



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

EVALUACIÓN DE CORRIENTE PULSADA Y OTRAS VARIABLES EN LA REMOCIÓN DE SÍLICE POR  
ELECTROCOAGULACIÓN

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
SHIRLEY IRAZOQUE CASTAÑEDA

TUTOR PRINCIPAL  
SILVIA LUCILA, GELOVER, SANTIAGO, IMTA  
COMITÉ TUTOR  
MARÍA TERESA, ORTA, LEDESMA, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
ALFONSO, DURÁN, MORENO, FACULTAD DE QUÍMICA

MÉXICO, D. F. ENERO 2014

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente.- Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma

Secretario: Dr. Alfonso Durán Moreno

Vocal: Dra. Alejandra Martín Domínguez

1º supl.- Dra. Silvia L. Gelover Santiago

2º supl.- Dr. Ignacio Monje Ramírez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

**TUTOR DE TESIS:**

NOMBRE

---

**FIRMA**

## DEDICATORIAS

*A mis padres Alfonso Irazoque Andaney y Vicenta Castañeda García por su apoyo incondicional, amor, paciencia y confianza.*

*A mis hermanos Allan Irazoque Castañeda, Kimberly Irazoque Castañeda y Madeleine Irazoque Castañeda por su apoyo y cariño.*

*Al amor de mi vida Rodrigo Oliva González por su apoyo, comprensión, amor, paciencia, respeto.*

*A mi precioso y amado hijo Rodrigo Oliva Irazoque que dios me mando en esta etapa de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por aceptarme como alumna de esta máxima casa de estudios.**

**Al Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA) por brindarme las instalaciones y medios para llevar a cabo este trabajo.**

**Al CONACYT, por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría en Ingeniería Ambiental culminados con esta tesis.**

**A la Dra. Silvia Gelover Santiago por brindarme su valiosa asesoría, dirección, comprensión, apoyo al aportar su conocimiento y experiencia en este trabajo de tesis.**

**A las Doctoras Ma. Teresa Orta Ledesma y Alejandra Martín Domínguez así como a los Doctores Alfonso Durán Moreno e Ignacio Monje Ramírez, por las aportaciones, comentarios y correcciones realizadas a este trabajo de tesis.**

**A las maestras Sara Pérez Castrejon y María de Lourdes Rivera Huerta por su amistad, ayuda, apoyo y consejos para la elaboración de este trabajo y en mi desarrollo profesional.**

**A mis profesores de asignaturas por apoyarme con sus conocimientos y dudas sobre este trabajo.**

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÍNDICE.....</b>                                                                             | <b>i</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>                                                                   | <b>ii</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                                                                  | <b>4</b>  |
| <b>RESUMEN .....</b>                                                                           | <b>iv</b> |
| <b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Problemática y justificación .....</b>                                                  | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Hipótesis .....</b>                                                                     | <b>3</b>  |
| <b>1.3 Objetivos .....</b>                                                                     | <b>4</b>  |
| <b>1.3.1 Objetivo general.....</b>                                                             | <b>4</b>  |
| <b>1.3.2 Objetivos específicos.....</b>                                                        | <b>4</b>  |
| <b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>                                                                    | <b>5</b>  |
| <b>2.1 El agua para uso industrial .....</b>                                                   | <b>5</b>  |
| <b>2.2 Torres de enfriamiento .....</b>                                                        | <b>6</b>  |
| <b>2.2.1 Funcionamiento .....</b>                                                              | <b>6</b>  |
| <b>2.2.2 Tipos de torre de enfriamiento .....</b>                                              | <b>7</b>  |
| <b>2.2.3 Balance de agua de una torre de enfriamiento .....</b>                                | <b>8</b>  |
| <b>2.2.4 Problemática de la calidad de agua en torres .....</b>                                | <b>11</b> |
| <b>2.2.5 Tratamiento del agua de las torres para remoción de sílice .....</b>                  | <b>14</b> |
| <b>2.3 Sílice .....</b>                                                                        | <b>16</b> |
| <b>2.3.1 Propiedades físicas y químicas de la sílice .....</b>                                 | <b>18</b> |
| <b>2.3.2 Soluciones convencionales y avanzadas para remoción de sílice .....</b>               | <b>19</b> |
| <b>2.3.3 Ventajas y desventajas de los procesos para remoción de sílice .....</b>              | <b>25</b> |
| <b>2.4 Aspectos fundamentales de la electrocoagulación .....</b>                               | <b>26</b> |
| <b>2.4.1 Factores que afectan el proceso de electrocoagulación .....</b>                       | <b>27</b> |
| <b>2.4.2 Reactores utilizados en el proceso de electrocoagulación .....</b>                    | <b>31</b> |
| <b>2.4.2.1Diseño y operación de un reactor en electrocoagulación .....</b>                     | <b>35</b> |
| <b>2.4.3 Electrocoagulación con electrodos de aluminio .....</b>                               | <b>38</b> |
| <b>2.4.4 Ventajas y desventajas que se presentan en el proceso de electrocoagulación .....</b> | <b>40</b> |
| <b>2.4.4.1Pasivación .....</b>                                                                 | <b>41</b> |

---

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.5 Tipos de corriente utilizada en el procesos de electrocoagulación</b> .....                                         | <b>43</b> |
| 2.5.1 Corriente continua .....                                                                                             | 43        |
| 2.5.2 Corriente pulsada .....                                                                                              | 44        |
| 2.5.2.1 Perfiles de corriente pulsada .....                                                                                | 44        |
| <b>2.6 Parámetros para la evaluación de corriente pulsada</b> .....                                                        | <b>45</b> |
| 2.6.1 Dosis de aluminio teórico .....                                                                                      | 45        |
| 2.6.2 Material de los electrodos .....                                                                                     | 47        |
| 2.6.3 Eficiencia de corriente aplicada .....                                                                               | 48        |
| 2.6.4 Ciclo de trabajo .....                                                                                               | 48        |
| 2.6.5 Frecuencia del pulso .....                                                                                           | 49        |
| 2.6.6 Distancia de los electrodos .....                                                                                    | 49        |
| <b>3 METODOLOGÍA</b> .....                                                                                                 | <b>50</b> |
| <b>3.1 Descripción general</b> .....                                                                                       | <b>50</b> |
| 3.1.1 Diseño del reactor de electrocoagulación.....                                                                        | 51        |
| 3.1.1.1 Prueba de trazadores para la caracterización hidráulica del reactor.....                                           | 54        |
| 3.1.2 Diseño de experimentos.....                                                                                          | 55        |
| 3.1.2.1 Matriz de experimentos del diseño factorial $2^3$ .....                                                            | 56        |
| 3.1.3 Caracterización fisicoquímica del agua .....                                                                         | 51        |
| 3.1.4 Tren de tratamiento para la remoción de sílice .....                                                                 | 59        |
| 3.1.4.1 Descripción del procedimiento del tren de tratamiento .....                                                        | 60        |
| 3.1.5 Perfil de corriente pulsada a evaluar .....                                                                          | 61        |
| <b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....                                                                                      | <b>64</b> |
| 4.1 Caracterización inicial de parámetros de interés .....                                                                 | 64        |
| 4.2 Evaluación del efecto de las variables de prueba en las de respuesta del sistema siguiendo diseño de experimentos..... | 65        |
| 4.2.1 Remoción de sílice.....                                                                                              | 65        |
| 4.2.2 Aluminio producido .....                                                                                             | 68        |
| 4.2.3 Voltaje de respuesta .....                                                                                           | 70        |
| 4.3 Análisis de la corriente directa con la corriente promedio del diseño de experimentos $2^3$ .....                      | 72        |

|                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.4 Análisis de la comparación de la corriente pulsada con la corriente directa para la remoción de sílice .....</b> | <b>75</b> |
| <b>5 CONCLUSIONES.....</b>                                                                                              | <b>77</b> |
| <b>6 RECOMENDACIONES .....</b>                                                                                          | <b>78</b> |
| <b>7 BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                                                                             | <b>79</b> |
| <b>8 ANEXOS .....</b>                                                                                                   | <b>82</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1 Variables de operación en un sistema de torres de enfriamiento ...                            | 10 |
| Tabla 2.2 Posibles depósitos en sistemas de enfriamiento .....                                          | 12 |
| Tabla 2.3 Principales contaminantes en el agua de purga de torres de enfriamiento. ....                 | 13 |
| Tabla 2.4 Remoción de contaminantes mediante precipitación con cal .....                                | 20 |
| <br>                                                                                                    |    |
| Tabla 3.1 Valores para las conexiones del reactor electroquímico .....                                  | 51 |
| Tabla 3.2 Material para los electrodos .....                                                            | 52 |
| Tabla 3.4 Valores asignados para cada parámetro independiente .....                                     | 57 |
| Tabla 3.5 Datos para programar la fuente de poder .....                                                 | 62 |
| Tabla 4.1 Resultados de la caracterización del agua de pozo .....                                       | 64 |
| Tabla 4.2 Porcentajes de remoción de sílice obtenidos en el diseño de experimentos 2 <sup>3</sup> ..... | 71 |
| Tabla 4.3 Análisis de varianza para sílice removida - floculación-sedimentación .....                   | 71 |
| Tabla 4.4 Valores de la producción de aluminio obtenidos mediante el diseño experimental .....          | 66 |
| Tabla 4.5 Análisis de varianza para voltaje - floculación-sedimentación .....                           | 68 |
| Tabla 4.6 Variables de respuesta obtenidas con corriente directa .....                                  | 72 |



**ÍNDICE DE FIGURAS**

**2.1 Evolución del volumen concesionado para uso agrupado industria autoabastecida por tipo de fuente, 2001-2009.....5**

**2.2 Funcionamiento de una torre de enfriamiento .....7**

**2.3 Balance de agua en una torre de enfriamiento .....10**

**2.4 Crecimiento microbiano en las torres de enfriamiento .....11**

**2.5 Corrosión en sistemas de enfriamiento .....13**

**2.6 Estructura atómica de la cristobalita .....16**

**2.7 Modelo de sílice, a) monomérico y b) amorfo .....17**

**2.8 Equipo de ósmosis inversa .....23**

**2.9 Esquema de electrocoagulación.....29**

**2.10 Diagrama de solubilidad de  $Al(OH)_3$  considerando solo especies de aluminio monoméricas.....30**

**2.11 Modelo de sílice, a) monomérico y b) amorfo .....32**

**2.12 Equipo de ósmosis inversa .....33**

**2.13 Esquema de electrocoagulación .....34**

**2.14 Diagrama de solubilidad de  $Al(OH)_3$  considerando solo especies de aluminio monoméricas.....34**

**2.15 Reactores para electrocoagulación tipo bach:(a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.....35**

**2.16 Reactor de electrocoagulación a flujo pistón .....36**

**2.17 Usos del proceso de electrocoagulación .....38**

**2.18 Ensamble de las placas de aluminio en forma paralela y cada una con su conexión a la caja de acrílico .....43**

**3.1 Reactor electroquímico armado y acoplado a la fuente de poder programable .....50**

**3.2 Prueba de trazadores al reactor electroquímico con placas paralelas .....53**

**3.3 Esquema del desarrollo experimental.....53**

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4 Tren de tratamiento para la remoción de sílice .....                                                      | 55 |
| 3.5 Diagrama del perfil utilizado para las pruebas con corriente pulsada....                                  | 59 |
| 3.6 Diagrama del perfil programado en la fuente de poder .....                                                | 61 |
| 3.7 Reactor electroquímico .....                                                                              | 54 |
| 4.1 Diagrama de Pareto para porcentaje de remoción de sílice .....                                            | 67 |
| 4.2 Gráfico de superficie de respuesta para remoción de sílice .....                                          | 68 |
| 4.3 Diagrama de Pareto para la producción de aluminio .....                                                   | 67 |
| 4.4 Grafica de superficie de respuesta para la producción de aluminio<br>dosificado. ....                     | 68 |
| 4.5 Diagrama de Pareto para la producción de aluminio .....                                                   | 70 |
| 4.6 Gráfico de relación sílice removido aluminio producido .....                                              | 71 |
| 4.7 Gráfico de la relación voltaje con la intensidad de corriente .....                                       | 71 |
| 4.8 Grafica de respuesta para la sílice removida comparada con la intensidad<br>de corriente. ....            | 72 |
| 4.9 Gráfico donde se muestra la relación del % de remoción de sílice con los<br>dos tipos de corriente .....  | 72 |
| 4.10 Relación de consumo de corriente con los dos tipos de corriente<br>utilizada .....                       | 73 |
| 4.11 Gráfico donde se muestra la relación del % de remoción de sílice con<br>los dos tipos de corriente ..... | 72 |
| 4.12 Relación de consumo de corriente con los dos tipos de corriente<br>utilizada .....                       | 73 |

### RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la aplicación de corriente pulsada en la remoción de sílice del agua de uso industrial con el proceso de electrocoagulación teniendo como referencia el mismo sistema bajo un régimen de corriente directa.

Para el estudio de este proceso se construyó un reactor electroquímico con placas paralelas de aluminio, en el que se tiene un flujo tipo floculador hidráulico vertical, al cual se le suministró un caudal de 0.3 L/min con lo que se tenía una velocidad para el agua de 0.04 m/s. Se acopló a una fuente de poder donde se programó el perfil de corriente pulsada, y así se evaluaron los efectos de la aplicación de corriente pulsada mediante la variación de la intensidad de corriente de pico (10A, 5A y 1A), del ciclo de trabajo (0.6, 0.5 y 0.3) y la frecuencia de pulso (500 Hz, 250Hz y 5Hz) sobre las variables de respuesta seleccionadas (voltaje, aluminio producido y sílice removida), así como pasivación y consumo energético durante el proceso de electrocoagulación.

Se realizaron las pruebas en base a un diseño de experimentos factorial  $2^3$ , para tres variables con dos niveles y su centro. El cual mostró que ni la frecuencia ni el ciclo de trabajo, en los intervalos probados, fueron significativos para la remoción de sílice pero sí lo fueron para el voltaje de respuesta obtenido. Al evaluar las diferentes condiciones de prueba para la corriente pulsada el perfil de mejor respuesta resultó el del ciclo de trabajo de 0.7 con una frecuencia de 5 Hz y con una intensidad de corriente de pico de 10 A, en donde se obtuvo una remoción de sílice para una relación de aluminio producido/sílice removida de 0.63 lo que disminuye el costo del tratamiento al requerirse una menor cantidad de aluminio para remover una misma cantidad de sílice. Al comparar el consumo energético aplicando corriente pulsada y corriente directa, para un mismo valor de remoción de sílice se obtuvo que con corriente pulsada se logra un ahorro de 30% con respecto a utilizar corriente directa.

Estos resultados muestran la conveniencia del uso de corriente pulsada, por lo que se sugiere realizar experimentos complementarios con la finalidad de determinar las condiciones bajo las que la aplicación de corriente pulsada ofrece mayores beneficios al proceso de electrocoagulación aplicado a la remoción de sílice.

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problemática y justificación

Las torres de enfriamiento consumen una gran cantidad de agua especialmente en las industrias termoeléctrica y petroquímica. En las torres de enfriamiento una parte de agua se evapora, otra se pierde por arrastre de aire, mientras que otra parte se purga para evitar la concentración de sales como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Si(OH)}_4$  y  $3\text{MgSiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .

La sílice ( $\text{SiO}_2$ ) recibe especial atención por su baja solubilidad y por tratarse de una especie química presente en el agua en forma natural. Por esta razón es de suma importancia removerla de las aguas industriales para su reuso posterior.

Los depósitos de sílice y silicatos son particularmente difíciles de remover una vez que se han formado, por lo que usualmente se requiere de métodos mecánicos. Estos depósitos se adhieren a las superficies de las torres de enfriamiento, equipos de transferencia de calor y tuberías, afectando la transferencia de masa y energía, disminuyendo el desarrollo normal de los procesos y ocasionando grandes pérdidas económicas así como tiempo de operación.

Existen diversos métodos utilizados para el control de la sílice. El método más comúnmente utilizado para el tratamiento de aguas con presencia de sílice es la coagulación química. En este método se agregan agentes coagulantes como sulfato de aluminio o cloruro férrico, además de otros aditivos como polielectrolitos (Holt *et al.*, 1999) para producir flóculos, los cuales puedan ser separados del agua fácilmente. Sin embargo, estos métodos requieren de un continuo suministro de productos químicos y generan una excesiva cantidad de lodos, los cuales a su vez deben ser sometidos a tratamiento para su disposición final.

La remoción de sílice permitiría; reducir las incrustaciones en torres de enfriamiento, incrementar el número de ciclos de concentración, reducir la cantidad de agentes coagulantes, disminuir el agua de repuesto y purga, así como disminuir las necesidades de mantenimiento.

Una alternativa para la remoción de sílice es la electrocoagulación (EC). Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico como sulfato de aluminio o cloruro férrico, el agente coagulante (típicamente  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ )

es generado por ánodos de sacrificio mediante la aplicación de una corriente eléctrica.

La electrocoagulación que utiliza corriente directa (CD) se usa para hacer que los iones de los electrodos eliminen contaminantes indeseados, sea mediante reacción química y precipitación o provocando que los materiales coloidales se aglomeren y sean eliminados por flotación electroquímica.

En el laboratorio de potabilización de agua se ha demostrado que la remoción de sílice es un proceso técnicamente factible, sin embargo una de las desventajas de CD es la pasivación en los electrodos lo cual involucra una gran pérdida de material, altos costos de mantenimiento y también grandes cantidades de energía eléctrica.

En esta tesis se evalúa el efecto de la aplicación de corriente pulsada (CP) y compararlo con los resultados obtenidos por aplicación de corriente directa (CD) a nivel piloto. Para ello se implementó el uso de la corriente pulsada para tratar de minimizar la pasivación en los electrodos, tener mayor eficiencia y menores costos.

## 1.2 Hipótesis

Si se aplica corriente pulsada en el proceso de electrocoagulación para remover sílice en lugar de corriente directa, entonces se obtendrán mayores porcentajes de remoción de sílice evitando la pasivación de los electrodos así como menores consumos de energía eléctrica y se generarán beneficios tanto económicos como ambientales.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de corriente pulsada en la remoción de sílice por electrocoagulación, empleando un reactor de placas paralelas de aluminio de flujo tipo floculador hidráulico vertical y compararlo con la aplicación de corriente directa, así como evaluar las implicaciones de su uso en la aparición de incrustaciones en los electrodos de aluminio, la pasivación y en el consumo de energía durante el proceso.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un reactor electroquímico con placas paralelas de aluminio y flujo tipo floculador hidráulico vertical, acoplado a una fuente de poder para programar un perfil de corriente pulsada.
- Evaluar los efectos de la aplicación de corriente pulsada mediante la variación de los parámetros independientes (intensidad de corriente de pico, ciclo de trabajo y frecuencia de pulso) sobre las variables dependientes (voltaje, aluminio producido y sílice removida, pasivación y consumo energético) durante el proceso de electrocoagulación.
- Evaluar el efecto de la corriente pulsada, teniendo como punto de comparación la corriente directa en todas las variables de estudio.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 El agua para uso industrial

El agua es utilizada en la industria para procesamiento, lavado y enfriamiento. Las industrias que requieren más agua son las termoeléctricas, químicas, de procesamiento de papel y de refinado de petróleo. El reciclaje de agua dentro de una planta es una parte integral de los procesos industriales, el agua es reciclada para ahorrar agua y evitar los estrictos requerimientos de descarga.

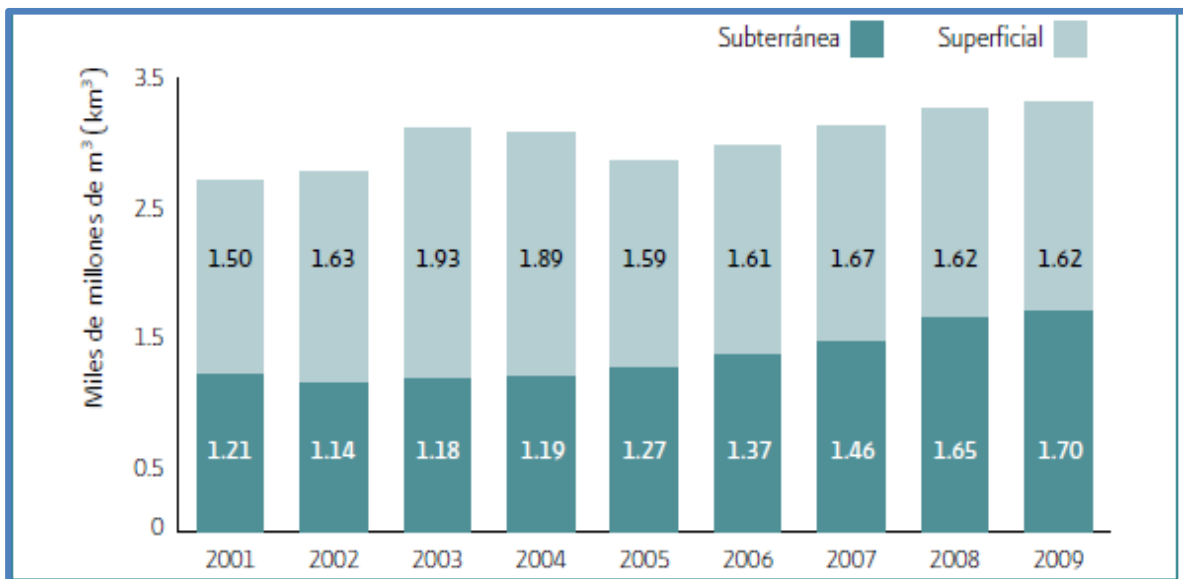


Fig. 2.1: Evolución del volumen concesionado para uso agrupado industria autoabastecida por tipo de fuente, 2001-2009 (Conagua, 2010)

El método más aplicado para utilizar el agua en una industria de este tipo es el enfriamiento del agua caliente procedente de procesos industriales. Las industrias utilizan agua de refrigeración para varios procesos, como la manufacturación, el acondicionamiento de aire y la generación de energía, entre otros (CTI, 2008).



Debido al importante requerimiento de flujo de agua, las torres de enfriamiento utilizadas en refinerías son de las de mayor consumo que se pueden encontrar en la industria.

El consumo elevado de agua de enfriamiento en las refinerías representa un problema que repercute ambiental y económicamente debido a que el agua cruda es un recurso no renovable y su explotación ocasiona cada vez más escasez en regiones del país en donde esto no era un problema hace años. El agua circulante se obtiene de pozos, presas, ríos aledaños (agua cruda) o en el mejor de los casos de plantas de tratamiento de agua residual.

Los problemas comunes que se presentan en las torres de enfriamiento de las refinerías es la falta de mantenimiento, escaso control del agua que circula en equipos y tratamientos químicos que no dan resultados adecuados, este último es un problema difícil de manejar, sobre todo a gran escala en cuanto a capacidad se refiere.

### **2.2 Torres de enfriamiento**

Las torres de enfriamiento tienen como finalidad enfriar una corriente de agua por vaporización parcial de ésta con el consiguiente intercambio de calor sensible y latente de una corriente de aire seco y frío que circula por el mismo aparato. Pueden ser de muchos tipos, sin embargo el enfoque se centra en un equipo de costo inicial bajo y de costo de operación también reducido. Con frecuencia el armazón y el empaque interno son de madera. Es común la impregnación de la madera, con fungicidas. Generalmente el entablado de los costados de la torre es de pino, poliéster reforzado con vidrio o cemento de asbesto (CTI, 2008).

#### **2.2.1 Funcionamiento**

En las torres de enfriamiento se disminuye la temperatura del agua caliente que proviene de un circuito de refrigeración mediante la transferencia de calor y masa al aire que circula por el interior de la torre. A fin de mejorar el contacto aire-agua, se utiliza un relleno. El agua entra en la torre por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre el relleno utilizando pulverizadores. De esta forma, se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico.

El relleno aumenta el tiempo y la superficie de intercambio entre el agua y el aire. Una vez establecido el contacto entre el agua y el aire, tiene lugar una

transferencia de calor del agua hacia el aire. Ésta se produce debido a dos mecanismos: la transmisión de calor por convección (flujo de calor en dirección al aire que rodea al agua a causa de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos) y la transferencia de masa desde el agua al aire, produciendo el enfriamiento del agua debido a la evaporación. En la Fig.2.1 se muestra el funcionamiento de una torre de enfriamiento además se indican las partes principales.

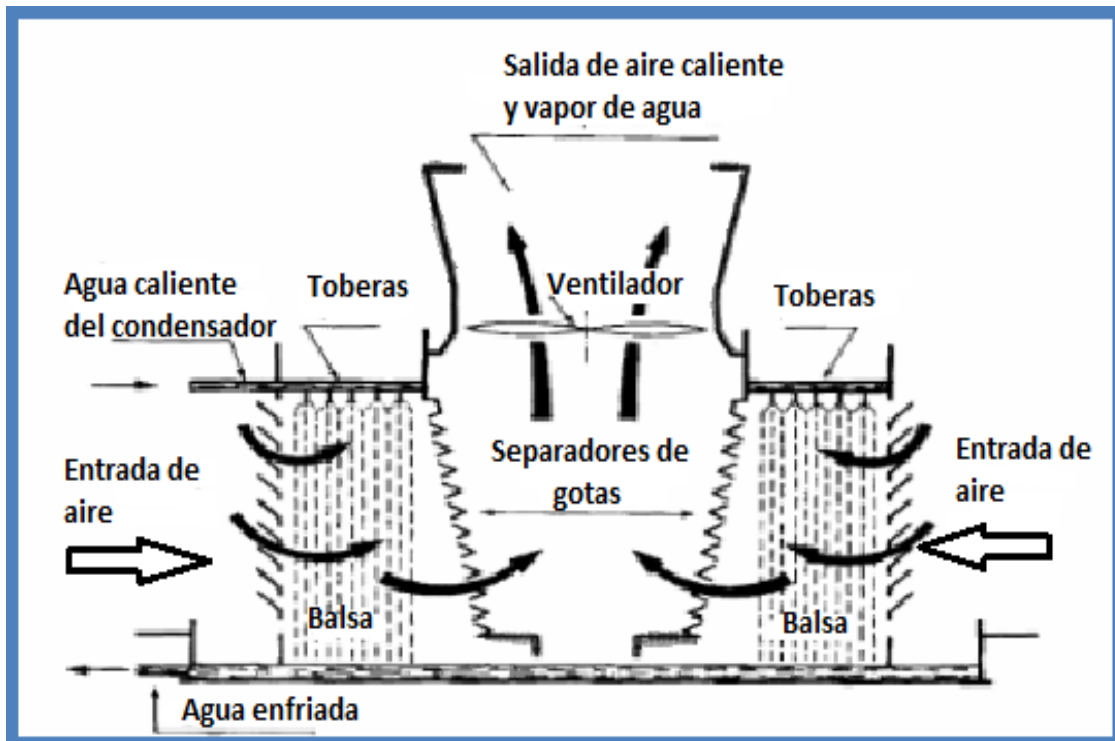


Fig. 2.2- Funcionamiento de una torre de enfriamiento.

## 2.2.2 Tipos de torre de enfriamiento

Las torres de enfriamiento se clasifican según la forma de suministro de aire en:

- Torres de circulación natural
  1. Atmosféricas: El movimiento del aire depende del viento y del efecto aspirante de las boquillas aspersoras. Se usan en pequeñas instalaciones. Depende de los vientos predominantes para el movimiento del aire.

2. Tiro natural: El flujo de aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades, entre el aire más frío del exterior y húmedo del interior de la torre. Utilizan chimeneas de gran altura para lograr el tiro deseado. Debido al inmenso tamaño de estas torres (152 m de alto y 121 m de diámetro), se utilizan por lo general para flujos de agua por encima de 210L/s. Son ampliamente utilizadas en las centrales térmicas.

➤ Torres de tiro mecánico

El agua caliente que llega a la torre puede distribuirse por boquilla aspersoras o compartimientos que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua a través de los orificios. El aire usado para enfriar el agua caliente es extraído de la torre, en cualquiera de las dos formas siguientes:

1. Tiro Inducido: El aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre; son las más utilizadas.
2. Tiro forzado: El aire se fuerza por un ventilador situado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior.

➤ Torres de flujo cruzado

El aire entra a los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Las corrientes de aire laterales se unen en un pasaje interno y dejan la torre por la cima. Las torres de flujo cruzado requieren más aire y tienen un costo de operación más bajo que las torres a contracorriente (CTI. 1994).

### **2.2.3 Balance de agua de una torre de enfriamiento**

En las torres se colocan deflectores o eliminadores de niebla que atrapan las gotas de agua que fluyen con la corriente de aire hacia la salida de la torre con el objeto de disminuir la posible pérdida de agua.

Durante el ciclo de enfriamiento hay pérdidas ocasionadas por diversas causas, las cuales se enumeran a continuación:

1. Evaporación: Mecanismo de enfriamiento principal de una torre, el calor perdido por evaporación (aproximadamente 1000 BTU/lb de agua) baja la temperatura del agua restante (NCDENR, 2008).
2. Arrastre: Principalmente ocasionada por las condiciones climatológicas, se considera que representan un porcentaje fijo de pérdida que es de alrededor de 0.02% con respecto al agua circulante.
3. Fugas: En lo que es el circuito de enfriamiento existen equipos que tienen fugas que en algunos casos no se detectan a tiempo y que causan pérdidas al sistema. Éstas no son cuantificadas, pero si se consideran a la hora de mantener el nivel del agua constante.
4. Purgas continuas y de fondo: Término para el agua que es extraída de la recirculación del agua de enfriamiento para reducir contaminantes en el agua de la torre. Con la purga y la adición de agua de repuesto el nivel de los sólidos disueltos puede mantenerse para reducir la acumulación mineral y otros contaminantes en la torre.

Los principales parámetros base que determinan la purga de la torre de enfriamiento son: Dureza de calcio, dureza de magnesio, sílice, conductividad, turbiedad y sólidos principalmente.

5. Contaminación: Una torre sucia puede ser un foco de infección ya que puede contener agentes biológicos. Es importante examinar periódicamente el agua de la torre para saber si hay un buen tratamiento biológico.

Los problemas derivados de la formación de incrustaciones han afectado a los sistemas de enfriamiento durante años. La precipitación de los minerales sobre la superficie de los intercambiadores de calor provoca la pérdida de eficiencia de transferencia y bloqueo parcial o completo del flujo de agua. En la mayoría de los casos, las incrustaciones están formadas de carbonatos de calcio, sulfatos de calcio, sílice y silicatos de magnesio.

Las pérdidas por fugas, evaporación e infiltración no se cuantifican, se calculan o estiman tomando en cuenta factores tales como la ubicación geográfica.

Todos estos criterios- junto con algunos otros dentro de situaciones particulares- deben ser tomados en cuenta al momento de elaborar el balance general de agua figura 2.3.

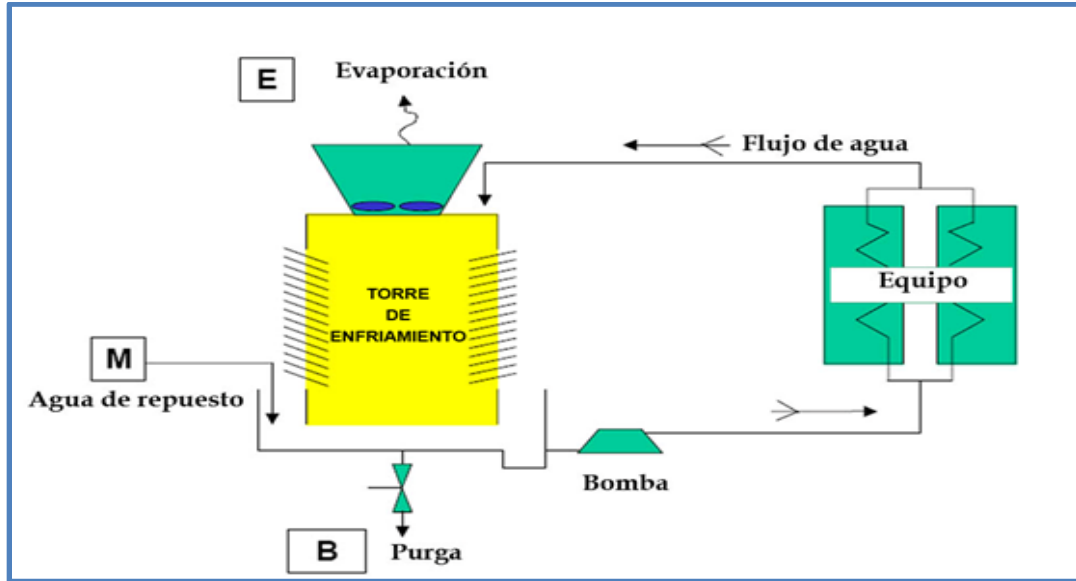


Figura 2. 3 Balance de agua en una torre de enfriamiento

Los ciclos de concentración (CC) son la relación de la concentración total de sólidos en el agua de repuesto con la concentración en el agua de recirculación, dichos ciclos de concentración indican el número de veces que se ha concentrado el agua recirculada o más bien el número de veces que el agua ha completado el circuito sin que haya sido purgada.

En la tabla 2.1 se muestra el esquema resumido de las variables y ecuaciones del balance de agua en las torres de enfriamiento (CTI, 2003).

Tabla 2. 1 Variables de operación en un sistema de torres de enfriamiento

| Repuesto    | Purga                                                                                 | Arrastre           | Evaporación                                           | Recirculación                       |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Ar          | P                                                                                     | A                  | E                                                     | R                                   |
| $P + A + E$ | $\frac{E}{(C.C - 1)} - A$ <p>C.C= ciclos de concentración</p> $C.C = \frac{X_R}{X_r}$ | $0.001\% \times R$ | $\frac{R \times \Delta T}{1000}$ $\Delta T = T1 - T2$ | $R = \text{Cap. total de la torre}$ |

### 2.2.4 Problemática de la calidad del agua en torres de enfriamiento

Entre los problemas causados por las características de los procesos de refrigeración y por las impurezas que suele traer consigo el agua sin tratamiento, podemos mencionar los siguientes:

*Crecimiento microbiano:* Es uno de los problemas más frecuentes en el agua a temperaturas próximas a 35°C, altas concentraciones de O<sub>2</sub>, luz UV, etc., constituyen un microambiente adecuado para el crecimiento de microorganismos (algas, bacterias, hongos).

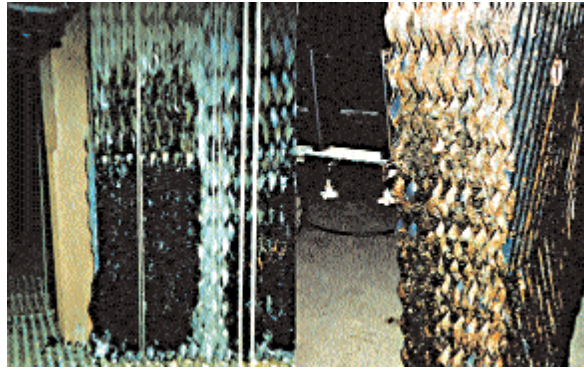


Fig. 2.4 Crecimiento microbiano en las torres de enfriamiento

*Depósitos e incrustaciones:* El agua utilizada para enfriamiento es un agua de origen natural, que se verá sometida a calentamiento, aun cuando sea mucho menor al que se da en un generador de vapor. Por lo tanto, encontraremos formación de incrustaciones, principalmente CaCO<sub>3</sub> (también Mg(OH)<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>).

Los depósitos reducen la eficiencia de los sistemas de refrigeración ya que actúan de aislante para la transferencia de calor y reducen la sección de paso en los elementos de distribución. Además, los diseños que no han previsto una tolerancia para tener en cuenta la formación de depósitos en los intercambiadores de calor, puede que no consigan los valores mínimos de proceso. Los depósitos también aceleran la corrosión debida a la formación de células de oxidación diferencial. Algunas consideraciones a tener en cuenta con relación a posibles depósitos en los sistemas de enfriamiento, se muestran en la tabla 2.2 :

Tabla 2.2. Posibles depósitos en sistemas de enfriamiento

| PARAMETRO                            | CONCENTRACIÓN |
|--------------------------------------|---------------|
| Solidos Disueltos                    | < 2500 mg/L   |
| [Ca <sup>++</sup> ]CaCO <sub>3</sub> | < 300 mg/L    |
| [SiO <sub>2</sub> ]                  | < 120 mg/L    |

Un programa de control del poder incrustante de las aguas de enfriamiento incluye las mediciones de la dureza, Ca y Mg, pH, la alcalinidad y temperatura, los cuales definen la concentración de iones carbonato y bicarbonato y la solubilidad del carbonato. También hay que controlar la concentración de sulfatos, sílice y otros contaminantes tales como hidrocarburos, glicoles, amoníaco, etc. Los índices de estabilidad de Langelier y Ryznar permiten determinar el comportamiento agresivo o incrustante del agua.

*Corrosión:* La corrosión se define como el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico. Por su entorno, la corrosión se origina por una reacción química (oxidación).

Los sistemas de enfriamiento contienen diversos materiales metálicos, como aceros, acero galvanizado, aleaciones de cobre, etc. A esto debe agregarse los productos utilizados para controlar incrustaciones o crecimiento microbiano, que estarán disueltos en el agua del circuito, lo que constituye un medio muy complejo.

Además, al estar el agua en permanente contacto con el aire, la concentración de oxígeno disuelto en la misma será muy cercana a la correspondiente a la de saturación de oxígeno disuelto en esas condiciones.

Por lo tanto, los sistemas de enfriamiento sufren muchas formas de corrosión y fallas. La diversidad en el ataque lo causan las diferencias en el diseño, la temperatura, el flujo, la química del agua, la composición de las aleaciones, y la operación de los sistemas de enfriamiento por agua. Se podrían incluir una variedad casi interminable de características químicas en las corrientes de los procesos en este tipo.



Fig. 2.5 Corrosión en sistemas de enfriamiento

La protección contra corrosión, incrustaciones, microorganismos y biocapas sobre los componentes y tuberías de las torres de enfriamiento es, sin lugar a dudas, un problema de enorme importancia económica. En la siguiente tabla podemos ver algunos contaminantes en el agua de purga de las torres de enfriamiento (SCMSGM 2000)

Tabla 2. 3. Principales contaminantes en el agua de purga de torres de enfriamiento (SCMSGM, 2002).

| PARAMETRO           | CAUSA                                                                                                                 |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dureza              | Se combinan con los carbonatos para formar incrustaciones en tuberías                                                 |
| Cloro libre         | Provoca la corrosión en los equipos de enfriamiento al formar compuestos con la combinación de $Cl^-$                 |
| Sulfatos            | Se combina con calcio para formar sales incrustantes de sulfato de calcio.                                            |
| Sílice              | Incrustaciones en intercambiadores de calor y tuberías.                                                               |
| Sólidos suspendidos | Originan depósitos en equipos de intercambiadores de calor y tuberías, ocasionan formación de lodos e incrustaciones. |
| Sólidos disueltos   | Elevadas concentraciones de sólidos, originan la formación de lodos al sedimentar.                                    |



La incrustación es el crecimiento cristalino de una capa adherente de sal insoluble u óxido en una superficie donde se realiza el intercambio de calor.

El termino general “incrustación” incluye poros o acumulaciones gelatinosas de sal insoluble, óxidos producidos por la corrosión y material extraño como suciedad y fibras, se originan masas microbiológicas, muchos depósitos descritos como biológicos son aglomerados de desechos debido a secreciones de microorganismos. La incrustación interfiere con el flujo de agua de enfriamiento, y la reducción en la velocidad de transferencia de calor.

Con respecto al crecimiento microbiano, las *Pseudomonas* y *Eurobacter* son los géneros que mayormente prevalecen en el agua de enfriamiento y los que más predominan en su formación. Las algas que prosperan en las torres de enfriamiento son: Cianoficofita (alga azul-verdosa) y Cloroficofita (alga verde). Los hongos son simples plantas que no contienen clorofila, sobreviven a menor pH que el de las bacterias y se reproducen por esporación.

### **2.2.5 Tratamiento del agua en las torres de enfriamiento**

A las torres de enfriamiento se les da mantenimiento por medio de reactivos químicos, los cuales se dosifican y adicionan de acuerdo con las condiciones particulares de cada torre, con la finalidad de evitar incrustaciones, corrosión, crecimiento de microorganismos y biomasa en las paredes. Lo que se utiliza principalmente para esto son:

- Anti-incrustantes
- Desinfectantes
- Biocidas
- Antiespumantes
- Inhibidores de corrosión

La dosificación adecuada de cada uno de estos productos al agua de enfriamiento y la buena calidad de agua de repuesto de la torre, así como las buenas condiciones operativas permitirán dar un servicio óptimo a los procesos.

Para incrementar los ciclos de concentración de las torres de enfriamiento una de las estrategias es eliminar la sílice del agua de repuesto, esto permite disminuir el agua de repuesto empleada, es decir se logra un ahorro de agua.

Se han desarrollado métodos para prevenir el desarrollo de incrustaciones de calcio, mediante el empleo de polímeros acrílicos y ácido fosfórico (Nishida *et al.*, 2009), además, se han reportado algunos métodos físicos para inhibir la formación

de incrustaciones de calcio, incluyendo métodos ultrasónicos y magnéticos, sin embargo, estos métodos tradicionales no son eficientes en la remoción de sílice debido a su amorficidad (Neofotistou y Demadis, 2004).

La concentración de sílice, la cual depende de la química del agua y de la temperatura, debe mantenerse por debajo de su límite de solubilidad ( $150\text{-}180\text{mgL}^{-1}$ ) para evitar incrustaciones en los sistemas de enfriamiento (Demadis y Neofotistou, 2004). Este tipo de incrustaciones inorgánicas son las más indeseadas, debido a que aumentan drásticamente la necesidad de combustible, derivado de la baja conductividad térmica de los depósitos.

El desarrollo de métodos para la prevención de incrustaciones de sílice es limitado debido a la complejidad química de este compuesto.

Actualmente, el control de las altas concentraciones de sílice en las torres de enfriamiento puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos, entre los cuales destacan:

- Operación a bajos ciclos de concentración
- Pre tratamiento
- Uso de inhibidores o dispersantes

Para evitar la formación de incrustaciones de sílice se ha reportado el uso de dendrímeros de poliaminoamidas; pero desafortunadamente, la actual aplicación de inhibidores en este campo es bastante limitada debido al alto costo de estas moléculas (Demadis y Neofotistou, 2004).

El método para el control de sílice predominante es la operación de las torres de enfriamiento a bajos ciclos de concentración combinado con el uso de inhibidores y dispersantes, lo cual conlleva un excesivo consumo de agua. El uso de pretratamientos se ha visto limitado por la extensa área de instalaciones que los métodos tradicionales requieren y a los altos costos de operación, por otra parte, los inhibidores de minerales convencionales no son eficientes para evitar la precipitación del sílice, mientras que el costo del uso de inhibidores efectivos es excesivamente alto (Demadis y Neofotistou, 2004).

### 2.3 Sílice

El dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice. Es muy abundante en la naturaleza en tres formas que son: cristalina (cuarzo, cristobalita y tridimita), criptocristalina (calcedonia) y amorfa (ópalo) (Lerman et al., 1988)

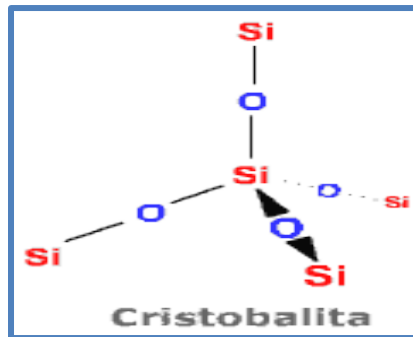


Fig. 2.6 Estructura atómica de la cristobalita

La sílice libre no se encuentra combinada con otro elemento o compuesto, se presenta en estado natural en piedras, arcillas, y suelos. La sílice combinada, está formada con uno o más de otros óxidos, como por ejemplo la sílice de la micra.

La sílice pura tiene una coloración de incolora a blanco es insoluble en el agua ligeramente soluble en álcalis y soluble en ácido fluorhídrico.

Se encuentra presente en la mayoría de las fuentes naturales de abastecimiento de agua en un intervalo de 20 a 60 ppm, sin embargo, en algunos lugares (p.ej. México) el contenido de sílice en aguas naturales puede alcanzar los 100 ppm (Koo *et al.*, 2001).

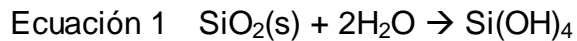
Al igual que el átomo de carbón, el silicio (componente del sílice) puede formar cuatro enlaces covalentes, por lo tanto da origen a una vasta variedad de moléculas, sin embargo, el silicio no puede formar fácilmente enlaces dobles o triples, debido a que el núcleo del silicio es más grande que el de carbono.

La sílice libre no se encuentra combinada con otro elemento o compuesto, se presenta en estado natural en piedras, arcillas y suelos.

Todas las aguas naturales contienen alguna cantidad de sílice soluble y muchas fuentes de suministro contienen sílice suspendida o coloidal.

La forma hidratada del sílice disuelto es el ácido orthosílico ( $\text{Si(OH)}_4$ ) (también llamado sílice reactivo o monomérico), la solubilidad del sílice en agua es de 150-180 ppm dependiendo de la química del agua .

La presencia de ácido orthosílico se puede deber a la disolución de cuarzo o sílice amorfo (Ecuación 1) en agua; la reacción se puede representar mediante la siguiente reacción (Sheikholeslami *et al.*, 2001):



Los depósitos de sílice amorfo y sílice sólido son compuestos que tienen una relación de dos moles de oxígeno por uno de silicio (b), sin embargo cuando está disuelto en agua el modelo  $(\text{SiO}_2)_n$  es improbable.

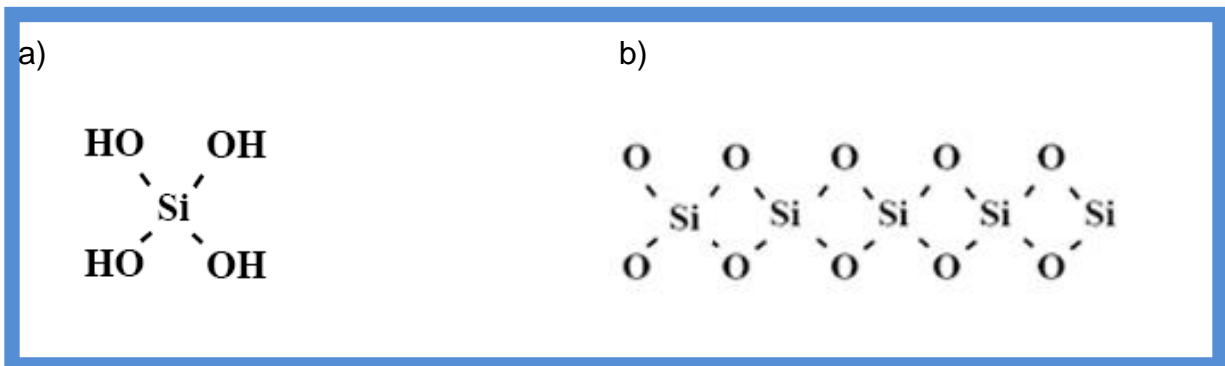


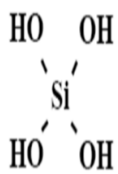
Fig.2.7 Modelos de sílice, a) monomérico y b) amorfo

### 2.3.1 Propiedades físicas y químicas de la sílice

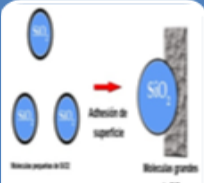
#### **Polimerización**

El término “polimerización” se refiere a la condensación del  $\text{Si}(\text{OH})_4$  para formar primeramente ácidos polisílicos de bajo peso molecular (oligómeros) de hasta de 50 Å de diámetro (los cuales pueden involucrar desde trímeros hasta dodecámeros), para posteriormente formar grandes especies poliméricas, reconocidos como coloides, los cuales portan carga negativa, a diferencia de la molécula soluble  $\text{Si}(\text{OH})_4$  (Bergna, 1994).

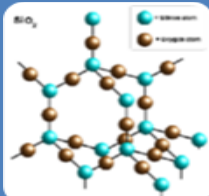
El proceso de polimerización se puede separar en las etapas siguientes:



Cuando la concentración de sílice es mayor de 100 -200 ppm y se encuentra en ausencia de una fase sólida en la cual pudiera depositar, entonces el monómero polimeriza mediante condensación para formar dímeros y especies de mayores pesos moleculares.



Debido a que no todas las partículas tridimensionales son del mismo tamaño, las partículas pequeñas de sílice se depositan sobre las grandes, aumentando el tamaño de las partículas y disminuyendo su número, generando partículas reconocidas como coloides.



Las moléculas esféricas resultantes son el núcleo de las moléculas que se desarrollarán posteriormente en grandes partículas coloidales, la solubilidad de estas partículas depende del tamaño de las mismas, esto es, del radio de la curvatura de su superficie.

## Deposición

El crecimiento de los depósitos de sílice es un proceso complejo e involucra diversos equilibrios. En sistemas de agua de enfriamiento (donde el pH de interés es de 7 a 9.5), la sílice coloidal se favorece a  $\text{pH} < 8.5$ , mientras que los silicatos de magnesio ( $3\text{MgSiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) se favorecen a  $\text{pH} > 8.5$ .

La sílice exhibe características de disoluciones normales, su solubilidad se incrementa con el aumento de la temperatura, sin embargo, los silicatos de magnesio exhiben una solubilidad inversa.

La formación de sílice coloidal resulta de la polimerización de sílice soluble, las incrustaciones de sílice resultantes son por lo tanto, mezclas complejas, multicomponentes; contrastando con las incrustaciones cristalinas como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ), entre otras, las cuales son producto de las asociaciones anión –catión.

La sílice disuelta precipita principalmente por deposición en superficie o a través de precipitación por aglomeración. En la deposición en superficie, los iones sílice/silicato condensan en cualquier superficie sólida que contenga grupos  $-\text{OH}$ , la reacción es más fuerte en las superficies que contienen grupos  $\text{M-OH}$ , tal es el caso de las incrustaciones de sílice en las superficies metálicas que han sufrido una severa corrosión, debido a que las superficies de éstas se encuentran cubiertas con óxidos/ hidróxidos.

Una vez que la superficie receptora está cubierta con incrustaciones de sílice, se deposita sílice adicional hasta formar una película.

Cuando la concentración de sílice es mayor a 100- 200 ppm, la sílice disuelta puede polimerizar para formar partículas coloidales, las cuales crecen y se aglomeran, hasta formar grandes partículas de sílice que finalmente precipitan, a este tipo de deposición se le conoce como deposición por aglomeración (Demadis y Neofotistou, 2004).

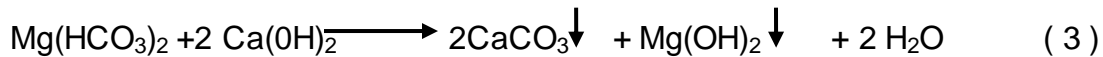
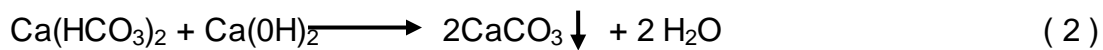
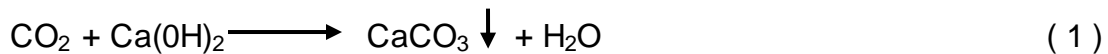
### 2.3.2 Soluciones convencionales y avanzadas para remoción de sílice

Debido a la necesidad de dar un tratamiento al agua proveniente de las torres de enfriamiento para su reúso, y también prevenir los problemas antes mencionados se han implementado diversos procesos de tratamiento de agua, algunos de estos se describen a continuación:

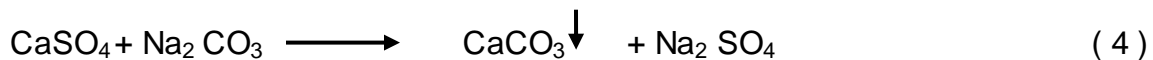
➤ **Ablandamiento cal-carbonato**

En la práctica, la remoción de sílice es usualmente parte de un proceso de ablandamiento con cal-bicarbonato sódico en el cual se reducen las concentraciones de calcio, magnesio y alcalinidad. Este proceso está considerado como un método efectivo para la remoción de sílice disuelto, aunque su propósito principal es controlar la dureza del agua (Sheikholeslami et al., 2001).

Las reacciones involucradas en el proceso de ablandamiento son las siguientes:



La dureza sin carbonatos de calcio puede precipitarse con la adición de carbonato de sodio:



En el proceso de ablandamiento, la concentración de sílice será reducida por la precipitación del hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ). La precipitación de hidróxido de magnesio y carbonato de calcio es dependiente del pH, la solubilidad del hidróxido de magnesio disminuye abruptamente cuando el pH es mayor a 9.5. Aunque la solubilidad de la sílice aumenta con el incremento de pH, la solubilidad de los silicatos alcalinos disminuye con éste. El pH óptimo para la adsorción de sílice en  $\text{Mg(OH)}_2$  se encuentra en el intervalo (10-11), el cual coincide con las condiciones creadas mediante el proceso de ablandamiento (Roques, 1996). A continuación se muestra la tabla de remoción de contaminantes con precipitación con cal.

Tabla 2.4. Remoción de contaminantes mediante precipitación con cal

| Parámetro    | Porcentaje de remoción |
|--------------|------------------------|
| Dureza total | 81%                    |
| Sílice       | 50%                    |

➤ **Coagulación – Floculación**

El método más común para eliminar sólidos suspendidos y los coloides es la coagulación química que es un proceso donde se genera la formación de partículas sedimentables a partir de puentes químicos o enlaces fisicoquímicos; a partir de esto, las partículas se aglomeran, aumentando el tamaño, peso y velocidad de sedimentación.

La coagulación es la adición y mezcla rápida de un coagulante para promover la desestabilización de coloides y de sólidos suspendidos finos, logrando la precipitación de tales partículas desestabilizadas. Los coagulantes que se utilizan para agua son los siguientes:

- Sales de Aluminio: Forman un flóculo ligeramente pesado. Las más conocidas son (Sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ) que en la práctica se denomina como alumbre; Sulfato de aluminio amoniacal, por su bajo costo y el Aluminato Sódico.
- Sales de Hierro: Se utiliza Cloruro Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) y los Sulfatos de Hierro (Férrico y Ferroso). Forman un flóculo más pesado y de mayor velocidad de asentamiento que con las sales de aluminio.
- Polímeros o polielectrolitos: Son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como ayudantes de la coagulación.

La floculación es la formación de aglomerados o flóculos con agitación lenta o delicada para formar flóculos de rápida sedimentación.

Este proceso es muy efectivo para remover sílice (tanto soluble como coloidal) mediante la coprecipitación con hidróxidos metálicos polivalentes. Sin embargo, no se sabe cuál es el mecanismo exacto por el cual el sílice es removido con estos hidróxidos.

La cantidad de hidróxido requerida para remover sílice incrementa con la concentración, pero no en una proporción directa. Se ha sugerido usar 4 moles de  $\text{Al}^{3+}$  por mol de sílice disuelto a un pH entre 8 y 9 (Roques, 1996). Se requiere una menor cantidad de  $\text{Al}^{3+}$  para remover sílice coloidal que para remover la misma cantidad de sílice disuelto (cerca de 1 mol de  $\text{Al}^{3+}$  para remover 40 moles de sílice coloidal, el pH óptimo para este caso se encuentra entre 4.1 y 4.7 (Roques, 1996).



➤ **Intercambio iónico**

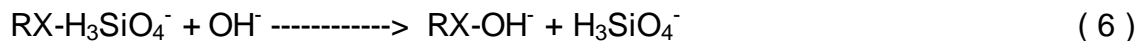
El intercambio iónico es una operación basada en la transferencia de materia líquido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase líquida a la sólida, por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales.

Las resinas de intercambio iónico del tipo aniónicas de base fuerte pueden remover efectivamente la sílice monomérico y de acuerdo a la ecuación 5; sin embargo, la sílice coloidal no puede ser removida mediante este proceso (Resintech, 1999). Estas resinas de intercambio iónico pueden remover parcialmente la sílice coloidal a través de un mecanismo de filtración, pero no son muy eficientes en este proceso.

Resina de base fuerte



Las resinas de base fuerte son comúnmente regeneradas con sosa cáustica mediante la reacción:



La remoción se lleva a cabo a pH básico, a través de un intercambio entre iones silicato e iones hidroxilo (Ben *et al.*, 2004).

➤ **Ósmosis inversa**

La tecnología de ósmosis inversa se basa en la utilización de una bomba de alta presión para forzar una porción del agua de alimentación a través de una membrana semipermeable, eliminando sustancias disueltas presentes en el agua. La cantidad de agua de producto es función directa de la presión del agua de alimentación y la temperatura (Resintech, 1999).

Los sistemas de ósmosis inversa pueden ser usados para la remoción de sílice. El mecanismo de remoción es hiperfiltración, pero también puede estar relacionado con el grado de ionización de sílice, ya que se ha observado que la eficiencia de remoción es mayor a pH elevado (debido a que la sílice monomérica se encuentra ionizada).

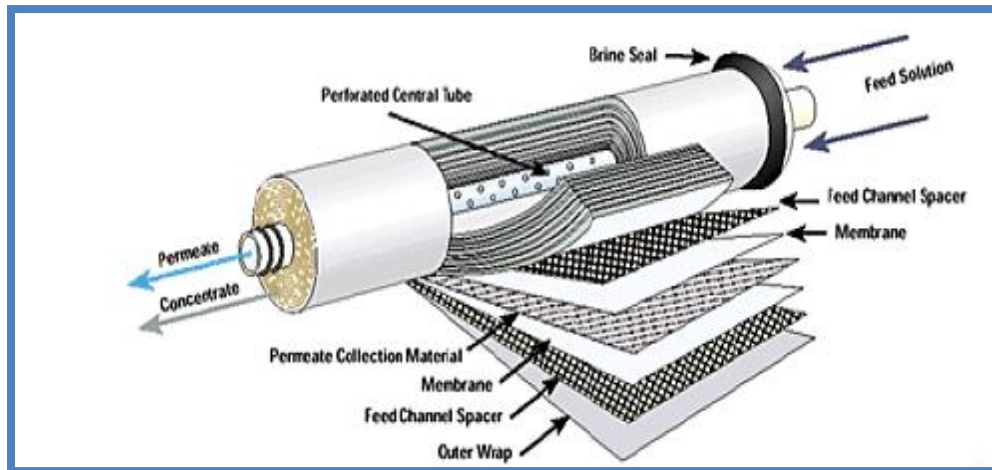


Fig. 2.8. Equipo de ósmosis inversa

Los sistemas de osmosis inversa remueven una cantidad inferior de sílice reactiva que las resinas de intercambio iónico, sin embargo son muy superiores con respecto a la remoción de sílice coloidal (Resintech, 1999).

### ➤ Ultra-alta cal

El tratamiento por ultra alta cal es una modificación innovadora del ablandamiento por cal tradicional, este proceso puede remover la mayoría de los agentes depositantes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ), sin importar la calidad del agua a tratar. El elemento esencial en el proceso de ultra-alta cal es mantener una alta concentración de calcio y alto pH, lo cual resulta en la remoción de sílice mediante precipitación de silicato de calcio ( $\text{CaH}_2\text{SiO}_4$ ); el elevado valor de pH necesario en este proceso (11-12) es alcanzado mediante la adición de cal en exceso (Batchelor *et al.*, 1991).

➤ **Electrocoagulación**

La electrocoagulación es un proceso que aplica los principios de la coagulación–floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que replazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional (Hola *et al.*, 1999).

La electrocoagulación tiene la capacidad de remover una gran cantidad de contaminantes, entre los cuales se encuentran: sólidos suspendidos, grasas, aceites, metales pesados, productos derivados de petróleo, flúor, nitritos, entre otros. Se ha demostrado que este proceso es eficiente para la remoción de sílice, ya sea utilizando electrodos de aluminio o de hierro, sin embargo, el proceso tiene una mayor eficiencia de remoción de sílice con electrodos de aluminio.

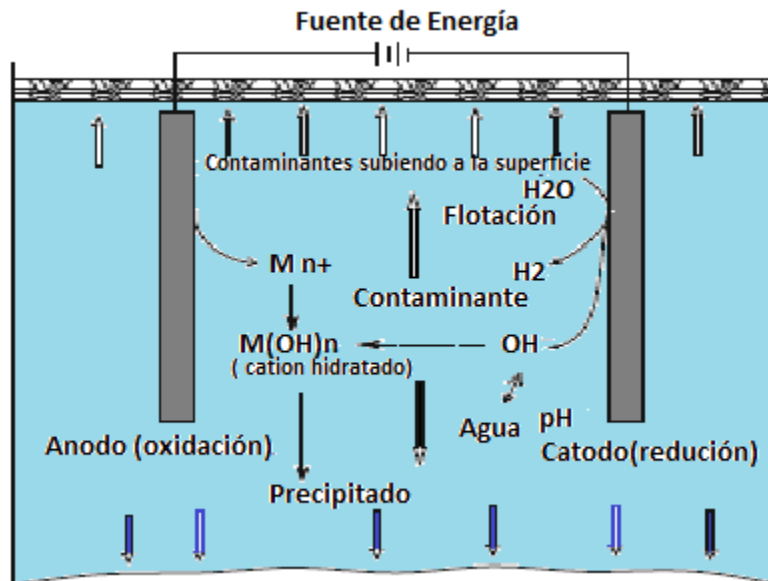


Fig.2. 9. Esquema de electrocoagulación

**2.3.3 Ventajas y desventajas de los procesos para remoción de sílice**

Debido a los diversos procesos para la remoción de sílice del agua de purga de las torres de enfriamiento se analizan las ventajas y desventajas.

| Proceso de remoción                | Ventajas                                                                                                                                                                   | Desventajas                                                                                                                                 |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ablandamiento cal-carbonato</b> | Alta eficiencia en la remoción de sílice monomérico.                                                                                                                       | Se requiere pH entre 11 y 12 para el agua a tratar<br>Suministro continuo de químicos.<br>Generación importante de lodos.                   |
| <b>Coagulación-Floculación</b>     | Alta eficiencia de remoción de sílice monomérico y coloidal (4 moles de $Al^{3+}$ por mol de sílice monomérico, un mol de $Al^{3+}$ por cada 40 moles de sílice coloidal). | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de una excesiva cantidad de lodos</li> <li>• Suministro continuo de químicos</li> </ul> |
| <b>Intercambio iónico</b>          | Remoción de sílice disuelta en una alta eficiencia.                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No remueve sílice coloidal</li> <li>• Costo elevado</li> </ul>                                     |
| <b>Ósmosis inversa</b>             | Remoción de sílice coloidal                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensuciamiento de membranas</li> <li>• Alto costo de inversión y mantenimiento</li> </ul>           |

|                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ultra alta cal</b></p>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de la mayoría de los agentes depositantes, incluyendo sílice</li> <li>• Proceso económico, debido al precio de la cal</li> </ul>                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes instalaciones</li> <li>• Generación de una gran cantidad de lodos.</li> <li>• Suministro continuo de químicos</li> </ul> |
| <p><b>Electrocoagulación</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lodos más deshidratados que los producidos mediante coagulación convencional</li> <li>• Mayor eficiencia para desestabilizar pequeñas partículas coloidales</li> <li>• Facilidad de automatización</li> <li>• Precio competitivo</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de energía eléctrica</li> <li>• Pasivación de los electrodos</li> </ul>                                                      |

#### 2.4 Aspectos fundamentales de la electrocoagulación

Los electrolitos son sustancias que careciendo de carácter metálico, en disolución son capaces de conducir corriente eléctrica. No todos los electrolitos presentan la misma resistencia al paso de la corriente eléctrica. La conducción de corriente eléctrica por una disolución electrolítica va acompañada de cambios químicos que tienen lugar en los extremos del conductor introducido en la disolución. Estos cambios dependen del polo de la corriente.

Se define la electrolisis como la reacción química de descomposición del electrolito al paso de la corriente continua cuando introducimos dos electrodos a

una solución electrolítica y aplicamos una diferencia de potencial continua entre ellos. La reacción química producida por la corriente eléctrica tiene lugar en la superficie de los electrodos que son los conductores metálicos introducidos en la solución.

La conductividad eléctrica de la disolución electrolítica y las reacciones químicas que se producen en los electrodos, son fenómenos perfectamente relacionados entre sí. Esta relación fue deducida por Faraday de forma experimental y expresada mediante las leyes que llevan su nombre, las cuales cuantifican los procesos electrolíticos, siendo:

La cantidad de electrólito descompuesto en una celda electroquímica al paso de la corriente, es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado a través de dicha solución ( Chen, 2005).

#### **2.4.1 Factores que afectan el proceso de electrocoagulación**

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación discutiremos aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad del mismo.

##### **Densidad de corriente**

La densidad de corriente es muy importante en el proceso de electrocoagulación porque es el único parámetro operativo que se puede controlar directamente.

Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio.

La densidad de corriente (  $j$  ) es la corriente que pasa por los electrodos dividida entre el área efectiva de los mismos [Ecuación 2]. Este parámetro se puede controlar fácilmente variando la corriente administrada.

$$j = \frac{I}{A} \quad (2)$$

Dónde:

- $j$  = Densidad de corriente (Amperes/ m<sup>2</sup>)
- $I$  = Corriente (Amperes)
- $A$  = Área de los electrodos (m<sup>2</sup>)

Mientras mayor sea la densidad de corriente aplicada mayor será la producción de burbujas en los electrodos. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad iones de Aluminio ( $Al^{3+}$ ) o Hierro ( $Fe^{2+}$ ) liberados por los respectivos electrodos (Arango, 2005).

Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura (Villegas, 2009).

### **Conductividad**

Es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad, es un parámetro muy importante en la electrocoagulación, debido a que la conductividad impacta directamente en la cantidad de energía requerida en el proceso. La energía consumida por las celdas electroquímicas puede ser expresada como:

$$P = v I$$

Dónde:

P= Consumo de energía (watts)

v= Voltaje (volts)

I= Corriente (Amperes)

La ley de Ohm establece que:

$$v = R I$$

Donde

R = Resistencia (Ohm)

Usando estas relaciones es posible reescribir Ecuación como:

$$P = R I^2$$

La Ecuación muestra que reduciendo la resistencia en el electrolito, sin cambiar la corriente, es posible disminuir el consumo de energía requerido.

La resistencia disminuye de manera proporcional a medida que la conductividad aumenta, por lo tanto, la adición de una cierta cantidad de electrolito reduce la cantidad de energía requerida en un sistema de electrocoagulación, reduciendo los costos de operación (Nielson y Smith, 2005).

Se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$ , pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de  $\text{Cl}^-$  alrededor del 20%, mantener constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad así como la densidad de corriente constante para producir una disminución en el voltaje aplicado (Arango 2005, Aristizábal y Bermúdez 2007).

### **Temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a  $60^\circ\text{C}$ , punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo (Aristizábal y Bermúdez 2007).

### **pH**

El efecto del pH del agua a tratar durante la electrocoagulación se ve reflejado en la eficiencia de corriente y en la solubilidad de los hidróxidos metálicos. Se ha encontrado que la mayor eficiencia de remoción de sílice utilizando electrodos de aluminio se logra a un pH cercano a 7 (Whipple *et al.*, 2007).

El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.



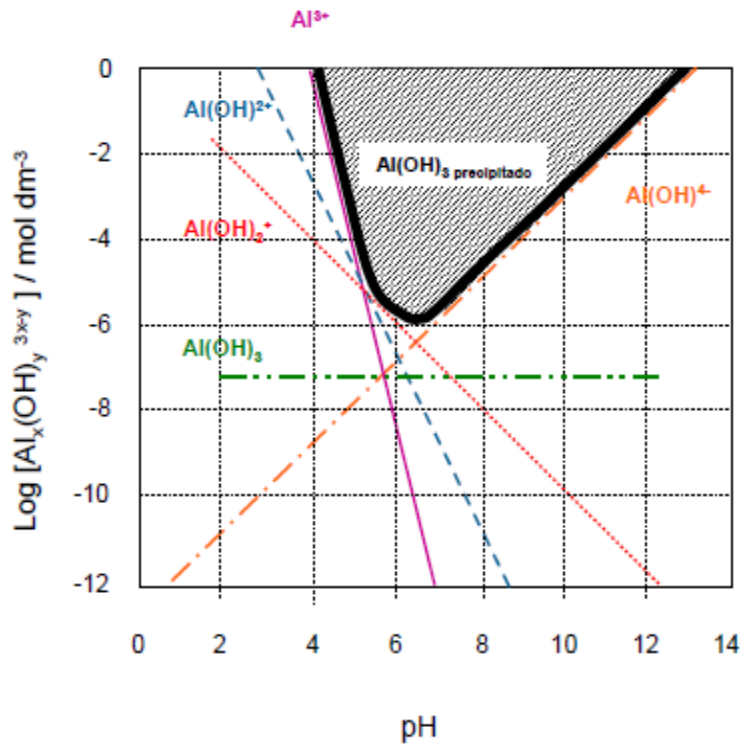


Fig. 2. 10- Diagrama de solubilidad de Al(OH)<sub>3</sub> considerando sólo especies de aluminio monoméricas. (Holt et al, 2005)

En esta figura se representa el intervalo de pH en la cual se obtiene una mejor solubilidad del hidróxido de aluminio. Los complejos de aluminio en su forma catiónica son adsorbidos en las partículas neutralizándolas (Bensadok et al, 2008).

### Área superficial

El área superficial tiene relación directamente proporcional con el rendimiento del espacio y del tiempo, por lo cual se recomienda utilizar electrodos con medios granulados, porosos o fibrosos.

### Material del electrodo

Deben tener resistencia química y buenas propiedades electroquímicas por lo cual el cátodo debe contar con elevados sobre-potenciales que favorezcan las reacciones de descomponían del agua y permitan obtener elevados rendimientos electroquímicos.

Se pueden utilizar láminas de aluminio, hierro, acero inoxidable, cobre, entre otros, la eficiencia de los electrodos depende de sus potenciales estándar de reducción.

Sin embargo en términos económicos y de disponibilidad las láminas de aluminio y de hierro son las más utilizadas en los procesos de electrocuagulación (Aristizábal y Bermúdez 2007, Moreno 2002, Vergnes 2008).

## Presencia de electrolitos

La presencia de algunos iones, como por ejemplo el sulfato, pueden incrementar el consumo de energía eléctrica y disminuir la eficiencia del proceso de electrocoagulación (Trompette *et al.*, 2008), esto debido a que los iones sulfato pueden preservar la capa de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que se forma cuando el aluminio se expone a la atmosfera, lo cual complica la oxidación del aluminio para producir iones  $\text{Al}^{3+}$ . Esto implica un mayor consumo de energía para realizar la oxidación, por otra parte, se ha encontrado que los cloruros o los iones de amonio pueden ser benéficos para el proceso de electrocoagulación, ya que los cloruros poseen una gran capacidad corrosiva y pueden romper la capa de alúmina mediante “corrosión por picadura”, por otra parte, los iones amonio pueden regular el pH, mientras que los iones de sodio no tienen ningún efecto en el proceso (Trompette *et al.*, 2008). Los efectos perjudiciales que ocasionan los iones sulfatos pueden ser frustrados mediante el uso de sales de amonio debido al efecto amortiguador que estas confieren, también se ha sugerido que se puede llevar a cabo la electrocoagulación en presencia de iones sulfato siempre y cuando la relación  $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^-$  sea mayor a 1/10.

### 2.4.2 Reactores utilizados en el proceso de electrocoagulación

En comparación con un reactor químico convencional, el reactor electroquímico (o celda electroquímica) puede ser tremendamente interesante desde el punto de vista de su concepción, ya que en él, tanto la transferencia de carga, como los procesos químicos derivados de la misma y como, especialmente, la transferencia de materia, juegan un papel fundamental.

Así, existen muchos tipos de celdas electroquímicas empleadas en el proceso de electrocoagulación, y pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios:

#### ➤ Dirección del flujo de agua

En función de la dirección del flujo en la celda, los reactores se pueden clasificar en unidades de flujo horizontal y vertical (Figura 2.11). Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrógeno generados en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente.

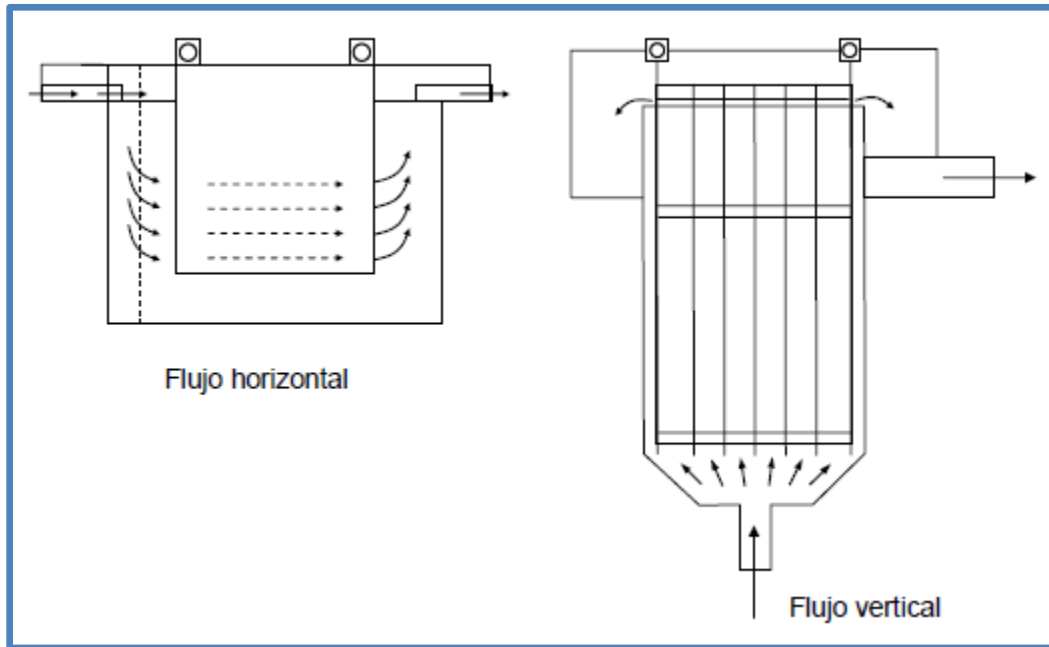


Fig.-2.11 Unidades de electrocoagulación de flujo horizontal y vertical

➤ **Modo de circulación**

en función del modo de circulación del agua a tratar entre los electrodos, se pueden encontrar celdas de canales múltiples o bien de un sólo canal, tal y como se observa en la Figura 2.12. La ventaja de las celdas de canales múltiples se encuentra en la sencillez de su disposición. Sin embargo debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición puede favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos.

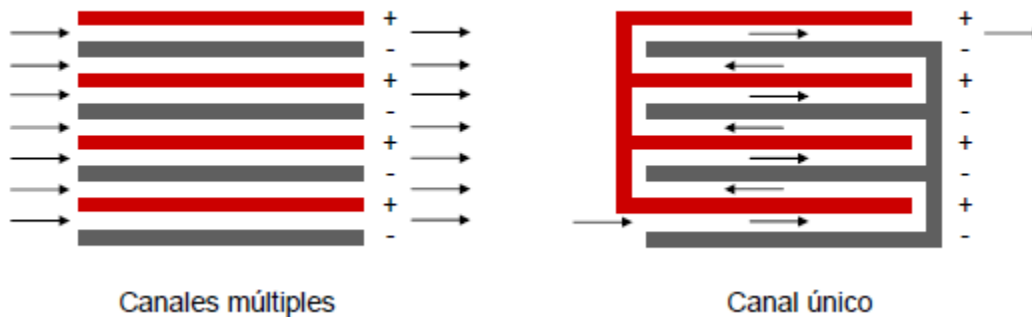


Fig.-2.12. Unidades de electrocoagulación con canales múltiples y únicos

➤ **Tipo de conexión eléctrica**

De acuerdo con el tipo de conexión eléctrica, los reactores pueden ser clasificados en monopolares y bipolares (Figura 2.13). La configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño.

Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares (Jiang, 2002), y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos.

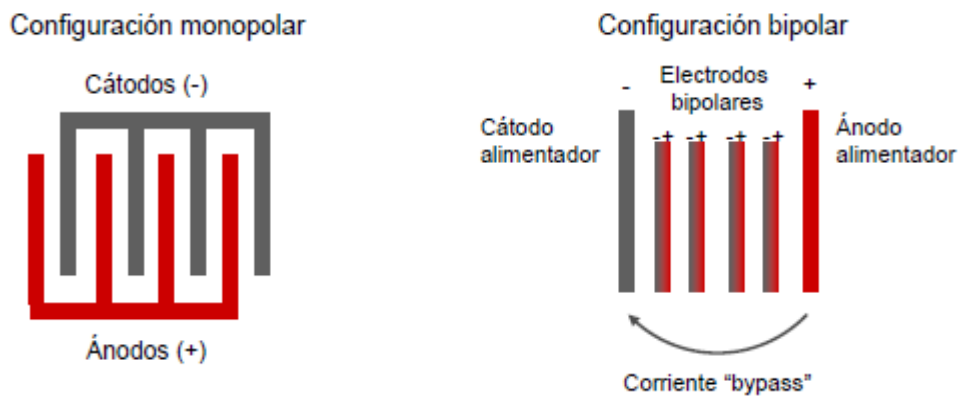


Fig.- 2.13. Disposición de los electrodos en modos monopolar y bipolar

➤ **Finalidad de la celda**

En el diseño de procesos de electrocoagulación (y tal vez sea el más característico dentro de esta aplicación, ya que los demás son comunes al del resto de tecnologías electroquímicas) es la finalidad del reactor.

Esta puede ser simplemente la dosificación de agente coagulante, o bien puede ser más ambiciosa e incluir el movimiento de contaminantes (electrofloculación) o incluso llegar a favorecer el proceso de flotación mediante la utilización del oxígeno y el hidrógeno generados respectivamente en los ánodos y cátodos de la instalación (electroflotación).

Con estos requisitos, existen numerosos prototipos de reactor de electrocoagulación. La celda de la Figura 2.13 utiliza un diseño de tipo cilíndrico. Este consta de cuchillas raspadoras dentro del cilindro con objeto de evitar

problemas de atascamiento, y los electrodos se sitúan en los espacios abiertos entre los dientes del peine rascador.

Una alternativa al diseño cilíndrico se muestra en la Figura 2.14 donde los electrodos consisten en barras, y un Venturi se sitúa en el centro del cilindro para conseguir una buena mezcla entre el agua residual y el agente coagulante generado. (Chen et al., 2000a) en el que se promueve la electroflotación mediante el uso apropiado de las microburbujas generadas en los electrodos.

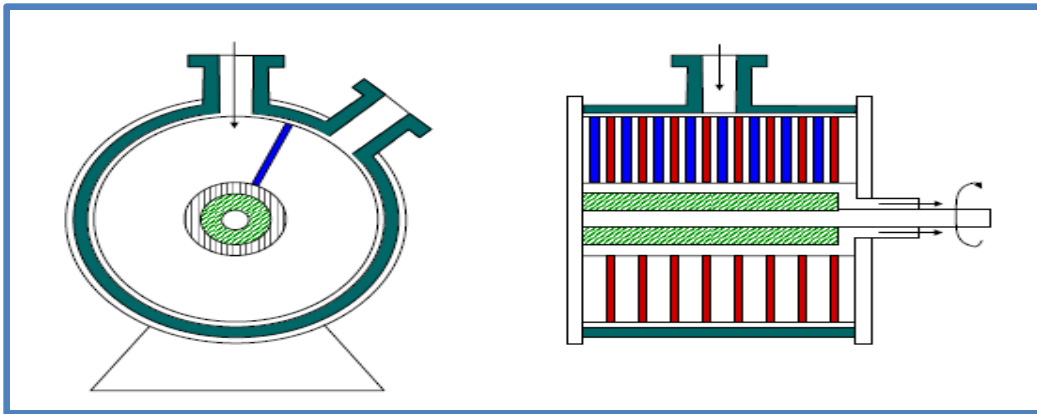


Fig.-2.14. Unidad de electrocuagulación con electrodos cilíndricos

Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación, uno de los más populares es el tipo filtro prensa, está formado por una unidad de cobertura en forma de caja con un ánodo, un cátodo y una membrana como se muestra en la Figura 2.15 Este sistema hace que su operación y mantenimiento sea relativamente simple (Guohua, 2004).

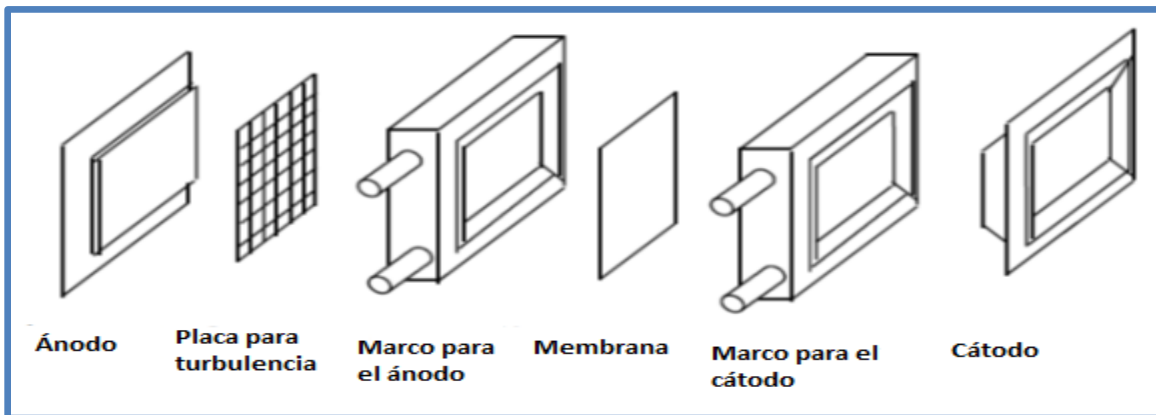


Fig.-2.15. Reactor tipo filtro prensa

### 2.4.2.1 Diseño y operación de un reactor en electrocuagulación

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar o aspectos que involucren disminución de zonas muertas o cortos circuitos.

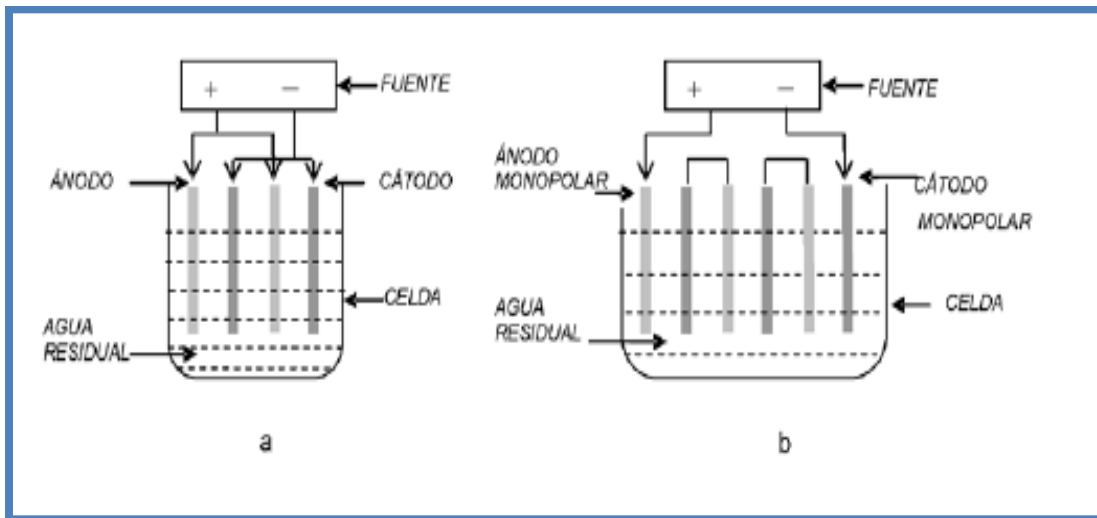


Fig. 2.16 Reactores para electrocoagulación tipo batch:(a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.

Analizando el reactor tipo batch, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas, una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación, existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de electroflotación.

Estas combinaciones de técnicas de separación con el proceso de electrocoagulación se pueden llevar a cabo integrando ambas tecnologías en el diseño del reactor o se pueden presentar en unidades separadas. Es importante señalar que la combinación de estas tecnologías y su diseño dependen en gran medida de las propiedades y características que tenga el agua a tratar y sus contaminantes. Es, además, importante considerar el uso que se le dará al efluente.

*Gradiente de mezcla en el reactor*

Es deseable que exista un mezclado rápido durante la coagulación para dispersar los agentes coagulantes uniforme y rápidamente a través de todo el volumen del reactor antes que los precipitados coloidales se formen; por tal motivo, se recomiendan gradientes altos durante el proceso de coagulación (Amirtharajah *et al.*, 1991).

En los reactores a flujo pistón con la configuración hidráulica de la figura 2.12, la energía de mezclado se disipa mediante la pérdida de carga debido a cambios en la dirección y turbulencia del caudal, ensanchamientos o contracciones en diversas secciones y fricción en tramos rectos.

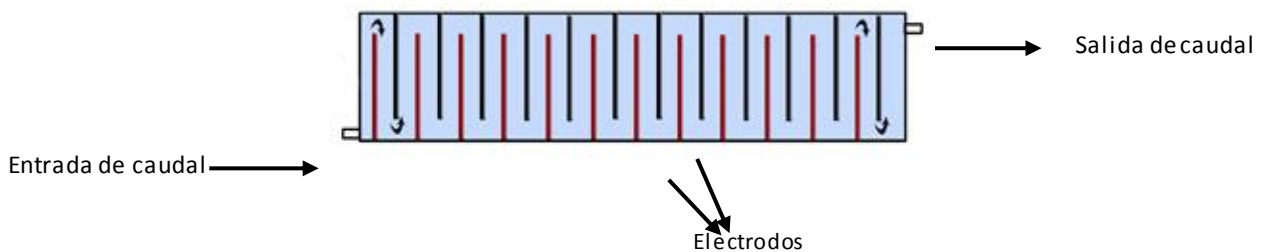


Figura 2.17 Reactor de electrocoagulación a flujo pistón

Para reactores en los cuales la energía de mezclado se disipa mediante una pérdida de carga, la potencia disipada es igual al producto de la pérdida de carga por el caudal.

$$P = \Delta H \cdot g \cdot Q \cdot \gamma$$

Análisis dimensional:

$$watt = m \cdot \frac{m}{s^2} \cdot \left( \frac{m^3}{s} \right) \cdot \frac{Kg}{m^3} = \frac{Kg \cdot m^2}{s^3} = watt$$

Dónde:

P= Potencia (watts)

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/s)

γ = Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

ΔH= Perdida de carga (m)

g = gravedad =9.8 (m/s<sup>2</sup>)

y después se tiene :

$$G = \sqrt{\frac{\Delta H \cdot g \cdot \gamma}{\mu \cdot \tau}}$$

Análisis dimensional:

$$s^{-1} = \sqrt{\frac{m \cdot \frac{m}{s^2} \cdot \frac{Kg}{m^3}}{\frac{Kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{s}{m^2} \cdot s}} = \sqrt{\frac{1}{s^2}} = s^{-1}$$

Donde

G= Gradiente (s<sup>-1</sup>)

τ= tiempo de residencia (s)

Como ya se mencionó anteriormente, los valores recomendados del gradiente de mezcla para coagulación se encuentran entre 300 -1000 s<sup>-1</sup> (Letterman, 1999).



### 2.4.3 Electrocoagulación con electrodos de aluminio

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico como sulfato de aluminio o cloruro férrico, si no que el agente coagulante (típicamente  $Al^{3+}$  o  $Fe^{3+}$ ) es suministrado por ánodos de sacrificio mediante la aplicación de una corriente eléctrica. ha sido una tecnología emergente desde 1906, con la primera patente concedida en Estados Unidos. Problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos generaron tropiezos para que la industria adoptara esta técnica. Aunque no es una tecnología nueva, ha sido poco estudiada y desarrollada. Pese a esto, ha logrado alcanzar un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica con mayores ventajas comparativas con respecto a las tecnologías tradicionales de tratamiento.

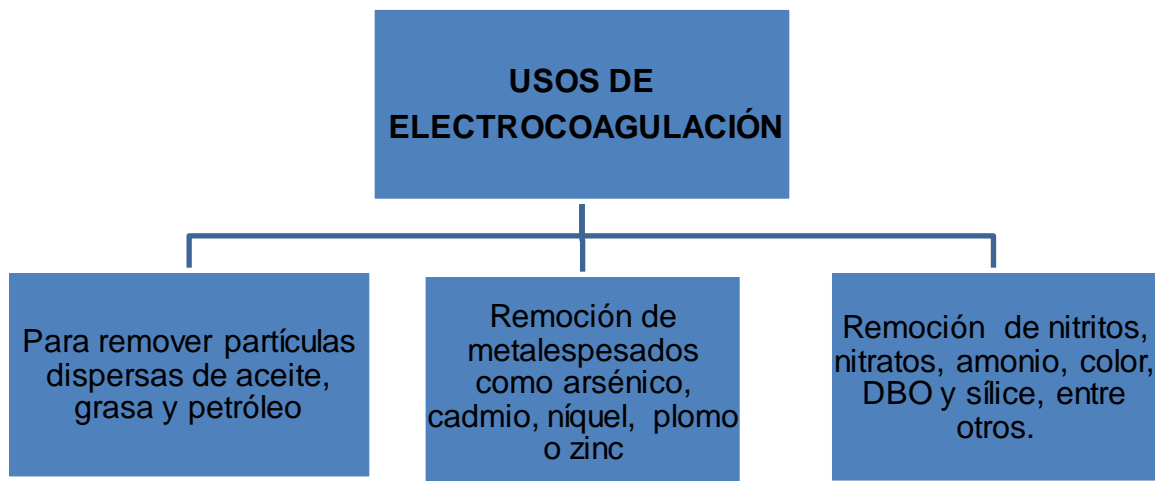


Fig. 2.18 Usos del proceso de electrocoagulación

El proceso involucra un reactor electroquímico, el cual es en esencia una celda electroquímica, donde un ánodo es usado para dosificar un agente coagulante al agua contaminada, mientras que en el cátodo se produce gas hidrógeno e iones hidroxilo.

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (Whipple *et al.*, 2007).

Usualmente se usan placas de aluminio o de hierro como electrodos en el proceso de electrocoagulación, sin embargo, se ha reportado en la literatura una mayor remoción de sílice cuando se utilizan electrodos de aluminio.

Las reacciones químicas involucradas cuando se utilizan electrodos de aluminio son (Chen, 2004):

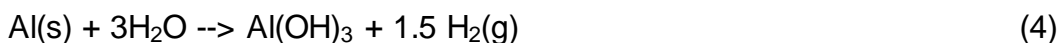
En el ánodo:



En el cátodo:



El ánodo y el cátodo se disuelven químicamente de acuerdo a:



Si existen cloruros presentes se puede dar la reacción (ánodo y cátodo) :



En condiciones alcalinas, la reacción global sería:



Los iones de aluminio desestabilizan y agregan los sólidos suspendidos permitiendo que ocurra floculación, este proceso de neutralización de cargas es similar a la neutralización convencional en la coagulación química. Por otra parte,

las consecutivas reacciones de hidrólisis pueden generar varias especies de hidróxidos monoméricos, tales como  $\text{Al(OH)}^{2+}$ ,  $\text{Al(OH)}_2^+$ ,  $\text{Al(OH)}_3$ ,  $\text{Al(OH)}_4^-$ ; las reacciones de hidrólisis son las siguientes:



Estas especies, además de desestabilizar las cargas de los sólidos suspendidos, pueden producir polímeros coagulantes como  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ , los cuales pueden adsorber una gran cantidad de contaminantes.

Los flóculos obtenidos mediante electrocoagulación tienen una menor cantidad de agua que los obtenidos mediante coagulación química, además de ser más grandes, por lo tanto son más resistentes al rompimiento (Nielson y Smith, 2005).

#### **2.4.4 Ventajas y desventajas que se presentan en el proceso de electrocoagulación**

Comparado con la coagulación convencional, la electrocoagulación tiene muchas ventajas, entre las cuales destacan:

- ✓ Los costos de operación son menores en comparación con los procesos convencionales usando polímeros
- ✓ Requiere de equipos simples y de fácil operación
- ✓ Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos
- ✓ Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- ✓ Mayor eficiencia para desestabilizar pequeñas partículas coloidales.
- ✓ Facilidad de automatización.
- ✓ Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada
- ✓ Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- ✓ El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.

Las principales desventajas del proceso de electrocoagulación son:

- ✓ Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- ✓ El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

#### 2.4.4.1 Pasivación

Dentro de las principales desventajas de la electrocoagulación se encuentra la pasivación de los electrodos, ya que es una variable que afecta significativamente las eficiencias de remoción y costos de operación.

La pasivación es un proceso que limita la emisión de iones metálicos, debido a la formación de una capa de productos oxidados sobre la superficie del ánodo. Esto aumenta el consumo de energía eléctrica y por lo tanto aumenta el costo de operación. La pasivación puede ser consecuencia de la formación de una capa de pequeño espesor de productos oxidados sobre la superficie del electrodo, o bien por la formación de capas monoatómicas de  $O_2$  sobre la superficie del cátodo (Ríos *et al.*, 2005).

Cada metal presenta un determinado umbral de potencial y pH en donde los iones que entran a la solución pueden ser solubles y en tal caso no se presenta la pasivación; sin embargo cuando los iones liberados no son solubles, la capa de hidróxidos puede presentarse con facilidad.

#### *Mecanismos de pasivación*

En la mayoría de los casos prácticos parece bien establecido que la pasividad se mantiene por una película superficial, probablemente de óxido, o tal vez de algún otro compuesto. En todos estos casos parece tratarse de una película tridimensional de espesor definido.-

Lo que no parece totalmente aclarado es el mecanismo de transición del estado activo al estado pasivo. En ciertos casos (Ag en Cl, Pb en  $SO_4$ ), se sabe que se forman núcleos del producto pasivante que se extienden y llegan a recubrir por completo la superficie metálica. Sin embargo, en un gran número de casos, en particular los del hierro y el acero inoxidable, la explicación de la pasivación como proceso de nucleación y crecimiento de óxido no parece suficiente por la rapidez del proceso; se cree que en tales casos la pasivación aparece por formación de una monocapa de óxido o hidróxido del metal en disolución.

### *Potencial de pasivación*

La pasivación aparece a un potencial determinado, el potencial de Flade, que varía según el metal y el medio corrosivo considerado. Se han hecho muchos estudios para relacionar

el valor de este potencial con el mecanismo de pasivación. Se cree que el potencial de Flade varía con el pH de las soluciones. El hecho de obtener la misma dependencia del potencial de Flade con un pH en diferentes metales sugiere estar en presencia de un electrodo del tipo metal / óxido. La reacción que se supone ocurre en dicho electrodo puede ser:



Este fenómeno ha limitado el uso de la electrocoagulación como un proceso para el tratamiento de aguas.

### *Estrategias para controlar la pasivación*

Se han propuesto algunos métodos para controlar la pasivación, entre los cuales se encuentran:

- Cambiar la polaridad de los electrodos
- Introducir agentes inhibidores
- Incrementar el caudal (limpieza hidromecánica)

Limpieza mecánica de los electrodos

## 2.5 Tipos de corriente utilizada en el procesos de electrocoagulación

### 2.5.1 Corriente continua

La corriente directa (CD) o corriente continua (CC) es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado, moviéndose del polo negativo hacia el polo positivo de una fuente de fuerza electromotriz (FEM), tal como ocurre en las baterías, las dinamos o en cualquier otra fuente generadora de ese tipo de corriente eléctrica.

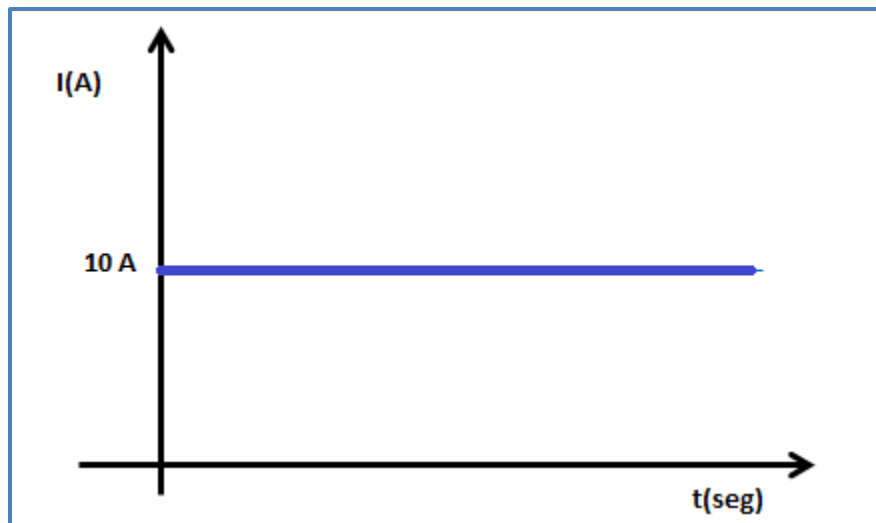


Fig.- 2. 19. Diagrama de corriente continua

### 2.5.2 Corriente pulsada

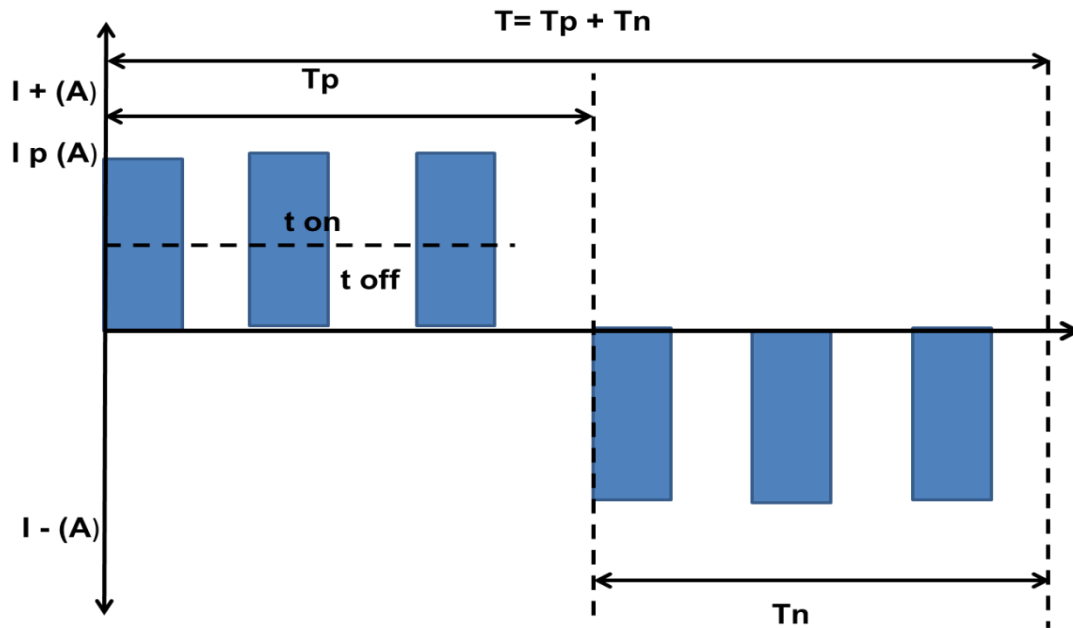
Es una corriente continua que sufre cambios regulares de magnitud a partir de un valor constante. Los cambios pueden ser en intensidad o en tensión. Estos cambios o pulsos son siempre en el mismo sentido de la corriente.

Afortunadamente, la aparición de la técnica pulso trajo un impacto significativo en el proceso electroquímico, no sólo podría salvar el impacto en el proceso, sino también se puede ahorrar energía, ya que es muy eficiente. El desarrollo de la electrocoagulación pulsada (PE) fue explorada en los últimos años. PE utilizando

encendido-apagado-encendido como modo de suministro de energía para la electrólisis, bajo la acción del campo eléctrico aplicado. En comparación con la CE, el electrodo opera de manera intermitente para promover la difusión de la superficie del electrodo, evitando así el fenómeno de polarización (Guohua Chen, 2000).

### 2.5.2.1 Perfiles de corriente pulsada

a)



Dónde:

$I$  = Intensidad de corriente

$I_p$  = Intensidad de corriente de pico

$I_m$  = Intensidad de corriente media

$T$  = Periodo total

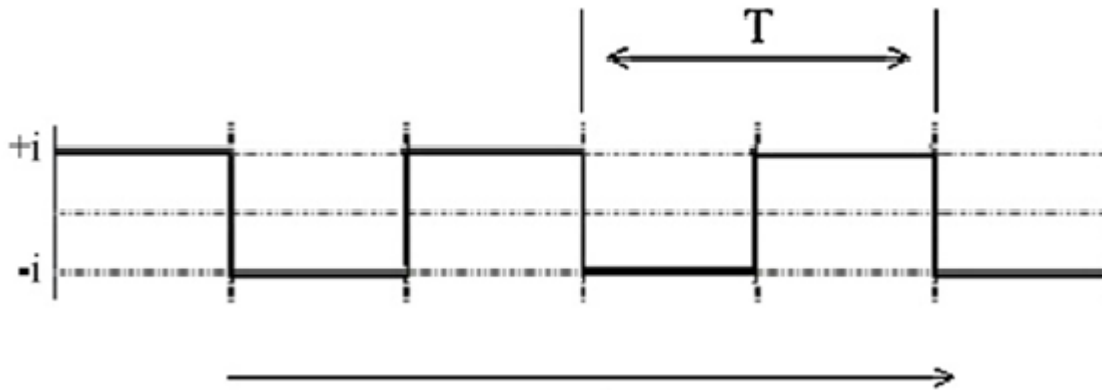
$T_n$  = Periodo negativo

$T_p$  = Periodo positivo

$t_{on}$  = tiempo de encendido

$t_{off}$  = tiempo de apagado

b)



## 2.6 Parámetros para la evaluación de corriente pulsada

### 2.6.1 Dosis de Aluminio teórico

La cantidad de  $Al^{3+}$  o  $Fe^{2+}$  suministrada electroquímicamente puede ser calculada mediante la ley de Faraday, la cual establece que “la cantidad de sustancia que sufre oxidación o reducción en cada electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la celda electroquímica” (Whitten y Davis, 1998) esto es:

$$m \text{ (mol)} = \frac{I \left( \frac{\text{coulomb}}{\text{s}} \right) t \text{ (s)}}{nF \left( \frac{\text{coulomb}}{\text{mol}} \right)} \quad (1)$$

Dónde:

m = moles de sustancia oxidada o reducida en los electrodos (mol)

I = Corriente [ampere (coulomb/s)]

F= Constante de Faraday (96,500 coulomb/mol)

n = número de electrones involucrados en la reacción

t= tiempo (s)

Para poder utilizar la ecuación en un reactor de electrocoagulación con ánodos de aluminio a flujo pistón, se realizan las siguientes simplificaciones:



$$I = \frac{mnF}{t} \quad (2)$$

Por otra parte,

$$m(\text{mol}) = C \left( \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \cdot V (\text{L}) \quad (3)$$

Dónde: m= moles (mol)

C= concentración molar (moles/L)

V= volumen (L)

Combinando las ecuaciones 19 y 20 se obtiene:

$$I = \frac{CVnF}{t} \quad (4)$$

Debido a que el caudal  $Q = V/t$ , la ecuación se puede describir como:

$$I \left( \frac{\text{coulomb}}{\text{s}} \right) = C \left( \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) Q \left( \frac{\text{L}}{\text{s}} \right) nF \left( \frac{\text{coulomb}}{\text{mol}} \right) \quad (5)$$

Despejando C:

$$C = \frac{I}{QnF} \quad (6)$$

Con motivo de utilizar la ecuación anterior en unidades más prácticas ( $\text{mgL}^{-1}$  y  $\text{L/min}$  para C y Q respectivamente), se realizan las siguientes operaciones (considerando que  $\text{PM Al} = 27 \text{ g/mol}$  y  $n=3$ ):

$$C \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \text{Al}^{3+} = \frac{I \left( \frac{\text{coulomb}}{\text{s}} \right) \left( \frac{27 \text{ g}}{\text{mol}} \right) \left( \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}} \right) \left( \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} \right)}{Q \left( \frac{\text{L}}{\text{min}} \right) 3 \left( 96500 \frac{\text{coulomb}}{\text{mol}} \right)}$$

Por lo tanto,

$$C \text{ Al}^{3+} = \frac{I \left( \frac{\text{coulomb}}{\text{s}} \right)}{.1787 \left( \frac{\text{coulomb min}}{\text{mg s}} \right) Q \left( \frac{\text{L}}{\text{min}} \right)} \quad (7)$$

Dónde:

$C_{Al^{3+}}$  = concentración de  $Al^{3+}$  (mg/L)

Q= caudal (L/min)

Con la ecuación anterior se puede calcular la cantidad de corriente (I) necesaria, a un caudal determinado (Q), para dosificar el agua con una cantidad de  $Al^{3+}$  ( $C_{Al^{3+}}$ ) deseada.

Para el proceso de electrocoagulación de corriente pulsada de acuerdo con la ley de Faraday el tiempo de electrólisis determina la cantidad total de  $Al^{3+}$  producido durante el proceso electroquímico para evitar el alto consumo de energía y de materiales lo cual es importante conocer el tiempo óptimo para dicho proceso.

$$\Delta M = \frac{MI\theta t}{nF} \quad (8)$$

Donde  $\Delta M$  masa del metal (g), M peso molecular (g/mol) I es Intensidad de corriente (A),  $\Theta$  ciclo de trabajo de pulso, t es el tiempo (s), n número de moles (mol) y F es la constante de Faraday ( $F=96487$  C/mol).

### 2.6.2. Material de los electrodos

Usualmente se usa aluminio como ánodo, debido a que es el material más económico que provee cationes trivalentes, el hierro también provee cationes trivalentes después de la oxidación de  $Fe^{2+}$ , sin embargo, el hierro ha mostrado un desempeño inferior en la remoción de sílice (Whipple *et al.*, 2007).

Existen otros materiales económicos, los cuales liberan iones divalentes, sin embargo, este tipo de iones tienen una capacidad más baja para flocular contaminantes, los iones trivalentes tienen una mayor densidad de carga, lo cual les permite tener una mayor capacidad de adsorción (Nielson y Smith, 2005).

### 2.6.3 Eficiencia de corriente aplicada

Además del aluminio dosificado electroquímicamente mediante la aplicación de una corriente, también se puede liberar aluminio químicamente, la eficiencia de corriente mide la relación entre la cantidad de aluminio total producido y la cantidad de aluminio producida electroquímicamente (dosis teórica).

$$\text{Eficiencia de corriente} = \frac{\text{Al}^{3+} \text{ total producido}}{\text{Al}^{3+} \text{ Producido teóricamente}} \times 100 \quad (25)$$

### 2.6.4 Ciclo de trabajo

Se define como la relación de poder y tiempo para el tiempo de ciclo completo.

$$\theta = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} - t_{off}} \quad (26)$$

Donde

T = Tiempo de ciclo de pulso

$t_{on}$  = tiempo de encendido

$t_{off}$  = tiempo de apagado

y el valor de la intensidad media se calcula con la ecuación 27

$$I_m = I \times \theta \quad (27)$$

La cantidad de energía consumida en función del ciclo de trabajo es

$$Q = VIt\theta^2 \quad (28)$$

Donde Q es la cantidad de energía en (Wh), V es el voltaje en Voltios (V), I la intensidad en (A), t es el tiempo de reacción en (s) y  $\theta$  es el ciclo de trabajo del pulso.

### 2.6.5 Frecuencia del pulso

Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

Para calcular la frecuencia de un suceso, se contabilizan un número de ocurrencias de éste teniendo en cuenta un intervalo temporal, luego estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido.

Un método alternativo para calcular la frecuencia es medir el tiempo entre dos repeticiones (periodo) y luego calcular la frecuencia (f) recíproca del periodo esta manera:

$$f = \frac{1}{T} \quad (29)$$

Donde T es el periodo de la señal.

### 2.6.6 Distancia de los electrodos

La distancia entre los electrodos desempeña un papel muy importante en la electrocoagulación de corriente pulsada debido a que en ellos se realizan las reacciones electroquímicas así que pueden ayudar a mejorar la eficiencia o a reducirla es por ello que los electrodos deben de estar a pequeñas distancias (de 2cm a menos distancia) unos de otros para que se utilice menor energía y así puedan interactuar entre ellos.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Descripción general

En el presente capítulo se describe la metodología experimental que se realizó para el desarrollo de este proyecto. El diagrama de la Fig.- 3.1 muestra la secuencia de las actividades experimentales desarrolladas.

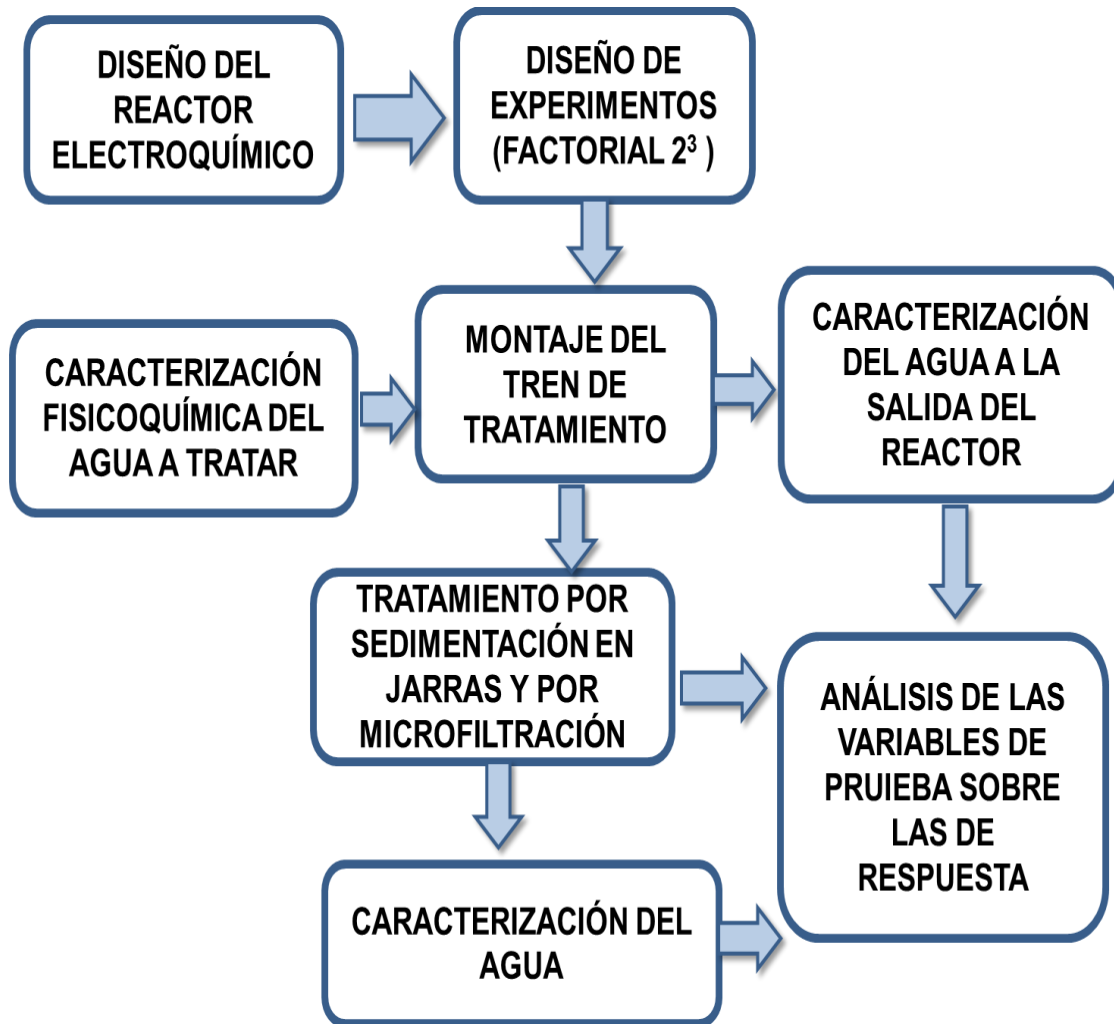


Fig.- 3.1 Esquema del desarrollo experimental

### 3.1.1 Diseño del reactor de electrocoagulación

Para la construcción del reactor electroquímico se consideraron como parámetros críticos la densidad de corriente y la velocidad entre las placas. Estos dos parámetros dependen a su vez de parámetros geométricos como la altura y el ancho de los electrodos, así como el espesor y la separación entre los mismos y de la corriente aplicada.

Criterios o parámetros para el diseño del reactor

Velocidad entre las placas  $> 0.04$  m/s

Densidad de corriente  $< 5$  A/m<sup>2</sup>

Espesor de los electrodos  $\sim 1$  mm.

El reactor electroquímico es un reactor cerrado en el que las dimensiones han sido seleccionadas tratando de tener condiciones hidráulicas favorables. En esta primera etapa se ha trabajado en la búsqueda de características físicas del reactor que permitan periodos de trabajo continuos.

#### CONEXIONES

Tabla 3.1 valores para las conexiones del reactor electroquímico

|                                                    | VALOR                          |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Resistencia inicial al paso de la corriente</b> | 1.5 V                          |
| <b>Longitud total del cable de conexión</b>        | 6.1 m                          |
| <b>Resistividad del material colector</b>          | 0.01775 ohm.mm <sup>2</sup> /m |
| <b>Área de sección nominal para cable 3-0</b>      | 3.31 mm <sup>2</sup>           |

MATERIAL DE LOS ELECTRODOS

Tabla 3.2 Material para los electrodos

| <b>Aluminio</b>                              |                        |
|----------------------------------------------|------------------------|
| <b>Coefficiente de Manning (0.012-0.013)</b> | 0.013                  |
| <b>Número de electrones intercambiados</b>   | 3                      |
| <b>Espesor de las placas</b>                 | 0.0012 m               |
| <b>Densidad del aluminio</b>                 | 2698 Kg/m <sup>3</sup> |

Condiciones de operación del reactor electroquímico

|                                    | <b>Valor</b>                 |
|------------------------------------|------------------------------|
| <b>Caudal (Q)</b>                  | <b>0.3 (L/min)</b>           |
| <b>Tiempo de residencia</b>        | <b>11 (min)</b>              |
| <b>Intensidad de corriente( I)</b> | <b>1.4 (A)</b>               |
| <b>Gradiente total x tramo</b>     | <b>9 (s<sup>-1</sup>)</b>    |
| <b>Conductividad</b>               | <b>800 (μS/cm)</b>           |
| <b>Volumen de líquido</b>          | <b>0.003 (m<sup>3</sup>)</b> |

Valores para la construcción del reactor

|                                                             | <b>Valor</b> |
|-------------------------------------------------------------|--------------|
| TRH real                                                    | 9.7020       |
| Gradiente de velocidad total en el tramo (s <sup>-1</sup> ) | 20.44        |
| Gradiente en canal (s <sup>-1</sup> )                       | 20.03        |
| Área anódica (m <sup>2</sup> )                              | 0.32         |
| Ancho cada tramo (m)                                        | 0.01         |
| Tiempo retención x tramo (min)                              | 11           |
| canales x tramo                                             | 60           |
| No. Placas x tramo                                          | 59           |
| Separación entre placas (m)                                 | 0.009        |
| velocidad en canales (m/s)                                  | 0.041        |
| velocidad en los pasos (m/s)                                | 0.03         |
| Separación en los pasos (m)                                 | 0.013        |

### Construcción del reactor electroquímico

Para la construcción del reactor con las características antes mencionadas se utilizó el material adecuado debido al diseño

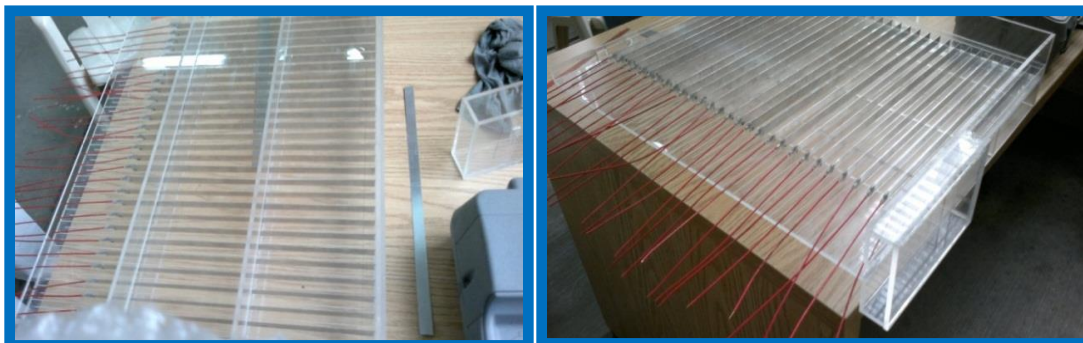


Fig.- 3.2 Ensamble de las placas de aluminio en forma paralela y cada una con su conexión a la caja de acrílico



Fig. 3.3.- Reactor electroquímico armado y acoplado a la fuente de poder programable

Se diseñó y construyó un reactor de electrocoagulación a flujo pistón (Figura 3.3) El reactor está compuesto por una caja de acrílico sellada herméticamente la cual contiene 59 pares de electrodos dispuestos como un floculador, el agua fluye a través de ellos en forma continua dentro del mismo. Las características de los



electrodos se presentan en la Tabla 3.2 . Es importante mencionar que se eligió construir el reactor de electrocoagulación con esta configuración debido a que según estudios de comportamiento hidráulico, esta configuración presenta menos problemas de zonas muertas y cortos circuitos (Piña et al., 2009) así como una mayor facilidad de adaptar los electrodos en la estructura misma del reactor.

El reactor de electrocoagulación funciona como una unidad de mezcla rápida. La pérdida de carga hidráulica que ocurre dentro del mismo debido a cambios en la dirección, turbulencia del caudal, ensanchamientos o contracciones en diversas secciones y fricción en tramos rectos provee la energía de mezclado necesaria para la coagulación.

La fuente de poder, es la que proporciona la energía para la generación de coagulante *in situ*, ofrece amplia flexibilidad en sus características de salida: corriente pulsada y directa con opción de cambio de polaridad a intervalos seleccionables que permiten el estudio del comportamiento de los electrodos del reactor.

El agente coagulante es generado in situ conforme se realizan las reacciones electroquímicas. El caudal va recibiendo el agente coagulante, aumentando la concentración de aluminio a medida que va pasando por el reactor.

El voltaje requerido para mantener la corriente de operación es directamente proporcionado por la fuente de poder.

### **3.1.1.1 Prueba de trazadores para la caracterización hidráulica del reactor**

Con el objeto de verificar que se cumplan los tiempos de residencia hidráulicos teóricos, se realizaron pruebas de trazadores utilizando 5ml de cloruro de sodio (NaCl) con azul de metileno. Para esto se aplicó a la entrada del reactor electroquímico un pulso, prácticamente instantáneo, de la solución concentrada y se midió cada medio minuto la conductividad, el tiempo medio de residencia real (TMRR) se calculó en base al procedimiento de cálculo descrito por (Martín *et al.*, 1998)

Inyección de la tinta y su recorrido en el reactor

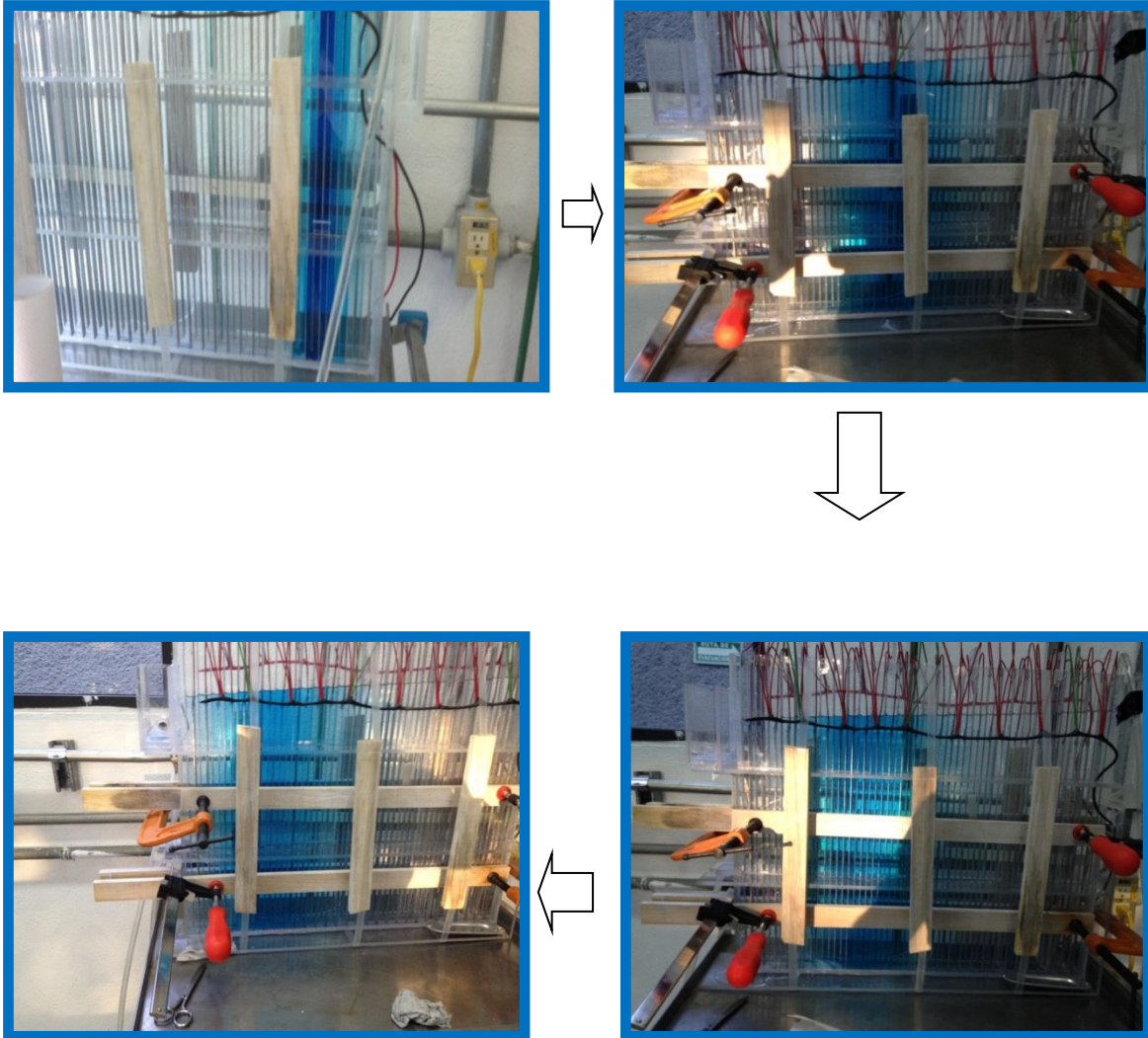


Fig. 3.4 Prueba de trazadores al reactor electroquímico con placas paralelas

### 3.1.2 Diseño de experimentos

El diseño estadístico de experimentos es la forma más eficaz de hacer pruebas. El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras.

El diseño de experimentos es un diseño de técnicas activas en el sentido de que no esperan que el proceso mande las señales útiles, sino que este se manipula para que proporciones la información que se requiere para su mejoría.

## Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta

### Diseños factoriales $2^n$

Un diseño de experimentos factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de niveles de los factores. El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias variables de respuestas o características de calidad, con la finalidad de conocer mejor cómo es esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso. Por ejemplo, uno de los objetivos más importantes que en general tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la cual el desempeño del proceso sea mejor. La familia de diseños factoriales  $2^n$  consiste de  $n$  factores, todos en 2 niveles de prueba (Gutiérrez y Salazar, 2004). Con el diseño ( $2^n$ ) se puede estudiar:

- La media
- Los  $n$  efectos principales
- $n(n-1)/2$  Interacciones dobles
- $n(n-1)(n-2)/(3 \times 2)$  interacciones triples

Un plan factorial completo permite estimar no solo el efecto de los factores, sino todas las interacciones que ocurren entre ellos. Para ello se conformó una matriz que incluye 8 experimentos realizados ver tabla 3.3

### 3.1.2.1 Matriz de experimentos del diseño factorial $2^3$

Variables de prueba:

- Ciclo de trabajo de 0.3 y 0.7
- Frecuencia del pulso 5 y 500 Hz
- Intensidad de corriente pico de 1 y 10 A

Variables de respuesta:

- Al producido




- ❑ Voltaje
- ❑ Sílice removida                      Se incluirán 3 centros al diseño de experimentos

Tabla 3.4. Valores asignados para cada parámetro independiente

| Ciclo de trabajo( $\theta$ ) | Frecuencia(Hz) | Intensidad de corriente pico $I_p$ |
|------------------------------|----------------|------------------------------------|
| 0.3                          | 5              | 1                                  |
| 0.3                          | 500            | 1                                  |
| 0.7                          | 5              | 1                                  |
| 0.7                          | 500            | 1                                  |
| 0.5                          | 250            | 5                                  |
| 0.5                          | 250            | 5                                  |
| 0.5                          | 250            | 5                                  |
| 0.3                          | 5              | 10                                 |
| 0.3                          | 500            | 10                                 |
| 0.7                          | 5              | 10                                 |
| 0.7                          | 500            | 10                                 |

Estos valores son los que se programan en la fuente de poder para aplicar la corriente pulsada y así analizarlos con respecto a las variables de respuesta obtenidos.

3.1.3 Caracterización fisicoquímica del agua

| PARÁMETRO        | MÉTODO ANALÍTICO                                               | EQUIPO UTILIZADO                                                                                                      |
|------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pH               |                                                                | Potenciómetro Orion Modelo 420A<br> |
| CONDUCTIVIDAD    |                                                                | Conductímetro Orion Modelo 145                                                                                        |
| TEMPERATURA      |                                                                | Termómetro de mercurio                                                                                                |
| SÍLICE           | Método colorimétrico<br>Silicomolibdato (#8185 de HACH®)       |                                  |
| ALUMINIO         | Mediante el método Aluver® (método #8326) de HACH®             |                                  |
| SULFATOS         | Sulfaver 4 * (#8051 de HACH®); éste es un método colorimétrico |                                                                                                                       |
| DUREZA DE CALCIO | Titulación digital con EDTA (#8204 de HACH®).                  |                                                                                                                       |

### 3.1.4 Tren de tratamiento para la remoción de sílice

El diagrama esquemático del tren de tratamiento del sistema de electrocoagulación se presenta en la Figura 3.8 El tren de tratamiento cuenta con un sistema de almacenamiento de agua integrado por 1 tinaco, la medición del gasto se realiza a la salida del tinaco, a la entrada del reactor con ayuda de un cronómetro y una probeta graduada.

La configuración hidráulica del sistema permite la toma de muestras a la salida del reactor, mismas que se sometieron a floculación-sedimentación o a microfiltración.

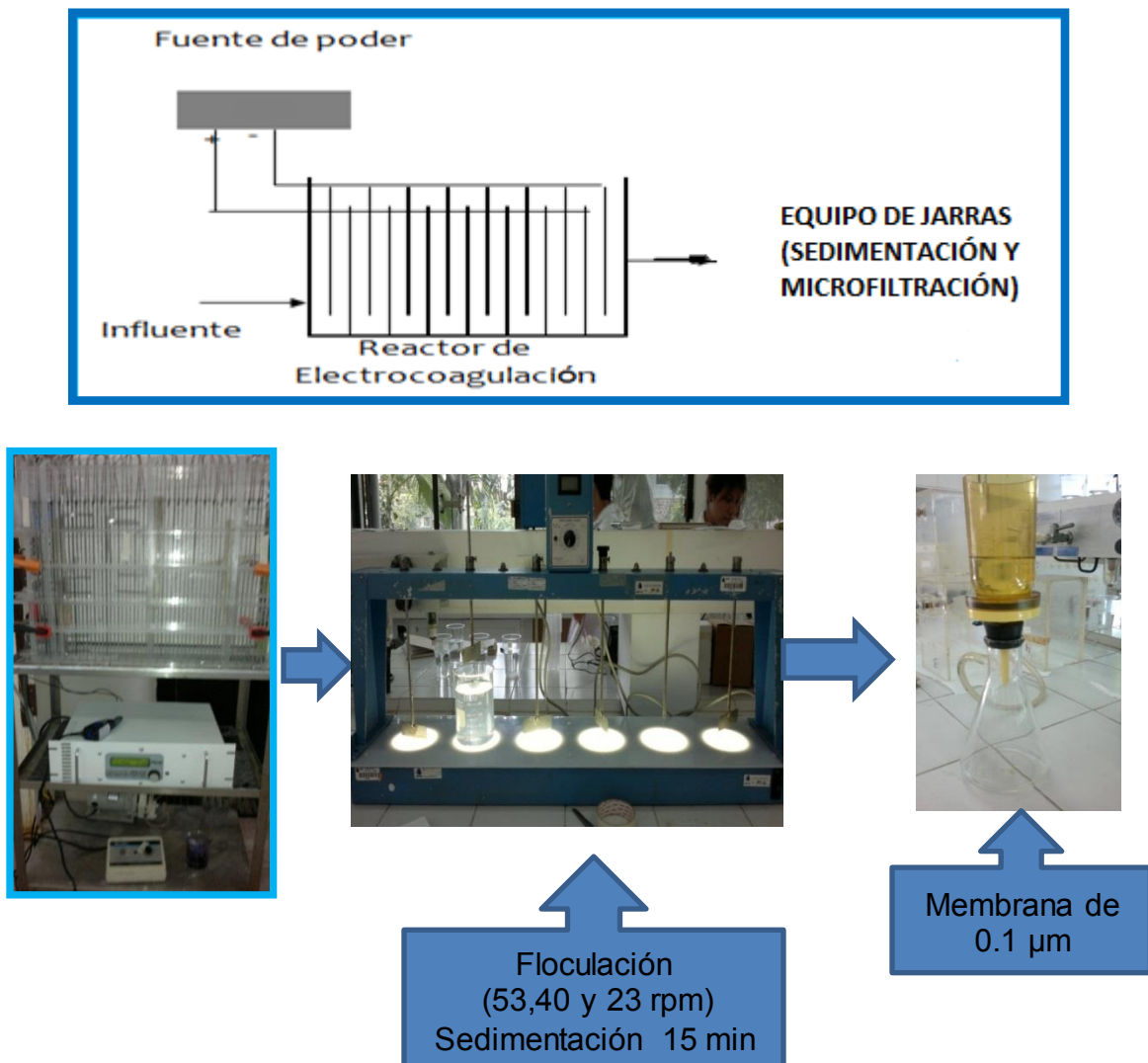


Fig. 3.5 Tren de tratamiento para la remoción de sílice

### 3.1.4.1 Descripción del procedimiento de operación del tren de tratamiento

El procedimiento para realizar cada una de las pruebas fue el siguiente:

- 1.- Llenar con el agua a tratar el tinaco del sistema de almacenamiento requerido
- 2.- Preparar el agua para que alcance la conductividad de  $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ , agregando NaCl ya que esta simulara el agua proveniente de un sistema de enfriamiento real.
- 3.- Programar la fuente de poder con las características del perfil de corriente a evaluar.
- 4.- Encender la bomba de alimentación y ajustar el caudal de operación previamente determinado mediante la válvula. Dejar que se establezca el caudal durante 15 min, antes de encender la fuente de poder ya programada.
- 5.- Tomar una muestra a la salida del reactor después de 15 min de haber puesto en marcha la fuente de poder y la segunda muestra a los 60 min.
- 6.- Registrar el valor de pérdida de carga hidráulica ( $\Delta H$ ) inicial dentro del reactor, y el registro de la intensidad de corriente media y el voltaje de repuesta de la fuente de poder al hacer la prueba así como a los tiempos previamente determinados.
- 7.- Tomar 100 ml de muestra de la salida del reactor en la línea de drenaje, a los tiempos previamente determinados para medir la concentración de  $\text{Al}^{3+}$ , pH y conductividad.
- 8.- Pasar 250 ml de la muestra a prueba de jarras donde se simula la floculación con sus respectivos valores de agitación ( 23, 40, 53 rpm ) durante 7 minutos cada uno, dejar sedimentar durante 30 minutos después de haber realizado la agitación, tomar la muestra del sobrenadante y medir la concentración de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{SiO}_2$ , pH y conductividad.
- 9.- También se toma una muestra de 150 mL a la salida del reactor para la prueba de microfiltración con una membrana de  $0.1 \mu\text{m}$  de malla y se mide la concentración de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{SiO}_2$ , pH y conductividad.
- 10.- Operar el equipo durante el tiempo requerido.
- 11.- Para limpiar el sistema se hacía pasar agua sin aplicar corriente durante un lapso de 10 a 15 min y de ser necesario se cepillaban los electrodos con un escobillón de cerdas suaves para retirar el material depositado.
- 12.- Apagar el equipo.

### 3.1.5 Perfil de corriente pulsada a evaluar

El perfil que se aplicó mediante la fuente de poder al reactor electroquímico para remoción de sílice, se esquematiza en la siguiente figura.

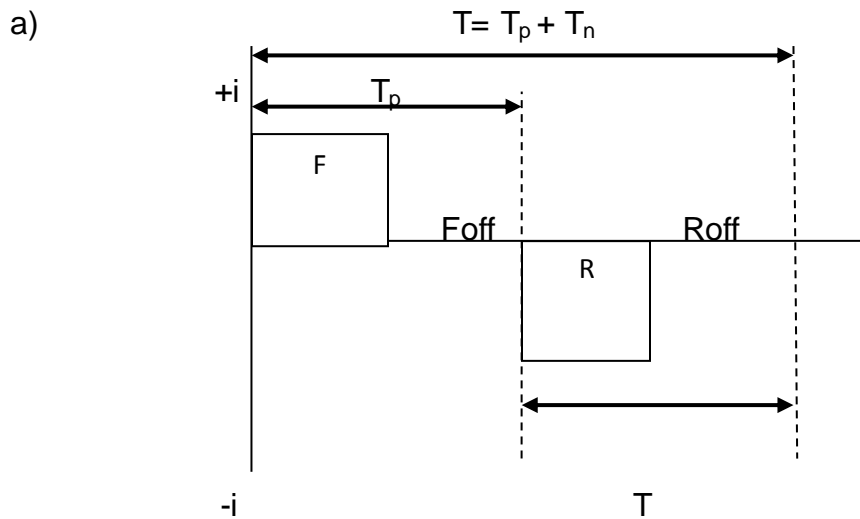


Fig. 3.6 Diagrama del perfil utilizado para las pruebas con corriente pulsada

Dónde:

F = Valor para el lado positivo encendido

R = Valor para el lado negativo encendido

Foff = Apagado positivo

Roff = Apagado negativo

T = Periodo total de encendidos positivo y negativo



**Tiempos de operación para cada ciclo de trabajo**

Se programan en la fuente poder los diferentes tiempos así como la intensidad de corriente pico para cada experimento del diseño previamente establecido.

Tabla 3.5 Datos para programar a la fuente de poder

| Frecuencia (Hz) | Ciclo de trabajo | Ip(A) | F   | F off | R   | R off | T(ms) |
|-----------------|------------------|-------|-----|-------|-----|-------|-------|
| 5               | 0.3              | 1     | 40  | 70    | 20  | 70    | 200   |
| 500             | 0.3              | 1     | 0.5 | 0.7   | 0.1 | 0.7   | 2     |
| 5               | 0.7              | 1     | 80  | 30    | 60  | 30    | 200   |
| 500             | 0.7              | 1     | 1   | 0.3   | 0.4 | 0.3   | 2     |
| 5               | 0.3              | 10    | 40  | 70    | 20  | 70    | 200   |
| 250             | 0.5              | 5     | 1.5 | 1     | 0.5 | 1     | 4     |
| 250             | 0.5              | 5     | 1.5 | 1     | 0.5 | 1     | 4     |
| 250             | 0.5              | 5     | 1.5 | 1     | 0.5 | 1     | 4     |
| 500             | 0.3              | 10    | 0.5 | 0.7   | 0.1 | 0.7   | 2     |
| 5               | 0.7              | 10    | 80  | 30    | 60  | 30    | 200   |
| 500             | 0.7              | 10    | 1   | 0.3   | 0.4 | 0.3   | 2     |

Un ejemplo del perfil programado en la fuente de poder se muestra en la figura 3. Con sus respectivos valores para cada pulso.

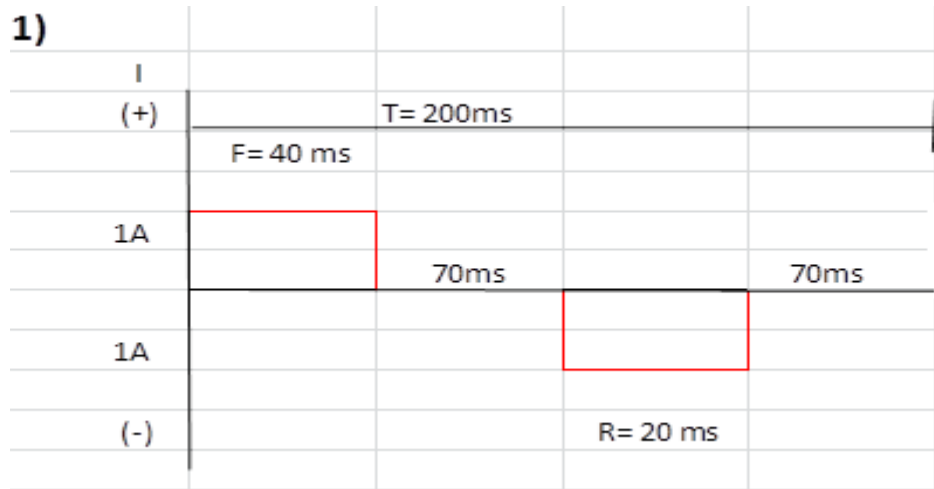


Fig.- 3.7 Diagrama del perfil programado en la fuente de poder

| Frecuencia (Hz) | Ciclo de trabajo | $I_p(\text{A})$ | F  | F off | R  | R off | T(ms) |
|-----------------|------------------|-----------------|----|-------|----|-------|-------|
| 5               | 0.3              | 1               | 40 | 70    | 20 | 70    | 200   |

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización inicial de parámetros de interés

Los resultados de la caracterización del agua de pozo preparada con NaCl se presentan en la donde se utilizaron los métodos antes mencionados para cada parámetro.

Tabla 4.1 Resultados de la caracterización del agua

| PARAMETRO        | VALOR                         |
|------------------|-------------------------------|
| Conductividad    | 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$   |
| Sílice           | 52.9 mg /L de $\text{SiO}_2$  |
| Sulfatos         | 14 mg/L de $\text{SO}_4^{2-}$ |
| Dureza de calcio | 67.3 mg/L de $\text{CaCO}_3$  |
| pH               | 6.8                           |

Estos resultados muestran la caracterización fisicoquímica del agua a tratar para el proceso de electrocoagulación donde se puede observar la concentración de sílice presente en el agua.

## 4.2 Evaluación del efecto de las variables de prueba en las de respuesta del diseño de experimentos

### 4.4.1 Remoción de sílice

Los porcentajes de remoción de sílice obtenidos en las pruebas del diseño de experimentos 2<sup>3</sup> realizado se presentan en la Tabla 4.2. El agua utilizada en este diseño de experimentos fue la que abastece al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, sus características fisicoquímicas se mostraron en la Tabla 4.1.

Tabla 4.2.- Porcentajes de remoción de sílice obtenidos en el diseño de experimentos 2<sup>3</sup>

| Ciclo de trabajo | Frecuencia | Intensidad de corriente de pico | Al producido | Voltaje | Sílice removida | % Remoción de sílice | Al producido /Sílice removida |
|------------------|------------|---------------------------------|--------------|---------|-----------------|----------------------|-------------------------------|
| 0.3              | 5          | 1                               | 4.3          | 0.73    | 2.2             | 4.15                 | 1.95                          |
| 0.3              | 500        | 1                               | 7            | 0.76    | 1.1             | 2.07                 | 6.36                          |
| 0.7              | 5          | 1                               | 5.7          | 1.07    | 2.7             | 5.10                 | 2.11                          |
| 0.7              | 500        | 1                               | 10.5         | 1.07    | 13.2            | 24.95                | 0.79                          |
| 0.5              | 250        | 5                               | 40.3         | 1.63    | 36.4            | 68.80                | 1.10                          |
| 0.5              | 250        | 5                               | 43           | 1.63    | 37.4            | 70.69                | 1.14                          |
| 0.5              | 250        | 5                               | 42.3         | 1.63    | 36.4            | 68.80                | 1.16                          |
| 0.3              | 5          | 10                              | 29.5         | 1.53    | 23.4            | 44.23                | 1.26                          |
| 0.3              | 500        | 10                              | 58.7         | 1.95    | 45.3            | 85.63                | 1.29                          |
| 0.7              | 5          | 10                              | 28.7         | 1.98    | 40.4            | 76.37                | 0.63                          |
| 0.7              | 500        | 10                              | 65.3         | 2.93    | 43.6            | 82.41                | 1.49                          |

En esta tabla de resultados del diseño se puede observar que en la condición de 0.7 de ciclo de trabajo a 5 Hz con una intensidad de corriente de pico de 10 A se obtiene una remoción de sílice del **76.37** % con una relación de aluminio producido de 0.63 aproximadamente la mitad lo requerido para las otras condiciones lo que representa una ventaja muy importante desde el punto de vista económico y por lo cual, se selecciona como la mejor condición.

El análisis de varianza de los resultados (Tabla 4.3) indica que ni el ciclo de trabajo ni la frecuencia tuvieron un efecto significativo sobre la remoción de sílice, ya que ningún valor-P fue menor al valor de la significancia prefijada ( $\alpha=0.05$ ) pero si el de la intensidad de corriente de pico que si es significativo para dicha remoción.

Tabla 4.3 Análisis de Varianza para sílice removida - floculación-sedimentación

| <i>Fuente</i>                  | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| A:ciclo de trabajo             | 134.48                   | 1         | 134.48                | 0.71           | 0.4459         |
| B:frecuencia de pulso          | 106.843                  | 1         | 106.843               | 0.57           | 0.4934         |
| C:intensidad de corriente pico | 2265.23                  | 1         | 2265.23               | 12.02          | 0.0257         |
| AB                             | 18.0                     | 1         | 18.0                  | 0.10           | 0.7728         |
| AC                             | 7.22                     | 1         | 7.22                  | 0.04           | 0.8544         |
| BC                             | 14.6895                  | 1         | 14.6895               | 0.08           | 0.7940         |
| Error total                    | 754.114                  | 4         | 188.529               |                |                |
| Total (corr.)                  | 3300.87                  | 10        |                       |                |                |

R-cuadrada = 77.1541 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 42.8852 porciento

Error estándar del est. = 13.7306

Error absoluto medio = 6.70179

Estadístico Durbin-Watson = 1.1505 (P=0.0500)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.378034

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de sílice removida en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 1 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 77.1541% de la variabilidad en sílice removida. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 42.8852%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 13.7306. El error medio absoluto (MAE) de 6.70179 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Con objeto de visualizar el impacto de cada uno de los factores, así como de las interacciones entre estos en la variable de respuesta (remoción de sílice), se construyó el diagrama de Pareto (Figura 4.1).

Los factores y sus interacciones se encuentran graficados en orden descendente con relación al impacto con que estos afectan la remoción de sílice. El diagrama de Pareto muestra, al igual que el análisis de varianza, que la intensidad de corriente de pico es la única de los factores estudiados que tienen efecto significativo sobre la remoción de sílice (ya que es factor que cruza la línea de significancia).

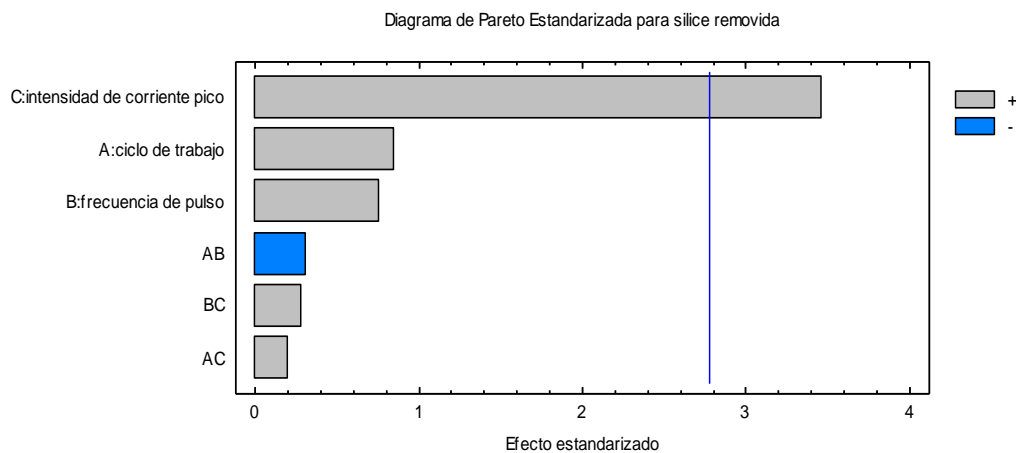


Figura 4. 1 Diagrama de Pareto para porcentaje de remoción de sílice

En este gráfico, cada efecto es dividido entre su error estándar. En adición, una línea es dibujada sobre el gráfico para determinar si un efecto es estadísticamente significativo en el nivel de significancia especificado.

Se construyó también un gráfico de superficie de respuesta (Figura 4.2) con objeto de visualizar gráficamente los valores obtenidos en las pruebas realizadas en sus correspondientes niveles.

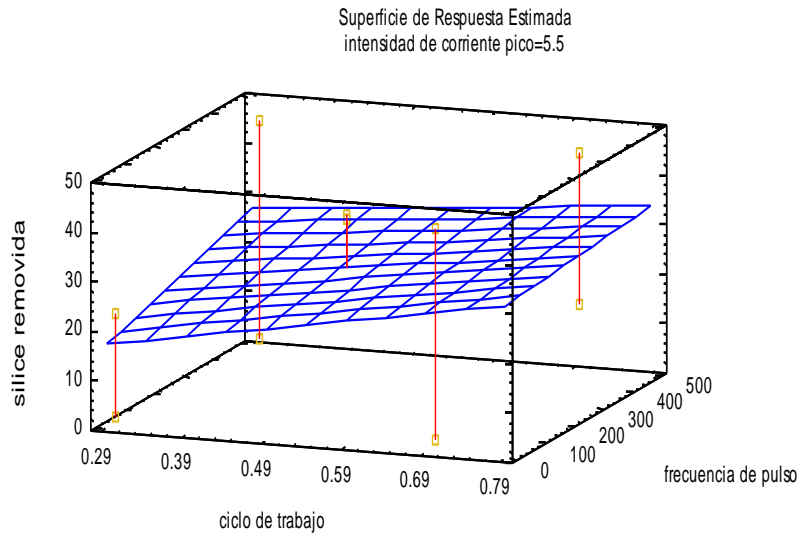


Fig. 4.2. Gráfico de superficie de respuesta para remoción de sílice

La Fig. 4.2 muestra que al utilizar el nivel bajo del ciclo de trabajo se obtienen remoción de sílice de  $\approx 18$  mg/L, sin embargo en el nivel alto del ciclo de trabajo se visualiza una remoción de sílice ( $\approx 50$ mg/L), con una alta intensidad de corriente de pico. Y podemos observar que los centros están muy juntos y esto indica que los resultados son confiables.

#### 4.4.2 Aluminio producido

Los valores correspondientes a la producción de aluminio obtenidos en las pruebas del diseño de experimentos  $2^3$  realizado se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores de la producción de aluminio obtenidos mediante el diseño experimental

#### Análisis de Varianza para Al producido - floculación-sedimentación

| Fuente                         | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:ciclo de trabajo             | 14.3112           | 1  | 14.3112        | 0.08    | 0.7896  |
| B:frecuencia de pulso          | 664.45            | 1  | 664.45         | 3.78    | 0.1238  |
| C:intensidad de corriente pico | 2836.22           | 1  | 2836.22        | 16.13   | 0.0159  |
| AB                             | 11.2813           | 1  | 11.2813        | 0.06    | 0.8125  |
| AC                             | 0.10125           | 1  | 0.10125        | 0.00    | 0.9820  |
| BC                             | 425.498           | 1  | 425.498        | 2.42    | 0.1947  |

|               |         |    |         |  |  |
|---------------|---------|----|---------|--|--|
| Error total   | 703.149 | 4  | 175.787 |  |  |
| Total (corr.) | 4655.78 | 10 |         |  |  |

R-cuadrada = 84.8973 porciento  
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 62.2432 porciento  
 Error estándar del est. = 13.2585  
 Error absoluto medio = 7.07172  
 Estadístico Durbin-Watson = 0.868015 (P=0.0135)  
 Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.530072

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Al producido en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 1 efectos tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 84.8973% de la variabilidad en Al producido. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 62.2432%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 13.2585. El error medio absoluto (MAE) de 7.07172 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos.

Con objeto de visualizar el impacto de cada uno de los factores, así como de las interacciones entre estos en la variable de respuesta (porcentaje de remoción del aluminio dosificado), se construyó un diagrama de Pareto (Figura 4.3).

El diagrama de Pareto muestra (al igual que el análisis de varianza) que la intensidad de corriente es el factor estudiado que tiene un efecto significativo sobre la producción del aluminio ya que cruza la línea de significancia.



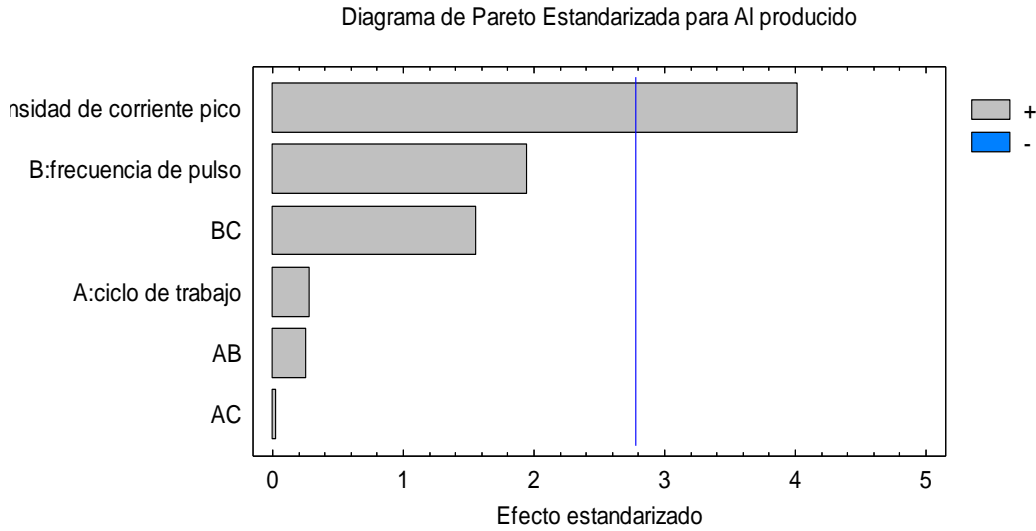


Figura 4. 3 Diagrama de Pareto para la producción de aluminio

Se construyó un gráfico de superficie de respuesta (Fig. 4.6) con objeto de visualizar gráficamente los valores obtenidos en las pruebas realizadas en sus correspondientes niveles factoriales.

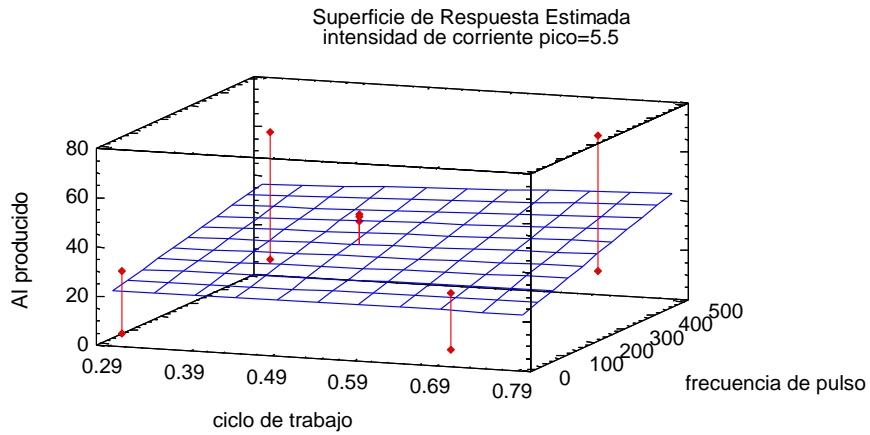


Figura 4. 4 Gráfica de superficie de respuesta para la producción de aluminio dosificado.

En esta gráfica se observa una dispersión de puntos experimentales en todos los niveles, para los factores estudiados.

### 4.4.3 Voltaje de respuesta

En relación al voltaje que se obtiene al programa la fuente de poder se hace un análisis de varianza donde se obtiene.

Tabla 4.5 Análisis de Varianza para voltaje - floculación-sedimentación

| <i>Fuente</i>                  | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>de Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|--------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|----------------|----------------|
| A:ciclo de trabajo             | 0.5408                   | 1            | 0.5408                | 17.72          | 0.0136         |
| B:frecuencia de pulso          | 0.243509                 | 1            | 0.243509              | 7.98           | 0.0476         |
| C:intensidad de corriente pico | 2.78571                  | 1            | 2.78571               | 91.30          | 0.0007         |
| AB                             | 0.03125                  | 1            | 0.03125               | 1.02           | 0.3688         |
| AC                             | 0.07605                  | 1            | 0.07605               | 2.49           | 0.1895         |
| BC                             | 0.22461                  | 1            | 0.22461               | 7.36           | 0.0534         |
| Error total                    | 0.122045                 | 4            | 0.0305112             |                |                |
| Total (corr.)                  | 4.02442                  | 10           |                       |                |                |

R-cuadrada = 96.9674 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 92.4185 por ciento

Error estándar del est. = 0.174675

Error absoluto medio = 0.0894936

Estadístico Durbin-Watson = 1.35526 (P=0.1012)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.251389

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de voltaje en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.9674% de la variabilidad en voltaje. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 92.4185%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.174675. El error medio absoluto (MAE) de 0.0894936 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación

significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Con objeto de visualizar el impacto de cada uno de los factores, así como de las interacciones entre estos en la variable de respuesta (voltaje), se construyó un diagrama de Pareto (Figura 4.5).

El diagrama de Pareto muestra (al igual que el análisis de varianza) que la intensidad de corriente, la frecuencia de pulso y el ciclo de trabajo son factores que tiene un efecto significativo sobre el voltaje ya que cruza la línea de significancia.

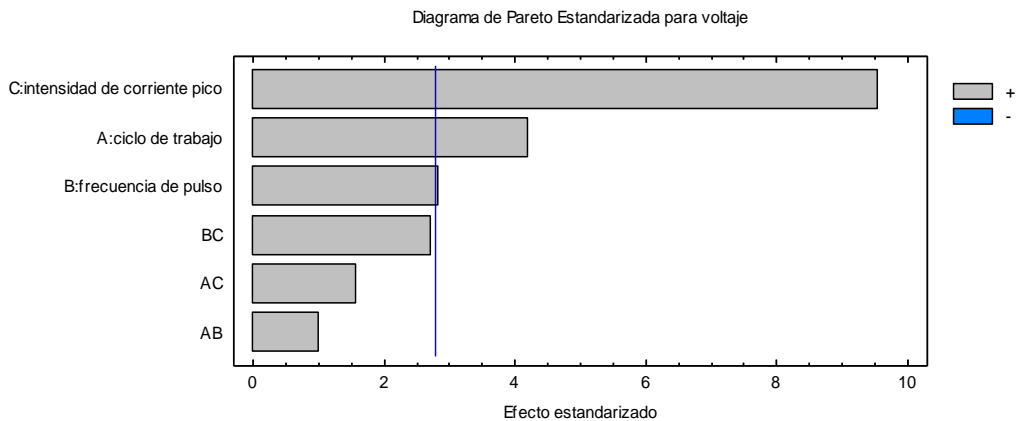


Figura 4. 5 Diagrama de Pareto para la producción de aluminio

**4.5 Análisis de la corriente directa con la corriente promedio del diseño de experimentos 2<sup>3</sup>**

Para la prueba que se realizó con corriente directa programada en la fuente de poder a las diferentes intensidades de corriente promedio tomadas de las corrientes de pico a (1A, 5A y 10A).

Se observa que

Tabla 4.6 Variables de respuesta obtenidas con corriente directa.

| INTENSIDAD DE CORRIENTE(A) | Al PRODUCIDO(mg/L) | VOLTAJE(V) | SiO2 REMOVIDA(mg/L) |
|----------------------------|--------------------|------------|---------------------|
| 0.1                        | 3.1                | 0.42       | 8.9                 |
| 1                          | 28.1               | 1.93       | 28.9                |
| 2.987                      | 64.3               | 2.48       | 32.9                |

En el gráfico se observa como entre más se produce aluminio se remueve más sílice

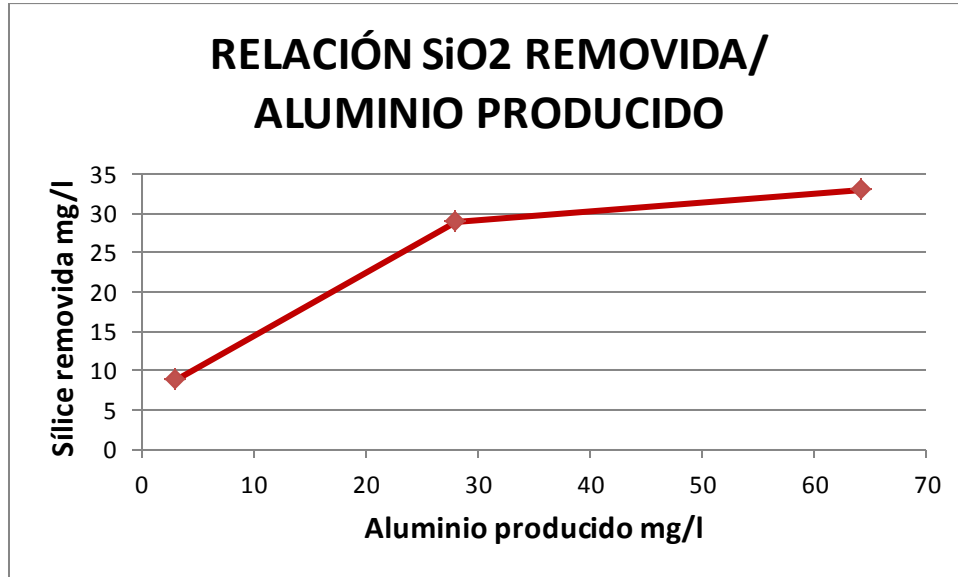


Fig. 4.6 Relación sílice removido aluminio producido

La remoción de sílice aplicando la corriente directa es muy baja y se produce mayor cantidad de lodos de aluminio.

En relación a la intensidad de corriente promedio que se aplica a la corriente directa para los diferentes casos antes mencionados nos da un voltaje de respuesta alto a muy baja intensidad de corriente lo que se muestra en el gráfico.

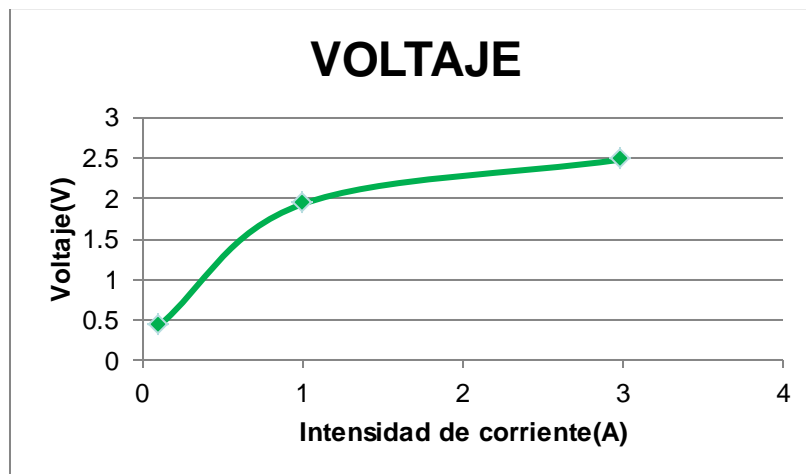


Fig. 4.7 Relación voltaje con la intensidad de corriente

Y con respecto a la sílice removida se observa que a mayor intensidad de corriente mayor remoción

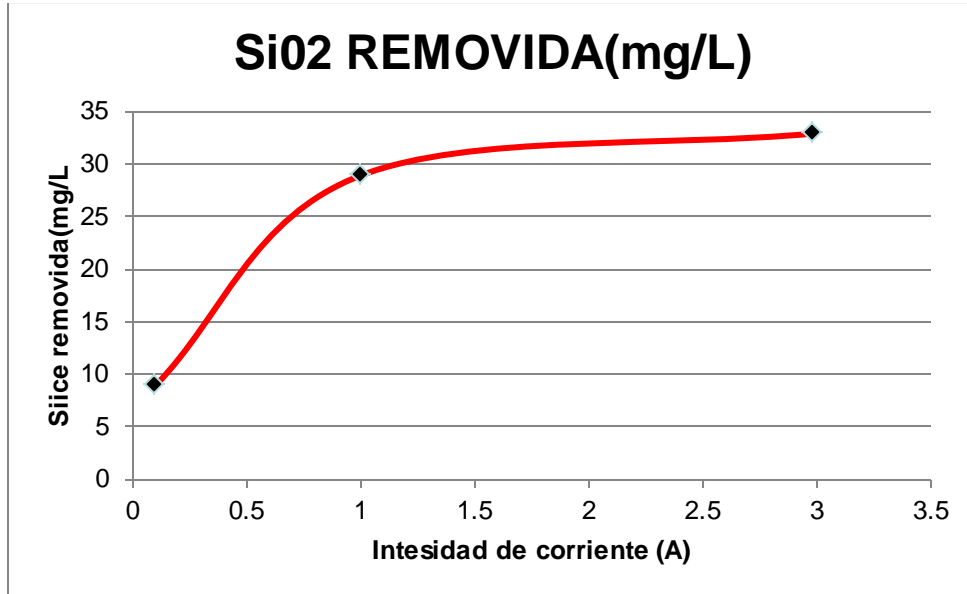


Fig. 4.8 Sílice removida en relación con la intensidad de corriente.

#### 4.6 Análisis de la comparación de la corriente pulsada con la corriente directa para la remoción de sílice

Se puede observar en el gráfico siguiente como con la corriente directa se

remueve menor cantidad de sílice, y con la corriente pulsada se remueve un 20% más con la misma intensidad de corriente y el mismo tiempo de operación.

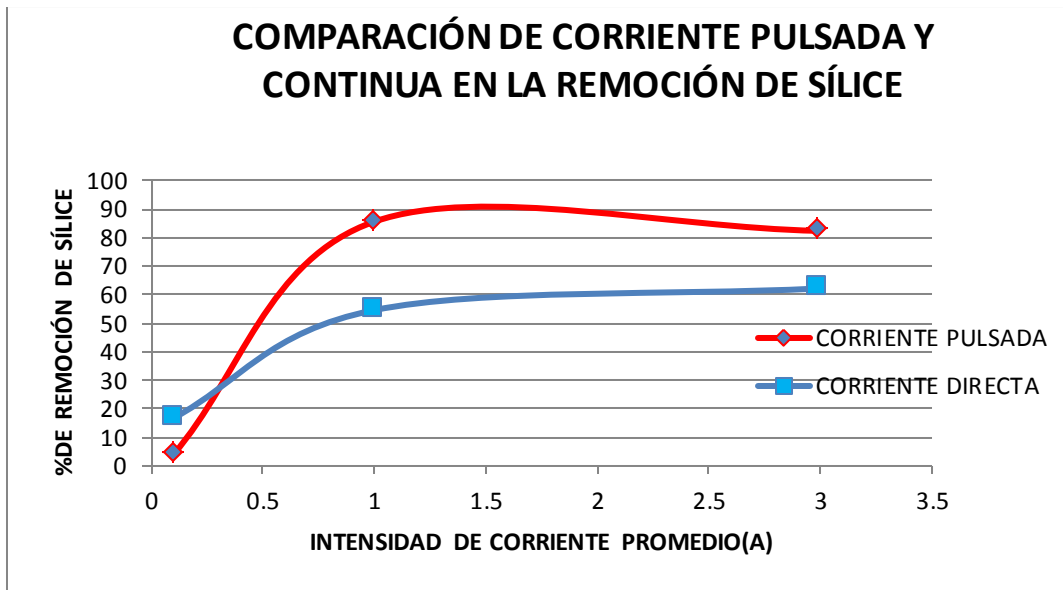


Fig. 4.9 Relación del porcentaje de remoción de sílice con los dos tipos de corriente

Lo que nos indica este gráfico que al utilizar corriente pulsada y corriente directa para un mismo valor de corriente promedio evaluada en la fuente de poder para los dos diferentes tipos de corriente, se obtiene mayor remisión al utilizar corriente pulsada

En el siguiente gráfico se puede observar que se consume menor cantidad de energía utilizando la corriente pulsada en comparación con el uso de corriente directa.

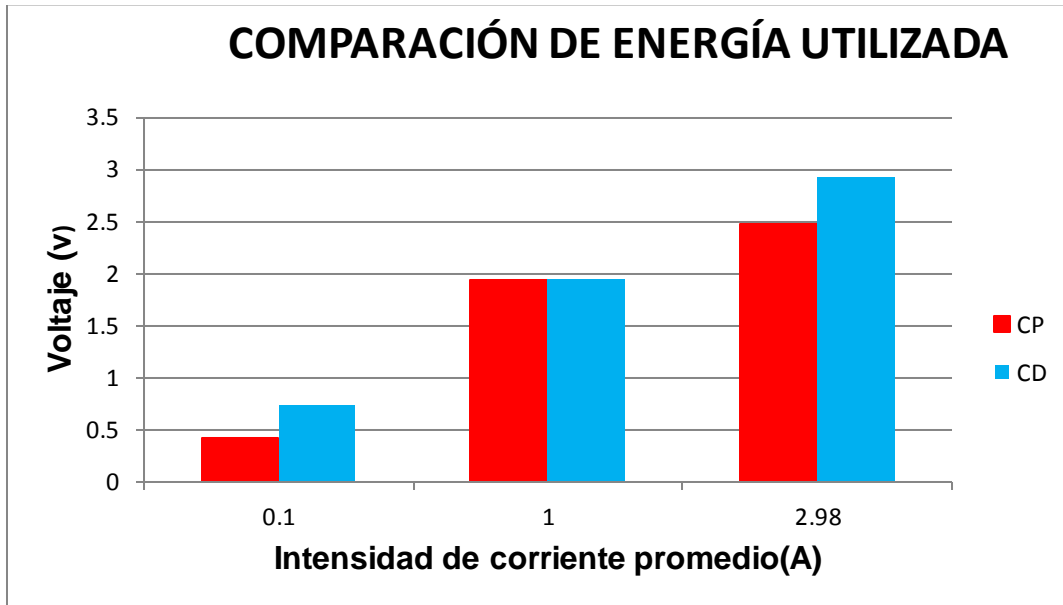


Fig. 4.10 Relación de consumo de corriente con los dos tipos de corriente utilizada

La comparación de voltaje utilizado para este reactor con la fuente de poder programable es favorable a corrientes de pico altas (10 A) con corriente pulsada por lo que es recomendable para este sistema de proceso de electrocoagulación ya que se tiene un ahorro de energía del 30 % para este tipo de sistema.

### 5 CONCLUSIONES

- El diseño del reactor electroquímico de electrocoagulación con placas paralelas de aluminio que se utilizó en el proceso resultó adecuado de acuerdo a la prueba de trazadores para el caudal suministrado para el que fue diseñado.
  
- Al evaluar y analizar los efectos de la aplicación de corriente pulsada de los parámetros independientes (intensidad de corriente de pico, ciclo de trabajo y frecuencia de pulso) en los parámetros dependientes (voltaje, aluminio producido y sílice removida) en el proceso de electrocoagulación resultó que la frecuencia y el ciclo de trabajo en los intervalos probados no fueron significativos para la remoción de sílice pero sí lo fueron para el voltaje de respuesta obtenido.
  
- Al evaluar el efecto de la aplicación de corriente directa con parámetros equivalentes a los parámetros de operación usados con corriente pulsada resultó que con la corriente pulsada se obtienen mayores remociones de sílice, 20%, y menor consumo de energía (voltaje)
  
- Al hacer el análisis de las incrustaciones y pasivación en los electrodos de aluminio se observó que hay mayores incrustaciones a corrientes de pico altas (10 A) con ciclos de trabajo bajos (0.3).
  
- Al evaluar las diferentes condiciones de prueba para la corriente pulsada el perfil de mejor respuesta es el de ciclo de trabajo de 0.7 con una frecuencia de 5 Hz y con  $I = 10$  A.
  
- Al evaluar las variables de prueba se obtuvo que la que tiene efecto significativo en el diseño de experimentos es la intensidad de corriente de pico; a mayor intensidad se tuvo mayor remoción de sílice.
  
- Al comparar el consumo energético aplicando corriente pulsada y corriente directa, para un mismo valor de remoción de sílice se obtuvo que con corriente pulsada se logra un ahorro de 30% con respecto a utilizar corriente directa.



### 6 RECOMENDACIONES

- ❖ Cuando se use corriente pulsada, para obtener remociones de sílice altas se recomienda trabajar a intensidades de corriente de pico altas pero también se debe tomar en cuenta la frecuencia de pulso ya que aunque sea la misma corriente aplicada obtenemos mejor resultados a frecuencias bajas pero periodos prolongados ya que se obtienen menos lodos de aluminio.
- ❖ Se recomienda explorar y analizar en el valor de 10 A de intensidad de corriente de pico con un ciclo de trabajo de 0.7 diferentes valores de periodo para esta misma, para tratar de encontrar condiciones que sean más convenientes, es decir trabajar a menor o mayor periodo de ciclo del explorado en este trabajo.

### 7 BIBLIOGRAFÍA

- Bergna, H. (1994). The Colloid chemistry of silica. *American Chemical Society*. Washington, DC. 695 pp.
- Cooling Technology Institute (CTI). (2008). Nota técnica: “What is a (wet, atmospheric) cooling tower?”. Obtenido en <http://www.cti.org/whatis/coolingtowerdetail.shtml>
- North Carolina Department of Environment and Natural Resources (NCDENR) Water Management Options [en línea]. Disponible en: <http://www.p2pays.org/ref%5C04/03101.pdf>
- Escardino, A.; Berna, A. “Introducción a l’enginyeria dels reactors químics”.
- Fundamentals of Cooling Water Treatment, 2000 CTI Educational Seminar, February 1, 2000.
- Guohua Chen, 2000 Xueming Chen, Po Lock Yue. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater journal environmental engineering-ASCE,2000,126(9): 858-863.
- Publicacions de la Universitat de Valencia. 2003
  
- Hill, C.G.Jr., "An Introduction to Chemical Engineering Kinetics & Reactor
- Jiang, J.Q.; Graham, N.; André, C.A.; Kelsall, G.H.; Brandon, N. *Water Res.* **36** (2002) 4064.
- D Koo, T., Lee, YJ., Sheikholeslami, R. (2001). "Silica fouling and cleaning of reverse ósmosis membranes." *Desalination* 139(1-3): 43-56.
- Kurimexicana (2009). Nota técnica: “Alta silice”. Obtenido en: [http://www.kurimexicana.com/productos\\_torres\\_de\\_enfriamiento\\_alta\\_silicie.shtml](http://www.kurimexicana.com/productos_torres_de_enfriamiento_alta_silicie.shtml)
- Lerman, S. I., Scheerer, C. C., The chemical Behavior of silica, *Ultra pure water*, December 1988
- Letterman, R. (1999). Water quality and treatment. *American Water Works Association (AWWA)*. Nueva York, EE.UU.1194 pp.
- Mangravite, F, Cassell, E., Matijević, E. (1972). "The microflotation of silica." *Journal of Colloid and Interface Science* 39(2): 357-366.
- Martín, A., Avilés, F., Ordeñana, L., Montellano, L., Piña, M., Sandoval, L. (2006). Manual de evaluación de plantas potabilizadoras. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Matthes, G. (1982). The properties of groundwater. *Wiley-Interscience*. New York.
- Maintaining Peak Performance of Your Cooling Tower”, CTI-101 Educational Seminar, February 12, 2003.
- Mortensen, K.P., “How to Keep Cooling Towers Running Strong” RSES Journal, April 2003.
- Mortensen, K.P., “How to Manage Cooling Tower Water Quality” RSES Journal, May 2003.
- Mortensen, K.P., Conley, S.N., “Film Fill Fouling in Counter flow Cooling Towers: Mechanism and Design”, Marley Cooling Tower Company, Paper

presented at the 1994 Cooling Tower Institute Annual Meeting Houston Texas, February 13-16.

- Neofotistou, E., Demadis, K. (2004). "Use of antiscalants for mitigation of silica (SiO<sub>2</sub>) fouling and deposition: fundamentals and applications in desalination systems." *Desalination* 167: 257-272.
- Nielson, K., Smith, D. (2005). "Ozone-enhanced electroflocculation in municipal wastewater treatment". *J. Environ. Eng. Sci.* 4: 65-76.
- Nishida, I., Shimada, Y., Saito, T., Okaue, Y., Yokoyama, T. (2009). "Effect of aluminum on the deposition of silica scales in cooling water systems." *Journal of Colloid and Interface Science.* 335(1): 18-23.
- Piña, S., Martín, A., Rivera M., Castrejon S., Gonzales C. (2009). "Aplicación de la electrocoagulación en la remoción de arsénico en agua". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Jiutepec, Morelos, México.
- Roques, H. (1996). *Chemical Water Treatment: Principles and Practice*, VCH Publishers, Inc., New York, 620 pp.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). "Estadísticas del agua en México". Comisión Nacional del Agua. Distrito Federal, México. 233pp.
- Resintech, Inc. (1999). Nota técnica: Behavior of silica in ion exchange and other systems. <http://www.snowpure.com/docs/resintech-silica-iwc99.pdf>
- Ríos, B., Almeraya, F., Herrera, A. (2005). "Electrode Passivation in the Electrocoagulation Process". *Portugaliae Electroquímica Acta* 23:17-34
- Romero, R. (2006). *Purificación del agua*. Editorial escuela colombiana de ingeniería. Segunda edición. 471pp.
- Smethurst, G (2002). "Basic Water treatment". Thomas Telford. Tercera edición. 292pp.
- Sheikholeslami, R., Al-Mutaz, I., Koo, T., Young, A. (2001). "Pretreatment and the effect of cations and anions on prevention of silica fouling." *Desalination* 139(1-3): 83-95.
- Sheikholeslami, R., Al-Mutaz, Tan, S.,. (2002). "Some aspects of silica polymerization and fouling and its pretreatment by sodium aluminate, lime and soda ash." *Desalination* 150(1): 85-92.
- Sheikholeslami, R., Bright, J. (2002). "Silica and metals removal by pretreatment to prevent fouling of reverse ósmosis membranes." *Desalination* 143(3): 255-267.
- Tchobanoglous, G., Burton, FL., Metcalf & Eddy., Stensel, HD. (2004). "Wastewater Engineering treatment and reuse". *McGraw Hill*, New York. 4ta edición. 1817 pp.
- Trompette, J. and Vergnes, H. (2008). On the crucial influence of some supporting electrolytes during electrocoagulation in the presence of aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials.* 163(2-3): 1282-1288.

- Villegas, I. (2009). "Remoción de sílice para uso en torres de enfriamiento mediante un método electroquímico". Tesis de licenciatura. *Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- Wen, R., Deng, S., Zhang, Y. (2005). "The removal of silicon and boron from ultra-pure water by electrodeionization." *Desalination* 181(1-3): 153-159.
- Whipple, D., Baygents, J., Farrel, J. (2007). Electrocoagulation: A Technology for Water Recycle and Wastewater Treatment in Semiconductor Manufacturing. *Technology and Research Initiative Foundation*.
- Whitten, W., Davis, E. (2008). "Química general". 5a Edición. *Mc Grall Hill*. Madrid, España. 1116pp.esign", Wiley 1977.

## 8 ANEXOS

### Caracterización electroquímica del electrodo de aluminio

Con el objetivo de determinar donde ocurre la pasivación del electrodo de aluminio, en qué valor de potencial se oxida el agua y cuando se comienza a formar picadura en la superficie del aluminio, se realizó la caracterización electroquímica de electrodos de aluminio. Los datos serán utilizados más adelante para seleccionar valores de potencial de trabajo para el reactor electroquímico.

### **Sistema electroquímico empleado**

**ELECTRODO DE REFERENCIA (ER):** Este electrodo se caracteriza por tener un valor a potencial constante y conocido, luego por tanto, permite conocer a que potencial ocurre el proceso de reducción y oxidación estudiado. El electrodo de referencia utilizado en este trabajo de investigación es el XR200 Hg/HgSO<sub>4</sub>.

**ELECTRODO DE TRABAJO (ET):** Es el electrodo donde ocurre la reacción de interés, en este caso se utilizó la punta del electrodo de aluminio, que es el material sobre el que ocurren las reacciones que van a ser objeto de estudio. Se usó el electrodo **RADIOMETER COPENHAGEN EDI 101**.

**CONTRAELECTRODO (CE):** Electrodo no polarizable, acoplado al electrodo de trabajo, actúa como un colector de corriente. Se usó una barra de grafito.

Los electrodos fueron colocados en la celda electroquímica, se usó como electrolito el agua de pozo del IMTA cuya conductividad fue ajustada a 800  $\mu\text{s}/\text{cm}$  con NaCl.

La celda electroquímica completa se muestra en la Fig. 3.5, se tuvo cuidado de mantener cercanos los electrodos pero sin tocarse. El sistema se conectó al potencióstato con interfaz de cómputo como se muestra en la Fig. 3.6.



Fig. 3.5.- Sistema montado con los electrodos en nuestra celda electroquímica.

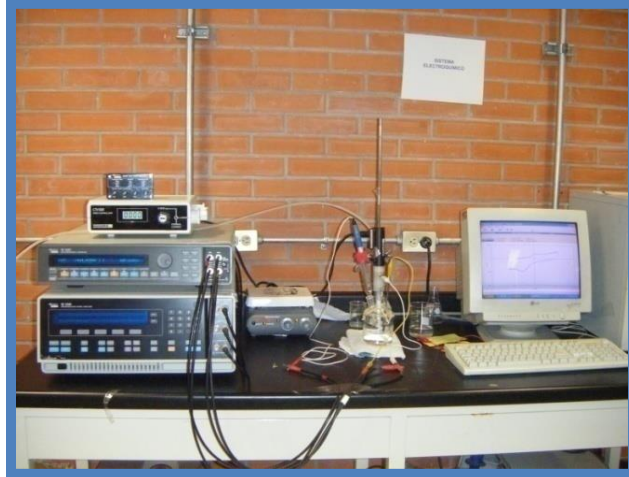


Fig. 3.6.- Potenciostato conectado a la celda electroquímica.

El objetivo de una medición potenciométrica es obtener información acerca de la composición del par redox analizando el potencial que aparece entre dos electrodos. La medición del potencial se determinó bajo condiciones reversibles, en forma termodinámica, y esto implica que se debe dejar pasar el tiempo suficiente para llegar al equilibrio, extrayendo la mínima cantidad de energía, para no influir sobre el equilibrio que se establece.

### **Voltamperometría cíclica**

Para realizar esta técnica de caracterización se necesita de la punta de aluminio en el electrodo de trabajo.

Para poder hacer la voltamperometría se burbujeó al electrolito (agua de pozo) con nitrógeno durante 20 minutos, para desplazar el oxígeno presente. Después de este tiempo se realizó la determinación de potencial a circuito abierto, a muy baja velocidad de barrido. Después se procedió a hacer una voltamperometría de 2 ciclos con una velocidad de barrido de  $50 \text{ mVs}^{-1}$ .

Se tiene programado realizar otros barridos para explorar el comportamiento del sistema a mayores valores de potencial, tanto positivo como negativo.

### **Análisis de la voltamperometría cíclica del electrodo de aluminio**

La fig. 4.1 muestra el comportamiento al realizar un barrido desde un potencial de -1.2 a 1.2 donde, hasta donde se puede observar, aún no ocurre la pasivación del electrodo de aluminio.

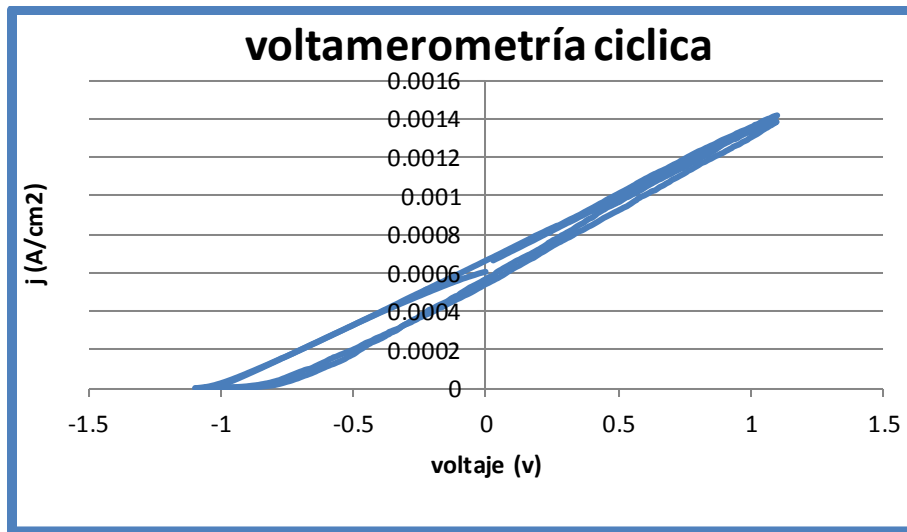
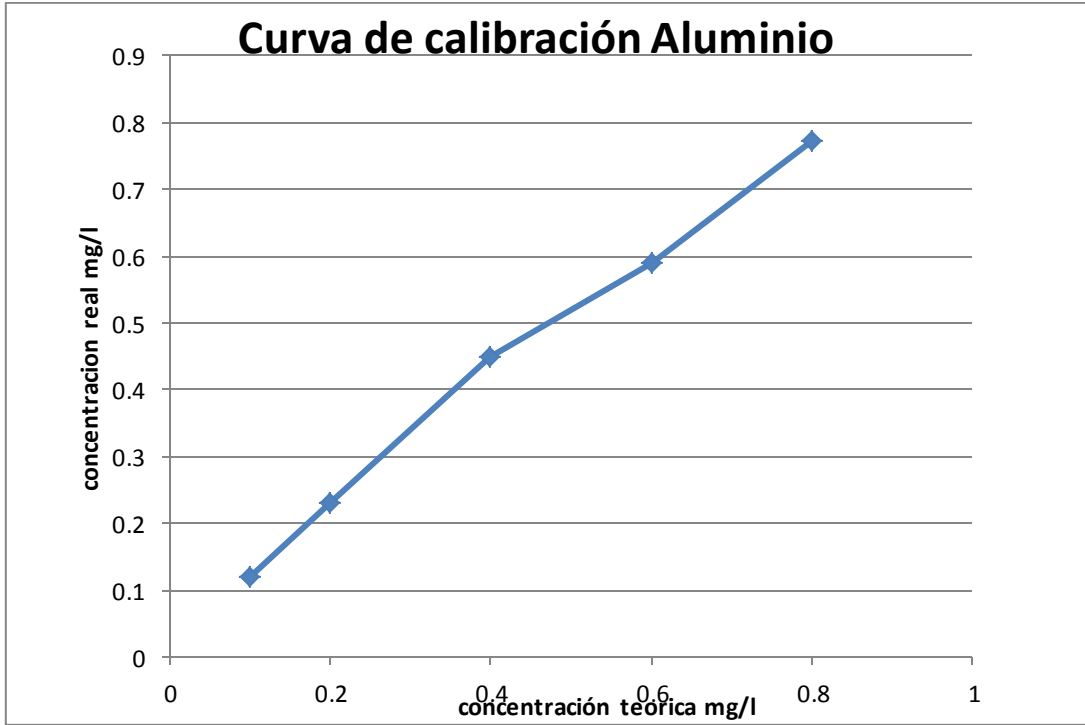


Fig. 4.1.- Voltamperometría cíclica del electrodo de aluminio con agua a 750  $\mu\text{s}/\text{cm}$

### Curvas de calibración para sílice y aluminio

Estándar de Aluminio

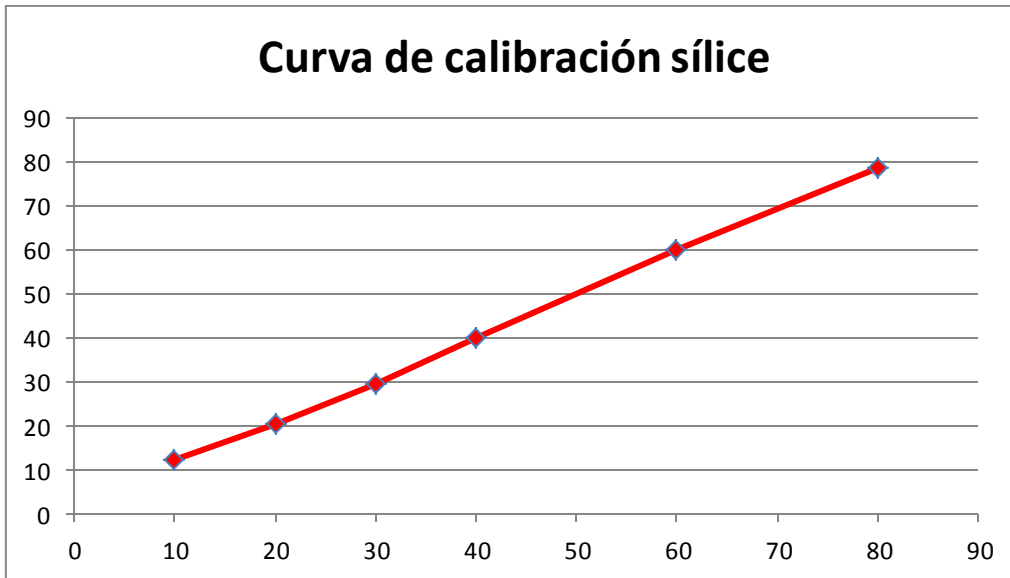
| Concentración teórica (mg/L) | Concentración real (mg/L) |
|------------------------------|---------------------------|
| 0.1                          | 0.12                      |
| 0.2                          | 0.23                      |
| 0.4                          | 0.45                      |
| 0.6                          | 0.589                     |
| 0.8                          | 0.771                     |



Estándar de Sílice

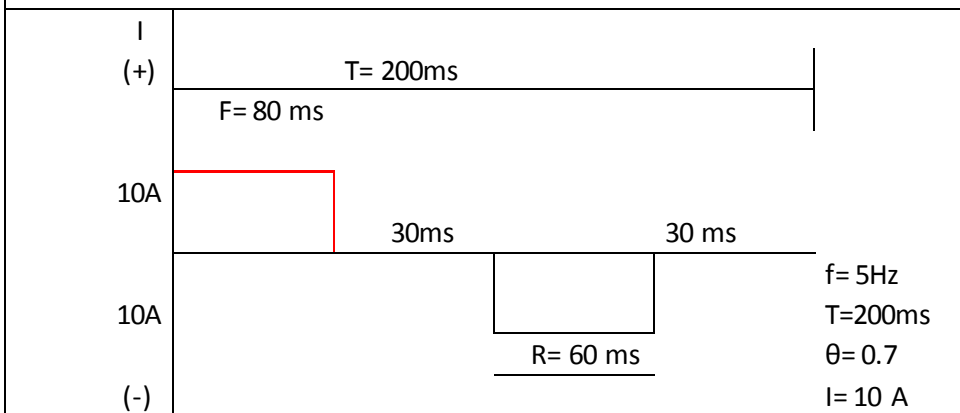
| Concentración teórica (mg/L) | Concentración real (mg/L) |
|------------------------------|---------------------------|
| 10                           | 12.1                      |
| 20                           | 20.3                      |
| 30                           | 29.5                      |
| 40                           | 40.1                      |
| 60                           | 59.81                     |
| 80                           | 78.7                      |





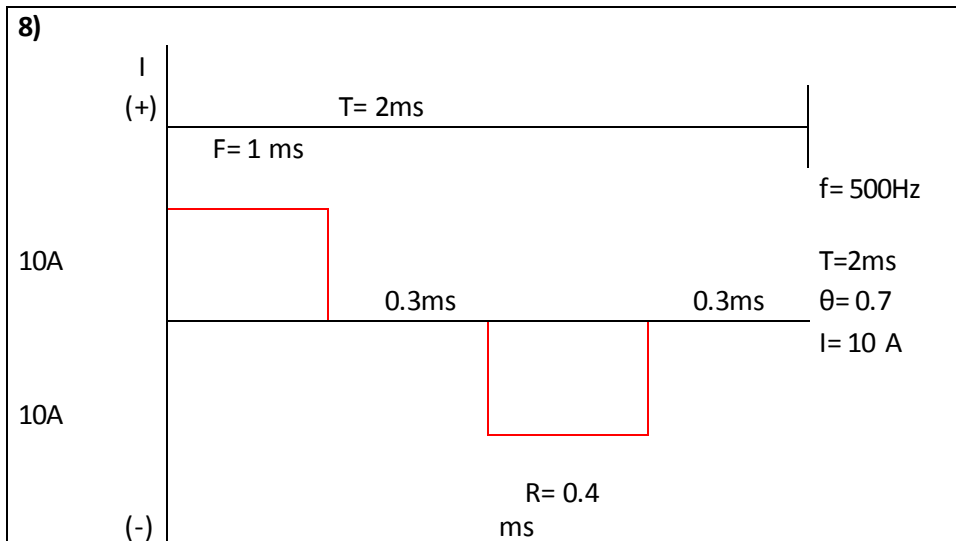
Réplicas de las pruebas 7 y 8 del diseño de experimentos ya que son las que muestran mejores resultados de remoción de sílice.

### 7)



|                         | Réplicas de la prueba 7 a la salida del reactor |       |       |       |       |       |
|-------------------------|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 1 reportada                                     |       | 2     |       | 3     |       |
| t(min)                  | 15min                                           | 60min | 15    | 60    | 15    | 60    |
| Ce (µs/cm)              | 675                                             | 725   | 685   | 703   | 645   | 700   |
| PH                      | 6.17                                            | 6.67  | 7.03  | 7.1   | 6.5   | 6.85  |
| I(A)                    | 1.002                                           | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| V                       | 1.71                                            | 1.78  | 0.57  | 0.75  | 0.64  | 0.85  |
| Al <sup>3+</sup> (mg/L) | 24.5                                            | 28.7  | 19.8  | 22.5  | 20.6  | 24.2  |

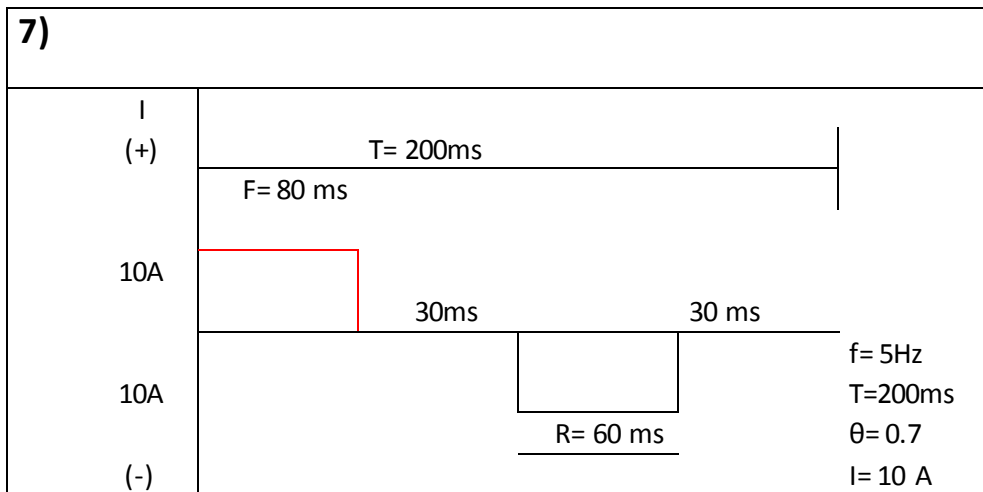
|                         | Réplicas de la prueba 7 del sedimentador (jarras) |       |       |       |       |       |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 1 reportada                                       |       | 2     |       | 3     |       |
| t(min)                  | 15min                                             | 60min | 15    | 60    | 15    | 60    |
| Ce( $\mu\text{s/cm}$ )  | 671                                               | 711   | 675   | 726   | 689   | 712   |
| PH                      | 6.56                                              | 7.01  | 6.8   | 6.9   | 6.8   | 7.01  |
| I(A)                    | 1.002                                             | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| V                       | 1.71                                              | 1.98  | 0.57  | 0.75  | 0.64  | 0.85  |
| Al <sup>3+</sup> (mg/L) | 4.3                                               | 8     | 14.5  | 17.3  | 12.4  | 16    |
| SiO <sub>2</sub> (mg/L) | 23                                                | 12.5  | 7.8   | 4.4   | 7.3   | 5.7   |
| sílice remov            | 29.9                                              | 40.4  | 42.7  | 46.1  | 43.2  | 44.8  |
| % remoción              | 56.52                                             | 76.37 | 80.72 | 87.15 | 81.66 | 84.69 |
| rel Al/Si               | 0.82                                              | 0.71  | 0.46  | 0.49  | 0.48  | 0.54  |



|                         | Réplicas de la prueba 8 salida del reactor |       |       |       |       |       |
|-------------------------|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 1 reportada                                |       | 2     |       | 3     |       |
| t(min)                  | 15                                         | 60    | 15    | 60    | 15    | 60    |
| Ce( $\mu\text{s/cm}$ )  | 574                                        | 580   | 530   | 600   | 592   | 604   |
| PH                      | 6.93                                       | 7     | 6.98  | 7.02  | 6.78  | 7.08  |
| I(A)                    | 2.987                                      | 2.987 | 2.987 | 2.987 | 2.987 | 2.987 |
| V                       | 3.7                                        | 2.93  | 2.4   | 2.21  | 2.45  | 2.2   |
| Al <sup>3+</sup> (mg/L) | 58.7                                       | 65.3  | 70.1  | 82.5  | 67.2  | 73.4  |

|                         | Réplicas de la prueba 8 sedimentado(jarras) |       |       |       |       |       |
|-------------------------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 1 reportada                                 |       | 2     |       | 3     |       |
| t(min)                  | 15                                          | 60    | 15    | 60    | 15    | 60    |
| Ce( $\mu\text{s/cm}$ )  | 582                                         | 601   | 625   | 642   | 675   | 704   |
| PH                      | 6.36                                        | 6.98  | 7.01  | 7.08  | 6.55  | 6.89  |
| I(A)                    | 2.987                                       | 2.987 | 2.987 | 2.987 | 2.987 | 2.987 |
| V                       | 3.7                                         | 2.93  | 2.4   | 2.21  | 2.45  | 2.2   |
| Al <sup>3+</sup> (mg/L) | 38.8                                        | 52.3  | 29.5  | 36.3  | 27.5  | 32.9  |
| SiO <sub>2</sub> (mg/L) | 12.9                                        | 9.3   | 2.9   | 1.9   | 4.5   | 2.7   |
| sílice remov            | 37.6                                        | 41.2  | 47.6  | 48.6  | 46    | 47.8  |
| % remoción              | 74.46                                       | 81.58 | 94.26 | 96.24 | 91.09 | 94.65 |
| rel Al/Si               | 1.56                                        | 1.58  | 1.47  | 1.70  | 1.46  | 1.54  |

En esta prueba que se hizo repetidamente no precipita de manera cuantitativa el aluminio lo cual no es conveniente.



|                         | Réplicas de la prueba 7 a la salida del reactor |       |       |       |       |       |
|-------------------------|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 1 reportada                                     |       | 2     |       | 3     |       |
| t(min)                  | 15min                                           | 60min | 15    | 60    | 15    | 60    |
| Ce( $\mu\text{s/cm}$ )  | 675                                             | 725   | 685   | 703   | 645   | 700   |
| PH                      | 6.17                                            | 6.67  | 7.03  | 7.1   | 6.5   | 6.85  |
| I(A)                    | 1.002                                           | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| V                       | 1.71                                            | 1.78  | 0.57  | 0.75  | 0.64  | 0.85  |
| Al <sup>3+</sup> (mg/L) | 24.5                                            | 28.7  | 19.8  | 22.5  | 20.6  | 24.2  |

|                         | Réplicas de la prueba 7 del sedimentador (jarras) |       |       |       |       |       |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 1 reportada                                       |       | 2     |       | 3     |       |
| t(min)                  | 15min                                             | 60min | 15    | 60    | 15    | 60    |
| Ce( $\mu$ s/cm)         | 671                                               | 711   | 675   | 726   | 689   | 712   |
| PH                      | 6.56                                              | 7.01  | 6.8   | 6.9   | 6.8   | 7.01  |
| I(A)                    | 1.002                                             | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| V                       | 1.71                                              | 1.98  | 0.57  | 0.75  | 0.64  | 0.85  |
| Al <sup>3+</sup> (mg/L) | 4.3                                               | 8     | 14.5  | 17.3  | 12.4  | 16    |
| SiO <sub>2</sub> (mg/L) | 23                                                | 12.5  | 7.8   | 4.4   | 7.3   | 5.7   |
| sílice remov            | 29.9                                              | 40.4  | 42.7  | 46.1  | 43.2  | 44.8  |
| % remoción              | 56.52                                             | 76.37 | 80.72 | 87.15 | 81.66 | 84.69 |
| rel Al/Si               | 0.82                                              | 0.71  | 0.46  | 0.49  | 0.48  | 0.54  |