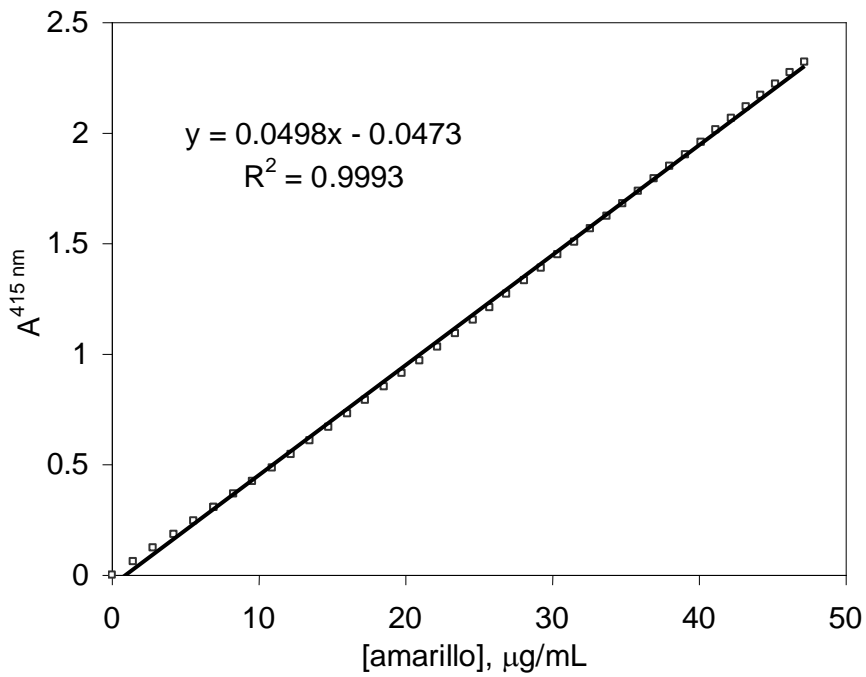
Figura 28. Espectro de absorción de los colorantes comestibles azul, amarillo y verde.

Una vez caracterizado el sistema de estudio se elaboraron las curvas de calibración (Figura 28). Se realizaron los gráficos de absorbancia (A) en función de la concentración del colorante (en

$\mu\text{g/mL}$) calculada a partir de la cantidad especificada de la solución estándar. El análisis de regresión lineal indica que los resultados obtenidos tienen una tendencia lineal, debido a que el coeficiente de determinación lineal (r^2) presenta un valor de 0.999 para los dos A estudiadas el azul a 631 nm y 415 nm para el amarillo.



a)



b)

Figura 29. Gráficos de absorción en función de la concentración del colorante a) azul y b) amarillo.

Estas curvas de calibración fueron utilizadas para evaluar los tratamientos electroquímicos aplicados donde se varió el pH y corriente (i).

Las variables estudiadas para el tratamiento electroquímico fue corriente aplicada de 2 y 4 A, con y sin adición de H_2O_2 a pH 2 constante. Se tomaron muestras cada 5 min durante 60 min.

A partir de la absorción leída, fueron calculadas las concentraciones residuales de los colorantes azul y amarillo a partir de las curvas patrón. Se trazaron 4 gráficos de concentración (en $\mu\text{g/mL}$) en función del tiempo (min), para cada una de las pruebas. En la Figura 30 se presenta el comportamiento típico de un tratamiento electroquímico con las condiciones experimentales de 4 A, sin H_2O_2 , se observa que hay una disminución de la concentración de los colorantes con el tiempo de tratamiento aplicado. Se obtiene la máxima remoción desde un tiempo de 30 min para los dos colores.

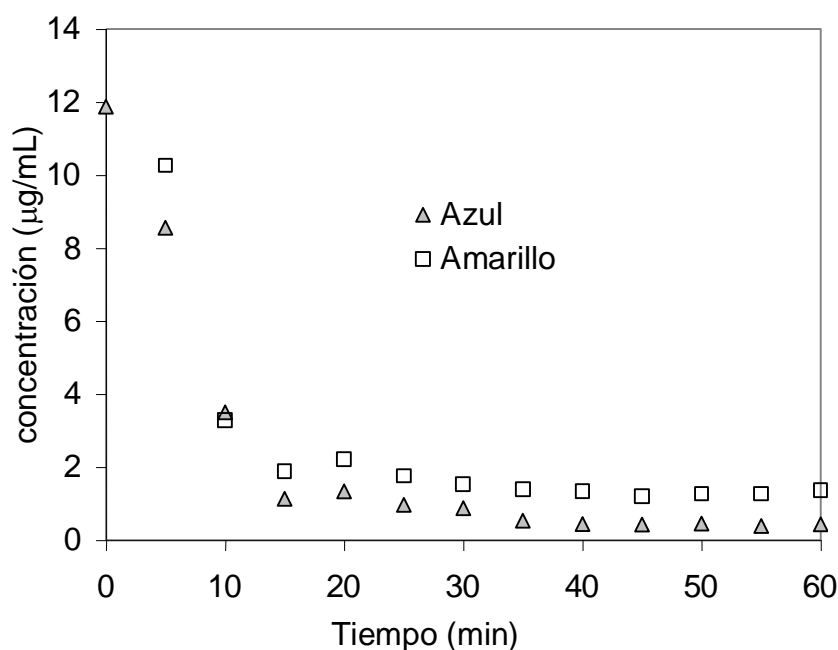


Figura 30. Gráfico de concentración de colorante en función del tiempo para el tratamiento electroquímico aplicando una intensidad de corriente de 4A sin adición de peróxido.

En la Figura 31 se presenta el comportamiento típico de un tratamiento electroquímico con las condiciones experimentales de 4 A, con H_2O_2 , este presenta un comportamiento similar al descrito anteriormente. Sin embargo, en el color azul se presenta una disminución hasta $1.8 \mu\text{g/L}$ en los primeros 10 min y para ambos colores se observa que las disminución máxima se presenta a los 25 min de tratamiento.

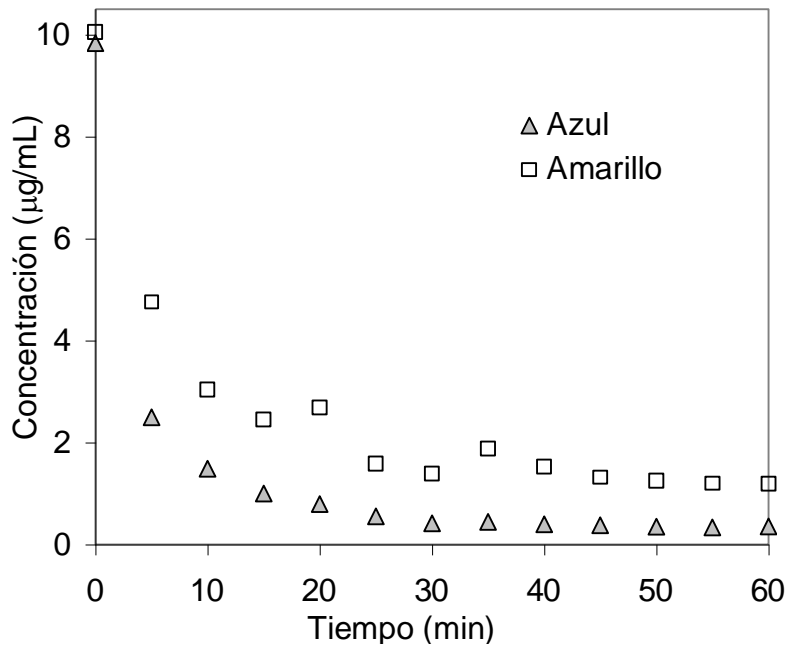


Figura 31. Gráfico de concentración de colorante en función del tiempo para el tratamiento electroquímico aplicando una intensidad de corriente de 4 A, adicionando peróxido de hidrógeno.

Una vez que se trazaron todas las gráficas se procedió a calcular el porcentaje de remoción de cada color en las 4 pruebas para probar la efectividad de cada una de ellas y a partir de ahí se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 9.

Tabla 9.- Resultados de la remoción de color para cada una de las pruebas, después de un tiempo de 60 minutos de electrocoagulación.

<i>Prueba</i>	<i>% remoción de color después de 60 minutos</i>	
	<i>Azul</i>	<i>Amarillo</i>
2A sin peróxido	94.55%	92.48%
2A con peróxido	71.47%	77.01%
4A sin peróxido	96.32%	92.72%
4A con peróxido	96.42%	88.19%

La mayor eficiencia se alcanzó bajo las condiciones de 4A de intensidad de corriente y sin la adición de peróxido, donde se observó alrededor de un 96% de remoción de color azul y de un 93% aproximadamente para el color amarillo. Sin embargo, con la adición de peróxido de hidrógeno se obtienen resultados similares con la aplicación de la misma intensidad de corriente, pero la remoción del color amarillo no es tan alta en comparación del tratamiento anterior, ya que en los dos sistemas con los que se trabajó con peróxido, la remoción aumentó

para el colorante azul, pero para el colorante amarillo disminuyó considerablemente. Esto puede asociarse a una interferencia de con el Fe(III) formado durante la electrolisis ya que este presenta una coloración amarilla.

CONCLUSIONES

- Se comprobó que la electrocoagulación es un tratamiento efectivo en la remoción de colorantes alimenticios, indicando al mismo tiempo la disminución de la DQO; utilizando el reactor de electrodos de hierro.
- Un factor importante de acuerdo a la bibliografía y que en el desarrollo de este proyecto fue comprobado, es la distancia entre los electrodos; indicando que a menor distancia entre dichos electrodos será mayor la actividad entre las partículas, lo que le aportará eficiencia a la electrocoagulación.
- La propuesta de manejar la electrocoagulación como un tratamiento previo al tren de tratamiento convencional resulta convincente ya que se remueve un 99.9% de los contaminantes además que en el proceso dichos contaminantes pueden también ser degradados.
- La eficiencia del tratamiento en el reactor de electrodos de hierro por electrocoagulación resultó mayor con respecto al reactor de electrodos de aluminio.
- La adición del sulfato de sodio no mejoró considerablemente el proceso de electrocoagulación debido a que el agua utilizada fue agua potable la cual ya tiene una carga de iones lo que permite cerrar el circuito en la celda electroquímica.
- Se comprobó que el tratamiento también se puede utilizar para mezclas de colorantes.

REFERENCIAS

- 1) Aplin, R. and Waite, D. 1998. **Comparison of three advanced oxidation processes for degradation of textile dyes.** Journal of Appl. Electrochem. 235-241.
- 2) Barrera, C. Díaz. 2002. **A combined electrochemical-irradiation treatment of highly colored and polluted industrial wastewater.** Radiation Physics and Chemistry
- 3) Barrera, Carlos Díaz,, et. al. **Electrochemical Treatment Applied to Food – Processing industrial Wastewater.**
- 4) Brett, Ch. M. and Oliveira, B. A. 1994. **Electrochemical cells: thermodynamic properties and electrode potentials. En: Electrochemistry: principles, methods and applications.** Oxford Science Publications U.S.A. p.p.13-39
- 5) Brillas Enric, and Casado.- **Mineralization of herbicide 3,6-dichloro-2-methoxybenzoic acid in aqueous medium by anodic oxidation, electrofenton and photoelectro-fenton.** Electrochimica Acta 48 (2003)1697-1705
- 6) Brillas, E. and Casado, J. 2002, **Aniline degradation by electro-Fenton and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for waste water treatment.** Chemosph, 47: 241-248
- 7) Brown, Theodore L. et. al. **Química La Ciencia Central.** Pearson Educación de México. Novena edición. 2004, pp. 777
- 8) Can, O.T. Bayramoglu, M. and Kobya M. 2003, **Decolorization of reactive dye solutions by electrocoagulation using aluminum electrodes.** Ind. Eng. Chem. Res. 42: 3391-3396.
- 9) CH. Comninellis, C. Pulgarin, **Anodic oxidation of phenol for waste water treatment,** Journal of Applied Electrochemistry 21 (1991) 703-708
- 10) Chang, Raymond. **Química,** Ed. Mc Graw Hill, sexta edición, pp.
- 11) Carbajal López K., G Roa Morales, I. Linares Hernández, R. M. Rivas, P. Balderas Hernández, **Tratamiento electroquímico de aguas residuales provenientes de una industria chocolatera,** XXVII Congreso de la sociedad mexicana de electroquímica, 2012.
- 12) Gutiérrez, Octavio Flores. 2007. **Validación del análisis de DQO en aguas residuales, por método espectrofotométrico, empleando el espectrofotómetro HACH DR 4000.** Facultad de Química UAEM. Toluca, México

- 13) Henry J. Glynn, & Heinke, Gary W. **Ingeniería Ambiental**, 2da ed. Prentice Hall Hispanoamericana., 1999, México. Pp. 432
- 14) Holt P. K., Barton G. W., Mitchell C. A., 2005, **The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology**, Chemosphere 59, pp. 355-367
- 15) Holt Peter, Barton Geoffrey and Mitchell Cynthia. **Electrocoagulation as a Wastewater Treatment**. 2006
- 16) Kemmer Frank N. and Mc Callion John. 1997. **Manual del Agua Su Naturaleza, Tratamiento y aplicaciones**. Mc Graw hill. pp1-1
- 17) Kiely, G. 1999, **Ingeniería ambiental**, Mc Graw Hill, España, p.p. 567-572
- 18) Ibañez, J. G. Singh, M. M. and Szafran, Z. 1998. **Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment. Part 4: Electroflotation**. Jour of Chem. Ed. 75: 1040-1041
- 19) Lapeña, Miguel Rigola. 1999. **Tratamiento de Aguas Industriales Aguas de Proceso y Residuales**. Alfaomega, pp28-48
- 20) Linares-Hernández Ivonne , Carlos Barrera Díaz , Gabriela Roa Morales , Bryan Bilyeu, Fernando Ureña Núñez, **A combined electrocoagulation–sorption process applied to mixed industrial wastewater**, Journal of Hazardous Materials 144 (2007) 240–248
- 21) L. Koene, L.J. J. Janssen (2002) **The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection**. Chemical Engineering Journal 85 (2002) 137-146
- 22) Martínez, Angel G., Marco A. Rodríguez P, Luis E. Pacheco T., Miriam G. Rodríguez R y Sergio A. Martinez D.; **Tratamiento del agua residual doméstica por medio de un reactor electroquímico continuo**, 2005
- 23) Molera Sola, Pere. **Electromecanizado , electroerosión y mecanizado electroquímico**. Productica Marcombo Boixareu Editores, España 1989. pp 47-95.
- 24) Mollah, M. Y. Schennach, R. Pargamol, J. P. Cocke, D. L. 2001. **Electrocoagulation (EC)- science and applications**. Jour. Haz. Mater. B84: 29-41
- 25) Morante, G., 2002, Electrocoagulación de aguas residuales, revista colombiana de física 34: 2-6
- 26) M. Giomo, et- al. **Electrochemical removal of tannins from aqueous solutions**. Ind. Eng. Chem. Res. 2000, 39, 494-499
- 27) Normas Oficiales Mexicanas. *Diario Oficial de la Federación*. México.

- 28) Pletcher, D. 1991, **The nature of electrode reactions**. En: **A first course in electrode processes**. Alresford Press LTD. England, p.p.1-50
- 29) Roa-Morales Gabriela, Eduardo Campos Medina, Juan Aguilera Coter, Bryan Bilyeu , Carlos Barrera Díaz, **Aluminum electrocoagulation with peroxide applied to wastewater from pasta and cookie processing**. Separation and Purification Technology 54 (2007) 124-129
- 30) Robinson, James W. **Principios de Análisis Instrumental**. Editorial Acribia, 1974, España, pp. 35-45
- 31) R. Bandala, Et. al. **Degradación de desechos de laboratorio mediante fotocátalisis solar**. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 27 al 31 de oct. 2002
- 32) Spyrkowicz Lidia, et. al. **Electrochemical oxidation of dyeing baths bearing disperse dyes**. Ind. Eng. Chem. Res. 2000, 39, 3241-3248
- 33) Technology, R. I. o. Puigdomenech, Hydrochemical Equilibrium Constants Database (MEDUSA), Stockolm, 1997.
- 34) **Tratamiento Del Agua Residual Doméstica Por Medio De Un Reactor Electroquímico Continuo**. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
- 35) <http://www.miliarium.com/PremiosMiliarium/2003/TratamientoAguas/TratamientoAguas.pdf> (consulta: 10 de julio de 2013)
- 36) http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id_sec=42&id_art=1879&id_ejemplar=74 (consulta: 10 de julio de 2013)
- 37) <http://www.semarnat.gob.mx> (consulta: 10 de julio de 2013)
- 38) <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Temas/AgendadelAgua2030.pdf>, Comisión nacional de agua, Agenda del agua 2030 (consulta: 10 de julio de 2013)

A N E X O S

ANEXO 1: Leyes de Faraday

Según Faraday la cantidad máxima de metal (m) que es eliminado en el ánodo, es función de la intensidad de corriente (I), del tiempo de experimentación (t) y de la valencia gramo del material de ánodo (ϵ), es decir:

$$m = \frac{I \cdot t \cdot \epsilon}{96500}$$

Faraday demostró que si dos metales se utilizan como electrodos, dentro de una disolución salina llamada electrolito, se desprendían partículas de metal conectado al electrodo positivo (llamado ánodo). Dichas partículas luego de atravesar la disolución salina se depositaban en el electrodo negativo (llamado cátodo); para que esto sea posible la corriente aplicada debe ser continua. (*Molera, 1989*)

Se disuelve el ánodo en los puntos de mayor densidad de corriente, lo cual puede ser del orden de los 800 A/cm², unas 1000 veces la densidad de corriente empleada en galvanoplastia o en el decapado electrolítico. (*Molera, 1989*)

La distancia entre los electrodos que en este caso están intercalados como se muestra en las Figuras 10 y 12 tiene mucho que ver ya que a menor es la distancia entre éstos, mayor será la densidad de corriente y mayor será la velocidad de disolución del metal, pues cuanto menor es la distancia entre los electrodos menor es la resistencia eléctrica ofrecida por la solución electrolítica

En cuanto a la velocidad de desprendimiento, esta se ve limitada por dos consideraciones de orden físico que son el punto de ebullición del electrolito y la velocidad máxima a la cual los átomos del metal pueden ser extraídos. La masa de 0.00111815 g recibe el nombre de *equivalente electroquímico de plata*, cada metal tiene su correspondiente equivalente electroquímico, entre mayor sea éste será mayor la velocidad de desprendimiento del metal y es independiente de las propiedades físicas del metal.

TABLA 10. Velocidad de disolución de los metales basada en las leyes de Faraday. (Molera, 1989)

			Velocidad de arranque a 1000A/pulgada ²	
Metal	Valencia	Densidad libras/pulg. ³	libra/A *hr	pulg3/min
Oro	1	0.698	16.22	0.387
	3		5.4	0.129
Hafnio	4	0.473	3.94	0.139
Aluminio	3	0.098	0.74	0.126
Hierro	2	0.284	2.3	0.135
	3		1.53	0.09
Plomo	2	0.41	8.52	0.346
	4		4.26	0.173
Níquel	2	0.322	2.41	0.129
	3		1.61	0.083
Cobre	1	0.324	5.22	0.268
	2		2.61	0.134
Cobalto	2	0.322	2.42	0.125
	3		1.62	0.084
Cromo	2	0.260	2.14	0.137
	3		1.43	0.092
	6		0.71	0.046

En la tabla anterior se muestran algunos valores de material arrancado al pasar 1000 A/pulg², cabe mencionar que también es interesante observar numéricamente la cantidad de material desprendido al circular 1000A.

TABLA 11. Volumen de material (cm³/s) eliminado al pasar una intensidad constante.(Molera, 1989)

Metal	volumen en cm ³ /s
Aluminio	2.096
Cromo	2.244
Cobalto	2.047
Cobre	2.195
Hierro	2.195
Níquel	2.047

ANEXO 2: Espectrofotometría

Desde hace ya mucho tiempo se ha usado el color como un parámetro para reconocer ciertas sustancias químicas, al reemplazar el ojo humano por otros detectores de radiación es posible estudiar la absorción de las sustancias no solo en el espectro visible sino también en el ultravioleta e infrarrojo.

Se denomina espectrofotometría a la medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda de la radiación y a las mediciones a una determinada longitud de onda.

En espectroscopía el término luz no sólo se aplica a la forma visible de radiación electromagnética, sino también a las formas UV e IR, que son invisibles. En espectrofotometría de absorbancia se utilizan las regiones del ultravioleta (UV cercano, de 195-400 nm) y el visible (400-780 nm).

La teoría ondulatoria de la luz propone la idea que un haz de luz es un flujo de cuantos de energía llamados fotones; la luz de una cierta longitud de onda está asociada con los fotones, cada uno de los cuales posee una cantidad definida de energía.

Como consecuencia de las interacciones entre los fotones y las partículas absorbentes, la potencia de haz es atenuada, de aquí que la *transmitancia* es la fracción de la radiación incidente transmitida por la solución.

$$T = (I/I_0) = (I_{\text{solución}}/I_{\text{solvente}})$$

$$\% T = (I/I_0) \times 100$$

Entonces la *absorbancia* *A* de una solución se define mediante la ecuación:

$$A = -\log T = \log (I_{\text{solvente}}/I_{\text{solución}})$$

La absorción de radiación ultravioleta y visible por una especie M es un proceso de dos etapas, la primera corresponde a la excitación indicada por la ecuación:

Donde M^* representa la partícula atómica en su estado electrónico excitado producido por la absorción del fotón $h\nu$ y éste desaparece en el proceso de *relajación*.

Existe una relación entre la concentración de la solución y su capacidad de absorber

Las medidas de absorción representan la ventaja de crear una alteración mínima del sistema en estudio (excepto cuando hay descomposición fotoquímica) la absorción de radiación ultravioleta y visible se produce generalmente como consecuencia de la excitación de los electrones de enlace por lo que resulta un valiosa herramienta para la identificación de grupos funcionales en una molécula y proporciona un método muy selectivo para el análisis cuantitativo de compuestos cuyos enlaces producen absorción. (*Skoog*)

Los electrones que contribuyen a las características de absorción de una molécula orgánica son 1) los que participan directamente en la formación de enlaces entre átomos y se asocian así con más de un átomo; 2) electrones exteriores no enlazados o no compartidos, situados principalmente en átomos como oxígeno, halógenos, azufre y nitrógeno. (*Skoog*)