



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ELIMINACIÓN DE SILICATOS DE AGUA DE PROCESO
INDUSTRIAL POR ELECTROCOAGULACIÓN - FLOCULACIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

JOSÉ TAKAO HOSHIKO OYAMA

MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Prof. LUIS FRANCISCO FARRERA GAMBOA
Vocal	Prof. ANA ISABEL CARRANCO PÉREZ
Secretario	Prof. FRANCISCO JAVIER GARFIAS VÁZQUEZ
1er. Suplente	Prof. AURORA DE LOS ÁNGELES RAMOS MEJÍA
2do. Suplente	Prof. MARÍA GUADALUPE LEMUS BARAJAS

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Cd. Universitaria, México D. F.
Facultad de Química, UNAM

Asesor del tema: Dr. FRANCISCO JAVIER GARFIAS VÁZQUEZ

Sustentante: JOSÉ TAKAO HOSHIKO OYAMA

ÍNDICE

Capítulo I	INTRODUCCIÓN	
Introducción		11
Capítulo II	ANTECEDENTES	
Antecedentes		14
2.0 Fundamentos teóricos		15
2.1 El Agua		15
2.1.1. El agua en el planeta Tierra		15
2.1.2. El ciclo del agua		16
2.1.3. Propiedades del agua		18
2.1.4. Algunos de los beneficios del agua		20
2.1.5. Tipos de contaminantes encontrados en el agua		21
2.1.5.1. Contaminantes orgánicos		21
2.1.5.2. Los hidrocarburos		22
2.1.5.3. Los insecticidas		22
2.1.5.4. Los metales		22
2.1.5.5. Los silicatos		23
2.1.5.5.1. Clasificación de los silicatos		
Nesosilicatos, Sorosilicatos, Ciclosilicatos,		
Insosilicatos, Filosilicatos, Tectosilicatos		23

2.1.6. Características y parámetros de prueba	
para el control de la calidad y la pureza del agua	26
2.1.6.1. Color	26
2.1.6.2. Olor	27
2.1.6.3. Sabor	27
2.1.6.4. Turbidez	27
2.1.6.5. Materia Sólida	28
2.1.6.6. pH	28
2.1.6.7. Conductividad	29
2.1.6.8. Dureza	32
2.1.6.9. Acidez y Alcalinidad	32
2.1.6.10. Nitrógeno	33
2.1.6.11. Fósforo	34
2.1.6.12. Carbón Orgánico Total	34
2.1.6.13. DQO y DBO	35
2.1.6.14. Contaminación Microbiana	35
2.1.6.15. Concentración de silicatos	35
2.1.6.16. La Ley de Lambert y Beer	36
2.1.6.17. La espectroscopia de Absorción Atómica	38
2.2. Coloide	39

2.2.1. Las características y origen de los coloides	40
2.2.2. La dispersión luminosa por partículas coloidales	41
2.2.3. Las propiedades electrocinéticas de los coloides	41
2.2.4. La estabilidad de los coloides	42
2.2.5. La eliminación del coloide	42
2.3. La Coagulación	42
2.3.1. El Potencial Zeta	42
2.3.2. Los Coagulantes	43
2.3.2.1. Antecedentes sobre los coagulantes	43
2.4. La Floculación	45
2.4.1. Los floculantes	46
2.5. La Electroquímica	47
2.6. La Electrólisis	47
2.6.1. Las Leyes de Faraday de la electrólisis	49
2.7. La Electrocoagulación-floculación (ECF)	50
2.7.1. La ECF para tratamiento de agua	51
2.8. El Electrodo	52
2.8.1. El electrodo estándar de hidrógeno	52
2.8.2. Otros electrodos estándar	53
2.9. La Celda Electroquímica	54

2.9.1. Clasificación de las celdas electroquímicas	54
2.9.1.1. Celdas voltaicas	
Celdas primarias y secundarias	54
2.9.1.2. Celdas de combustible	55
2.9.1.3. Celdas electrolíticas	55
2.10. Reactor Químico	58
2.10.1. Algunos tipos de reactores químicos	58
2.10.1.1. Reactor Batch o Discontinuo	59
2.10.1.2. Reactor Discontinuo de Volumen Constante	59
2.10.1.3. Reactor de Flujo o Continuo	60
2.10.1.4. Reactor Semicontinuo	61
2.10.1.5. Reactor Tubular	61
2.10.1.6. Reactor de Lecho Fluidizado	61
2.10.1.7. Reactor de Lecho Fijo	62
2.10.1.8. Reactor de Recirculación	63
2.10.1.9. Reactor de Burbujas	63
2.10.1.10. Reactor de Membrana	63
Capítulo III	DISEÑO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL
Diseño del equipo experimental	65
3.1. Fundamentos teóricos de diseño y operación	66

3.2. Lista de equipos, instrumentación y reactivos	67
3.2.1. Lista de equipos	67
3.2.2. Lista de material e instrumentación	67
3.2.3. Lista de reactivos	68
3.3. Equipo experimental del reactor batch	68
3.4. Equipo experimental del reactor continuo y continuo con recirculación	70
3.4.1. Diseño de los electrodos de aluminio	70
3.4.2. Diseño del reactor para la celda de ECF	73
3.4.2.1. Cálculo del volumen vacío de la celda de ECF	74
3.4.3. El sedimentador	75
3.5. Operación del equipo experimental del reactor continuo	76
3.6 Operación del equipo experimental del reactor continuo con recirculación	77
Capítulo IV RESULTADOS EXPERIMENTALES	
Resultados Experimentales	79
4.1 Fundamentos de los resultados experimentales	80
4.2 Análisis de silicato presente en el agua	80
4.3 Cálculos para la determinación de variables de proceso	82
4.3.1 Cálculo del rendimiento faradaico	83
4.3.2 Cálculo de la velocidad del fluido	88

5.2 Cálculos para el costo de operación de la celda de ECF experimental	
Consumo de energía, Tiempo de reemplazo de las placas,	
Costo de operación	109
5.3 Cálculos para la operación de una celda de ECF de tamaño industrial	112
5.3.1 Dimensiones de la celda de ECF	112
5.3.2 Variables para el manejo de la celda de ECF	113
5.3.3 Costos de operación de la celda de ECF	113
Capítulo VI	CONCLUSIONES
Conclusiones	116
Recomendaciones	119
Glosario	120
Bibliografía	121

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra está conformado en su mayoría por agua, de la cual sólo el 0.3 % es utilizable por los humanos. Una inmensa cantidad de personas que contamos con este escaso recurso utilizamos una gran cantidad de agua diariamente para distintos usos, tales como: beber, asearnos, lavar la ropa, etc. Pero esta no es la única forma en la que utilizamos el agua, ya que todo aquello que forma parte de nuestra vida cotidiana, como alimentos, fármacos, artículos de tocador, prendas de vestir, artículos de oficina, medios de transporte, etc., han llevado un largo proceso industrial que con gran seguridad ha requerido de agua para poder proporcionarnos el producto terminado.

La industria utiliza una gran cantidad de agua para poder llevar a cabo cada parte de la que consta un proceso de producción, esto implica de forma obligatoria que debe estar cubierto por completo el abastecimiento de agua, y ésta debe ser suficiente y de ningún modo faltar. Por esta y muchas otras razones, algunos investigadores dedicados al tratamiento de agua han utilizado distintos métodos para la limpieza de la misma, y han encontrado en sus estudios que aproximadamente un 70% del agua es posible limpiarla y retirarles contaminantes como materia orgánica e inorgánica entre otros. El 30% restante queda con una gran concentración de estos contaminantes.

Uno de estos métodos para la limpieza del agua es la electrocoagulación-floculación, este es un método desarrollado bajo los principios de la Electroquímica el cual ha sido eficiente para el tratamiento tanto de agua potable como de agua contaminada, enfocándonos al agua contaminada se puede mencionar el agua de restaurantes, agua de acuarios, agua proveniente de la industria textil, de la industria papelera, de alcantarillas, etc.

La electrocoagulación es un proceso en el cual se hace pasar una corriente eléctrica a través de un medio acuoso, ésta corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca determinadas reacciones químicas; si este medio se encuentra contaminado, al provocar o forzar estas reacciones los elementos contaminantes se aproximan a su estado más estable lo cual produce partículas sólidas que son menos coloidales y a su vez menos solubles que al estado de equilibrio.

Los contaminantes que se acostumbran eliminar por medio del uso de la electrocoagulación son muchos, como: grasas, aceites, desechos orgánicos e inorgánicos y sales por mencionar solo algunos. Dentro de estas sales podemos destacar al grupo de los silicatos, los cuales son sales del ácido silícico y forman la mayor parte de los minerales existentes en la corteza terrestre. Estos silicatos tienden, bajo ciertas condiciones, a depositarse en grandes cantidades, esto les proporciona una alta dureza y casi nula oportunidad de degradarse, este tipo de condiciones se da por lo general en la industria, en algunos equipos y tuberías tras un proceso de producción, lo cual resulta en el deterioro y poca funcionalidad de los mismos.

Para la Ingeniería Química este es un factor de gran importancia ya que en la actualidad cada parte a realizar de nuestras Ingenierías cuenta con una amplia serie de tuberías y equipos en diferentes tamaños, materiales y para cada uso en particular.

Por este motivo en concreto dado que es responsabilidad del Ingeniero Químico el conocer aquellos factores que alteran las condiciones de los instrumentos con los que trabaja, el planteamiento de esta tesis es enfocado a reducir la concentración de silicatos dentro del agua de salida de una torre de enfriamiento la cual proviene de la industria farmacéutica, utilizando para ello la electrocoagulación-floculación.

Capítulo II

ANTECEDENTES

2.0 Fundamentos teóricos

En este capítulo se describe la gran importancia del agua en nuestro planeta, algunos métodos para su control y uso adecuado de la misma y los fundamentos electroquímicos en el uso de la electrocoagulación-floculación para el tratamiento del agua con un alto contenido de silicatos.

2.1 El agua

2.1.1 El agua en el planeta Tierra

El volumen de agua existente en la Tierra es extenso, se ha calculado que los mares y océanos alojan $1.35 \times 10^{18} \text{ m}^3$ de agua, de la misma forma se ha estimado que en los polos hay aproximadamente $2.92 \times 10^{16} \text{ m}^3$ de agua. Ambas masas de agua integran cerca del 97% del agua contenida en la Tierra. Desafortunadamente sólo una pequeña parte de este porcentaje es útil como suministro de agua ya que del agua de mar cada litro contiene 35 gramos de sal y de los hielos polares sólo se puede abastecer una pequeña porción de habitantes en el planeta.

En el siglo pasado se estimaba que aproximadamente una sexta parte de la población mundial se encontraba desabastecida de agua (UNICEF, 2000) para los años siguientes se espera que la demanda de agua crezca proporcionalmente tanto como la población humana y de la misma forma se espera un gran crecimiento de la industria a nivel mundial (Asmal, 2000).

Algo que debemos tener muy claro es el hecho de que océanos, mares, ríos, nubes y lluvia están en constante cambio: el agua de la superficie se evapora, el agua de las nubes precipita, la lluvia se filtra por la tierra, etc. Sin embargo, un punto muy importante y que debemos tomar en cuenta es que la cantidad total de agua en el planeta no cambia, lo que sí cambia es la cantidad de agua potable para consumo humano. A la circulación y conservación de agua en la Tierra se le llama ciclo hidrológico, o ciclo del agua (ver figura 1).

2.1.2 El ciclo del agua

El ciclo del agua comienza con la evaporación del agua desde la superficie del océano. A medida que se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua: es la condensación. Las gotas se juntan y forman una nube. Luego, caen por su propio peso: es la precipitación. Si en la atmósfera hace mucho frío, el agua cae como nieve o granizo. Si es más cálida, caerán gotas de lluvia.

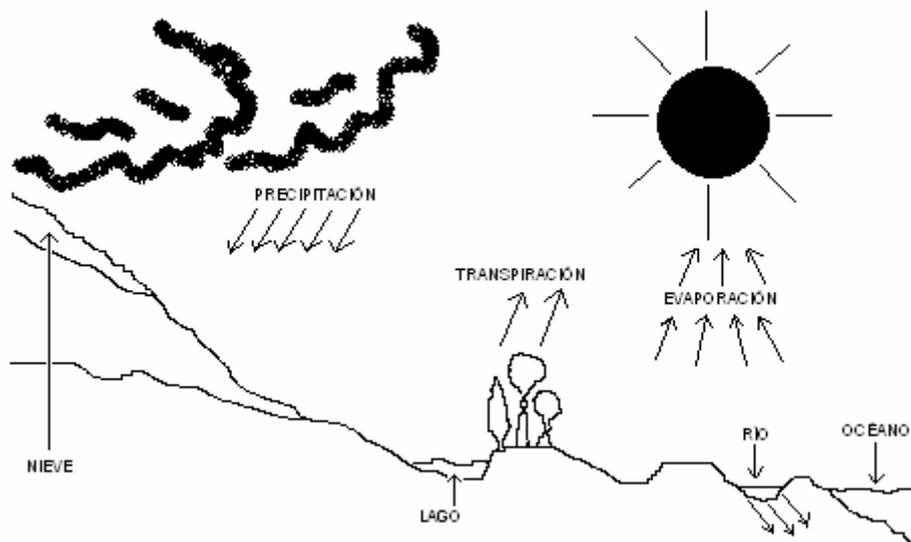


Figura 1. El ciclo del agua

Una parte del agua que llega a la tierra es aprovechada por los seres vivos; otra escurre por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. Otro poco del agua se filtra a través del suelo formando capas de agua subterránea, algunas raíces de las plantas absorben el agua para después evaporarla hacia el aire a lo cual se le llama transpiración. Más tarde, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación.

Al evaporarse, el agua deja atrás todos los elementos que la contaminan o la hacen no apta para beber (sales minerales, químicos, desechos). Por eso el ciclo del agua nos entrega un elemento puro.

Sin embargo y a pesar de que este proceso es natural y se lleva a cabo de forma continua, no es capaz de proporcionar la cantidad de agua suficiente para que la gran mayoría subsista y es por eso que aquella parte de la población que logra tener acceso a este recurso natural debe buscar una forma de hacerlo sustentable.

Existen varias formas de poder hacer esto viable y una de ellas sería utilizar agua potable únicamente para determinados fines y reutilizar el agua para aquellas tareas que no requieren de esta calidad, o sea, plantear un tratamiento del agua.

Este sistema de pre-tratamiento de agua utiliza un esquema similar al mostrado en la figura 2 misma que hace mención a diversos tipos de agua entre los cuales se encuentran: el agua potable para consumo humano, el agua de lluvia, las aguas grises referentes al agua generada por procesos de un hogar como el lavado de utensilios y de ropa así como del baño de las personas, agua de riego y finalmente las aguas negras que son aquellas contaminadas con heces fecales y orina procedentes de vertidos orgánicos humanos o animales. Es posible mostrar en esta misma figura, que dándole un tratamiento quizá no muy costoso al agua de lluvia podemos obtener agua potable, o de las aguas negras obtener agua útil para el riego, Aunado a esto contamos con una mejor calidad de agua y mayor diversificación de usos.

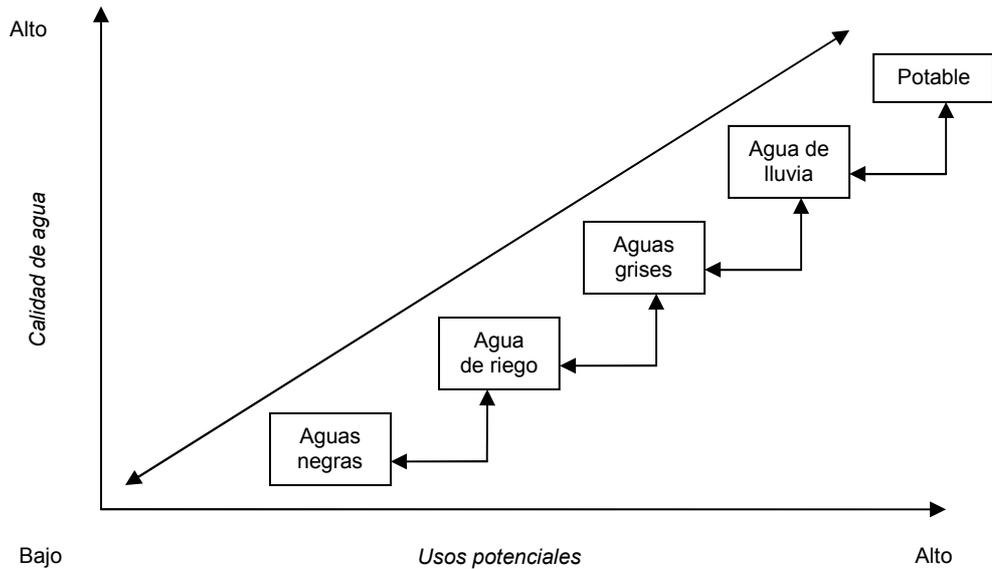


Figura 2. El tratamiento de agua para distintos usos

Un factor importante para gozar de agua de mejor calidad, purificada y útil para los seres humanos (sea que se utilice o no el tratamiento) es el control de contaminantes de las aguas sucias, el cual también es de gran importancia para los organismos que viven en ríos, lagos y océanos y que dependen del agua para poder subsistir.

Para poder controlar los contaminantes, determinar la necesidad de tratamiento y la correcta tecnología se requiere conocer como primer punto las propiedades del agua y cómo han llegado ahí los contaminantes, para lograr esto es necesario hacer una serie de estudios y análisis, para de esta forma conocer cuales son las condiciones y la calidad del agua.

2.1.3 Las propiedades del agua

La molécula del agua es bipolar, o sea, presenta un polo positivo y uno negativo. Es una molécula formada por dos elementos: oxígeno e hidrógeno en la siguiente proporción: una parte de oxígeno y dos partes de hidrógeno, unidos por medio de enlaces y representada por H₂O.

Esta estructura le permite que muchas otras moléculas iguales sean atraídas y se unan con gran facilidad, formando enormes cadenas que constituyen el líquido que da la vida a nuestro planeta: el agua.

El agua es una sustancia inodora, insípida, en pequeñas cantidades incolora y verdosa o azulada en grandes masas.

Es el componente más abundante de la superficie terrestre y, más o menos puro, forma la lluvia, los ríos y los mares; es parte constituyente de todos los organismos vivos y aparece en compuestos naturales.

Propiedades del agua:

- Este líquido tiene densidad, que es la relación de la masa entre el volumen. De ahí que un kilo de agua ocupa el volumen de un litro.
- El agua por si misma no posee una forma definida, por eso es que toma la forma del recipiente que la contiene.
- La temperatura y la presión atmosférica determinan los diferentes estados del agua. Así, a una temperatura de 0° C se produce la congelación y el agua se convierte en hielo. En cambio, a una temperatura de 100° C, el líquido se transforma en vapor, este proceso se llama ebullición.

Dependiendo de la temperatura y la presión, el agua cambia muy fácilmente de un estado al otro. Puede aparecer como un líquido que fluye, o un gas que sube por la atmósfera o un sólido quieto guardado en el refrigerador como podemos observarlo en la tabla 1, la cual nos muestra algunas características del agua según el estado en el que se encuentre.

Tabla1. Formas del agua

Sólido	Líquido	Gas
<p>Forma y volumen propio.</p> <p>Incompresible.</p> <p>Difusión extremadamente lenta de las partículas.</p>	<p>Adopta la forma del recipiente que los contiene.</p> <p>Volumen propio incompresible.</p> <p>Difusión lenta de las partículas</p>	<p>Sin forma ni volumen propio.</p> <p>Compresibles.</p> <p>Se expanden.</p>

Ahora que se ha hecho una breve descripción del significado del agua podemos mencionar algunos de los beneficios que el agua trae consigo y que en general benefician a todos los organismos vivientes.

2.1.4 Algunos de los beneficios del agua

El agua es uno de los componentes más importantes en todos los seres vivos. Es el elemento más abundante de nuestro cuerpo y está involucrado en varias funciones vitales para nuestro organismo. En el agua están disueltas casi todas las sustancias que forman y nutren a nuestro cuerpo, por esto se le conoce como el solvente universal; también permite el transporte de todos los nutrientes, remueve los materiales de desecho y participa en todas las reacciones que se llevan a cabo para producir energía; además, mantiene constante la temperatura de nuestro cuerpo, independientemente de la que exista en el ambiente.

Cuando hace mucho calor o hacemos un ejercicio intenso se pierde una cantidad excesiva de agua provocando un desequilibrio en este control; por

ésta razón debemos tomar más líquidos de lo habitual para compensar la pérdida adicional que se produce a través de la respiración agitada y el sudor que provocan el ejercicio y el calor.

Sin embargo, después de que nuestro organismo le ha dado su uso, el agua se contamina y en la mayoría de las ocasiones ésta ya no es posible reutilizarla, lo cual se refleja en el aumento de escasez de la misma, por esta razón es de vital importancia conocer cuáles son los principales contaminantes que se encuentran en el agua y de esta forma dentro de lo que esté en nuestras manos hacer lo posible por no generarlos.

2.1.5 Tipos de contaminantes encontrados en el agua

Muchos compuestos químicos diferentes son considerados contaminantes o impurezas, desde simples iones inorgánicos hasta complejas moléculas orgánicas. Los contaminantes del agua se dividen en varias clases. Cada clase de contaminante tiene sus maneras específicas de introducirse en el medio ambiente y sus peligros específicos. Todas las clases incluyen contaminantes importantes y son conocidos por muchas personas, debido a sus diversos efectos sobre la salud.

2.1.5.1 Contaminantes orgánicos

Los compuestos orgánicos son compuestos formados por enlaces largos, generalmente de carbono. Muchos compuestos orgánicos son tejidos básicos de los organismos vivos. Las moléculas formadas por carbono y por carbono e hidrógeno son no polares y no son solubles en agua o son poco solubles en agua. Tienen de poca a ninguna carga eléctrica. El comportamiento de los compuestos orgánicos depende de su estructura molecular, tamaño y forma y de la presencia de grupos funcionales que son determinantes importantes de la toxicidad. Es importante conocer la estructura de los compuestos orgánicos, con el objeto de predecir su destino en los organismos vivos y en el medio ambiente. Todos los compuestos orgánicos que son peligrosos para la salud son producidos por el hombre y sólo han existido durante el último siglo.

2.1.5.2 Los Hidrocarburos

Éstos son enlaces carbono-hidrógeno. Pueden dividirse en dos grupos, estando el primero formado por alcanos de enlace simple, alquenos de enlace doble y alquinos de triple enlace (gases o líquidos) y el segundo por los hidrocarburos aromáticos, que contienen estructuras de anillo (líquidos o sólidos).

2.1.5.3 Los insecticidas

La mayoría de los aerosoles contra insectos de uso doméstico contienen químicos llamados piretrinas, los cuales generalmente no son dañinos, pero pueden causar problemas respiratorios potencialmente mortales en caso de ser inhalados. Los insecticidas industriales, que a menudo se encuentran en cocheras de casas e invernaderos, contienen muchos materiales peligrosos, incluyendo entre otros: organofosfatos, carbamatos y paradiclorobencenos los cuales son muy peligrosos porque se acumulan en los tejidos grasos de los animales inferiores y se introducen en la cadena alimentaria, introduciéndolos recíprocamente al agua. Por lo anterior, los insecticidas han sido restringidos desde hace algunas décadas.

2.1.5.4 Los metales

Los metales son buenos conductores de la electricidad y generalmente participan en las reacciones químicas como iones positivos, conocidos como cationes. Los metales son sustancias naturales que se han formado por meteorización de minerales, allí donde fueron depositados durante la actividad volcánica. Algunos ejemplos de metales son: plomo, zinc, manganeso, calcio y potasio. Se pueden encontrar en aguas superficiales en sus formas iónicas estables. Los metales artificiales pueden ser muy peligrosos, porque a menudo provienen de reacciones nucleares provocadas por el hombre.

Los organismos necesitan metales, ya que son esenciales para su salud y a menudo son componentes esenciales de las enzimas.

2.1.5.5 Los silicatos

Los silicatos son utilizados como materiales de construcción de casas y edificios, en la producción de tazas y vasos, elaboración de vidrios, etc., por ello no se consideran como dañinos para la vida humana, sin embargo cuando se presentan en industrias que no utilizan los silicatos como parte de un proceso de producción o como un medio para la fabricación de artículos o materiales, son considerados como contaminantes sobre todo cuando son clasificados como impurezas dentro de un proceso.

El silicio es el segundo elemento más abundante del planeta y se encuentra en la mayoría de las aguas. La sílice existe normalmente como óxido (SiO_2 en la arena y como silicato SiO_3^{2-}). Puede estar en forma insoluble, soluble y coloidal. Los silicatos son sales del ácido silícico, los cuales forman la mayor parte de los minerales existentes en la corteza terrestre y por ello también se encuentran contenidos de un 10% hasta un 80% en el agua del planeta.

La unidad fundamental de los silicatos, el SiO_4 se encuentra ordenado en forma de tetraedro regular. El tetraedro mencionado está unido por enlaces 50% iónico y 50% covalente.

Existe una enorme cantidad de silicatos conocidos y su diversidad es muy amplia por lo cual a continuación se presenta una breve clasificación de los silicatos más comúnmente encontrados.

2.1.5.5.1 Clasificación de los silicatos

a. Los Nesosilicatos

El empaquetamiento atómico de las estructuras de los nesosilicatos es generalmente denso, lo que hace que los minerales de este grupo tengan

valores relativamente altos de peso específico y dureza. Aunque el Al^{3+} sustituye común y fácilmente la posición de Si de los silicatos, la proporción de esta sustitución en los tetraedros de SiO_4 en los nesosilicatos es generalmente débil. Los miembros más comunes de los nesosilicatos son el olivino y el granate. La unidad de composición es generalmente $(\text{SiO}_4)^{4-}$ mostrado en la figura 3.

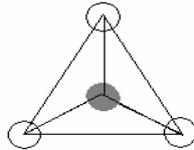


Figura 3. Arreglo tetraédrico de los nesosilicatos

b. Los Sorosilicatos

Están formados por grupos tetraédricos dobles, es decir, por dos tetraedros SiO_4 compartiendo un oxígeno (ver figura 4). La unidad que la compone es el $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$.

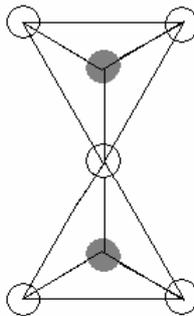


Figura 4. Arreglo tetraédrico de los sorosilicatos

c. Los Ciclosilicatos

Están formados por anillos de tetraedros SiO_4 enlazados, tienen una relación de SiO_3^{2-} , exhibe tres posibles configuraciones cerradas las cuales son: Si_3O_9 , Si_4O_{12} y el Si_6O_{18} . La unidad que lo compone por lo general es el $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$ como se puede ver en la figura 5.

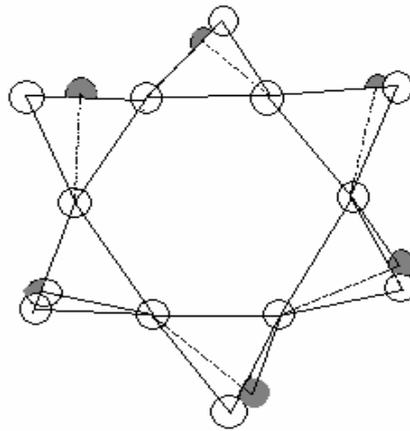


Figura 5. Arreglo tetraédrico de los ciclosilicatos

d. Los Inosilicatos

Los tetraedros SiO_4 pueden estar enlazados formando cadenas al compartir oxígenos con los tetraedros adyacentes. Estas cadenas sencillas pueden unirse después lateralmente, compartiendo más oxígenos de algunos tetraedros para formar bandas o cadenas dobles. En la estructura de cadenas sencillas, dos de los cuatro oxígenos de cada tetraedro SiO_4 son compartidos con los tetraedros vecinos dando una relación de SiO_3^{2-} , la mitad de los tetraedros comparten tres oxígenos y la otra mitad sólo dos como lo muestra la figura 6.

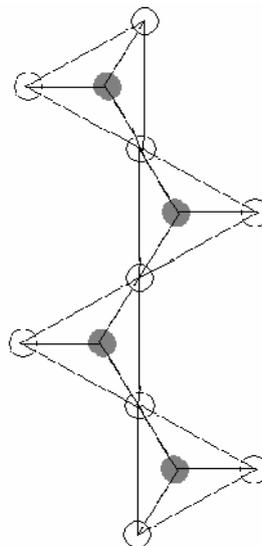


Figura 6. Arreglo tetraédrico de los inosilicatos

e. Los Filosilicatos

Derivan del predominio en la estructura de tetraedros SiO_4 , de extensión indefinida. Tres de los cuatro oxígenos de cada tetraedro SiO_4 están compartidos con tetraedros vecinos, resultando una relación de $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$.

f. Los Tectosilicatos

Son minerales formados por un armazón tridimensional de tetraedros SiO_4 enlazados, todos los oxígenos del tetraedro están compartidos formando estructuras muy fuertes, uno de los ejemplos más frecuentes de este tipo de silicato es la cristobalita, la cual responde a la composición formada por $(\text{SiO}_2)^0$.

Una vez que hemos conocido cuáles son algunos de los muchos contaminantes que alteran las condiciones normales del agua no importando su uso, debemos conocer algunas de las características del agua para poder determinar si es que ésta se encuentra o no contaminada.

2.1.6 Características y parámetros de prueba para el control de la calidad y la pureza del agua

2.1.6.1. Color

El color puede sugerir que existan impurezas orgánicas presentes. En ciertos casos el color del agua puede ser causado por algunos iones de metales. El color es medido por la comparación de diversas muestras visualmente o con un espectrómetro. Éste es un dispositivo que mide la transmisión de luz en una sustancia, para calcular concentraciones de ciertos contaminantes. Cuando el agua tiene un color inusual esto generalmente no significa una preocupación para la salud.

2.1.6.2 Olor

El olor puede ser definido como el conjunto de sensaciones percibidas por el olfato al captar ciertas sustancias volátiles.

La detección del olor puede ser útil, porque el oler puede detectar generalmente incluso niveles bajos de contaminantes.

El procedimiento normalmente utilizado es el de ir diluyendo el agua y examinar hasta que no presente ningún olor perceptible. El resultado se da como un número que expresa el límite de percepción del olor, y corresponde a la dilución que da olor perceptible. Debido al carácter subjetivo de la medida, es recomendable que la medida la realicen al menos dos personas distintas, comparando la percepción con la de un agua sin olor.

2.1.6.3 Sabor

El gusto puede detectar concentraciones de algunas décimas a varios centenares de ppm y puede indicar que los contaminantes están presentes, pero no puede identificar contaminantes específicos.

La evaluación del sabor, se realiza por degustación del agua a examinar, comenzando por grandes diluciones, que se van disminuyendo hasta la aparición del sabor. Este ensayo no se realiza mas que en aguas potables.

2.1.6.4 Turbidez

La materia suspendida en el agua absorbe la luz, haciendo que el agua tenga un aspecto nublado, esta materia suspendida por lo general se encuentra finamente dividida, como arcillas, limos, partículas de sílice, materias inorgánicas, etc. La determinación de la turbidez tiene un gran interés como parámetro de control en aguas contaminadas y residuales. Se puede evaluar en campo o en laboratorio con el fin de demostrar la resistencia del agua a la transmisión de luz.

2.1.6.5 Materia sólida

La materia sólida presente en un agua suele agruparse en tres categorías: materiales decantables, materias en suspensión y residuos.

La materia decantable se determina dejando en reposo un litro de agua en un cono o probeta graduada. El resultado se expresa como mililitros de materia decantada por litro de agua.

La determinación de las materias en suspensión en el agua puede realizarse por filtración o por centrifugación.

- La filtración se puede definir como la separación de partículas sólidas o semisólidas que están suspendidas en un fluido a su paso a través de un medio poroso, fibroso o granular llamado medio filtrante.
- La centrifugación es un método por el cual es posible separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una centrifugadora, la cual imprime a la mezcla un movimiento rotatorio con una fuerza de mayor intensidad que la gravedad, provocando rápidamente la sedimentación del sólido o de las partículas de mayor densidad.

La identificación y la cuantificación de contaminantes disueltos se hace por medio de métodos muy específicos en laboratorios, porque éstos son los contaminantes que se asocian a riesgos para la salud.

2.1.6.6 pH

El pH es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculando el número de iones de hidrógeno presentes. Se mide en una escala

de 0 a 14, en la cual en medio, es decir 7, la sustancia es neutra. Los valores de pH por debajo de 7 indican que una sustancia es ácida y los valores de pH por encima de 7 indican que es básica. Cuando una sustancia es neutra el número de átomos de hidrógeno y de oxhidrilos es igual. Cuando el número de átomos de hidrógeno (H^+) excede el número de átomos del oxidrilo (OH^-), la sustancia es ácida.

A continuación se muestra la escala de pH:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ácido							neutro							básico

El valor del pH tiene un efecto en muchas fases del proceso de tratamiento del agua. El valor de pH se puede determinar por varios métodos de análisis, tales como indicadores de color, papel pH o pH-metros.

- Los indicadores son ácidos o bases débiles que presentan diferente color según varía el pH.
- El papel pH se trata de un papel impregnado de una mezcla de indicadores.
- Un pH-metro es un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (generalmente de plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ion hidrógeno.

Este método se utiliza si se quiere obtener medidas muy precisas y es posible aplicarlo a cualquier caso en particular.

2.1.6.7 Conductividad

En realidad, el agua pura es muy mala conductora de la electricidad. Sin embargo, las sustancias químicas disueltas, presentes en forma de iones, son las responsables de la aparente buena conductividad del agua. De la misma

forma que el pH, la conductividad es un parámetro característico de una disolución y en cierta forma es fácil de medirlo. Las disoluciones acuosas pertenecen al tipo de los conductores iónicos o electrolíticos. En las disoluciones, la conducción de electricidad al aplicar un campo eléctrico se debe al movimiento de los iones en disolución, los cuales transfieren los electrones a la superficie de los electrodos para completar el paso de corriente.

La conductividad eléctrica (CE) de una disolución se puede definir como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio en el que éstos han de moverse. En nuestro caso, este medio es agua, y puesto que su viscosidad disminuye con la temperatura, la facilidad de transporte iónico o conductividad aumentará a medida que se eleva la temperatura.

El tema de la conductividad se comprendió mejor al efectuar estudios de la manera en que la conductividad eléctrica de las soluciones varía con la concentración de soluto.

Según la ley de Ohm, la resistencia R de un trozo de material es igual a la diferencia de potencial eléctrico V dividida entre la corriente eléctrica I :

$$R = V / I \quad (1)$$

O también:

$$R = (\rho * l) / A \quad (2)$$

Donde ρ es la resistividad del material, l es la distancia entre los electrodos y A es el área de sección transversal. Dado que $\rho = 1 / \kappa$ tenemos:

$$R = l / (\kappa * A) \quad (3)$$

Donde κ es una constante de proporcionalidad. Despejando κ :

$$\kappa = l / (R * A) \quad (4)$$

La unidad de potencial en el sistema SI es el volt y la de corriente es el ampere. La unidad de resistencia eléctrica es el ohm. El recíproco de la resistencia es la conductancia eléctrica G , cuya unidad en el sistema SI es el siemens:

$$G = \kappa * (A / l) \quad (5)$$

La variable κ es la conductividad, para el caso particular de la solución de un electrolito se denomina conductividad electrolítica, la cual no es una cantidad adecuada para comparar las conductividades de diferentes soluciones. La conductividad molar (Λ) tiene como importancia que da información acerca de la conductividad de los iones producidos en la solución por 1 mol de una sustancia. En todos los casos la conductividad molar disminuye a medida que la concentración (c) aumenta,

$$\Lambda = \kappa / c \quad (6)$$

Despejando κ :

$$\kappa = \Lambda * c \quad (7)$$

De la misma forma tenemos que si hacemos unitarios los términos del área y la longitud $A = 1$ y $l = 1$ y los sustituimos en la ecuación (3) tenemos que,

$$R = 1 / \kappa \quad (8)$$

Para relacionar el potencial eléctrico en función de la concentración sustituimos la ecuación (7) en la ecuación (1) y despejamos el voltaje,

$$V = I / \kappa \quad (9)$$

Y sustituimos la ecuación (7) en la ecuación (9) obteniendo,

$$V = I / (\Lambda * c) \quad (10)$$

De donde podemos concluir que la magnitud del potencial eléctrico es inversamente proporcional a la concentración de la solución.

2.1.6.8 Dureza

La dureza corresponde a la suma de las concentraciones de cationes metálicos excepto los metales alcalinos y el ión hidrógeno. Se debe principalmente a la concentración de sales de calcio y magnesio en el agua.

Mientras mas dureza tiene el agua significa que mayor es la concentración de estas sales en su contenido.

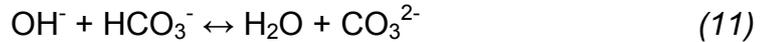
Si la dureza es inferior a 60 mg/L de CaCO₃ el agua se considera “blanda” y si es superior a 270 mg/L se considera agua “dura”.

Un proceso para la eliminación de la dureza del agua, es la desionización de ésta mediante resinas desionizantes.

2.1.6.9 Acidez y Alcalinidad

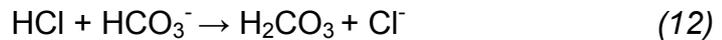
- La *acidez* es la capacidad que tiene una sustancia para neutralizar una base. Por lo tanto el agua es ácida cuando existe en su contenido una mayor cantidad de H⁺ que de OH⁻. La acidez de un agua corresponde a la presencia de anhídrido carbónico libre (CO₂), ácidos minerales y sales

de ácidos fuertes y bases débiles. Por ejemplo, dada la base OH^- y la especie HCO_3^- , la reacción de las dos especies en solución da como resultado:



La reacción anterior, el HCO_3^- ha neutralizado al OH^- dando como resultado H_2O y CO_3^{2-} , por lo cual decimos que la especie HCO_3^- funciona como un ácido en esta reacción.

- La alcalinidad por el contrario es la capacidad de una sustancia a neutralizar un ácido. Tenemos que entonces un agua es alcalina cuando por el contrario del agua ácida, ésta contiene una mayor cantidad de OH^- que de H^+ . La alcalinidad se debe a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de hidróxidos. Como ejemplo tenemos la reacción entre un ácido, el HCl y la especie HCO_3^- , obteniendo como resultado:



En la reacción tenemos que el HCO_3^- ha neutralizado al HCl y es por eso que en esta reacción el HCO_3^- ha funcionado como una base.

La acidez y alcalinidad son dos parámetros muy importantes los cuales deben ser controlados en la operación de una planta de tratamiento de agua contaminada.

2.1.6.10 Nitrógeno

La determinación de nitrógeno en forma de nitritos es de gran importancia para el control de contaminantes del agua, ya que éste es uno de los componentes con mayor abundancia dentro de las aguas contaminadas. La gente se alimenta en su gran mayoría por carne, y la carne al igual que las hamburguesas y los pollos asados contienen una gran cantidad de proteínas las cuales contienen nitrógeno. El nitrógeno en las proteínas es necesario para

la subsistencia de los seres humanos y por lo mismo al desechar aquello que ya ha realizado su función dentro del organismo también este desecho lleva un alto contenido de nitrógeno, dando como resultado la contaminación de suelos y subsecuentemente la contaminación del agua, la cual deberá tratarse posteriormente para su reutilización.

El nitrógeno de los nitritos rara vez aparece en concentraciones mayores a 1 mg/L aún en efluentes de plantas de tratamiento municipales. Su concentración en aguas superficiales y subterráneas es normalmente más baja de 0.1 mg/L debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente.

2.1.6.11 Fósforo

El fósforo puede ser encontrado tanto en plantas como en animales. En los animales se encuentra en huesos, dientes, nervios y músculos, así como en los ácidos nucleicos DNA y RNA. El cuerpo humano adquiere el fósforo de distintos alimentos, tales como huevo, frijoles, cacahuates y leche. Estos han sido utilizados durante mucho tiempo por los humanos y al igual que el nitrógeno se encuentra dentro de los contaminantes mas abundantes dentro de las aguas contaminadas.

2.1.6.12 Carbón Orgánico Total

La intensidad y el potencial de contaminación de un contaminante también puede fijarse midiendo su contenido de carbón, ya que el carbón reacciona con el oxígeno y el carbón que no llega a reaccionar o el restante es una medida del potencial del contaminante. El contenido de carbón es medido convirtiendo carbón en dióxido de carbón. El análisis se mejora inyectando una cantidad conocida de una muestra oxidante en un horno.

La cantidad de dióxido de carbono formado obtenido de la reacción de C con O₂ dentro del horno da una medida cuantitativa por medio de un analizador infrarrojo.

2.1.6.13 La DBO y DQO

La DBO es una medida de la materia orgánica en el agua, expresada en mg/L. Es la cantidad de oxígeno disuelto que se requiere para la descomposición de la materia orgánica. La prueba de la DBO toma un período de cinco días. La DQO es una medida de la materia orgánica e inorgánica en el agua expresada en mg/L, Se ha recurrido al análisis de la DQO con el fin de medir el contenido de oxígeno equivalente en una muestra contaminada utilizando un químico para oxidar el contenido orgánico de la muestra, en otras palabras es la cantidad de oxígeno disuelto requerida para la oxidación química completa de los contaminantes.

2.1.6.14 La contaminación microbiana

La contaminación microbiana es dividida en la contaminación por los organismos que tienen la capacidad de reproducirse y de multiplicarse y los organismos que no pueden hacerlo. La contaminación microbiana puede ser la contaminación por las bacterias, que es expresada en Unidades Formadoras de Colonias (UFC), una medida de la población bacteriana. Otra contaminación microbiana es la contaminación por pirogen. Pirogenes son los productos bacterianos que pueden inducir fiebre en animales de sangre caliente. Después de bacterias y de pirogen las aguas se pueden también contaminar por los virus.

2.1.6.15 Concentración de silicatos

Es importante conocer el contenido de los silicatos en las aguas de tipo industrial y en las aguas de desecho. El análisis de los silicatos en el agua de alimentación de las calderas de alta presión, es de gran importancia para evitar la formación de depósitos duros de sílice en los tubos de las calderas y en las aspas de las turbinas de vapor.

Los análisis de los silicatos, también proporcionan un método sensitivo para el control de la operación de los desmineralizadores de agua, ya que la sílice es

una de las principales impurezas que salen a través de una unidad agotada. Se puede eliminar la sílice del agua por intercambio iónico, destilación, tratamientos con cal, carbonato y magnesio.

La determinación de sílice y /o de silicatos se basa en la espectrofotometría de absorción en la región visible. Su relación cuantitativa se basa en la ley de Lambert y Beer, que indica que la absorción de la radiación es proporcional a la concentración de la sílice presente.

2.1.6.16 La Ley de Lambert y Beer

Este tipo de investigación se basa en leyes propuestas por el matemático alemán Johann Heinrich Lambert (1728 -1777) y el astrónomo alemán Wilhem Beer (1797 – 1850). Como se muestra en la figura 7, éstas leyes se refieren a la intensidad de la luz absorbida o transmitida cuando se hace pasar luz incidente a través de algún material.

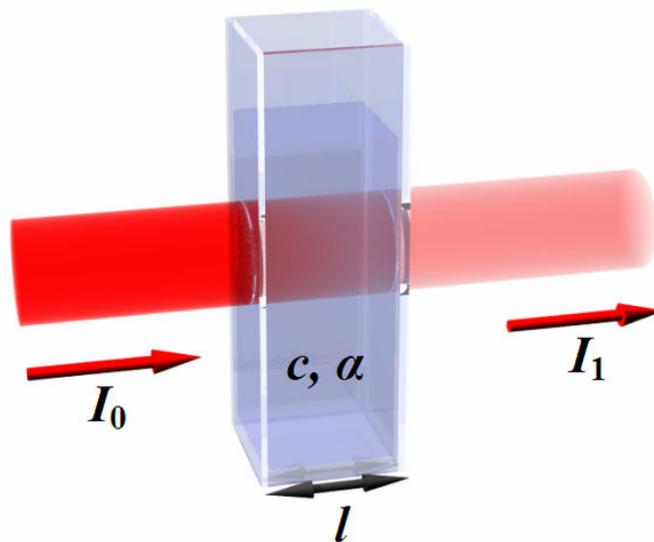


Figura 7. Diagrama de la absorción de un haz de luz
atravesando un cuerpo de longitud l

La ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también

entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa. Si conocemos I y α , la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida. Esto se puede expresar en la forma,

$$A = \alpha lc \quad (13)$$

Donde A es la absorbancia, α es el coeficiente de absorción, l es la distancia que la luz atraviesa por el cuerpo y C es la concentración de la sustancia absorbente en el medio,

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha lc} \quad (14)$$

Donde I_0 es la intensidad de la luz incidente e I_1 es la intensidad de la luz una vez que ha atravesado el medio.

Entonces tenemos que sustituyendo la ecuación (13) en (14) y despejando A ,

$$A = -\log \frac{I_1}{I_0} \quad (15)$$

Y consecutivamente se puede obtener el coeficiente de absorción en función de k y de λ :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (16)$$

Donde λ es la longitud de onda del haz de luz, k es el coeficiente de extinción y π es una constante matemática, la cual tiene un valor de 3.1416.

Las unidades de c y α dependen del modo en que se exprese la concentración de la sustancia absorbente. Si la sustancia es líquida, se suele expresar como

una fracción molar. El valor del coeficiente de absorción α varía con la absorción del material y con la longitud de onda para cada material en particular.

Cabe destacar que la ley tiende a no ser válida para concentraciones muy elevadas y especialmente si el material dispersa mucho la luz.

2.1.6.17 La espectroscopia de absorción atómica

La espectroscopia de absorción atómica emplea la absorción de la luz para medir la concentración de la fase gaseosa de átomos ya que la mayoría de las muestras son sólidas o líquidas, los átomos o iones deben ser vaporizados a la flama o en un horno de grafito. La temperatura de la llama debe ser lo bastante baja como para que la llama por si misma no excite los átomos de la muestra de su estado fundamental ya que los átomos absorben luz visible o ultravioleta y hacen transiciones a niveles de energía más altos.

Debido a su excelente sensibilidad y selectividad, la absorción atómica sigue siendo uno de los métodos de análisis comúnmente utilizados para diversas pruebas de laboratorio, además de prescindir de una gran precisión.

Ahora que se ha profundizado más en la identificación y determinación de algunos contaminantes que son posiblemente los más encontrados en el agua podemos darnos cuenta de que existe una gran diversidad de ellos y que es posible de la misma manera encontrarlos en distintas formas. Una gran mayoría de estos contaminantes son conocidos como coloides, los cuales cuentan con la gran mayoría de las características de la calidad del agua y que se manifiestan en los resultados obtenidos al analizarlos con algunos de los métodos anteriormente mencionados.

2.2 El coloide

El coloide es una partícula de pequeño diámetro (10 nm – 10µm) y es responsable de la turbidez o del color superficial del agua. El coloide es un sistema que se encuentra compuesto por dos fases:

La primera es una fase *continua* que se caracteriza por una gran fluidez, es decir poca resistencia al libre movimiento dentro de la solución.

La otra fase es conocida como *dispersa*, ésta se identifica, a diferencia de la continua, por tener muy poca fluidez la cual se debe en la mayoría de los casos a la gran cantidad de partículas, por lo general sólidas y de un tamaño mucho más grande que una molécula.

Aunque un coloide es por excelencia aquel en el que la fase continua es un líquido y la fase dispersa se compone de partículas sólidas, pueden encontrarse coloides cuyos componentes se encuentran en otros estados de agregación. En la tabla 2 se muestran los distintos tipos de coloides según el estado de sus fases continua y dispersa. Podemos observar que si en la fase continua tenemos un sólido y en la fase dispersa un líquido tenemos como resultado un gel y como ejemplos tenemos la gelatina y el queso. De la misma forma si en la fase continua tenemos un líquido y en la fase dispersa un sólido obtendremos algo de características similares a una pintura la cual responde al nombre de dispersión coloidal.

Tabla 2. Tipos de coloides según el estado de sus fases continua y dispersa

		Fase Dispersa		
		Gas	Líquido	Sólido
Fase Continua	Gas	No es posible porque todos los gases son solubles entre sí	<i>Aerosol líquido,</i> Ejemplos: niebla, neblina, nubes, bruma	<i>Aerosol sólido,</i> Ejemplos: Humo, polvo en suspensión
	Líquido	<i>Espuma,</i> Ejemplos: Espuma de afeitado, crema batida	<i>Emulsión,</i> Ejemplos: Leche, mayonesa, crema de manos, sangre	<i>Dispersión coloidal o Sol,</i> Ejemplos: Pinturas, tinta china, oro en agua
	Sólido	<i>Espuma Sólida,</i> Ejemplos: piedra pómez, poliestireno	<i>Gel,</i> Ejemplos: Gelatina, queso, jalea	<i>Emulsión sólida,</i> Ejemplos: Cristal de rubí, rubí en vidrio

2.2.1 Las características y origen de los coloides

El límite inferior de visibilidad microscópica es de aproximadamente 2×10^{-7} m (0.2 μ m o 200nm), y esto puede considerarse como el límite superior para el tamaño de las partículas coloidales. El límite inferior es aproximadamente 5×10^{-9} m (5nm). Esta cifra es comparable al diámetro de ciertas macromoléculas,

como el almidón y las proteínas. Por lo tanto las soluciones de estas sustancias presentan comportamiento coloidal y aunque estén formadas de moléculas únicas, se suelen clasificar como sistemas coloidales. La proporción superficie / volumen da muy buenas características de adsorción de los coloides para los iones libres. Este fenómeno de la adsorción del ion implica la presencia de la carga electrónica en su superficie que da lugar a algunas fuerzas de repulsión. Este es el motivo por el cual los coloides son tan estables en la solución.

Un coloide es capaz de formarse por medio de agregados de moléculas no disueltas, es decir cuando partículas diminutas se encuentran dispersas en algún medio. Las partículas en un coloide pueden ser inducidas a precipitar por el agregado de un compuesto químico que pueda llegar a neutralizar las cargas eléctricas de las partículas en suspensión, eliminando las fuerzas de repulsión.

2.2.2 La dispersión luminosa por partículas coloidales

Aunque por definición las partículas coloidales son demasiado pequeñas para observarse al microscopio, pueden detectarse por medios ópticos. Cuando la luz pasa a través de un medio que no contiene partículas mayores que aproximadamente 10^{-9} m de diámetro, la trayectoria luminosa no puede detectarse y se dice que el medio es óptimamente transparente. sin embargo, cuando hay presentes partículas coloidales, parte de la luz se dispersa y el haz incidente atraviesa con menor intensidad.

2.2.3 Las propiedades electrocinéticas de los coloides

Los coloides en general tienen carga eléctrica y por tanto pueden ser afectados por campos eléctricos. Estas cargas pueden explicarse por la presencia de imperfecciones en la superficie de la estructura reticular. Puede existir también ionización y por lo tanto la superficie de los coloides puede ionizarse algunos de los grupos funcionales probables de sufrir ionización son: -OH, -COOH, -SH, entre otros.

2.2.4 La estabilidad de los coloides

Los coloides son normalmente estables en solución. Entre los factores estabilizantes se cuentan a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por lo tanto las fuerzas electrostáticas y la hidratación les son favorables. Las fuerzas de atracción como la de gravedad y la de Van der Waals, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan.

2.2.5 La eliminación del coloide

Para retirar los coloides del agua una buena solución es realizar como primer paso una coagulación de las partículas con lo que llamamos un agente coagulante el cual es un reactivo químico.

2.3 La Coagulación

La coagulación hace referencia al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Esta desestabilización puede ser promovida por la adición de un reactivo químico llamado coagulante, el cual estando en agua origina productos insolubles o coágulos.

El interés práctico radica en que la coagulación se puede intensificar si se disminuye la resultante de la interacción de energía entre las fuerzas coulombica de repulsión y las de atracción de Van der Waals (o sea, el potencial zeta).

2.3.1 El Potencial Zeta

El potencial zeta es como ya se dijo una medida para determinar la carga del coloide. Para coloides en fuentes de agua natural con un pH de 5 a 8, el potencial zeta se encuentra entre los -14 y -30 mV; cuanto más negativo sea el número, tanto mayor será la carga de la partícula. A medida que disminuye el potencial zeta, las partículas pueden aproximarse cada vez más entre sí, aumentando la posibilidad de una colisión. En un sistema convencional de

clarificación con un pH de 6 a 8, los coagulantes proporcionan las cargas positivas para reducir la magnitud del potencial zeta. Si el potencial zeta disminuye a cero (punto isoeléctrico), los coloides pueden interactuar a una distancia menor a la establecida por la barrera de energía.

Según la teoría química, los coloides del agua, que son partículas con una estructura definida y con una carga neta negativa distribuida en su superficie, interaccionan químicamente con los productos de hidrólisis del coagulante, traduciéndose el proceso en la precipitación de compuestos insolubles.

2.3.2 Los Coagulantes

2.3.2.1 Antecedentes sobre los coagulantes

Los coagulantes son por lo general cationes trivalentes los cuales llevan a cabo la neutralización en la superficie de coloides negativos tal como ocurre en el caso de los coagulantes inorgánicos, como se muestra en la tabla 3, la cual esquematiza una serie de usos dependiendo del tipo de coagulante inorgánico empleado.

Los iones trivalentes son diez veces más eficaces que el ión bivalente. Las sales trivalentes del hierro y del aluminio siguen siendo utilizados extensamente en todos los tratamientos de la coagulación del agua.

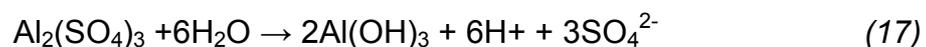
Tabla 3. Coagulantes inorgánicos para distintos usos dentro del tratamiento de agua

Ejemplos	Uso dentro del tratamiento de agua
-----------------	---

Sales de aluminio	Clarificación del agua superficial
Polímeros de aluminio	Tratamiento de aguas residuales
Sales de hierro	Clarificación del agua superficial
Otros coagulantes inorgánicos	Retiro de fosfatos Agua con materia orgánica

En general los coloides hidrofílicos requieren una mayor cantidad de coagulante que los hidrofóbicos ya que estos no reaccionan químicamente con el coagulante.

Entre los coagulantes, el más usado es el sulfato de aluminio (o alumbre). Esta sustancia presenta las siguientes reacciones:



Esta reacción va disminuyendo su pH a medida que la reacción se lleva a cabo hasta un punto en que se detiene. Si el agua contiene bicarbonatos, el pH puede mantenerse relativamente constante, ya que estos actúan como amortiguadores. La reacción se puede ver como,



El CO_2 puede producir corrosión y por lo tanto suele neutralizarse con cal. Para producir la coagulación el agua requiere de cierta alcalinidad natural. Si esta alcalinidad no se posee, se debe agregar algún tipo de sustancia que la asegure como es el CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH o NaCO_3 . Existe un pH óptimo de coagulación según el tipo de agua. Este punto se tendrá en el punto isoeléctrico, donde el potencial zeta es mínimo. En dicho punto también se cumple que el gasto de coagulante es mínimo.

Respecto al tipo de coagulante se pueden encontrar además de las sales de aluminio, las de hierro y los polielectrolitos. En general los coagulantes con mayor valencia actúan mejor debido a su mayor capacidad de intercambio de carga. El Al^{3+} es muy efectivo.

Según el tipo de agua que se tenga es el tipo de mecanismo de coagulación que más influye. En aguas poco turbias, la coagulación es principalmente por hidróxidos metálicos, lo cual se refiere a la producción de lodos, los cuales se deben quitar en el proceso final de la separación de los sólidos – líquidos por medio de algún método secundario. En aguas muy turbias en cambio se tiene gran participación también de los otros mecanismos y las relaciones de dosis de coagulante y coloides son prácticamente estequiométricas. Otros coagulantes comerciales son el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sales de hierro, cloruro férrico y el sulfato ferroso.

2.4 La Floculación

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos y después éstas se organizan en partículas más grandes que pueden ser depositadas, a éstas últimas se les da el nombre de flóculos. La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto entre sí. Esto implica la formación de puentes químicos entre las partículas de tal modo que se cree una malla de coágulos, la cual se constituiría mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floc lo suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

Para promover la floculación es posible la adición de otro reactivo llamado floculante, el cual es capaz de acelerar la rapidez de floculación y en el mejor de los casos aumentar el tamaño del flóculo formado.

2.4.1 Los floculantes

Los floculantes se emplean en la resolución de muchos problemas tecnológicos relacionados con la aceleración y aumento de eficacia de procesos de separación de sistemas sólido – líquido. Algunos de los floculantes empleados pueden ser polímeros sintéticos de alto peso molecular, polímeros inorgánicos como el sílice activado y polímeros naturales como los almidones. Estas macromoléculas se fijan por adsorción a las partículas y provocan así la floculación por formación de puentes interpartículas.

En la tabla 4 se muestran algunos de los floculantes naturales utilizados para el tratamiento de agua.

Tabla 4. Floculantes naturales

Ejemplos	Uso dentro del tratamiento de agua
Floculantes inorgánicos	Agua fría
Floculantes orgánicos (polímeros naturales)	Con sales férricas Con sales de aluminio

Como podemos observar en la tabla 4, los polímeros naturales son de los más comúnmente empleados para el tratamiento de agua que contiene sales.

Derivado de esto, los floculantes actualmente existentes en el mercado son productos sintéticos de naturaleza polímera, conocidos genéricamente como polielectrolitos, que presentan, entre otras, dos propiedades fundamentales, elevado peso molecular, y una determinada densidad de carga iónica que depende de sus aplicaciones.

No debemos olvidar que el uso primordial tanto de la coagulación, como de la floculación tiene como objetivo una separación sólido-líquido y es necesario resaltar que ambos son ampliamente utilizados de forma frecuente dentro del

tratamiento de agua contaminada. Sin embargo existe una forma de lograr estos mismos resultados sin la necesidad de introducir reactivos al agua como lo propone el empleo de coagulantes y floculantes los cuales tienen su origen por medio de un proceso químico. Esta forma es empleando otra rama de la Química llamada la Electroquímica.

2.5 La Electroquímica

La Electroquímica es la parte de la Química que trata de la relación entre las corrientes eléctricas y las reacciones químicas, y de la conversión de la energía química en eléctrica y viceversa. Estudia las reacciones que toman lugar en la interfase de un conductor electrónico y un conductor iónico. En el conductor electrónico el electrodo es utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo un semiconductor, un electrolito, un gas o el vacío. El conductor iónico se trata de un electrolito el cual es una sustancia que disocia iones libres cuando se disuelve o funde, para producir un medio que conduce la electricidad.

De lo anterior podemos decir que si una reacción química es causada por un voltaje externo, o si el voltaje es causado por una reacción química, como es lo que sucede en una batería, se trata de una reacción electroquímica y esta será tratada a su vez por la Electrólisis la cual forma parte de la Electroquímica.

La tecnología electroquímica es muy atractiva por su versatilidad ya que logra la posibilidad de un tratamiento de líquidos, gases y sólidos. El agente principal de ésta tecnología es el electrón, el cual funciona dentro de un proceso como el “agente de limpieza”.

2.6 La Electrólisis

La electrólisis es el nombre dado por Michael Faraday (de quien hablaremos más adelante) al proceso donde la energía eléctrica cambiará a energía

química dando como resultado una separación de sustancias por medio de la electricidad. Cuando un sólido iónico es disuelto en agua, sus iones componentes pueden moverse bajo la influencia de fuerzas eléctricas. Si éstas son de signo opuesto será posible entonces separar los aniones de los cationes presentes en la disolución. El proceso sucede en un electrolito, una solución acuosa o sales disueltas que dan la posibilidad a los iones de ser transferidos entre dos electrodos. El electrolito es la conexión entre los dos electrodos que también están conectados con una corriente directa.

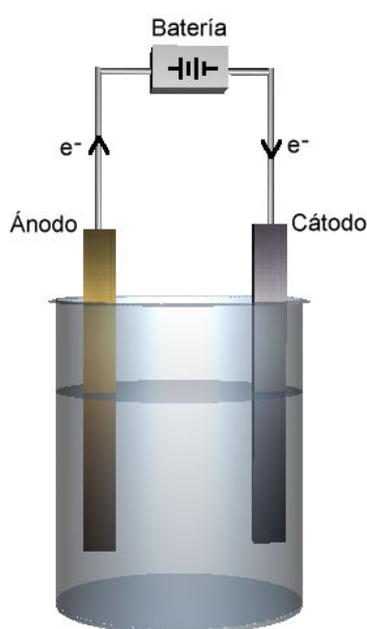


Figura 8. Esquema simplificado del proceso de electrólisis

El proceso electrolítico esquematizado de forma simplificada en la figura 8, consiste en la disolución de una sustancia en un determinado disolvente, con el fin de que los iones que constituyen dicha sustancia estén presentes en la disolución, por lo general la mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos. Posteriormente se aplica una corriente eléctrica a un par de electrodos conductores colocados en la disolución. El electrodo cargado negativamente se conoce como cátodo, y el cargado positivamente como ánodo. Cada electrodo

atrae a los iones de carga opuesta. Así, los iones positivos, o cationes, son atraídos al cátodo, mientras que los iones negativos, o aniones, se desplazan hacia el ánodo. La energía necesaria para separar a los iones e incrementar su concentración en los electrodos, proviene de una fuente de alimentación eléctrica que mantiene la diferencia de potencial en los electrodos.

En todos los casos, la cantidad de material que se deposita en cada electrodo al pasar la corriente por un electrolito sigue la ley descubierta por Faraday, quien empleo la palabra electrólisis para describir la descomposición del agua mediante una corriente eléctrica la cual dió como resultado la aparición de oxígeno en uno de los polos y de hidrógeno en el otro.

2.6.1 Las leyes de Faraday de la electrólisis

Durante los años 1833 y 1834, Michael Faraday publicó los resultados de una amplia serie de investigaciones acerca de las relaciones entre la cantidad de electricidad que atraviesa una solución y la cantidad de material que se libera en los electrodos. Faraday formuló las leyes de la electrólisis, que se resumen a continuación:

- La masa de un elemento es proporcional a la cantidad de electricidad Q que atraviesa el líquido; la unidad de Q en el sistema SI es el coulomb C. La cantidad de electricidad se define como la corriente I (ampere, A), multiplicada por el tiempo t (segundo, s):

$$Q = I \cdot t \quad (19)$$

- La masa de un elemento que se libera en un electrodo es proporcional al peso equivalente del elemento, dicho de otra forma señala que las masas de las diferentes sustancias producidas por el paso de la misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales a sus equivalentes en gramos,

$$m = (I \cdot PM \cdot t) / (n \cdot F) \quad (20)$$

Donde m es la masa producida de cada elemento, PM es el peso molecular de dicho elemento, n es el número de cargas intercambiadas y F es la constante de Faraday.

El factor de proporcionalidad que relaciona la cantidad de sustancia que se deposita con la cantidad de electricidad que pasa por la solución, se conoce como constante de Faraday y se le asigna el símbolo F , la cual es igual a 96485 C mol^{-1} .

Ahora que hemos profundizado en los conceptos y fundamentos que han dado origen a las teorías que dan sustento a todos aquellos elementos que juegan un papel muy importante dentro de nuestro tema de interés, estamos hablando por supuesto del tratamiento de agua contaminada, es posible nombrar el proceso que reúne todos los mecanismos para poder llevar a cabo lo anterior, estamos hablando del proceso de la electrocoagulación-floculación.

2.7 La Electrocoagulación-floculación (ECF)

La electrocoagulación-floculación (ECF) es un proceso para desestabilizar contaminantes suspendidos, emulsificados o disueltos en un medio acuoso, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del mismo.

La ECF es utilizada en la actualidad para tratar agua contaminada. En los últimos años el uso de los principios electroquímicos en el campo del tratamiento de aguas contaminadas se ha incrementado notablemente ya que no requieren del uso de agentes químicos (es una tecnología limpia), esto ha conseguido que una gran cantidad de estudiosos en este tema hayan puesto mayor atención en la Electroquímica y paralelo a esto a los procesos como el de la ECF.

Algunos de los usos del proceso de ECF son:

- Tratamiento de agua contaminada de restaurantes, de tal forma para lograr separar las aguas con un contenido alto en grasas, evitando de

esta forma la contaminación excesiva de aguas residuales con elementos orgánicos.

- Tratamiento de agua para riego, para separar de las aguas contaminadas los desechos orgánicos que puedan contener y poder reutilizarlas.
- Clarificación del agua superficial, para lograr una sensación de limpieza y evitar que microorganismos se acumulen y contaminen el agua.
- Clarificación de agua con alto contenido de turbiedad.
- Tratamiento de aguas residuales industriales y así evitar la gran contaminación de lagos y lagunas o bien de mares y océanos con sustancias tóxicas.

2.7.1 La ECF para tratamiento de agua

El fundamento teórico de la ECF, consiste en llevar a cabo la precipitación al mismo tiempo que la desestabilización de coloides. Hablando del tratamiento de agua, en el proceso de la ECF, los electrodos ya sean de aluminio (Al) o de hierro (Fe) son disueltos por medio de electrólisis formando especies coagulantes e hidróxidos del metal, los cuales desestabilizan y aglomeran las partículas en suspensión, o bien precipitan y adsorben los contaminantes disueltos. La disolución del ánodo metálico va acompañada del hidrógeno que es producido a través del cátodo, las burbujas formadas capturan los sólidos suspendidos haciéndolos flotar y de esta forma remover los contaminantes. Toda esta serie de reacciones que se llevan a cabo en el proceso son efectuadas dentro de lo que nombraremos como celda electroquímica, sin embargo antes de emprender de lo que trata una celda electroquímica, es necesario conocer su elemento principal y del cual depende en gran parte la forma en la que se llevará a cabo una reacción, este elemento es conocido como electrodo.

2.8 El electrodo

Un electrodo en una celda electroquímica es el ánodo o cátodo, conceptos que también fueron acuñados por Faraday. El ánodo se define como el electrodo al

cual los electrones vienen de la celda y ocurre la oxidación, y el cátodo es definido como el electrodo en el cual los electrones entran a la celda y ocurre la reducción. Cada electrodo puede convertirse en ánodo o cátodo dependiendo del voltaje que se aplique a la celda. Un electrodo bipolar es un electrodo que funciona como ánodo en una celda y como cátodo en otra.

2.8.1 El electrodo estándar de hidrógeno

El electrodo estándar de hidrógeno se utiliza normalmente como un electrodo de referencia, es decir que sirve para medir los valores de fem de otros electrodos.

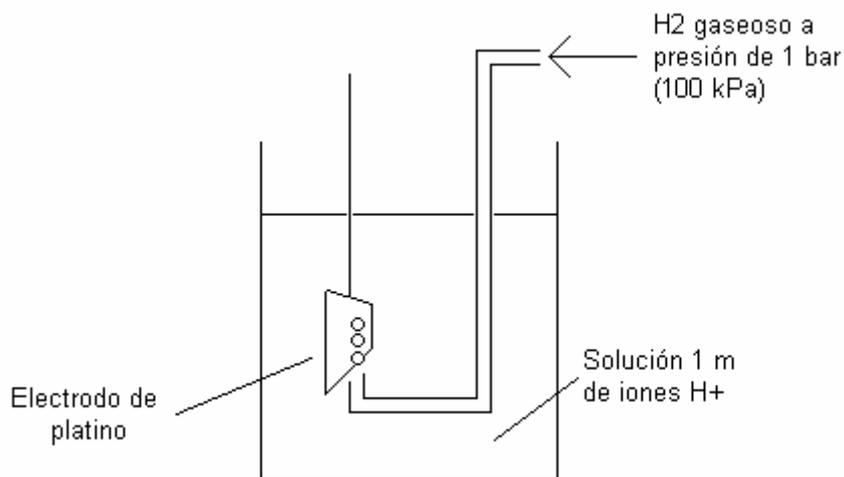


Figura 9. Electrodo estándar de Hidrógeno

Este electrodo consta de un electrodo de platino sumergido en una solución 1 molal de iones de hidrógeno que se mantienen a presión de 0.987 atm y 25° C (ver figura 9). Se hace burbujear hidrógeno gaseoso sobre el electrodo y pasa a la solución formando iones hidrógeno y electrones:



La fem que corresponde a este electrodo se le asigna arbitrariamente el valor de cero, y dicho electrodo se emplea como estándar para otros electrodos.

2.8.2 Otros electrodos estándar

El electrodo estándar de hidrógeno no es el más conveniente por la necesidad de hacer burbujear hidrógeno sobre un electrodo de platino. Es posible utilizar otro tipo de electrodos estándar de tipo secundario. Uno de ellos es el electrodo estándar de plata-cloruro de plata en el cual un electrodo de plata está en contacto con cloruro de plata sólido, el cual es una sal muy poco soluble. Todo esto está sumergido en una solución de cloruro de potasio, en la cual la concentración del ion cloruro es 1 molal. Este electrodo se representa como:



Otro electrodo que suele emplearse como estándar secundario es el electrodo de vidrio, el cual consta de un tubo que termina en un bulbo de vidrio de pared delgada. El bulbo de vidrio contiene una solución de ácido clorhídrico 0.1 m y un diminuto electrodo de plata-cloruro de plata.

Una vez conocido todo aquello que engloba un electrodo, debemos saber que una gran parte de los procesos productores de potencia tienen lugar en lo que conocemos como celda electroquímica; estos procesos consumen sustancias de alta energía y producen potencia eléctrica.

Es interesante resaltar que la invención de la celda electroquímica por Alessandro Volta en 1800 es, de hecho, una reinención. Excavaciones arqueológicas recientes en Oriente Próximo han descubierto lo que parece ser una celda electroquímica basada en electrodos de hierro y cobre. El dispositivo data de entre 300 a.C. y 300 d.C. Hay cierta evidencia de que ya por el 2500 a.C. los egipcios conocían la forma de galvanoplastiar objetos.

2.9 La Celda Electroquímica

Una celda electroquímica, es un dispositivo en el cual se produce una reacción química, la cual da lugar a una diferencia de potencial eléctrico entre los dos electrodos. Si dichos electrodos están conectados a un circuito externo se produce un flujo de corriente, que puede utilizarse para realizar trabajo mecánico de manera que la celda electroquímica transforme energía química en trabajo. Las celdas electroquímicas son instrumentos valiosos de laboratorio ya que permiten obtener cantidades termodinámicas como entalpías, energías de Gibbs, determinar números de transporte y los coeficientes de actividad para iones en solución.

2.9.1 Clasificación de las celdas electroquímicas

Podemos clasificar las celdas electroquímicas que proporcionan energía eléctrica como celdas voltaicas ó galvánicas, además de contar con las celdas de combustible y las celdas electrolíticas.

2.9.1.1 Celdas voltaicas

Una celda voltaica es un dispositivo para producir energía eléctrica a partir de una reacción de tipo redox misma en la que los estados de oxidación cambian de forma espontánea. Las celdas voltaicas se clasifican en dos tipos, las celdas primarias y las celdas secundarias.

a. Celdas Primarias

Las celdas primarias son constituidas con materiales de alta energía que reaccionan químicamente y producen energía eléctrica. La reacción de celda no es reversible y cuando los materiales se consumen, el dispositivo debe ser desechado. Algunos ejemplos típicos de este tipo de celdas son: las pilas comunes que todos conocemos y las celdas de cinc-mercurio usadas en cámaras fotográficas, relojes, relojes de mano, etc.

Sin embargo y a pesar de la gran cantidad de usos diarios que se le dan a las celdas primarias como lo pudimos notar, debemos mencionar que otro tipo de funciones no es posible que se lleven a cabo en este tipo de celda, con lo cual se da paso a la existencia de las celdas secundarias y las celdas de combustible que a continuación se describen.

b. Celdas Secundarias

Este tipo de dispositivo es reversible. Después de proporcionar energía pueden reconstituirse imponiendo una corriente desde una fuente de energía exterior en la dirección inversa. La reacción de la celda se invierte y el dispositivo se recarga (la reacción es de tipo reversible). Un ejemplo de este tipo de celda es la batería de plomo utilizada en los automóviles y las celdas recargables de níquel-cadmio utilizadas en las calculadoras y linternas.

2.9.1.2 Celdas de combustible

Al igual que la celda primaria, la celda de combustible utiliza materiales de alta energía para producir potencia, con la diferencia de que la celda de combustible está diseñada para aceptar una alimentación continua de combustible ya sea hidrógeno, carbono e hidrocarburos.

2.9.1.3 Celdas electrolíticas

Una celda electrolítica es un dispositivo en el que la energía producida por una corriente eléctrica se puede emplear para efectuar una reacción particular que no se produce de forma espontánea. Dentro de este tipo de celdas podemos también clasificar a la celda de ECF (ver figura 10).

A continuación se muestra un esquema de las interacciones que ocurren dentro de una celda de ECF.

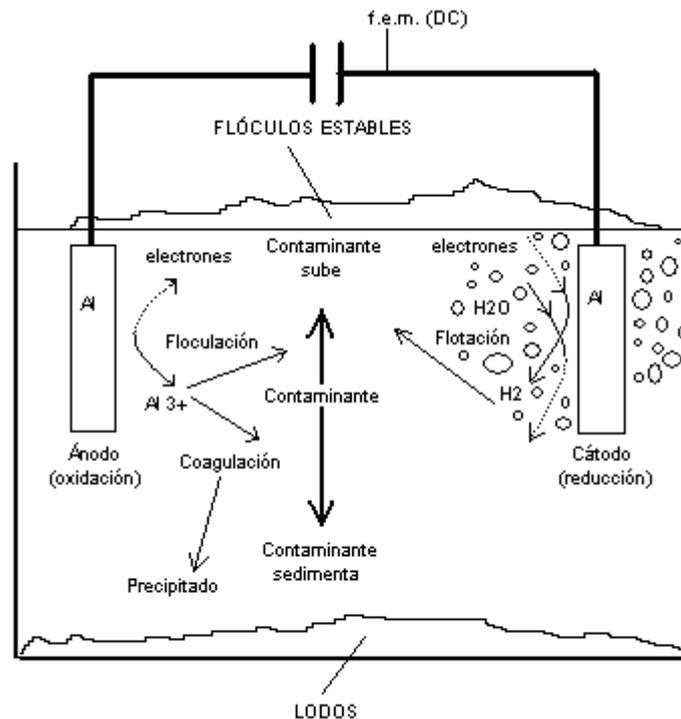
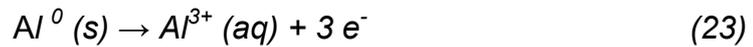


Figura 10. Esquema de las reacciones ocurridas dentro de una celda de electrocoagulación-floculación

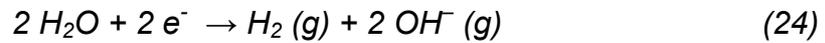
Podemos observar en la figura 10 las reacciones que ocurren dentro de la celda de ECF. Los electrodos están hechos de aluminio, por lo cual empezaremos por mencionar algunas de las razones por las cuales se decidió utilizar el aluminio como material para elaborar las placas:

- Causa la aglutinación y sedimentación de desechos presentes en el agua sucia por su fuerte efecto reductor del Potencial Zeta.
- El aluminio a diferencia del hierro no da color a la solución lo cual se traduce en un aspecto de mayor limpieza.
- El aluminio no cambia sus características químicas durante el reciclado. El proceso se puede repetir indefinidamente.
- Un residuo de aluminio es fácil de manejar: es ligero, no se rompe, no arde y no se oxida.
- Su punto de fusión es de 933.47 K y su punto de ebullición es de 2792 K, las cuales son temperaturas muy altas para casi cualquier tratamiento de agua existente.

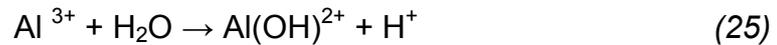
Ahora podemos describir las reacciones ocurridas dentro de la celda de ECF mostrada en la figura 10. La reacción que inicia se lleva a cabo en el ánodo cuando una corriente pasa a través del electrodo de Aluminio oxidando el metal (reacción 23):



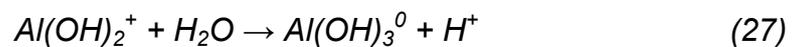
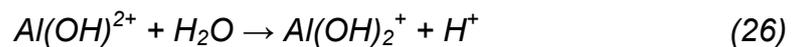
Al mismo tiempo, el agua es reducida en forma de hidrógeno gaseoso e iones OH^- lo cual se representa con la reacción,



Posteriormente una molécula de Al^{3+} proveniente de (23) reacciona con una molécula de H_2O encontrada en el medio dando como resultado,



Consecutivamente a la reacción (25) se originan las siguientes reacciones en las cuales el hidróxido de aluminio reacciona con agua formando más hidróxido de aluminio y liberando hidrógeno.



Gracias a la liberación de toda esta cantidad de hidrógeno que podemos ver en las reacciones, es posible lograr la flotación de los contaminantes que se encuentren dentro del agua que a su vez ya hayan reaccionado.

Debemos tener en cuenta que las celdas tienen la capacidad de funcionar como lo que conocemos con el nombre de reactores químicos, ya que dentro de una celda se llevan a cabo reacciones químicas de la misma forma que como ocurre en un reactor químico.

2.10 Reactor Químico

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora esta constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y esta gobernado por un algoritmo de control.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada.

2.10.1 Algunos tipos de reactores químicos

Como anteriormente se ha mencionado existe una gran variedad de reactores químicos ya que muchos de ellos son diseñados y elaborados para un fin en especial, por ello a continuación se mencionan solamente algunos de estos reactores encontrados con mayor frecuencia.

2.10.1.1 Reactor batch o discontinuo

Es simplemente un recipiente en el que están contenidas las sustancias mientras reaccionan (ver figura 7); lo que hemos de determinar es la extensión de la reacción para diversos tiempos, que puede seguirse por varios caminos, por ejemplo:

1. Siguiendo la marcha de la concentración de un determinado componente.
2. Siguiendo la variación de alguna propiedad física del fluido, tal como la conductividad eléctrica o el índice de refracción.
3. Siguiendo la variación de la presión total, en un sistema a volumen constante.
4. Siguiendo la variación del volumen total, en un sistema a presión constante.

El reactor discontinuo experimental suele operar a temperatura y volumen constante, debido a la fácil interpretación de los resultados experimentales procedentes de las experiencias efectuadas en estas condiciones. Este reactor es un dispositivo relativamente sencillo, adaptable a experiencias de laboratorio en pequeña escala y necesita solo pequeños instrumentos o aparatos auxiliares; es el dispositivo preferido para la obtención de datos cinéticos en sistemas homogéneos.

2.10.1.2 Reactor discontinuo de volumen constante

Cuando hablamos de reactor discontinuo de volumen constante nos estamos refiriendo al volumen de la mezcla reaccionante y no al volumen del reactor; es decir, esta denominación corresponde a un sistema reaccionante de volumen constante o de densidad constante (figura 11). Se incluyen en este tipo la mayor parte de las reacciones en fase líquida y todas las reacciones en fase gaseosa que se efectúan en una bomba de volumen constante.

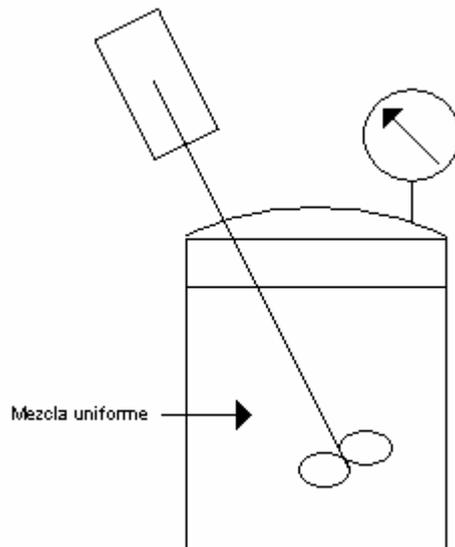


Figura 11. Esquema de un reactor discontinuo

2.10.1.3 Reactor de Flujo ó Continuo

Se utiliza principalmente para el estudio cinético de reacciones heterogéneas, aunque en algunos casos se usa para completar el estudio de reacciones homogéneas y ofrece ventajas sobre el reactor discontinuo. Como ejemplo de casos en que el estudio cinético puede efectuarse con mayor facilidad en los reactores de flujo podemos citar: las reacciones que son difíciles de seguir, las reacciones que dan lugar a varios productos, las reacciones muy rápidas, y las reacciones en fase homogénea. Este tipo de reactor se representa en la figura 12.

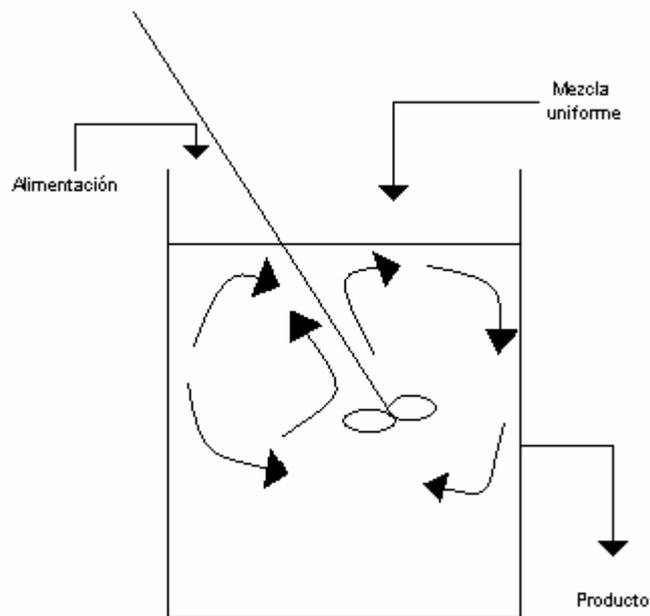


Figura 12. Esquema de un reactor de flujo o continuo.

2.10.1.4 Reactor Semicontinuo

Es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se van retirando productos y también incorporando más material de manera casi continua.

2.10.1.5 Reactor Tubular

En general es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. Tienen forma de tubos, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.

2.10.1.6 Reactor de Lecho Fluidizado

Se utiliza para reacciones donde intervengan un sólido y un fluido (generalmente un gas). En estos reactores la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas,

con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura evitando la formación de zonas calientes (ver figura 13).

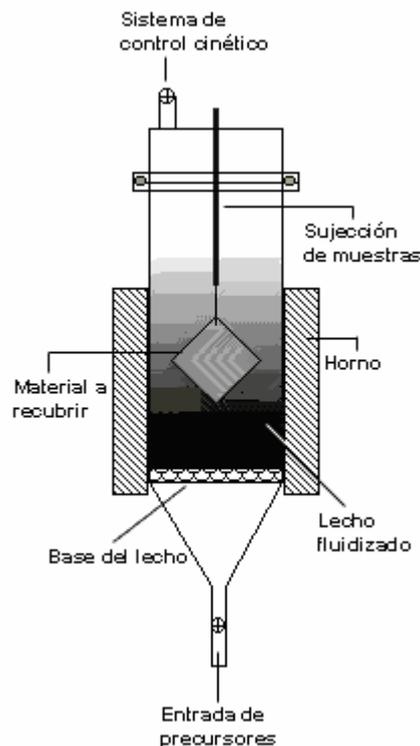


Figura 13. Esquema de un reactor de lecho fluidizado.

2.10.1.7 Reactor de Lecho Fijo

Los reactores de lecho fijo consisten en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, que operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma: granulares, cilíndricas, esféricas, etc. En algunos casos, especialmente con catalizadores metálicos como el platino, no se emplean partículas de metal, sino que éste se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material. Estas mallas catalíticas se emplean en procesos comerciales como por ejemplo para la oxidación de amoníaco y para la oxidación del acetaldehído a ácido acético.

2.10.1.8 Reactor de recirculación

El reactor de recirculación con dispositivo separador toma parte de la corriente de salida y la lleva directamente a la entrada del reactor.

El reactor de recirculación sin dispositivo separador se trata de aquel en el que en la salida del reactor colocamos un dispositivo separador que hace que se separen reactivos y productos, luego los reactivos se recirculan de nuevo al reactor.

2.10.1.9 Reactor de Burbujas

Este tipo de reactor permite hacer burbujear un reactivo gaseoso a través de un líquido con el que puede reaccionar, porque el líquido contiene un catalizador disuelto, no volátil u otro reactivo. El producto se puede sacar del reactor en la corriente gaseosa.

2.10.1.10 Reactor de Membrana

El reactor de membrana es aquel que combina la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana remueve selectivamente una (o más) de las especies reactantes o productos. Estos reactores han sido comúnmente usados para aplicaciones en las cuales los rendimientos de la reacción están limitados por el equilibrio. También han sido propuestos y usados para otras aplicaciones; para incrementar el rendimiento y la selectividad de reacciones enzimáticas y catalíticas influyendo a través de la membrana sobre la concentración de una (o más) especies intermedias, removiéndolas selectivamente (o ayudando a mantenerlas en una concentración baja), evitando la posibilidad de que dichos compuestos envenenen o desactiven el catalizador y para proveer una interfase controlada entre dos o más reactantes.

Englobando lo fundamentado dentro de este capítulo y tendiendo un conocimiento más amplio de todo aquello que involucra el proceso de la electrocoagulación-floculación (ECF), como lo es el tipo de agua a tratar, su

caracterización, los medios que es posible emplear para determinar las impurezas contenidas en ella y la eliminación de las mismas, el siguiente paso a realizar será el diseño experimental con el cual se llevarán a cabo las experiencias para la eliminación de silicatos del agua de proceso.

Capítulo III

DISEÑO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

3.1 Fundamentos teóricos de diseño y operación

El diseño de los aparatos empleados en las etapas del tratamiento físico, se estudia en las operaciones básicas de la Ingeniería Química. Económicamente, la etapa de tratamiento químico de un proceso puede ser de poca importancia, como por ejemplo, si se realiza en un simple tanque de mezcla. Sin embargo, es más frecuente que esta etapa sea la más significativa del proceso, es decir, la que económicamente decide la posibilidad del mismo.

El diseño del reactor no es cuestión de rutina, ya que para el mismo proceso pueden proponerse diferentes diseños. El diseño óptimo no ha de basarse precisamente en el costo mínimo del reactor; puede hacerse un diseño con un costo bajo de reactor, pero los materiales de su instalación pueden estar en condiciones tales que su tratamiento requiera un costo mucho más elevado que empleando otros. En consecuencia, en el diseño más adecuado ha de considerarse la economía global del proceso.

Para el diseño de nuestro equipo experimental después de tener una idea clara de nuestro objetivo, se ha recurrido a la investigación de experiencias realizadas con anterioridad, la mayoría de ellas basadas en los mismos fundamentos electroquímicos que se describen en el Capítulo II con la diferencia del tipo de contaminante o impureza que manejan. El equipo experimental que requerimos consta de una celda electroquímica la cual está compuesta por un reactor (contenedor) y los electrodos de aluminio, así como por un sedimentador, esto en cuanto a diseño se refiere. Cabe destacar que tanto el diseño de la celda electroquímica como el del sedimentador también se han realizado en base a equipos utilizados en procesos de este tipo.

El modo de operar del equipo es de vital importancia ya que de una incorrecta operación o inadecuada colocación de cada equipo es posible aumentar los errores que se reflejarán en los resultados experimentales. Antes que nada debe verificarse que el equipo esté debidamente limpio y que al momento de colocarse no exista la posibilidad de sufrir un accidente. El armado del equipo dependerá del tipo de reactor que se desee manejar, ya sea batch, continuo o

continuo con recirculación. Iniciaremos con el diseño y descripción del equipo experimental del reactor en operación batch haciendo mención primeramente del equipo, instrumentación y reactivos empleados.

3.2 Lista de equipos, instrumentación y reactivos

3.2.1 Lista de equipos

1. Celda electroquímica, reactor y electrodos de aluminio.
2. Sedimentador.
3. Fuente de poder marca CENCO, rango de medición de intensidad de corriente 0 a 5 A.
5. Bomba centrífuga Masterflex L/S elaborado por Cole-Parmer Instrument Company, rango de flujo de 40 mL/min hasta 2270 mL/min, mangueras Masterflex no. 18.
6. Multímetro digital, marca FLUKE, elaborado por Fluke Corporation Everett, WA.
7. Conductímetro, elaborado por Conductronic, S. A., rango de medición de 0 $\mu\text{S/cm}$ hasta 19.99 mS/cm, resolución 0.1 $\mu\text{S/cm}$, precisión $\pm 1.5\%$.
8. Plancha para agitar elaborada por Barnstead/Thermolyne, USA.
9. Comparador visual de ppm de silicatos.

3.2.2 Lista de material e instrumentación

- Electrodo de referencia Calomel para medir la caída de potencial.
- Vasos de precipitado Pyrex USA de 200 mL, 500 mL, 1000 mL.
- Tubos de ensayo.
- Pipeta Pyrex México de 10 mL en 1/10.
- Pipeta Kimax USA de 10 mL en 1/10.
- Frascos de polipropileno de 30 mL para muestreo.
- Agitador magnético.
- Papel filtro elaborado por Whatman International Ltd. Maidstone England de los números 4 y 40.
- Papel pH elaborado por Macherey - Nagel de rango 0.0 a 14.0.

3.2.3 Lista de reactivos

- HCl al 2%, elaborado por Hanna Instruments Inc.
- Sulfito de sodio, elaborado por Hanna Instruments Inc.
- Molibdato de amonio, elaborado por Hanna Instruments Inc.
- Agua destilada.
- NaCl o salmuera.

3.3 Equipo experimental del reactor batch

Para el empleo del reactor batch se utilizó un vaso de precipitado de 1 L como contenedor y los electrodos de aluminio que constan de 10 placas de 9.5 cm de largo, 9.5 cm de ancho y 6.35 cm de espesor, mismos que fueron elaborados y utilizados anteriormente. Con éstas dimensiones es posible obtener el área total de ánodos (A) la cual es de 0.0812 m^2 .

En este reactor se requiere introducir el agua contaminada a la celda de ECF y conectar los electrodos a la fuente de poder. Para su operación una vez realizado lo anterior se hace suministrar una intensidad de corriente (I) fija que pasará a través de los electrodos provocando las reacciones dentro de la celda de ECF como lo muestra la figura 14.

Las experiencias son realizadas a 1, 2 y 3 A de intensidad de corriente, teniendo como constante un tiempo de operación del equipo de 600 s y tomando una muestra de 10 mL cada 60 s.

De la concentración de SiO_3^{2-} obtenida por medio de pruebas de absorción atómica es posible calcular la cantidad de aluminio producido experimentalmente y por medio de la segunda ley de Faraday es posible calcular la producción de aluminio teórica. Éstas dos cantidades, tanto la producción experimental como la teórica es posible relacionarlas mediante el Rendimiento faradaico (R_F), destacando que mientras más cercana sea ésta

relación a 1 se desarrollará de mejor manera la reacción y la producción de Aluminio será mayor.

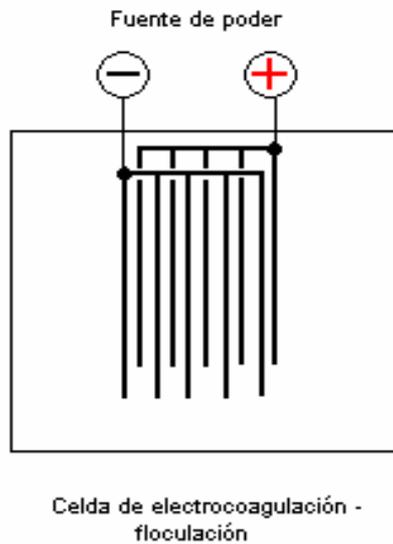


Figura 14. Esquema del reactor batch para el proceso de ECF

En esta parte de la experiencia se ha determinado que el R_F más cercano a 1 fue aquel en el que se suministró 2 A de intensidad de corriente, esto basándonos en los resultados obtenidos, mismos que se muestran más adelante en el capítulo IV.

Ya que contamos con la intensidad de corriente requerida y el área total de ánodos es posible calcular la densidad de corriente, la cual se define como la corriente eléctrica por unidad de superficie,

$$i = I / A \quad (28)$$

En donde i tiene un valor de $24.6 \text{ A} / \text{m}^2$.

3.4 Equipo experimental del reactor continuo y reactor continuo con recirculación

En ésta parte de la experiencia es en la cual se diseña un equipo para el proceso de ECF adecuado a nuestras necesidades. Para la realización del equipo utilizado como reactor continuo se han elaborado un contenedor, electrodos de Aluminio y un sedimentador.

3.4.1 Diseño de los electrodos de Aluminio

Nuestra primera decisión, en base en los fundamentos del capítulo II, fue elaborar los electrodos empleando el aluminio como material. Una vez teniendo esto presente, y en base a las experiencias realizadas con el reactor batch, contamos con la intensidad de corriente idónea para llevar a cabo el proceso de ECF la cual es de 2 A y como dato adicional contamos con la densidad de corriente requerida, la cual es de 24.6 A / m².

Partiendo de éstos datos lo primero que observamos es la posibilidad de obtener el área total de ánodos (A) dividiendo la intensidad de corriente entre la densidad de corriente requerida de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} A &= I / i && (29) \\ A &= (2 \text{ A}) / (24.6 \text{ A/m}^2) \\ A &= 0.0813 \text{ m}^2 = 813 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Una vez que tenemos el área total de los ánodos, nosotros hemos determinado que el número total de placas (N) que deseamos tener en la celda sea de 10. De aquí podemos obtener el número total de caras anódicas (N_{ca}) recordando que cada placa plana cuenta con una cara anódica y frente a ella se encuentra una cara que funciona como cátodo, de esta forma tenemos que:

$$\begin{aligned} N_{ca} &= N - 1 && (30) \\ N_{ca} &= 10 - 1 = 9 \end{aligned}$$

Ahora si dividimos el área total de ánodos entre el número total de caras anódicas es posible calcular el área por cada cara anódica (A_{ca}) como sigue:

$$\begin{aligned}A_{ca} &= A / N_{ca} & (31) \\A_{ca} &= 0.0813 \text{ m}^2 / 9 \\A_{ca} &= 0.00903 \text{ m}^2 = 90.3 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

Para cada placa de los electrodos es deseable tener una longitud mayor en la altura que en el ancho ya que esto se ve reflejado en una buena agitación de forma natural lo cual nos garantiza homogeneidad en la solución y un mayor tiempo de residencia, lo cual se refleja en una mejor formación de los coágulos. Por este motivo hemos decidido que para cada placa, la altura h debe medir al menos el doble que el ancho b de la misma, con lo cual tenemos un rectángulo, cuya área (la cual es el área por cada cara anódica) es posible determinar multiplicando la base por la altura del mismo:

$$b \times h = A_{ca} \quad (32)$$

donde:

$$\begin{aligned}A_{ca} &= 90.3 \text{ cm}^2 \\h &= 2 b & (33)\end{aligned}$$

Sustituyendo (33) en (32) tenemos que:

$$\begin{aligned}b \times 2 b &= 90.3 \text{ cm}^2 \\2 b^2 &= 90.3 \text{ cm}^2 \\b &= 6.719 \text{ cm}\end{aligned}$$

Sustituyendo el valor de b y de A_{ca} en la ecuación (32):

$$6.719 \text{ cm} \times h = 90.3 \text{ cm}^2$$

Despejando h obtenemos la altura de cada placa:

$$h = 13.44 \text{ cm}$$

El espesor de las placas (e_p) será de 0.7 cm, el cual es un espesor de tipo comercial, y la separación entre las placas (s_p) de 0.5 cm, ya que debemos tomar en cuenta que éstas no deben encontrarse muy cercanas entre sí para evitar que se produzca un corto circuito, ni demasiado alejadas ya que de esta forma producen una gran caída de voltaje lo cual se ve reflejado en costos.

A continuación en la figura 15 se muestran las dimensiones del conjunto de placas con las que se trabajó experimentalmente.

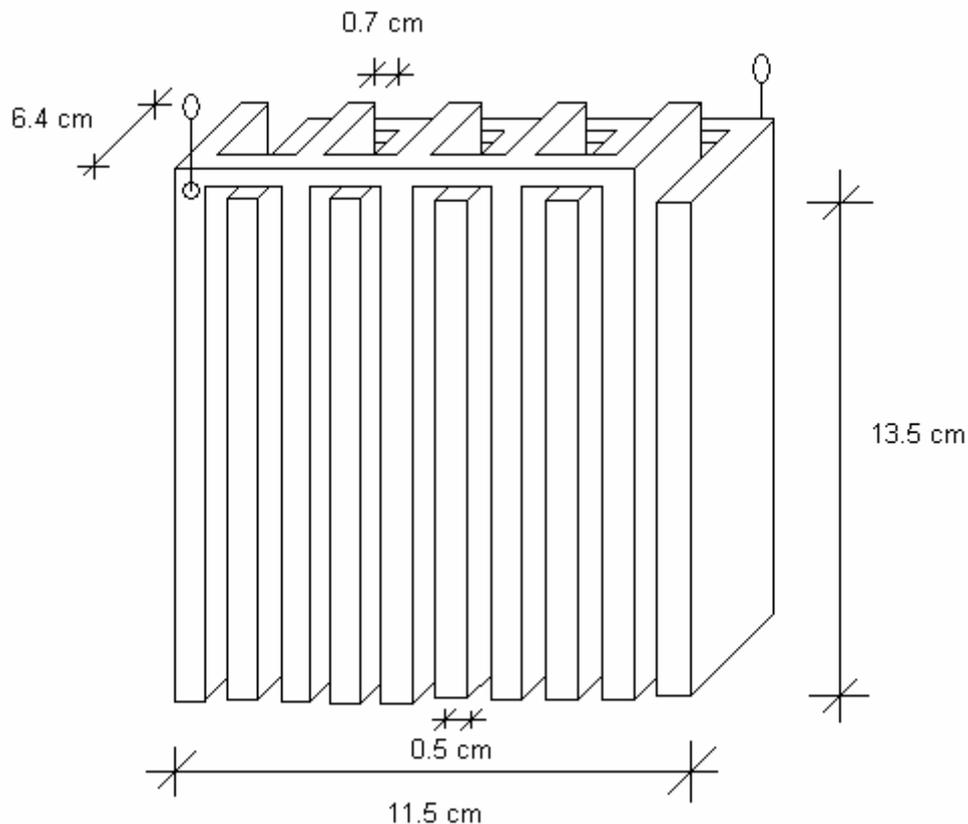


Figura 15. Esquema de las placas de aluminio utilizadas para el proceso de la electrocoagulación-floculación con sus dimensiones

De las dimensiones mostradas en la figura 15 es posible obtener el área total de ánodos en las placas experimentales que es de 778 cm^2 .

3.4.2 Diseño del reactor para la celda de ECF

Tomando como base las dimensiones de los electrodos es necesario construir un reactor que pueda contenerlos de una forma adecuada, de tal forma que se garantice altos rendimientos. El espacio dentro del que deben ir los electrodos en principio no debe ser mucho más grande que el volumen que ocupan los mismos ya que esto haría que aquellas partículas contaminantes que se encuentren más alejadas de los electrodos no logren reaccionar durante el tiempo de residencia de la celda y de la misma forma la agitación que se produce de forma natural por el desprendimiento del hidrógeno no sería del todo eficiente.

En la figura 16 se muestran las tres partes que componen el reactor de la celda de ECF, en ella podemos observar que la parte A es aquella en la que se introducen los electrodos mostrados en la figura 15 y como tal es la parte más importante del reactor ya que en ella es en donde se llevarán a cabo las reacciones, las partes B y C son en las que se recolectan tanto el agua tratada como los coágulos formados antes de pasar al sedimentador.

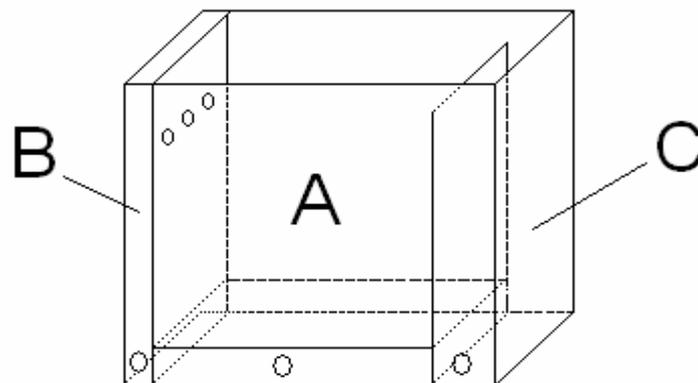


Figura 16. Esquema de las partes que componen el reactor de la celda de ECF

Para conocer las dimensiones adecuadas del reactor que utilizamos se llevaron a cabo algunos cálculos sencillos basados en las dimensiones de las placas.

3.4.2.1 Cálculo del volumen vacío de la celda de ECF

Como primer punto calculamos el volumen que ocupan las placas (V_P) dentro de la celda de ECF:

$$\begin{aligned} V_P &= h * b * (N * ep) & (34) \\ V_P &= 13.5 \text{ cm} * 6.5 \text{ cm} * (10 * 0.7 \text{ cm}) \\ V_P &= 614.25 \text{ cm}^3 = 6.143 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para obtener el volumen vacío (V_V) en la celda de ECF utilizamos la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} V_V &= h * b * [(N * ep) + (N_{ca} * sp)] & (35) \\ V_V &= (13.5 \text{ cm} * 6.5 \text{ cm}) * [(10 * 0.7 \text{ cm}) + (9 * 0.5 \text{ cm})] \\ V_V &= 1009.125 \text{ cm}^3 = 1.0091 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Finalmente por medio de una resta obtenemos el volumen vacío entre las placas (V_{VP}):

$$\begin{aligned} V_{VP} &= V_V - V_P & (36) \\ V_{VP} &= (1009.125 \text{ cm}^3) - (614.25 \text{ cm}^3) \\ V_{VP} &= 394.9 \text{ cm}^3 = 3.949 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Una vez que hemos calculado los volúmenes correspondientes a las placas podemos dimensionar el reactor que las contendrá a nuestra conveniencia.

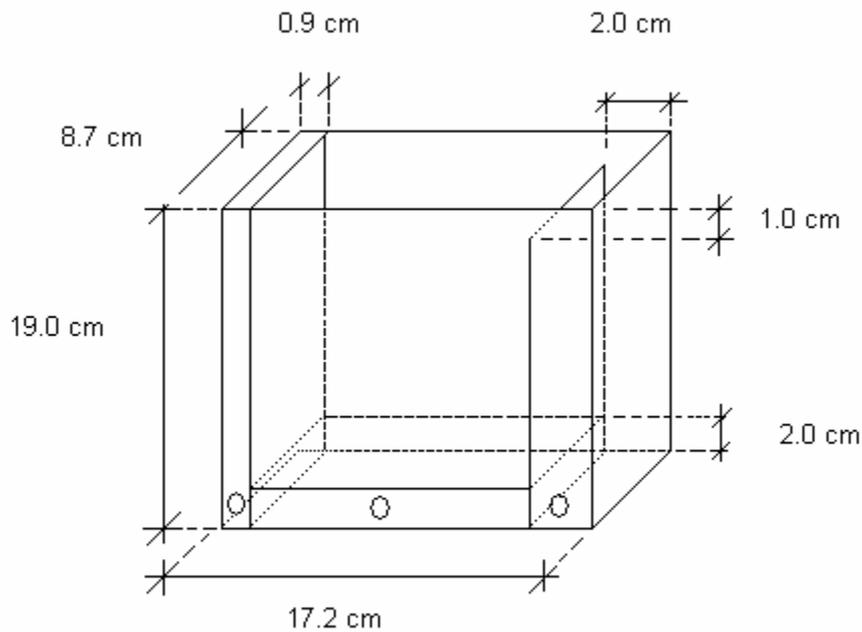


Figura 17. Dimensiones de la celda de electrocoagulación-floculación

En la figura 17 se muestran las dimensiones con las que se realizó el reactor de la celda de ECF. El material de fabricación es acrílico con un espesor de 0.5 cm.

De las dimensiones reales del equipo experimental mostradas en la figura 18 es posible calcular el volumen de la parte A (figura 16), éste volumen es de 1761.76 cm^3 .

3.4.3 El sedimentador

El sedimentador tiene como función darle mayor tiempo a los coágulos formados en el agua de agruparse en moléculas más grandes y por lo mismo más pesadas y de esta forma precipitar.

Para la elaboración del sedimentador se prefirió tomar como base un volumen semejante al volumen vacío de la celda de ECF ya que con este una vez sobrediseñado se tendría un tiempo mayor para lograr la sedimentación de los coágulos formados. En la figura 18 se muestran las dimensiones con las cuales

se construyó el sedimentador experimental, el material con el que se fabricó es también de acrílico con un espesor de 0.5 cm.

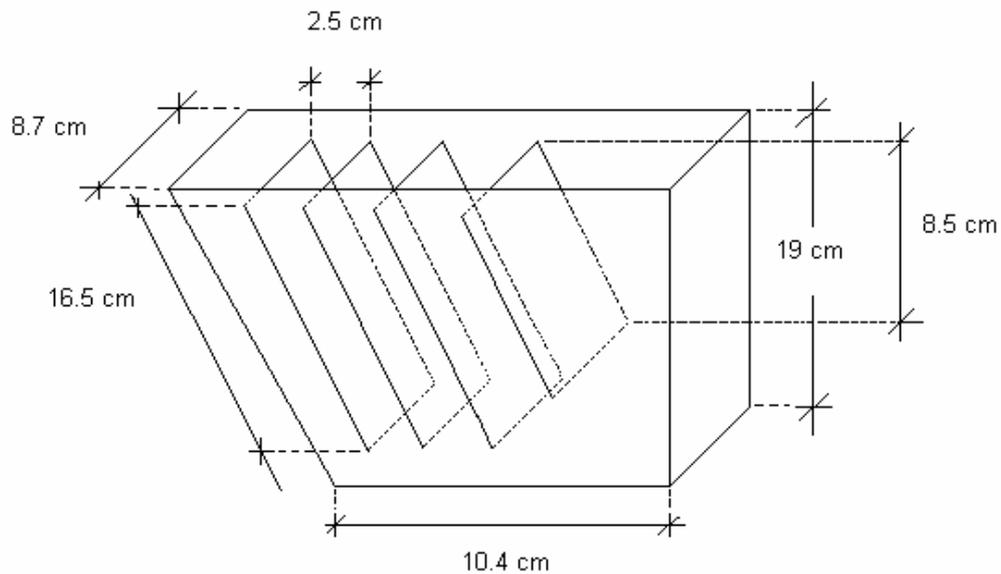


Figura 18. Dimensiones del sedimentador para el proceso de electrocoagulación-floculación

3.5 Operación del equipo experimental del reactor continuo

En este reactor, a diferencia del reactor en operación batch, existe un flujo de entrada constante de agua contaminada y al final del proceso se separa el agua limpia ya tratada al mismo tiempo que se filtran los coágulos. Para la operación de este tipo de reactor una vez que ha quedado configurado el equipo como lo muestra la figura 19, se procede a encender la bomba con un caudal volumétrico fijado previamente y aproximadamente cuando la mitad del volumen de la celda de ECF se encuentre con agua se pone en operación la fuente de poder también con una intensidad de corriente establecida desde antes. El agua tratada al término del proceso se separa para seguir con otros estudios.

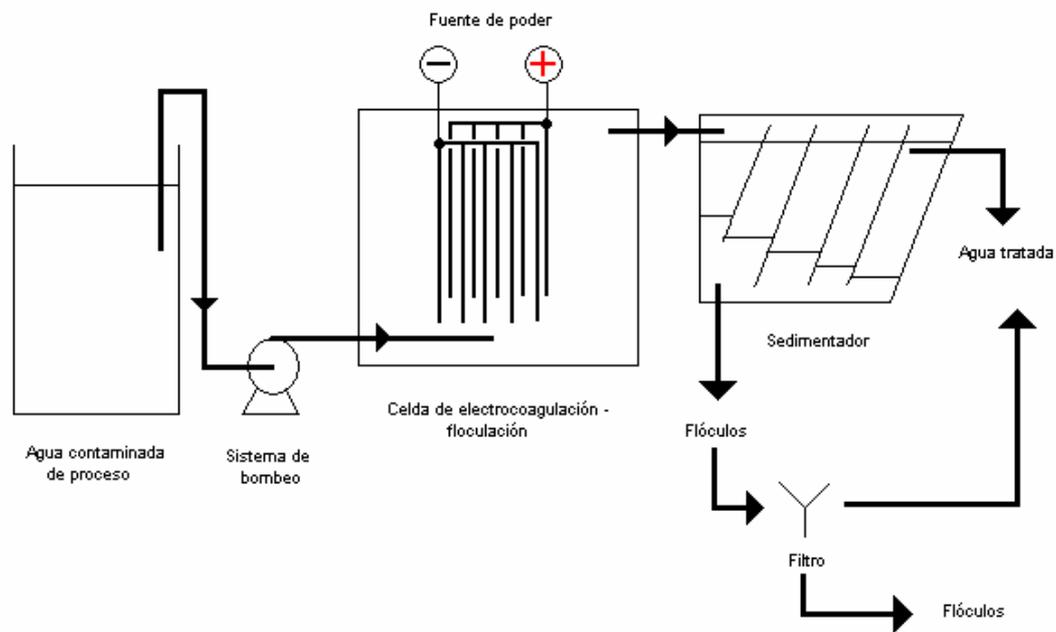


Figura 19. Esquema del reactor continuo para el proceso de electrocoagulación-floculación

3.6 Operación del equipo experimental del reactor continuo con recirculación

Este tipo de reactor, a diferencia del anterior, el agua tratada regresa nuevamente al contenedor inicial en donde se encuentra el agua contaminada. En este reactor esquematizado en la figura 20, se trata de minimizar al máximo la concentración de silicatos ya que cada vez que el agua pasa a través de la celda de ECF está eliminando silicatos a la vez que se están separando los coágulos formados por medio de un filtro.

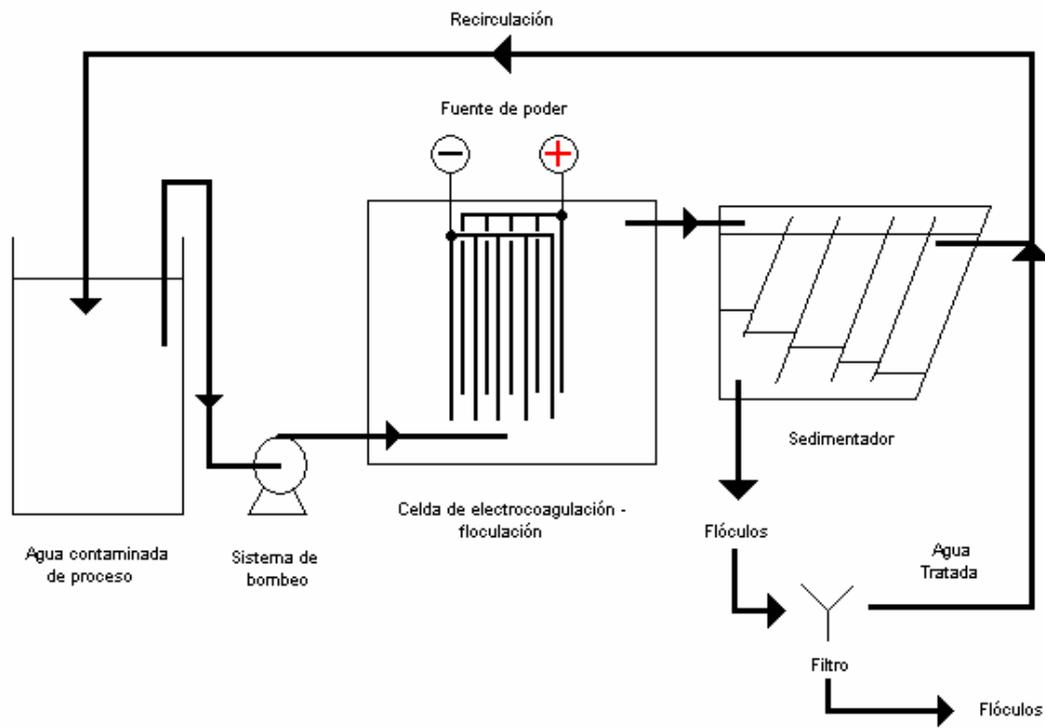


Figura 20. Esquema del reactor continuo con recirculación para el proceso de electrocoagulación-floculación

Capítulo IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Fundamentos de los resultados experimentales

En este capítulo podrán encontrarse primeramente los cálculos necesarios para darnos una idea del tipo de silicato que se encuentra contaminando el agua a tratar, también encontraremos los fundamentos de los cálculos elementales no sólo para la operación del equipo sino además para lograr una simulación misma que se verá en el capítulo V. También dentro de este mismo capítulo encontraremos los resultados obtenidos experimentalmente junto con algunos de sus cálculos para la eliminación de silicatos del agua de proceso.

4.2 Análisis del silicato presente en el agua

El análisis del silicato se realizó con el fin de conocer el tipo de contaminante contenido en las muestras de agua proporcionadas por la industria, resaltando que éste no formó parte de nuestro objetivo y se llevó a cabo para tener un mejor fundamento de nuestros resultados. La concentración inicial de silicatos contenida en el agua fue de 200 mg/L, estudio hecho por absorbancia o colorimetría. Ésta misma muestra nos arrojó una concentración de 76.5 mg/L de Sílice por absorción atómica la cual abreviaremos como $C_{Si_{a.a}}$.

Con estos datos y los fundamentos proporcionados en el capítulo II, es factible comprobar que el tipo de silicato contenido en el agua de proceso es el SiO_3^{2-} .

Para los siguientes cálculos requerimos de los pesos atómicos del Silicio y del Oxígeno:

Peso atómico del Silicio: 28.0855 g/mol

Peso atómico del Oxígeno: 15.9994 g/mol

Peso molecular del SiO_3^{2-} : 76.0837 g/mol

Calculamos la concentración de Si (C_{Si}) en mol / L :

$$C_{Si} = (C_{Si_{a.a.}}) / (\text{Peso atómico Si} * 1000 \text{ mg/g})$$

Sustituyendo los valores:

$$C_{Si} = (76.5 \text{ mg / L}) / (28.0855 \text{ g/mol} * 1000 \text{ mg/g})$$

$$C_{Si} = 0.002724 \text{ mol / L}$$

Utilizando el peso molecular del SiO_3^{2-} y la concentración de Si obtenida podemos calcular la concentración de SiO_3^{2-} ($C_{\text{SiO}_3^{2-}}$) en mg/L:

$$C_{\text{SiO}_3^{2-}} = (\text{Peso molecular } \text{SiO}_3^{2-} * C_{Si} * 1000 \text{ mg / g})$$

Sustituyendo:

$$C_{\text{SiO}_3^{2-}} = (76.0837 \text{ g / mol}) * (0.002724 \text{ mol / L}) * (1000 \text{ mg / g})$$

$$C_{\text{SiO}_3^{2-}} = 207.252 \text{ mg / L} = 207.252 \text{ ppm}$$

Por lo tanto podemos comparar el resultado obtenido por colorimetría, el cual fue de 200 ppm con nuestro resultado obtenido por absorción atómica de 207.252 ppm los cuales a simple vista son prácticamente iguales, sin olvidarnos que la prueba colorimétrica puede tener un error de $\pm 5 \%$, con lo cual estaríamos entre las 190 ppm y las 210 ppm de silicatos. En base a lo anterior es posible deducir y comprobar que el silicato que tenemos contenido en el agua de proceso es el SiO_3^{2-} .

Ahora bien, una vez que conocemos el tipo de silicato que trataremos de remover, podemos encontrar una posible relación entre el aluminio que se producirá dentro de la celda de ECF y el SiO_3^{2-} , a lo cual la propuesta es la que sigue:

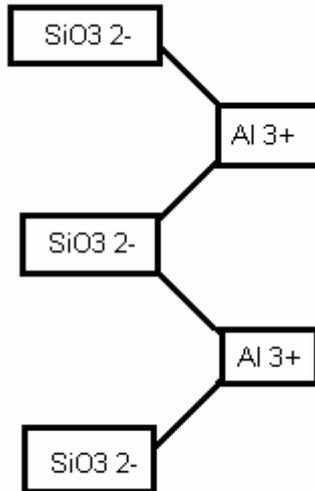


Figura 21. Relación entre el SiO_3^{2-} con el Al^{3+}

De la figura 21 podemos concluir que la molécula que se formaría es de un peso molecular aproximado a 282.21 g/mol, lo suficientemente pesado como para poder precipitar, sin embargo la posibilidad de cadenas más largas con enlaces de SiO_3^{2-} es bastante amplia ya que si dentro del medio es posible encontrar otro tipo de sales tales como calcio, magnesio, fosfatos, etc., éstos reaccionarán de la misma forma haciendo la cadena aún más pesada como pudimos verlo en el capítulo II.

4.3 Cálculos para la determinación de variables del proceso

Una vez que conocemos un poco más acerca del contaminante, se pone en marcha el equipo y es necesario conocer dos factores de gran importancia para la realización de los cálculos de las variables de las que depende nuestro proceso:

1. La concentración inicial de SiO_3^{2-} existente en el agua contaminada que desea tratarse ya que ésta será nuestra referencia en todo momento y en cada experiencia que se realice, esto es posible por medio de absorción atómica o bien por el método de determinación de sílice por colorimetría cuyos fundamentos son mencionados en el capítulo anterior. El agua

contaminada con la que trabajamos contenía una concentración de 200 ppm o lo que es igual 200 g/m^3 .

2. Una de las variables que deben fijarse desde un principio si se trata del reactor continuo o continuo con recirculación es el caudal volumétrico Q_V ya que de este depende en gran parte que se lleve a cabo un buen proceso de ECF. El Q_V que manejamos para el diseño de esta celda fue de 60 mL/min o bien $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

4.3.1 Cálculo del rendimiento faradaico

Un cálculo de gran importancia es el *Rendimiento faradaico* de la solución, ya que éste nos proporciona la relación entre la producción de aluminio experimental y la producción de aluminio teórica, ambas determinadas por cálculo. La tabla 5 nos muestra los datos obtenidos por absorción atómica de la concentración de Al^{3+} en una experiencia realizada con una intensidad de corriente de 1 A la cual se fijó en base a experiencias realizadas anteriormente para este tipo de proceso y con un tiempo de 600 s de operación.

Tabla 5. Concentración de Al^{3+} en función del tiempo determinado por un estudio de absorción atómica

Tiempo (s)	Al^{3+} (mg/L)
0	0
60	3.5
120	6.9
180	10.2
240	14.7
300	18.1
360	20.6
420	23.7
480	28.4
540	32.2
600	35.8

De la tabla anterior obtenemos la masa producida de Aluminio experimental tomando en cuenta una disminución de volumen, ya que por cada lectura realizada se tomó una alícuota de 10 mL para el análisis:

$$m_{2 \text{ Al exp}} = (C_2 \text{ Al}^{3+} * (V_1 - 0.01 \text{ L})) + (C_1 \text{ Al}^{3+} * 0.01 \text{ L}) \quad (37)$$
$$m_{\text{Al exp}} = (6.9 \text{ mg/L} * (1.0 \text{ L} - 0.01 \text{ L})) + (3.5 \text{ mg/L} * 0.01 \text{ L}) = 6.9 \text{ mg}$$

Para obtener la masa de Aluminio teórica tomamos en cuenta que la única variable que está cambiando es el tiempo:

$$m_{\text{Al teo}} = (I * PMAI^{3+} * t * 1000 \text{ mg/g}) / (n * F) \quad (38)$$
$$m_{\text{Al teo}} = (1 \text{ A} * 26.9815 \text{ g/mol} * 120 \text{ s} * 1000 \text{ mg/g}) / (3 * 96487 \text{ A*s} / \text{mol})$$
$$m_{\text{Al teo}} = 11.19 \text{ mg}$$

Una vez que contamos con $m_{\text{Al exp}}$ y $m_{\text{Al teo}}$ podemos calcular el Rendimiento Faradaico (R_F) de la reacción:

$$R_F = \text{masa de Al experimental} / \text{masa de Al teórica} \quad (39)$$
$$R_F = 6.9 \text{ mg} / 11.19 \text{ mg} = 0.614$$

Los cálculos anteriores aplicados a cada una de las concentraciones, nos arroja los resultados que podemos observar en la tabla 6:

Tabla 6. Masa de Al^{3+} producida experimental y teóricamente, así como el Rendimiento faradaico de la reacción suministrando 1 A

Tiempo	Al^{3+}	$m_{\text{Al}^{3+}}^{\text{exp}}$	$m_{\text{Al}^{3+}}^{\text{teo}}$	R_F
(s)	(mg / L)	(mg)	(mg)	
0	0	0	0	
60	3.5	3.5	5.59	0.626
120	6.9	6.9	11.19	0.614
180	10.2	10.1	16.78	0.602
240	14.7	14.5	22.37	0.647
300	18.1	17.,7	27.96	0.634
360	20.6	20.1	33.56	0.599
420	23.7	23.0	39.15	0.588
480	28.4	27.4	44.74	0.612
540	32.2	30.9	50.33	0.614
600	35.8	34.2	55.93	0.611

También de la tabla 6 podemos calcular el promedio del rendimiento faradaico de la reacción el cual nos da como resultado $R_F=0.615$.

Procedemos de la misma forma para las experiencias realizadas con 2 A y 3 A de intensidad de corriente suministrada. Los resultados de las tablas 7 y 9 nos muestran el rendimiento faradaico para una corriente suministrada de 2 A y 3 A respectivamente.

Tabla 7. Masa de Al^{3+} producida experimental y teóricamente, así como el Rendimiento faradaico de la reacción suministrando 2 A

Tiempo (s)	Al^{3+} (mg / L)	$m_{\text{Al}^{3+}}^{\text{exp}}$ (mg)	$m_{\text{Al}^{3+}}^{\text{teo}}$ (mg)	R_F
0	0	0	0	-
60	6.3	6.3	10.63	0.593
120	12.1	12.0	21.25	0.567
180	25.4	25.1	31.88	0.787
240	33.3	32.7	42.51	0.770
300	44.1	43.1	53.13	0.811
360	50.4	49.1	63.76	0.770
420	53.0	51.5	74.38	0.693
480	61.3	59.3	85.01	0.697
540	63.2	61.0	95.64	0.638
600	85.1	80.9	106.26	0.762

De la tabla 7 podemos el rendimiento faradaico promedio de la reacción es de $R_F=0.709$.

Tabla 8. Masa de Al^{3+} producida experimental y teóricamente, así como el Rendimiento faradaico de la reacción suministrando 3 A

Tiempo (s)	Al^{3+} (mg / L)	$m_{\text{Al}^{3+}}^{\text{exp}}$ (mg)	$m_{\text{Al}^{3+}}^{\text{teo}}$ (mg)	R_F
0	0	0	0	
60	9.1	9.1	16.78	0.542
120	17.9	17.8	33.56	0.531
180	27.1	26.8	50.33	0.533
240	35.4	34.9	67.11	0.520
300	43.7	42.8	83.89	0.511
360	54.5	53.1	100.67	0.528
420	62.9	61.0	117.45	0.519
480	73.3	70.7	134.23	0.527
540	84.5	81.0	151.00	0.536
600	96.7	92.1	167.78	0.549

De la misma forma que con los resultados obtenidos para 1 A y 2 A calculamos el rendimiento faradaico promedio de la reacción el cual es de $R_F=0.530$.

Una vez obtenidos los rendimientos faradaicos para cada intensidad de corriente distinta, elegimos aquella en la cual el R_F de la reacción sea más cercano a 1. En este caso ésta condición se cumple cuando se suministra una intensidad de corriente de 2 A cuyos resultados se encuentran en la tabla 7.

En la figura 22, la gráfica pretende plasmar los datos contenidos en la tabla 7, en ésta gráfica se muestra el comportamiento de la producción de masa de Al experimental y la de Al teórica en función del tiempo, la masa de Al producida experimentalmente responde a una ecuación de tipo lineal que es $y = 0.1264x + 0.3455$, con un índice de correlación de $R^2 = 0.9778$.

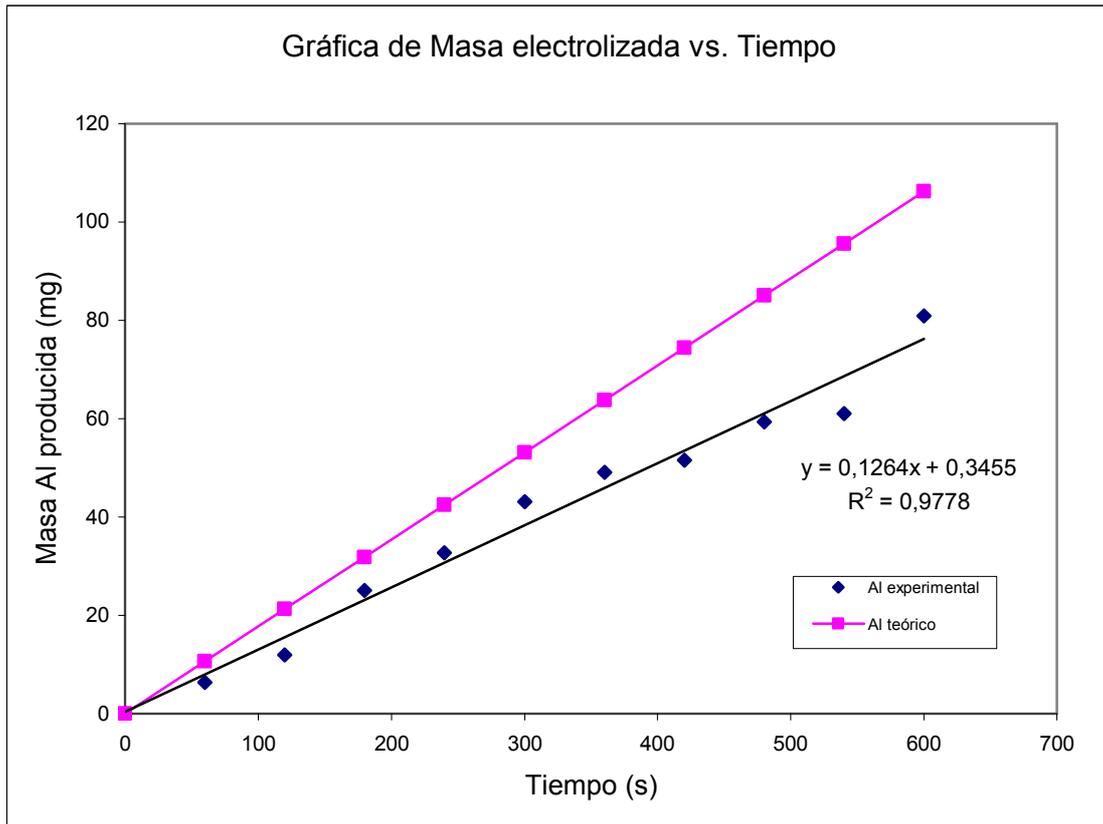


Figura 22. Gráfica de la masa producida de Al experimental contra la de Al teórica

Se observa claramente y como era de esperarse, que la producción de Al experimental posee una tendencia similar a la producción de Al teórica, dando como entendido en este punto y para esta experiencia, que no hay forma de que la producción de Al de forma experimental se dispare a un rango mucho mayor que aquel que nos proporciona el dato teórico.

4.3.2 Cálculo de la velocidad del fluido

Ya que contamos con el valor de Q_V el cual es $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, la velocidad del fluido v que pasa a través de la celda de ECF se calcula por medio de:

$$\begin{aligned}v &= Q_V / (s_p * N_{ca} * b) & (40) \\v &= (1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}) / (0.005 \text{ m} * 9 * 0.065 \text{ m}) \\v &= 3.42 \times 10^{-4} \text{ m/s}\end{aligned}$$

4.3.3 Cálculo de la producción experimental de Al

El cálculo de la producción de aluminio está dada por la ecuación (41). Ésta es de gran importancia ya que en base a la cantidad de aluminio será posible determinar la vida media de los electrodos.

$$m_{Al \text{ exp}} = (R_F * I * P_{Al^{+3}} * t_R) / (n * F) \quad (41)$$

Sustituyendo los valores tenemos que:

$$m_{Al \text{ exp}} = (0.709 * 2 \text{ A} * 26.9815 \text{ g/mol} * 600 \text{ s}) / (3 * 96487 \text{ A s/mol})$$

$$m_{Al \text{ exp}} = 0.08 \text{ g} = 80 \text{ mg}$$

Éste último valor de 80 mg es idéntico al resultado que se publicó en la tabla 6, en la cual la masa de aluminio experimental fue de 80.9 mg tras un tiempo de 600 s de operación.

4.4 Resultados experimentales obtenidos

4.4.1 Reactor en operación batch

Se observó que el valor de pH se encuentra entre 7.5 y 9.1, la conductividad prácticamente permanece constante en un intervalo entre los 1100 y 1350 μS , lo cual nos dice que se tiene una baja conductividad. Según se observó, la agitación disminuyó el tiempo de formación de los coágulos de SiO_3^{2-} , pero no

modificó el tiempo necesario para la formación de los iones Al^{3+} en el ánodo, ni la concentración de silicatos en función del tiempo, esto al parecer, debido a la agitación generada por la formación de gas hidrógeno en el cátodo. Así, se alcanzan los 0 mg/L para el caso de los SiO_3^{2-} .

Para la primera parte de esta experiencia se ha determinado hacer una serie de pruebas con diferentes intensidades de corriente suministradas, las cuales van de 1 A hasta los 3 A.

4.4.1.1 Suministrando una intensidad de 1 A

En la tabla 7 se representa los resultados experimentales del proceso de ECF suministrando una intensidad de 1 A, de forma análoga se han tomado las mediciones tanto del pH como de la conductividad de la solución (κ). Podemos observar que la concentración de SiO_3^{2-} se ha reducido de 103.5 mg/L que tenía en un principio a 0 mg/L en un tiempo aproximado de 16 minutos.

Por medio de la segunda ley de Faraday podemos calcular la concentración de Al^{3+} incluyendo el rendimiento faradaico de la reacción:

$$C_{\text{Al}^{3+}} = (I * R_F * P_{\text{MAl}^{3+}} * t) / (n * F) \quad (42)$$

Para el tiempo igual a 1 minuto tenemos que por cada litro la concentración de Al^{3+} es:

$$C_{\text{Al}^{3+}} = (1 \text{ A} * 0.709 * 26.9815 \text{ g/mol} * 60 \text{ s}) / (3 * 96487 \text{ A s/mol})$$
$$C_{\text{Al}^{3+}} = 0.0040 \text{ g / L}$$

De la misma forma se realizan los cálculos para determinar la concentración de Al^{3+} hasta los 16 minutos que transcurrieron, los resultados pueden observarse en la tabla 9.

Tabla 9. Concentraciones obtenidas de SiO_3^{2-} y Al^{3+} con una corriente de 1 A suministrado

t (min)	pH	κ (μS)	SiO ₃ ²⁻ (mg/L)	SiO ₃ ²⁻ (g/L)	Al ³⁺ (g/L)
0	8.72	1272	103.5	0.1035	0
1	8.34	1305	99	0.099	0.0040
2	8.36	1330	99	0.099	0.0079
3	8.11	1320	81	0.081	0.0119
4	8.15	1313	76.5	0.0765	0.0159
5	8.3	1305	72	0.072	0.0198
6	8.34	1202	67.5	0.0675	0.0238
7	8.45	1284	54	0.054	0.0278
8	8.3	1279	49.5	0.0495	0.0317
9	8.31	1274	45	0.045	0.0357
10	8.23	1189	45	0.045	0.0397
11	8.36	1252	40.5	0.0405	0.0436
12	8.54	1166	36	0.036	0.0476
13	8.41	1242	27	0.027	0.0515
14	8.65	1275	9	0.009	0.0555
15	8.6	1270	4.5	0.0045	0.0595
16	8.62	1140	0	0	0.0634

De la tabla 9 es posible obtener la relación existente entre el SiO₃²⁻ y el Al³⁺:

$$\text{Relación SiO}_3^{2-} / \text{Al}^{3+} = (a - b) / c \quad (43)$$

Donde:

a es la concentración de SiO₃²⁻ al tiempo 0, sus unidades están dadas en g/L

b es la concentración de SiO₃²⁻ al tiempo 15, la cual es la última lectura antes de llegar a las cero ppm de SiO₃²⁻ o bien los cero mg/L de SiO₃²⁻, sus unidades están dadas en g/L

c es la concentración de Al³⁺ tomada en el mismo tiempo que b, sus unidades son g/L

Sustituyendo tenemos:

$$\text{Relación SiO}_3^{2-} / \text{Al}^{3+} = (0.1035 - 0.0045) / 0.0595$$

$$\text{Relación } \text{SiO}_3^{2-} / \text{Al}^{3+} = 1.6644$$

Para determinar la relación de $\text{Al}^{3+} / \text{SiO}_3^{2-}$ únicamente obtenemos el inverso de la relación $\text{SiO}_3^{2-} / \text{Al}^{3+}$:

$$\text{Relación } \text{Al}^{3+} / \text{SiO}_3^{2-} = 1 / \text{Relación } \text{SiO}_3^{2-} / \text{Al}^{3+}$$

Entonces tenemos que:

$$\text{Relación } \text{Al}^{3+} / \text{SiO}_3^{2-} = 1 / 1.6644$$

$$\text{Relación } \text{Al}^{3+} / \text{SiO}_3^{2-} = 0.6008$$

Cálculo de la intensidad de corriente requerida teórica

Para obtener el valor de la intensidad de corriente requerida teórica empleamos la ecuación (44):

$$I = (R_{\text{Al}^{3+}/\text{SiO}_3^{2-}} * n * F * C_{\text{SiO}_3^{2-}} * Q_V) / (R_F * P_{\text{Al}^{3+}}) \quad (44)$$

En donde:

$R_{\text{Al}^{3+}/\text{SiO}_3^{2-}}$ es la relación entre el Al^{3+} y el $\text{SiO}_3^{2-} = 0.6008$

n es el número de cargas intercambiadas y en este caso es igual a 3

F es el número de Faraday = 96487 A s / mol

$C_{\text{SiO}_3^{2-}}$ es la concentración inicial de SiO_3^{2-} en $\text{g/m}^3 = 200\text{g/m}^3$

Q_V es el caudal volumétrico = $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

R_F es el Rendimiento Faradaico = 0.709

$P_{\text{Al}^{3+}}$ es el peso molecular del aluminio = 26.9815g/mol

Sustituyendo los valores en la ecuación tenemos que:

$$I = (0.60 * 3 * 96487 \text{ A s/mol} * 200 \text{ g/m}^3 * 0.000001 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.709 * 26.9815 \text{ g/mol})$$

$$I = 1.98 \text{ A} \approx 2 \text{ A}$$

Este último valor obtenido nos muestra con una mayor precisión la intensidad de corriente que se requiere en base a datos experimentales.

La figura 23 nos muestra por medio de una gráfica el comportamiento de la concentración de los SiO_3^{2-} a lo largo de los 16 minutos transcurridos suministrando una intensidad de corriente de 1 A.

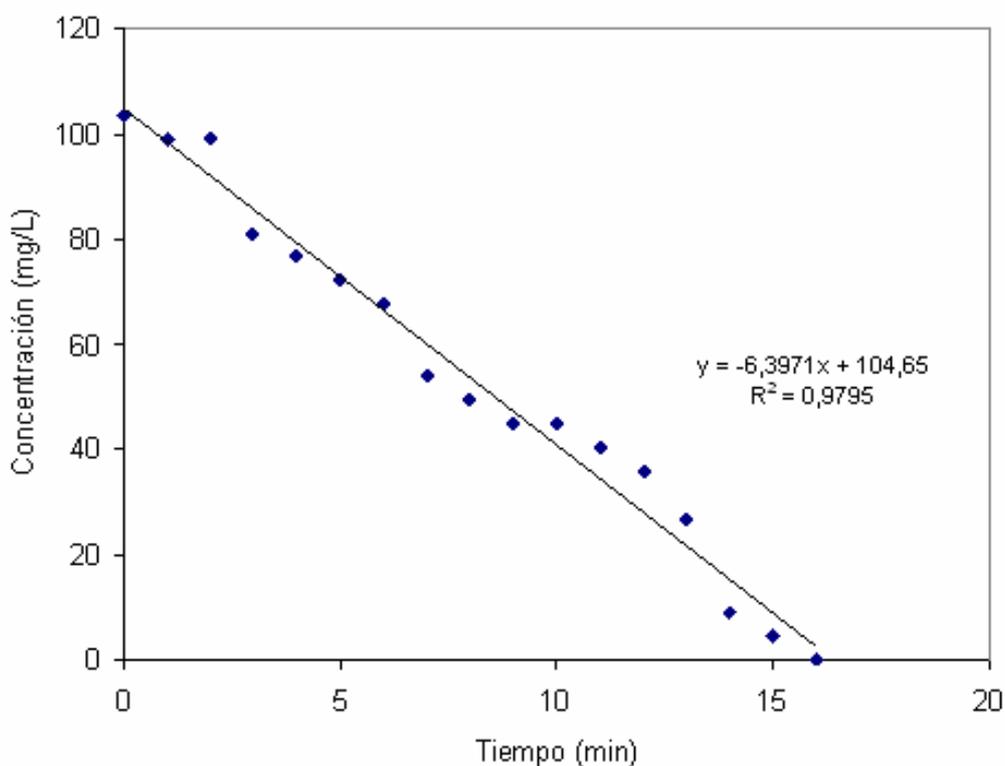


Figura 23. Gráfica de la concentración de SiO_3^{2-} en función del tiempo suministrando 1 A

En la gráfica mostrada en la figura 23, podemos notar que la tendencia de la curva es prácticamente lineal durante los 16 minutos, la ecuación que representa esta curva es $y = - 6.3971x + 104.65$, y su índice de correlación es $R^2 = 0.9795$.

La conductividad de la solución es posible determinarla calculando un promedio de κ de todas las muestras, en donde κ promedio de la solución es igual a 1260 $\mu\text{S/cm}$ ó 1.260 mS/cm.

4.4.1.2 Suministrando una intensidad de 2 A

En la tabla 10 se muestran los resultados experimentales del proceso de ECF suministrando una intensidad de 2 A. En esta experiencia podemos observar que la concentración de SiO_3^{2-} se ha reducido de 90 mg/L que tenía en un principio a 0 mg/L en un tiempo aproximado de 6 minutos.

Tabla 10. Concentraciones obtenidas de SiO_3^{2-} y Al^{3+} con una corriente de 2 A suministrado

t (min)	pH	κ (μS)	SiO_3^{2-} (mg/L)	SiO_3^{2-} (g/L)	Al^{3+} (g/L)
0	8.14	1178	90	0.09	0
1	7.47	1261	67.5	0.0675	0.0079
2	7.47	1225	22.5	0.0225	0.0159
3	7.52	1244	18	0.018	0.0238
4	7.8	1210	4.5	0.0045	0.0317
5	7.58	1131	4.5	0.0045	0.0397
6	8.11	1105	0	0	0.0476

De la misma forma que para la experiencia anterior se calcula tanto la concentración de Al^{3+} como las relaciones entre SiO_3^{2-} y Al^{3+} :

$$\text{Relación } \text{SiO}_3^{2-} / \text{Al}^{3+} = (0.09 - 0.0045) / 0.0397 = 2.1562$$

$$\text{Relación } \text{Al}^{3+} / \text{SiO}_3^{2-} = 1 / 2.1562 = 0.4638$$

Tomando como base los datos de concentración y de tiempo de la tabla 10 es posible realizar la gráfica en la que se muestra la concentración de SiO_3^{2-} en función del tiempo suministrando una intensidad de corriente de 2 A (figura 24). Calculando la conductividad promedio de la solución tenemos que $\kappa = 1193.43 \mu\text{S} = 1.193 \text{ mS}$.

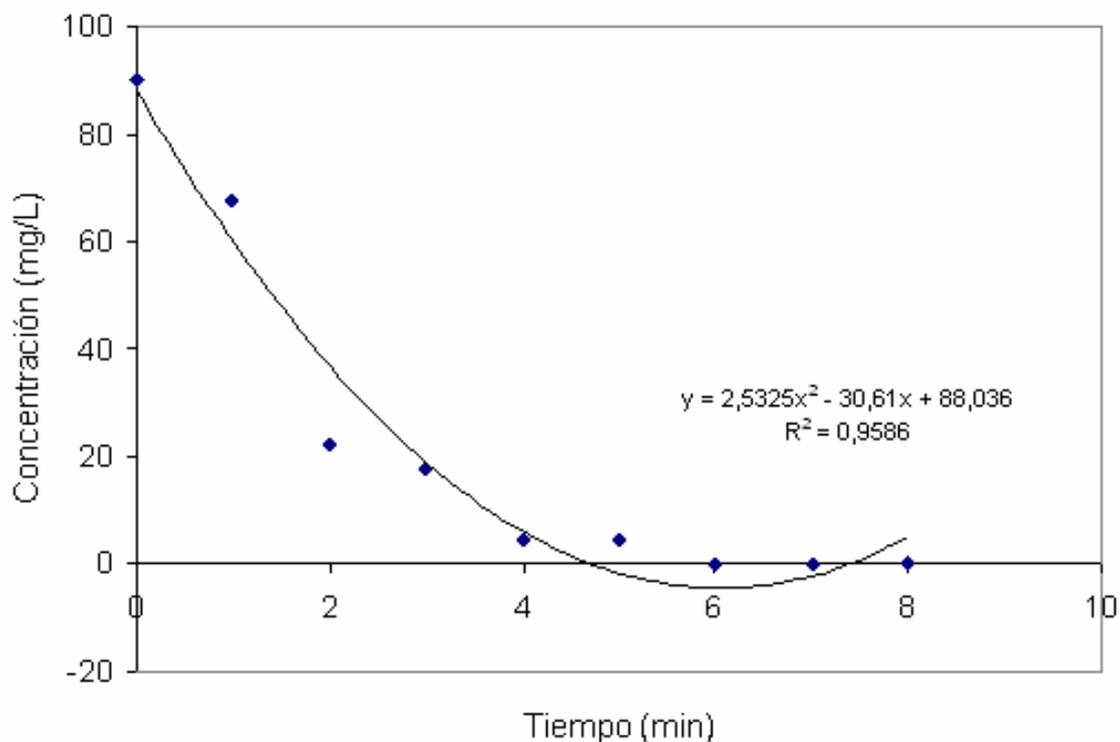


Figura 24. Gráfica de la concentración de SiO_3^{2-} en función del tiempo suministrando 2 A

La ecuación a la que mejor se ajusta esta curva es de tipo polinomial $y = 2.5325x^2 - 30.61x + 88.036$ y su índice de correlación es $R^2 = 0.9586$.

Podemos notar que la disminución más significativa de SiO_3^{2-} se da entre cero y dos minutos, ya que estos son los primeros instantes en que se da la reacción, la concentración baja de 90 a 22.5 mg/L de SiO_3^{2-} , lo cual nos dice que en un tiempo de operación aproximado a los dos minutos estamos reduciendo en un 75 % la cantidad de SiO_3^{2-} encontrados en el agua y que el 25 % restante se logra eliminar entre los 2 y los 7 minutos posteriores.

4.4.1.3 Suministrando una intensidad de 3 A

En la tabla 11 se incorporan los resultados experimentales obtenidos del proceso de ECF suministrando una intensidad de 3 A. Es posible observar que la concentración de SiO_3^{2-} se ha reducido de 103.5 mg/L que tenía en un principio a 0 mg/L en un tiempo aproximado de 5 minutos, es posible observar

en la figura 27 que la concentración de SiO_3^{2-} disminuye de forma prácticamente proporcional al tiempo y no da saltos repentinos.

Tabla 11. Concentraciones obtenidas de SiO_3^{2-} y Al^{3+} con una corriente de 3 A

t (min)	pH	κ (μS)	SiO_3^{2-} (mg/L)	SiO_3^{2-} (g/L)	Al^{3+} (g/L)
0	8.32	1256	103.5	0.1035	0
1	8.1	1277	103.5	0.1035	0.0119
2	7.8	1253	90	0.09	0.0238
3	7.81	1238	67.5	0.0675	0.0357
4	7.91	1210	22.5	0.0225	0.0476
5	8.23	1183	0	0	0.0595

Calculamos las relaciones entre SiO_3^{2-} y Al^{3+} :

$$\text{Relación } \text{SiO}_3^{2-} / \text{Al}^{3+} = (0.1035 - 0.0225) / 0.0476 = 1.7023$$

$$\text{Relación } \text{Al}^{3+} / \text{SiO}_3^{2-} = 1 / 1.7023 = 0.5874$$

La concentración de SiO_3^{2-} a lo largo de los cinco minutos suministrando una intensidad de corriente de 3 A se muestra en la gráfica de la figura 25, la ecuación a la que responde es de tipo polinomial $y = -4.2589x^2 - 1.0768x + 106.23$ y su índice de correlación es $R^2 = 0.9803$.

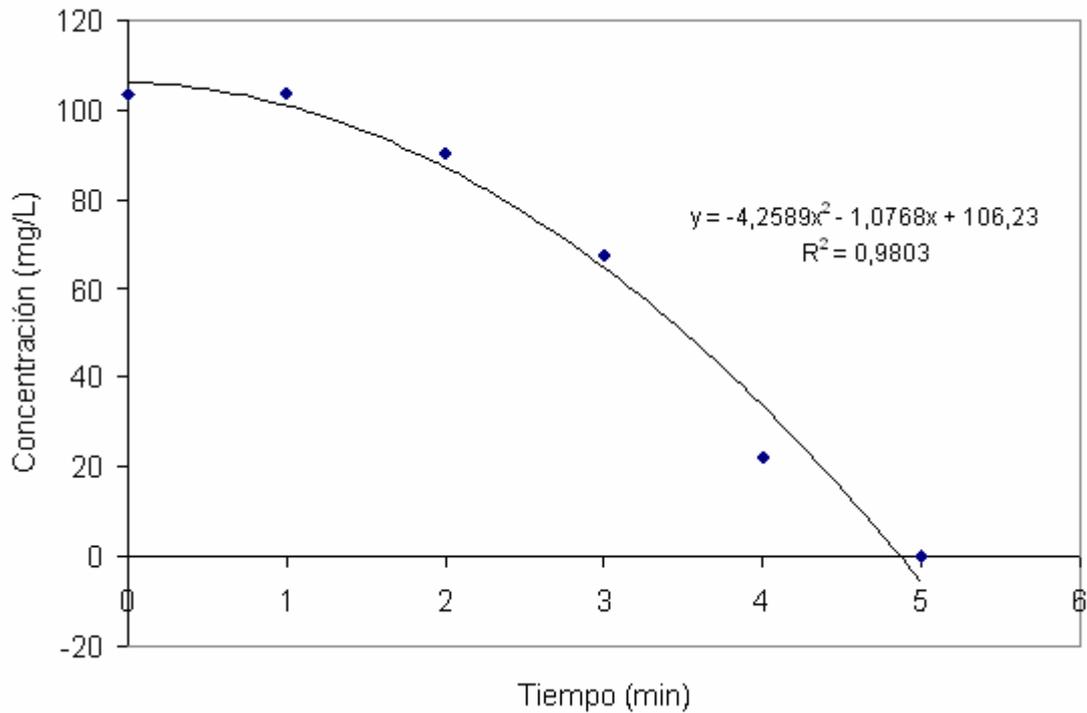


Figura 25. Gráfica de la concentración de SiO_3^{2-} en función del tiempo suministrando 3 A

De la tabla 9 podemos calcular también la conductividad promedio de la solución que tenemos y esta es $\kappa = 1236.17 \mu\text{S/cm}$ o bien 1.236 mS/cm . De los resultados mostrados variando el suministro de la intensidad de corriente, es posible concluir que:

Nuestro valor de conductividad promedio κ es de $1229.83 \mu\text{S/cm}$ ó 1.229 mS/cm , al suministrar una mayor intensidad de corriente logramos que el tiempo necesario para la eliminación de SiO_3^{2-} sea menor, es necesario conocer los usos que se pretenda dar al agua tratada por este proceso ya que la concentración final de SiO_3^{2-} deberá definirse dependiendo de esos usos, de la misma forma en que deberá definirse con que concentración de SiO_3^{2-} es posible reutilizar el agua tratada y basándonos en esto tener un equilibrio entre el tiempo aproximado de operación del equipo y la intensidad de corriente suministrada, en nuestro proceso se puede concluir que la intensidad de corriente que nos conviene utilizar es de 2 A debido a que éste es el que muestra una mejor relación entre el tiempo de operación del equipo y la máxima eliminación de SiO_3^{2-} . Para 1 A el tiempo que demanda para la

eliminación de SiO_3^{2-} es aproximadamente 16 minutos, lo cual a comparación de utilizar 2 A mismos que requieren tan solo de 6 minutos para lograr esto, nos habla de que es posible reducir en un 63% el tiempo de operación del equipo. Ahora bien, si comparamos estos mismos 2 A con las experiencias realizadas con 3 A se puede observar que el tiempo de eliminación de SiO_3^{2-} es prácticamente el mismo.

4.4.1.4 Medida de la conductividad y el análisis de comportamiento del SiO_3^{2-} agregando NaCl

Es conocido que las sales sirven para aumentar la conductividad de las soluciones, éste mismo hecho consigue que la caída de potencial disminuya. De forma sencilla esto puede explicarse por medio de la ley de Ohm recurriendo a la ecuación (10) señalada en el capítulo II, en donde al aumentar la concentración de NaCl disminuye el voltaje. En la figura 26 podemos observar el comportamiento de la caída de potencial con respecto al tiempo agregando distintas cantidades de NaCl, lo primero que se observa es que sin agregar NaCl el voltaje se encuentra entre 3 y 4 V. Es notable que para 0.5 g de NaCl la disminución del voltaje va de 1.5 a 0.6 V. Con 0.75 g de NaCl la caída de voltaje va de 1.06 a 0.55 V, y para 1 g de NaCl el voltaje va de 0.34 a 0.02 V.

De lo anterior es posible darse cuenta que con 0.5 g de NaCl se reduce 0.9 V la caída de potencial, a diferencia de agregar 1 g de NaCl con lo cual se reduce tan solo 0.32 V.

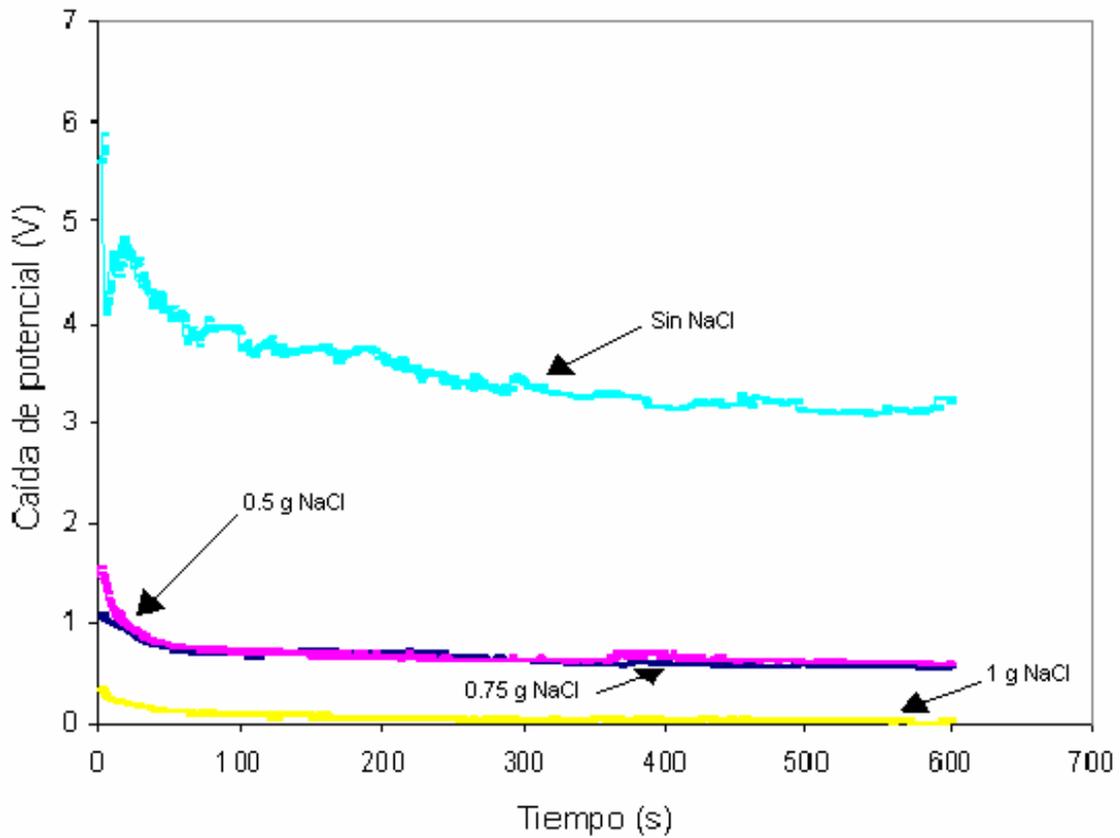


Figura 26. Gráfica de la caída de potencial en función del tiempo agregando 0.5, 0.75 y 1 g de NaCl

Con el fin de medir la conductividad de la solución, en esta experiencia se fueron agregando diferentes cantidades de NaCl teniendo como variable fija el suministro de 2 A de intensidad de corriente.

A continuación se muestran en las tablas 10, 11 y 12 los resultados obtenidos experimentalmente variando las cantidades de NaCl que se agregaron en el agua contaminada antes de pasar por la celda de ECF.

Tabla 12. Conductividad
con 0.5 g de NaCl

I=2A con 0.5 g de NaCl		
t	k	SiO ₃ ²⁻
(min)	(mS/cm)	(mg/L)
0	2540	200
1	1760	
2	1690	
3	1630	
4	1590	
5	1490	
6	1340	50
7	1230	
8	1030	
9	990	
10	920	20

Tabla 13. Conductividad
con 0.75 g de NaCl

I=2A con 0.75 g de NaCl		
t	k	SiO ₃ ²⁻
(min)	(mS/cm)	(mg/L)
0	2540	200
1	2050	
2	2010	
3	1950	
4	1870	
5	1700	
6	1500	60
7	1320	
8	1090	
9	1070	
10	900	20

Tabla 14. Conductividad
con 1.0 g de NaCl

I = 2 A con 1 g de NaCl		
T	k	SiO ₃ ²⁻
(min)	(mS/cm)	(mg/L)
0	2540	200
1	2420	
2	2400	
3	2320	
4	2260	
5	2200	
6	2020	50
7	1780	
8	1650	
9	1500	
10	1210	20

Lo primero que logramos apreciar de los resultados informados en las tablas 12, 13 y 14 es que las conductividades en el tiempo cero se encuentran en 2540 mS/cm y al paso de 10 minutos alrededor de 1000 mS/cm, ésta disminución de la conductividad es provocada por la disminución de iones encontrados en el agua de la celda de ECF. De la misma forma que para los tres casos, podemos observar que se inicia con una concentración de 200 mg/L de SiO₃²⁻ y al paso de 10 minutos se ha logrado reducir a 20 mg/L.

Basándonos en los resultados expuestos a lo largo de las experiencias realizadas con el reactor batch, podemos concluir que:

El agregar NaCl a la solución de agua contaminada promueve una disminución importante en la caída de voltaje lo cual se refleja en costos, en este caso al no agregar NaCl tenemos un voltaje de 3.5 V y agregando entre 0.5 g y 1 g de NaCl tenemos una caída de voltaje alrededor de 0.5 V. Sin embargo como se pudo comprobar en las experiencias, se cuenta con un límite dentro del cual hacer esto es efectivo para el proceso, éste límite es posible obtenerlo mediante estudios para cada tipo de agua diferente.

El NaCl es bien conocido como un electrólito fuerte, es decir que se ioniza totalmente en solución acuosa, en base a esto podemos explicar el aumento substancial de la conductividad en comparación con las lecturas obtenidas en las experiencias en las que no se agregó NaCl, recordando que para dichas experiencias la conductividad promedio fue de 1.229 mS/cm. En esta serie de experiencias realizadas con NaCl nuestras lecturas no fueron menores de 900 mS/cm. Así mismo se logró la reducción de la concentración final de SiO_3^{2-} hasta en un 90% en el mismo lapso de tiempo agregando distintas cantidades de NaCl, por lo cual la mejor opción al agregar NaCl desde luego será la menor y ésta es la de 0.5 g por cada litro de agua a tratar.

4.4.2 Reactor en operación continua

En las experiencias realizadas con este tipo de reactor se destaca como gran diferencia con el reactor en operación batch el manejo de un caudal volumétrico lo cual implica una entrada y una salida a la celda de ECF. Un parámetro que se ha fijado en base a los resultados obtenidos del reactor batch es el suministro de la intensidad de corriente, el cual se ha determinado que sea de 2 A para todas las experiencias con reactor en operación continua. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada experiencia que se realizó.

4.4.2.1 Medida del tiempo de residencia de la celda de ECF

En ésta parte de la experiencia se operó la celda de ECF con diversos caudales volumétricos desde los 40 mL/min hasta los 150 mL/min de agua contaminada y se midió el tiempo transcurrido para el llenado de la celda de ECF, a lo cual le llamamos el tiempo de residencia de la celda t_r , con este último y el caudal volumétrico es posible obtener el volumen del reactor de forma inmediata.

Como es de esperarse el t_r disminuye al aumentar Q_v .

En la tabla 15 tenemos el caudal volumétrico y el tiempo de residencia, los volúmenes se determinan multiplicando Q_v por t_r . El volumen de la celda fue de 812 mL, el voltaje se mantuvo prácticamente constante a 2.93 V.

Tabla 15. Resultados obtenidos del tiempo de residencia dependiendo del caudal volumétrico

Caudal volumétrico (ml/min)	Intensidad de corriente (A)	pH	Caída de potencial (V)	t_r (min)
150	2	8	2.92	5.8
140	2	8	2.91	5.9
130	2	8	2.98	6.0
120	2	9	2.83	6.6
110	2	9	2.89	6.8
100	2	9	2.95	8.2
90	2	8	2.88	9.0
80	2	8	2.84	10.4
70	2	9	3.02	12.5
60	2	9	2.99	13.2
50	2	8	2.90	16.5
40	2	9	3.03	19.2

4.4.2.2 Análisis del caudal volumétrico con respecto a la concentración de SiO_3^{2-}

Sabemos que el caudal volumétrico es una variable de gran importancia a manejar, por este motivo se ha realizado una experiencia en la cual se le relaciona con la minimización de la concentración de SiO_3^{2-} . Se operaron los flujos desde 150 mL/min hasta 40 mL/min durante un tiempo de una hora cada uno para después de transcurrido este tiempo fuera posible analizar la concentración de SiO_3^{2-} a la salida del sedimentador. La concentración de SiO_3^{2-} en el agua de entrada fue de 140 mg/L. La intensidad de corriente suministrada fue de 2 A.

Los resultados experimentales mostrados en la tabla 16 son los obtenidos de la concentración de SiO_3^{2-} en función del flujo una vez que se ha realizado el proceso de ECF al agua contaminada.

Tabla 16. Análisis del caudal volumétrico con respecto a la concentración final de SiO_3^{2-}

Caudal volumétrico (ml/min)	Intensidad de corriente (A)	pH	Caída de potencial (V)	$\text{C}_{\text{SiO}_3^{2-}}$ (mg/L)
150	2	8	3.04	64
140	2	8	2.99	64
130	2	9	2.97	56
120	2	8	2.87	52
110	2	9	2.93	44
100	2	9	3.05	40
90	2	9	2.99	32
80	2	9	3.13	32
70	2	9	3.01	28
60	2	8	2.98	28
50	2	8	2.90	28
40	2	8	2.93	28

Como primer punto que podemos destacar es el hecho de que no se logra llegar a los cero mg/L con ninguno de los caudales operando durante una hora, sin embargo empleando de 40 a 70 mL/min se logra una reducción de las 140 ppm o mg/L que había inicialmente hasta los 28 mg/L que finalmente se obtuvieron, los cuales son aceptables. El voltaje promedio obtenido es de 2.98 V.

La figura 27 muestra el comportamiento gráfico de la concentración de SiO_3^{2-} en función del caudal volumétrico.

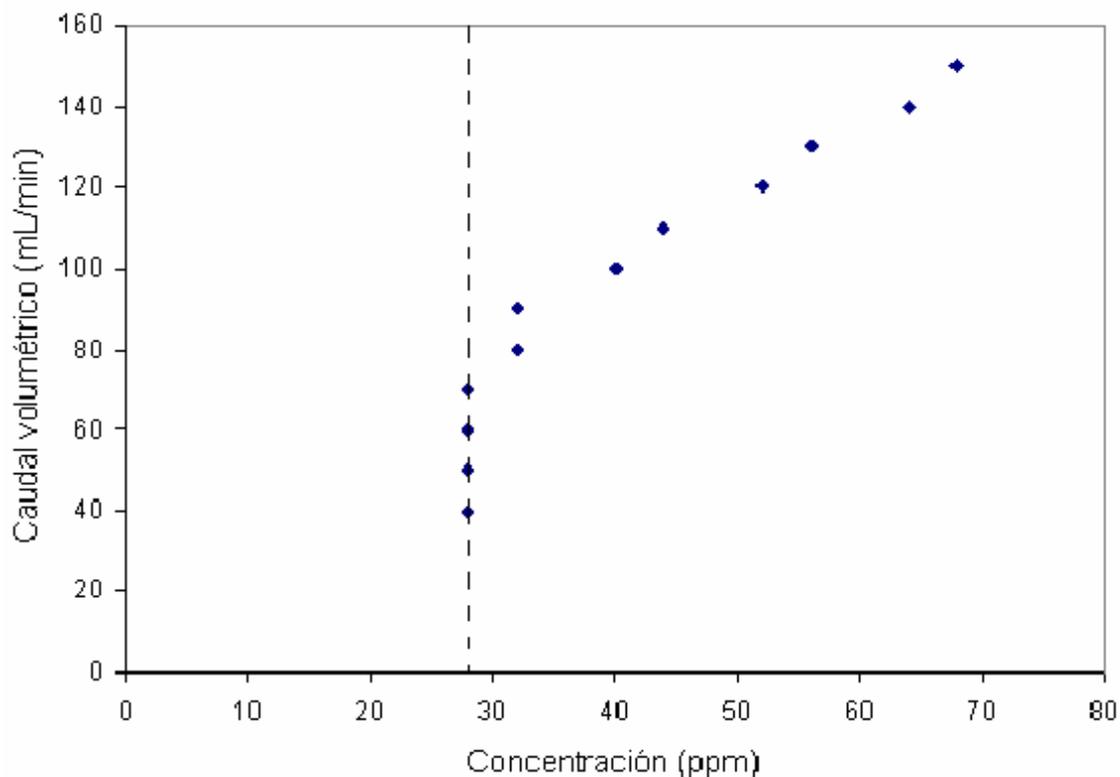


Figura 27. Gráfica del comportamiento entre el caudal volumétrico y la concentración final de SiO_3^{2-}

En la figura anterior, podemos enfatizar que el caudal de alimentación influye de manera significativa en el proceso de la ECF. Es posible concluir que el caudal óptimo de operación debe ser alrededor de los 50 mL/min.

4.4.2.3 Análisis del caudal volumétrico con respecto a la concentración de SiO_3^{2-} agregando al agua de entrada NaCl

Tomando como referencia los resultados obtenidos en las experiencias realizadas para el reactor batch (4.3.1.4), en esta experiencia se agregó 0.5 g de NaCl por cada litro de agua a la muestra de agua contaminada para aumentar la conductividad de la misma. Nuevamente se manejaron los caudales de 40 a 150 mL/min durante una hora para cada caudal y se observó el comportamiento de la concentración de SiO_3^{2-} a la salida del sedimentador. La concentración del agua contaminada a la entrada del reactor fue de 140 mg/L.

En la tabla 17 podemos observar los resultados experimentales obtenidos de la concentración de SiO_3^{2-} en función del caudal.

Tabla 17. Análisis del caudal volumétrico con respecto a la concentración de SiO_3^{2-} agregando NaCl al agua de entrada

Q_v (mL/min)	Intensidad de corriente (A)	pH	Caída de potencial (V)	$C_{\text{SiO}_3^{2-}}$ (mg/L)
150	2	8	2.295	64
140	2	8	2.237	64
130	2	8	2.154	40
120	2	8	2.268	28
110	2	9	2.166	20
100	2	9	2.110	16
90	2	8	2.149	12
80	2	9	2.193	12
70	2	9	2.141	0
60	2	8	2.145	0

De lo observado en la tabla 17, el pH se mantiene prácticamente constante e igual a 8, lo cual nos dice que la solución es ligeramente básica. El voltaje tuvo un valor de 2.199 V el cual fue menor que el obtenido en las experiencias anteriores realizadas sin NaCl, esto nos indica que al agregar NaCl a la solución, la caída de voltaje disminuye de la misma forma que ocurrió con las experiencias realizadas para el reactor batch. De estos mismos resultados se puede observar que con un flujo de 60 y de 70 mL/min se obtiene los 0 mg/L de SiO_3^{2-} .

De los resultados mostrados en las tablas 16 y 17 se puede hacer una comparación en la cual es posible destacar que agregando NaCl se alcanza los 28 mg/L de SiO_3^{2-} con un Q_v de 120 mL/min, a diferencia de no agregar NaCl con lo cual se requiere un Q_v de 70 mL/min. Esto último nos quiere decir que al agregar NaCl se logró aumentar la velocidad de coagulación consiguiendo eliminar 80% de SiO_3^{2-} con un mayor Q_v y un menor consumo de energía.

4.4.3 Reactor en operación continua con recirculación

En esta parte de la experiencia se operó el reactor de forma cerrada, es decir recirculando el agua limpia sin coágulos a la salida del sedimentador, sin modificar el proceso de separación de los coágulos en el fondo del sedimentador, ya que la remoción de éstos es parte fundamental para la eliminación del SiO_3^{2-} . Como se esperaba la concentración de SiO_3^{2-} disminuyó con el transcurso del tiempo.

La experiencia se realiza durante un tiempo de siete horas continuas para lograr obtener una cantidad de muestras significativas para el análisis y conseguir de esta forma un mayor conjunto de puntos y observar su tendencia. De la misma forma que en las experiencias anteriores se suministró una intensidad de corriente de 2 A. Se manejó un volumen total de 30 L y se agregó una cantidad de 15 g de NaCl.

En la tabla 18 encontramos los resultados obtenidos de la concentración de SiO_3^{2-} y el tiempo respectivamente.

Tabla 18. Resultados de la concentración de SiO_3^{2-} en función del tiempo para el reactor en operación continua con recirculación

Tiempo (h)	Concentración (ppm)
0	160
1	64
2	52
3	32
4	20
5	16
6	12
7	8

Como condición inicial tenemos un flujo de entrada de agua contaminada de 60 mL/min. En estos resultados es posible destacar que el 60% de SiO_3^{2-} fue eliminado en la primera hora de operación del equipo lo cual nos habla de la gran eficiencia de este proceso. Así mismo en la figura 28 se representan gráficamente los valores publicados en la tabla anterior, en la cual se llega a

una concentración de 8 mg/L de SiO_3^{2-} en un tiempo aproximado de siete horas.

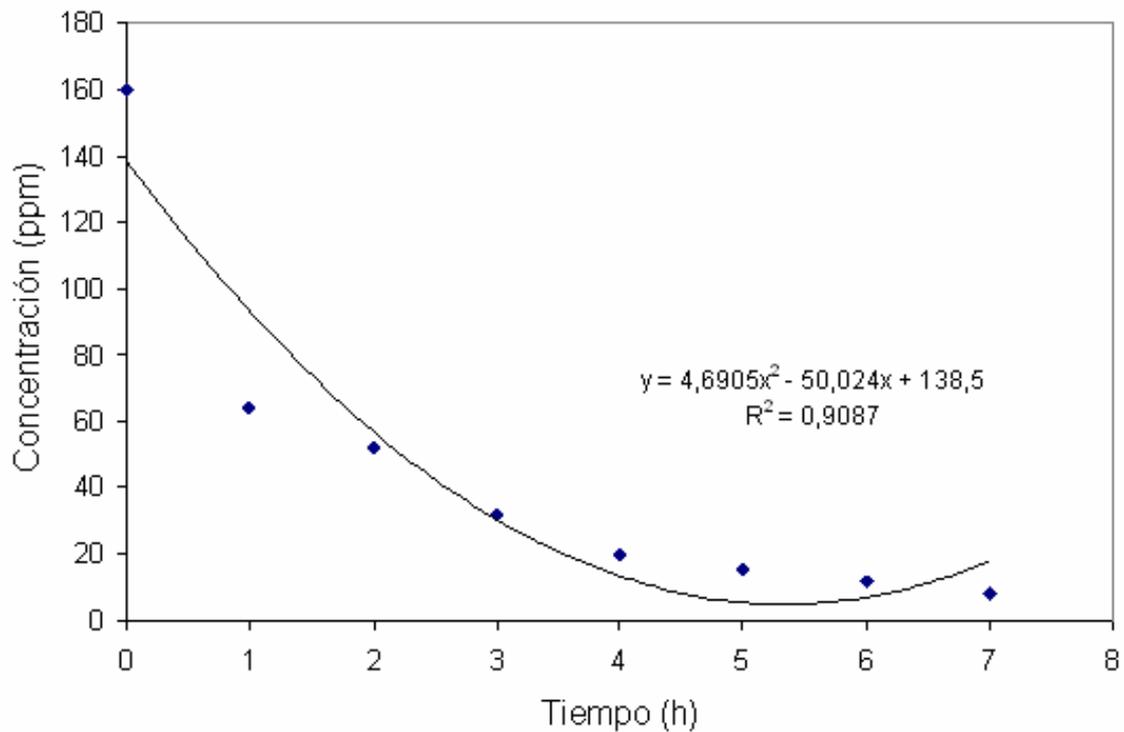


Figura 28. Gráfica de los resultados obtenidos experimentalmente para el reactor continuo con recirculación

Podemos apreciar en la figura 28, que la mayor reducción de SiO_3^{2-} se da en la primera hora de operación del proceso, después de esto la reducción decae de forma lenta y continua hasta llegar a 4 mg/L de SiO_3^{2-} durante cada hora.

Capítulo V

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ECF

5.1 Fundamentos teóricos de la simulación

La simulación de un proceso es un aspecto y una herramienta necesaria para conocer las probabilidades de llevar a cabo un proceso que puede existir en condiciones distintas y para saber cuan rentable es. Un proceso está compuesto de una gran cantidad de variables involucradas para que funcione de la mejor forma posible tanto en la inversión como en la operación y el mantenimiento, sin embargo las necesidades cambian a diario y es entonces en donde la simulación analiza la factibilidad de modificar algunas de éstas variables. Por ésta razón, en este capítulo podremos analizar los costos de operación de nuestra celda de ECF y la simulación de un equipo de mayores dimensiones semejante al utilizado en las experiencias.

5.2 Cálculos para el costo de operación de la celda de ECF experimental

Con el fin de facilitar los cálculos que se muestran a continuación se hará referencia nuevamente de algunos de los resultados obtenidos durante las experiencias, así como de algunos precios de variables importantes del proceso de ECF.

- Valores obtenidos de las experiencias:

Volumen de las placas: $6.143 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

Consumo de potencial: 2.199 V

Intensidad de corriente: 2.0 A

Masa de Al experimental producida: 0.08 g = 80 mg

Densidad del Al (ρ): 2.70 g/mL

Consumo de NaCl = 0.5 kg / m³

- Listado de precios de los componentes del proceso:

*Precio de la electricidad: \$1.35 / kWh

*Precio del aluminio: \$40 / kg

*Precio del NaCl: \$1.20 / kg

*(Los precios de electricidad, aluminio y NaCl fueron los proporcionados por la industria para la cual se desarrolló el proyecto de investigación y que corresponden al mes de abril del 2006)

Una vez que contamos con los valores de los resultados experimentales y de los precios de algunas variables importantes del proceso de ECF, nos es posible calcular los consumos para poder llevar cabo la operación de nuestro equipo experimental. De los consumos más importantes que debemos tomar en cuenta es evidentemente el de la energía ya que ésta es parte fundamental de todo proceso.

Cálculo para el consumo de energía

Consumo de energía = (Consumo de potencial * Intensidad de corriente requerida) / 1000

Consumo de energía = (2.199 V * 2.0 A) / 1000

Consumo de energía = 0.004398 kW

Costo de la electricidad

Costo de la electricidad = (Precio de la electricidad * Consumo de energía)

Costo de la electricidad = (\$1.35 / kWh * 0.004398 kW)

Costo de la electricidad = \$0.0059 / h ≈ \$0.006 / h

Peso del Al consumido

Para calcular el peso de Al consumido las únicas variables que manejamos son las de la producción de Al experimental y el tiempo de operación de la celda.

Peso del aluminio consumido = (Producción de Al exp / t_r) * (3600s / 1h)

Peso del aluminio consumido = (0.08 g / 600 s) * (3600s / 1h)

Peso del aluminio consumido = 0.48 g/h = 0.00048 kg/h

Costo del Al

Costo del Al = (Precio del Al * Peso del Al consumido)

Costo del Al = (\$40 / kg * 0.00048 kg/h)

Costo del Al = \$0.0192 / h

Volumen consumido de Al

Para el cálculo del volumen consumido del Al lo único que requeriremos será de la densidad del Al ya que contamos con el peso o la masa del Al consumido.

Volumen consumido de Al = Peso del Al consumido / 2700

Volumen consumido de Al = (0.00048 kg/h * 1000 g/kg) / (2.70 g/mL * 1000 mL/L * 1000 L/m³)

Volumen consumido de Al = 1.78 x 10⁻⁷ m³/h

Consumo de energía eléctrica por cada kg. de Al

Consumo de energía eléctrica por kg. de Al =

= Consumo de energía / Peso del Al consumido

Consumo de energía eléctrica por kg. de Al = 0.0044 kW / 0.00048 kg/h

Consumo de energía eléctrica por kg. de Al = 9.163 kWh/kg

El tiempo de reemplazo de las placas

Para calcular el tiempo de reemplazo de las placas es necesario recordar que éste va a depender del tiempo de operación de la celda, en este caso es de 600 s, mismo que repercutirá en el volumen consumido de Al.

Tiempo de reemplazo de las placas =

= Volumen de las placas / Volumen consumido de Al

Tiempo de reemplazo de las placas = (6.143 x 10⁻⁴ m³ / 1.78 x 10⁻⁷ m³/h)

Tiempo de reemplazo de las placas = 3451.1 h = 4.8 meses ≈ 5 meses

Costo total por hora (energía + Al)

Costo total por hora = Costo de la electricidad + Costo del Al

Costo total por hora = \$0.0059 / h + \$0.0192 / h

Costo total por hora = \$0.025 / h

Costo de operación por m³

El costo de operación aquí calculado, nos da la relación entre el total de todos y cada uno de los consumos por cada m³ de agua tratada.

Costo de operación por m³ = (Consumo de NaCl * Precio del NaCl) + (Costo total por hora / Flujo volumétrico)

Costo de operación por m³ = (0.5 kg / m³ * \$1.20 / kg) + (\$0.0251 / h / 0.0036 m³/h)

Costo de operación por m³ = \$7.57 / m³ = \$0.0076 / L

5.3 Cálculos para la operación de una celda de ECF de tamaño industrial

5.3.1 Dimensiones de la celda de ECF

En la industria difícilmente se colocaría un equipo de dimensiones como el utilizado en las experiencias indudablemente por los volúmenes y caudales que en un lugar así se manejan. Con el fin de simular una celda de dimensiones mayores a la experimental lo único que haremos será dimensionar la celda de ECF experimental a 10 veces su tamaño original, manejando el mismo número de placas que son 10, con lo cual quedaría como sigue:

Altura de la celda de ECF simulada: 1.35 m

Ancho de la celda de ECF simulada: 0.64 m

Espesor de las placas: 0.07 m

Separación entre las placas: 0.05 m

5.3.2 Variables para el manejo de la celda de ECF

Fijaremos algunas de las variables que no dependen de las dimensiones de la celda de ECF y que de la misma forma nos son útiles para el análisis de eliminación de SiO_3^{2-} en una celda de ECF simulada:

$$Q_V = 0.001 \text{ m}^3/\text{s} = 3.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Concentración de } \text{SiO}_3^{2-} = 200\text{mg/L} = 200 \text{ g/m}^3$$

Tiempo de operación de la celda de ECF: 600 s

$$\text{Rendimiento faradaico} = 0.709$$

Para calcular el volumen de las placas utilizamos la ecuación (34):

$$V_P = 1.35\text{m} * 0.64 \text{ m} * (10 * 0.07 \text{ m})$$

$$V_P = 0.6048 \text{ m}^3$$

Calculamos la intensidad de corriente requerida para las nuevas condiciones mediante la fórmula (44):

$$I = (0.65 * 3 * 96487 \text{ A s/mol} * 200\text{g/m}^3 * 0.001\text{m}^3/\text{s}) / (0.709 * 26.9815\text{g/mol})$$

$$I = 1967 \text{ A}$$

Para la producción experimental de Al recurriremos a la fórmula (41):

$$m_{\text{Al exp}} = (0.709 * 1967 \text{ A} * 26.9815\text{g/mol} * 600\text{s}) / (3 * 96487 \text{ A s/mol})$$

$$m_{\text{Al exp}} = 78 \text{ g}$$

5.3.3 Costos de operación de la celda de ECF

Consumo de energía

$$\text{Consumo de energía} = (2.199 \text{ V} * 1967 \text{ A}) / 1000$$

Consumo de energía = 4.33 kW

Costo de la electricidad

Costo de la electricidad = ($\$1.35 / \text{kWh} * 4.33 \text{ kW}$)

Costo de la electricidad = $\$5.85 / \text{h}$

Peso del Al consumido

Peso del Al consumido = $(78.0 \text{ g} / 600 \text{ s}) * (3600 \text{ s} / 1 \text{ h})$

Peso del Al consumido = 0.468 kg/h

Costo del Al

Costo del Al = $(\$40 / \text{kg} * 0.468 \text{ kg/h})$

Costo del Al = $\$18.72 / \text{h}$

Volumen consumido de Al

Volumen consumido de Al = $(0.468 \text{ kg/h} * 1000 \text{ g/kg}) / (2.70 \text{ g/mL} * 1000 \text{ mL/L} * 1000 \text{ L/m}^3)$

Volumen consumido de Al = $1.733 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$

Consumo de energía eléctrica por cada kg. de Al

Consumo de energía eléctrica por kg. de Al = $4.33 \text{ kW} / 0.468 \text{ kg/h}$

Consumo de energía eléctrica por kg. de Al = 9.25 kWh/kg

Tiempo de vida de las placas

Tiempo de reemplazo de las placas = $(0.6048 \text{ m}^3 / 1.733 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h})$

Tiempo de reemplazo de las placas = $3489 \text{ h} = 4.85 \text{ meses} \approx 5 \text{ meses}$

Tiempo de reemplazo de las placas (suponiendo media vida)

2.5 meses

Costo total por hora (energía + Al)

Costo total por hora = \$5.85 /h + \$18.72 /h

Costo total por hora = \$24.57 /h

Costo de operación por m³

Costo de operación por m³ = (0.5 kg / m³ * \$1.20 /kg) + (\$24.57 /h / 3.6 m³/h)

Costo de operación por m³ = \$7.45 /m³ ≈ \$7.57/m³

Capítulo VI

CONCLUSIONES

Con el empleo de la Electrocoagulación – floculación (ECF) a través del uso de una celda electrolítica, se ha logrado demostrar una buena eficiencia para la eliminación de silicatos contenida en el agua de proceso industrial. Es importante destacar que toda el agua empleada para la realización de las experiencias es proveniente del mismo lugar, sin embargo las condiciones de operación pueden variar dependiendo del agua que se desee tratar y de su procedencia.

El mejor diseño para la celda de ECF se realiza teniendo como base la densidad de corriente requerida para el cálculo del área total de ánodos. El sedimentador se diseñó de tal forma que los coágulos se separaran de forma inmediata una vez que pasaron por la celda de ECF.

A pesar de que no formó parte de nuestro objetivo conocer que tipo de silicato se encontraba en el agua de proceso se dedujo que éste mismo era el SiO_3^{2-} y que su relación con el Al^{3+} era de 3 moléculas de SiO_3^{2-} por cada 2 moléculas de Al^{3+} , sin embargo no se debe pasar por alto que la posibilidad de moléculas diferentes y de mayor peso molecular existan en forma de silicatos ya que en el agua de proceso es posible encontrar diferentes sales con las cuales se pueda llevar a cabo otra serie de reacciones.

La intensidad de corriente ideal comprobada para llevar a cabo el proceso de la ECF en nuestro sistema fue de 2 A ya que éste fue el suministro con el cual el R_F se acercó más a 1.

A través de las experiencias realizadas, se logró tener una buena conductividad para llevar a cabo el proceso sin la necesidad de agregar un exceso de NaCl, ya que se requirió de 0.5 g por cada litro de agua contaminada, esto a su vez trajo como consecuencia una disminución en la caída del potencial misma que se ve reflejada en el consumo de energía. De la misma forma al agregar NaCl se logró aumentar la velocidad de coagulación consiguiendo eliminar 80% de SiO_3^{2-} con un mayor Q_V y un menor consumo de energía.

Los resultados experimentales arrojados en todas y cada una de las experiencias tienden a disminuir de entre un 85 a un 100 % la concentración de SiO_3^{2-} , dependiendo de cuatro factores principalmente: la concentración inicial de SiO_3^{2-} en el agua, el flujo de alimentación de agua contaminada, el tiempo que la misma reside dentro de la celda y una adecuada separación de los flocúlos formados del agua tratada.

Para la simulación de una celda de ECF de dimensiones industriales bajo condiciones similares de operación que la experimental, podemos concluir que el tiempo de reemplazo de las placas de aluminio es de 5 meses aproximadamente y que el costo de operación de la misma sería de \$7.5 por cada m^3 de agua a tratar.

El método de la ECF cuenta con un campo muy amplio de aplicaciones en diversos sectores del tratamiento de agua, en él es posible desarrollar e innovar técnicas asociadas para el uso que se requiera, esto lo coloca dentro de uno de los métodos mas eficientes para el tratamiento del agua, sin olvidarnos de que haciendo un buen uso de él lograremos a corto plazo devolverle a la naturaleza lo que nos ha proporcionado de forma útil a los seres que habitamos este planeta.

Recomendaciones

Haciendo un breve análisis de todas las experiencias realizadas durante este proyecto, es posible estudiar dos alternativas concernientes al proceso para la separación de los flóculos dentro del sedimentador:

- ✓ En la primera se propone colocar un equipo de centrifugado como subsecuente al sedimentador, con esto se lograría una mejor separación del agua limpia y los coágulos formados y paralelo a esto se evitaría la inundación de coágulos dentro del sedimentador, haciendo el proceso más eficiente aún.

- ✓ La segunda alternativa, la cual sería más económica que la primera pero menos eficiente, sería la elaboración de un sedimentador de dimensiones mayores con el cual al tener un volumen mayor se tendría un tiempo de residencia mayor y de la misma forma un tiempo suficiente para la sedimentación de los coágulos.

GLOSARIO

Símbolo	Descripción	Unidad
A	Área total de ánodos	m ² , cm ²
A _{ca}	Área por cada cara anódica	m ² , cm ²
b	Base de la placa	cm
C	Concentración	M, ppm, mg/L
ep	Espesor de la placa	cm
F	Número de Faraday, F = 96487	(A * s)/mol
h	Altura de la placa	cm
I	Intensidad de corriente	A
i	Densidad de corriente	A/m ²
κ	Conductividad	μS/cm, mS/cm
m	Masa	g, mg
N	Número total de placas	-
N _{ca}	Número total de caras anódicas	-
n	Número de cargas intercambiadas	-
PM	Peso molecular	g/mol
Q _v	Caudal volumétrico	m ³ /s
R _F	Rendimiento faradaico	-
R _{SiO₃²⁻ / Al³⁺}	Relación entre SiO ₃ ²⁻ / Al ³⁺	-
sp	Separación entre las placas	cm
t _r	Tiempo de residencia de la celda ECF	s, min
v	Velocidad del fluido	m/s
V	Caída de potencial, voltaje	V
V _P	Volumen ocupado por las placas	m ³
V _V	Volumen vacío en la celda ECF	m ³
V _{VP}	Volumen vacío entre las placas	m ³

Bibliografía

1. Autores: Meter K. Holt, Geoffrey W. Barton, Cynthia A. Mitchell.
Título: The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology.
Base de datos: Elsevier.
Fuente: Chemosphere Vol 59 (2005) p 355 – 367.
2. Autor: Guohua Chen.
Título: Electrochemical technologies in wastewater treatment.
Base de datos: Academic Search Premier.
Fuente: Separation & Purification Technology; Jul 2004, Vol 38 Issue 1, pp 11-41.
3. Autores: Kai Nielson, D. W. Smith.
Título: Ozone-enhanced electroflocculation in municipal wastewater treatment.
Base de datos: Academic Search Premier.
Fuente: Journal Environmental Engineering & Science; Jan 2005, Vol 4 Issue 1, p 65-76.
4. Autores: Guohua Chen, Xueming Chen, Po Lock Yue.
Título: Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater.
Fuente: Journal Environmental Engineering & Science; Sep 2000.
5. Autores: Jia-Qian Jiang, Nigel Graham, Cecile André, Geoff H. Kelsall, Nigel Brandon.
Título: Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment.
Base de datos: Pergamon.
Fuente: Water Research Vol 36 (2002) p 4064-4078.
6. Autores: Chen L. Lai, Sheng H Lin.
Título: Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics.
Base de datos: Elsevier.
Fuente: Chemosphere Vol 54 (2004) p 235-242.
7. Autores: Grasmick, A., Pouet, M.
Título: Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation.
Base de datos: Environmental Issues & Policy Index

Fuente: Water Science & Technology Vol 31 (1995) p 275.

8. Autores: Peter Holt, Geoffrey Barton, Mary Wark, Cynthia Mitchell
Título: A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation.
Base de datos: Academic Search Premier.
Fuente: Colloids & Surfaces A: Phys. Eng. Asp. Vol. 211(2002) p 233.
9. Autores: Mehmet UGURLU
Título: The removal of some Inorganic compounds from paper mill effluents by the electrocoagulation method.
Base de datos: G. U. Journal of Science.
Fuente: Faculty of Science and Education. Mugla UNiversity 48000, TURKEY.
10. Autores: P. Ratna Kumar, Sanjeev Chaudhari, Kartic C. Khilar, S. P. Majan.
Título: Removal of arsenic from water by electrocoagulation
Base de datos: Elsevier
Fuente: Chemosphere Vol 55 (2004) p 1245-1252.
11. Autores: Can O. T., Bayramoglu, M., Kobya, M.
Título: Decolorization of Reactive Dye Solutions by Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes.
Base de datos: EJS E-Journals
Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Vol 42 (14), p 3391.
12. Autores: Pouet, M., Persin, F., Rumeau, M.
Título: Intensive treatment by electrocoagulation-flotation-tangential flow microfiltration in areas of high seasonal population.
Base de datos: Environmental Issues & Policy Index.
Fuente: Water Science & Technology 1992 Vol 25 (12), p 247.
13. Autores: C. Y. Hu, S. L. Lo, W. H. Kuan, Y. D. Lee.
Título: Removal of fluoride from semiconductor wastewater by electrocoagulation-flotation.
Base de datos: Elsevier.
Fuente: Water Research 39 (2005), p 895-901.
14. Autores: Peter Holt, Geoffrey Barton, Cynthia Mitchell.
Título: Electrocoagulation as a wastewater treatment.
Base de datos: The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event. 23-26, November, Castlemaine, Victoria 1999.

15. Autores: Valeria K. Kovatcheva, Marin D. Parlapanski.
 Título: Sono-electrocoagulation of iron hydroxides.
 Base de datos: Elsevier
 Fuente: Colloids and Surfaces, Physicochemical and Engineering Aspects 149 (1999), p 603-608.

16. Autores: José R. Ochoa, Marta Muñoz, Pedro Sasía.
 Título: Obtención de floculantes no iónicos y aniónicos (densidad de carga 40%) por polimerización en microemulsión inversa. Influencia del sistema tensoactivo.
 Base de datos: Revista Iberoamericana de polímeros.
 Fuente: Revista Iberoamericana de polímeros, Volumen 4 (4), Diciembre de 2003, Polimerización en microemulsión., p 14-29.

17. Arcadio P. Sincero, Gregoria A. Sincero, Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater, IWA Publishing CRC Press, 2003, Printed in U.S.A.

18. Cornelius Klein, Cornelius S. Hubert, Manual de mineralogía, Editorial Reverté, Cuarta edición, Impreso en México

19. Cornelius Klein, Cornelius S. Hubert jr., Manual of Mineralogy, Twentieth edition, John Wiley & Sons, 1985, Printed in U.S.A.

20. Cunningham William P., Mary Ann Cunningham, Barbara Woodworth Saigo, Environmental Science A Global Concern, Seventh Edition, McGraw-Hill, 2003, Printed in U.S.A.

21. Dana T. Griffen, Silicate Crystal Chemistry, New York Oxford University Press, 1992, Printed in U.S.A.

22. Enciclopedia Encarta de Microsoft 1998.

23. Gilbert W. Castellan, Fisicoquímica, Addison Wesley Longman de México, Segunda Edición, 1998, Impreso en México.

24. Gordon Masken Fair, John Charles Geyer, Daniel Alexander Okun, Water and wastewater engineering, Volume 1 – Water supply and wastewater removal, John Wiley and Sons, Inc., Toppan Company, Limited, 1966, Printed in Japan, p 6-1 a 6-21. Sheppard T. Powell, Water Conditioning for Industry, McGraw-Hill Book Company Inc. Kogakusha Company Ltd., First Edition, 1954, Tokyo Japan

25. Harris, DC. Quantitative Chemical Analysis. Ed. Freeman. 1999. pag 328.

26. James W. McCoy, Chemical Analysis of Industrial Water, Chemical Publishing Company, New York, 1969, Printed in U.S.A.
27. Keith J. Laidler, John Meiser, Fisicoquímica, Segunda edición, Editorial CECSA, Tercera reimpresión, 2002, México, pp. 257 – 259, 309 – 318, 584 – 589.
28. Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Termodinámica, Segunda edición, Editorial McGraw-Hill, Tomo II, 2002, Impreso en México.