

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



**“ DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES PROCEDENTES DE UNA PLANTA  
PRODUCTORA DE SULFATOS MEDIANTE EL PROCESO  
ELECTROQUÍMICO DE ELECTROCOAGULACIÓN”**

## **TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:**

**SÓCRATES ANDRÉS WESTRES ZÚÑIGA**

**LIMA – PERÚ**

**2013**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mi padre que desde el cielo siempre me dio fuerzas para seguir adelante. A mi madre que siempre estuvo a mi lado en los momentos más difíciles y nunca dejo que me rindiera.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo no podría haber sido culminado sin el apoyo de mi asesor, el Msc. Warren Reátegui Romero, que siempre me estuvo motivando a seguir adelante nunca se olvido de mi y no perdió la fe en mi trabajo.

A los miembros del jurado por haber estado dispuestos a ayudarme y aconsejarme en la corrección de la tesis.

Sin mi familia y amigos no hubiese sido posible concluir este trabajo, ya que ellos siempre estuvieron detrás de mí dándome ánimos y transmitiéndome sus buenos deseos.

Al ingeniero Walter Torres que me facilitó parte de la información para poder comenzar con los estudios de mi tema de tesis.

Al ingeniero José Silva que me facilitó el efluente de su planta productora de sulfatos, IC Industrial SRLTDA.

A la ingeniera Carmen Reyes que me apoyó con los equipos de medición del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil.

Al ingeniero Enrique Neyra que me facilitó equipo del laboratorio de investigación N° 21 de la Facultad de Ingeniería Química.

Al señor Oscar Tello que siempre fue amable en facilitarme los instrumentos que necesitaba para hacer los experimentos en el laboratorio de fisicoquímica N° 11 de la Facultad de Ingeniería Química.

## RESUMEN

En este proyecto se realizó el estudio de la tecnología de Electrocoagulación, con un efluente procedente de una planta productora de sulfatos de Zinc y Magnesio. Se manejaron las distintas variables involucradas con el proceso para poder obtener los mejores resultados posibles.

Este estudio sirvió para lograr disminuir la concentración de metales pesados tales como Boro, Cromo, Hierro, Fósforo, Molibdeno, Níquel, Plomo, Talio y Zinc, por debajo de los Límites Máximos Permisibles. Para poder lograr este resultado se tuvo que encontrar las variables óptimas relacionadas directamente con el proceso, como lo son la densidad de corriente ( $5 \text{ A/dm}^2$ ), pH de trabajo (6 – 9), caudal de entrada del efluente al reactor (14 mL/s). Los experimentos se iniciaron en un reactor por lotes donde se establecieron los parámetros densidad de corriente y pH de trabajo óptimo. Luego se diseñó y construyó un reactor tipo flujo continuo en material acrílico, con el cual se obtuvieron los mejores resultados en especial cuando se usaron electrodos de Aluminio, y donde se pudo observar lo que ocurría dentro del reactor. El poder observar lo que sucedía al interior del reactor ayudó a que se despejaron incógnitas de suma importancia en el desarrollo del proyecto.

Otra variable que confirmó que el tratamiento de Electrocoagulación fue satisfactorio y cumplió con la Ley General de Aguas (DS N° 261-69-AP), fue la turbidez que se logró disminuir de 36 NTU a 0,2 NTU. Definitivamente se logró concluir que el mejor tratamiento de Electrocoagulación se dio con el reactor flujo continuo cuando se utilizaban electrodos de Aluminio, ya que la remoción de metales pesados fue la mejor, el consumo del ánodo de sacrificio fue el más bajo, la producción de lodos fue mucho menor en comparación cuando se usó electrodos de Hierro y la cantidad de efluente tratado obtenido fue la mayor de todos los tratamientos realizados.

Finalmente se hizo un resumen con todos los gastos que involucró el proyecto, en el reactor por lotes y en reactor tipo flujo continuo. Además se hizo un escalamiento para obtener un sistema que tratara un efluente a nivel industrial, teniendo en cuenta principalmente un reactor de Electrocoagulación de mayores proporciones y un filtro prensa industrial.

## INDICE

<b>DEDICATORIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iii
<b>RESUMEN</b> .....	iv
<b>INDICE</b> .....	v
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE APENDICES</b> .....	xv
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCION</b> .....	16
1.1. Definición del problema.....	20
1.2. Objetivo general.....	23
1.3. Objetivos específicos.....	23
1.4. Hipótesis.....	23
1.5. Justificación.....	23
1.6. Alcances y limitaciones.....	24
1.7. Tratamiento de efluentes industriales líquidos.....	27
1.8. Métodos de tratamiento de efluentes líquidos industriales.....	28
1.8.1. Recuperación de metales.....	28
1.8.2. Destrucción de compuestos químicos.....	28
1.9. Metodología de trabajo.....	29
<b>CAPITULO 2: CONCEPTOS PREVIOS SOBRE ELECTROQUÍMICA</b> .....	31
2.1. Electrosíntesis.....	32
2.1.1. Clasificación.....	35
2.1.2. La reacción electroquímica.....	39
2.1.2.1. Modos de operación.....	40
2.1.3. Criterios de selección.....	48
2.1.4. Ventajas y limitaciones.....	49
2.2. Reactor electroquímico. Componentes básicos.....	50
2.2.1. Electrodos.....	50

2.2.1.1.	Tipos de electrodos .....	52
2.2.1.2.	Pasivación .....	53
2.2.1.3.	Criterios de selección. Propiedades .....	56
2.2.2.	Cuerpo de la celda .....	61
2.2.3.	Rectificadores .....	62
2.3.	Conceptos y unidades básicas.....	64
2.3.1.	Potencial de electrodo .....	64
2.3.2.	Voltaje .....	66
2.3.3.	Intensidad.....	67
2.3.4.	Densidad de corriente .....	67
2.3.5.	Resistencia eléctrica .....	69
2.3.6.	Resistividad .....	70
2.3.7.	Conductividad .....	70
2.4.	Ingeniería electroquímica. Conceptos y unidades.....	71
2.4.1.	Eficacia de la corriente.....	71
2.4.2.	Rendimiento espacio-tiempo.....	72
2.4.3.	Área electro activa por unidad de volumen .....	73
2.4.4.	Consumo específico de energía .....	73
2.4.5.	Tiempo de residencia .....	75
2.4.6.	Ley de Faraday.....	76
<b>CAPITULO 3: MARCO TEORICO DE REFERENCIA .....</b>		<b>78</b>
3.1.	Concepto, alcances y teoría de la Electrocoagulación.....	78
3.2.	Historia y evolución de la Electrocoagulación .....	82
3.3.	Restos y oportunidades de la Electrocoagulación .....	84
3.4.	Alcances técnicos de la Electrocoagulación .....	86
3.4.1.	Fenómenos producidos durante la electrólisis .....	87
3.4.2.	Factores que afectan la Electrocoagulación .....	88
3.5.	Aspectos técnicos de operación de la Electrocoagulación.....	93
3.6.	Mecanismos y Reacciones que ocurren en una celda de EC .....	95
3.7.	Análisis comparativo versus otros tratamientos .....	105
3.7.1.	Electrocoagulación (EC) v/s Tratamiento Fisicoquímico .....	105

3.7.1.1.	Comparación General.....	105
3.7.1.2.	Comparación Técnico/Económica .....	106
3.7.2.	Electrocoagulación (EC) v/s Tratamiento Biológico.....	106
3.7.2.1.	Comparación General.....	106
3.7.2.2.	Comparación Técnico/Económica .....	107
3.8.	Teoría de coloides.....	107
<b>CAPITULO 4: PROYECTOS RELACIONADOS.....</b>		<b>109</b>
4.1.	Estado del Arte .....	109
4.1.1.	Generalidades .....	109
4.1.2.	Evolución de la Electrocoagulación .....	110
4.1.2.1.	Estudios realizados.....	110
4.1.3.	Resúmenes de artículos revisados.....	112
<b>CAPITULO 5: DATOS EXPERIMENTALES .....</b>		<b>127</b>
5.1.	Reactor por lotes.....	128
5.2.	Reactor Flujo Continuo.....	142
<b>CAPITULO 6: TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>		<b>170</b>
6.1.	Reactor por lotes.....	170
6.2.	Reactor flujo continuo .....	187
<b>CAPITULO 7: ANALISIS ECONOMICO DEL PROCESO INDUSTRIAL.....</b>		<b>220</b>
7.1.	Inversión involucrada al proyecto.....	222
7.2.	Potenciales Beneficiarios.....	230
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>232</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>235</b>
<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS .....</b>		<b>236</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>		<b>239</b>
<b>APENDICES .....</b>		<b>242</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1: Concentración, en ppm, de metales pesados contenidos en la muestra inicial (sin tratamiento) del efluente proveniente de la planta productora de sulfatos.</b>	18
<b>Tabla 2: Porcentaje de remoción máximo alcanzado UNI-FIQT – Laboratorio de Físicoquímica N° 11</b>	19
<b>Tabla 3: Paralelo entre LMP y resultados obtenidos</b>	19
<b>Tabla 4: Valores máximos recomendados por la OMS y valores máximos permitidos en 3 países de América (ppm)</b>	20
<b>Tabla 5: pH, concentración de metales pesados (ppm), turbidez (NTU), de la muestra ácida inicial.</b>	21
<b>Tabla 6: Porcentaje de remoción de metales pesados <sup>(5)</sup></b>	24
<b>Tabla 7: Ventajas y limitaciones de EC <sup>(9)</sup></b>	49
<b>Tabla 8: Valores de diferentes variables en el proceso de electrocoagulación para distintos contaminantes de diversas fuentes de aguas residuales <sup>(7)</sup></b>	91
<b>Tabla 9: Características del proceso de EC <sup>(16)</sup></b>	95
<b>Tabla 10: Comparación general entre EC y el tratamiento Físicoquímico <sup>(16)</sup></b>	105
<b>Tabla 11: Comparación técnico económica entre EC y el tratamiento Físicoquímico <sup>(16)</sup></b>	106
<b>Tabla 12: Comparación general entre EC y el tratamiento Biológico <sup>(16)</sup> ...</b>	106
<b>Tabla 13: Comparación técnico económica entre EC y el tratamiento Biológico <sup>(16)</sup></b>	107
<b>Tabla 14: Paralelo entre Electrocoagulación y tratamiento Físico – Químico <sup>(14)</sup></b>	112
<b>Tabla 15: Resultados experimentales de densidad de corriente y pH en reactor por lotes</b>	138
<b>Tabla 16: Resultados experimentales en el Reactor por lotes</b>	139
<b>Tabla 17: Masa en mg de metales pesados presentes en los efluentes tratados en el reactor por lotes* (Apéndice 9)</b>	141
<b>Tabla 18: Masa en mg de metales pesados presentes en los efluentes tratados en el reactor flujo continuo con electrodos de Hierro. (Apéndice 9)</b>	159
<b>Tabla 19: Masa en mg de metales pesados presentes en los efluentes tratados en el reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio. (Apéndice 9)</b>	160
<b>Tabla 20: Resultados experimentales en el Reactor flujo continuo</b>	161
<b>Tabla 20: Resultados experimentales en el Reactor flujo continuo (continuación)</b>	162
<b>Tabla 21: Masa de ánodos después de EC. Densidad de corriente constante, 5 A/dm<sup>2</sup></b>	165
<b>Tabla 22: Cálculos de Energía Consumida Reactor por lotes</b>	171



<b>Tabla 23: Porcentajes de Remoción más altos para el Reactor por lotes*</b>	<b>172</b>
<b>Tabla 24: Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas.....</b>	<b>183</b>
<b>Tabla 25: Masa de metales removidos por EC en reactor por lotes (Apéndice 9).....</b>	<b>185</b>
<b>Tabla 25: Masa de metales removidos por EC en reactor por lotes (Apéndice 9) (continuación).....</b>	<b>186</b>
<b>Tabla 26: Cálculos de Energía Consumida en el reactor flujo continuo....</b>	<b>187</b>
<b>Tabla 27: Porcentajes de Remoción para el Reactor flujo continuo con electrodos de Hierro* .....</b>	<b>189</b>
<b>Tabla 28: Porcentajes de Remoción para el Reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio* .....</b>	<b>190</b>
<b>Tabla 29: Masa de metales removidos por EC en reactor flujo continuo (Apéndice 9).....</b>	<b>207</b>
<b>Tabla 29: Masa de metales removidos por EC en reactor flujo continuo (Apéndice 9) continuación .....</b>	<b>208</b>
<b>Tabla 30: Masa de metales removidos por EC versus consumo de ánodo en reactor flujo continuo .....</b>	<b>211</b>
<b>Tabla 31: Cuadro resumen tratamientos C25 – C28, flujo continuo .....</b>	<b>215</b>
<b>Tabla 32: Consumo de soda cáustica en escamas para el pre tratamiento .....</b>	<b>218</b>
<b>Tabla 33: Gastos detallados concernientes a la realización de Tesis.....</b>	<b>223</b>
<b>Tabla 34: Cantidad de floculante necesario para la Electrocoagulación... </b>	<b>228</b>
<b>Tabla 35: Dimensiones y precios de planchas de 9 mm de Aluminio y Hierro .....</b>	<b>228</b>
<b>Tabla 36: Inversión total en nuevos soles para un sistema de Electrocoagulación a escala industrial .....</b>	<b>230</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de bloques del proceso en general .....	30
Figura 2: Sistema de Electrocoagulación .....	34
Figura 3: Esquema de un proceso de Electrosíntesis indirecta In-Cell utilizando una celda sin dividir <sup>(9)</sup> .....	38
Figura 4: Esquema de un proceso de Electrosíntesis indirecta ex-cell utilizando una celda sin dividir <sup>(9)</sup> .....	39
Figura 5: Electrosíntesis a potencial constante. Variación del potencial electrodo y la intensidad de la corriente de la celda en función del tiempo de operación <sup>(9)</sup> .....	43
Figura 6: Electrosíntesis a intensidad constante. Ejemplo de la variación de la intensidad de la corriente y del potencial de electrodo en función del tiempo de operación <sup>(9)</sup> .....	44
Figura 7: Modos de operación respecto a la forma de alimentar y eliminar el medio de reacción: Por lotes <sup>(9)</sup> .....	45
Figura 8: Modos de operación respecto a la forma de alimentar y eliminar el medio de reacción: En continuo <sup>(9)</sup> .....	47
Figura 9: Capa producto del proceso de pasivación.....	55
Figura 10: Celda Electrolítica.....	62
Figura 11: Rectificador de corriente directa .....	64
Figura 12: Conductímetro de laboratorio.....	71
Figura 13: Representación Básica del fenómeno de EC.....	82
Figura 14: Celda Electrolítica.....	93
Figura 15: Diagrama de Pourbaix del Hierro.....	103
Figura 16: Diagrama de Pourbaix del Aluminio.....	104
Figura 17: Remoción de COD como función del pH y tiempo de tratamiento. ....	115
Figura 18: Modelo de Reactor Electroquímico .....	116
Figura 19: Reactores Electroquímicos en serie .....	117
Figura 20: Estado del efluente después de aplicar proceso de Electrocoagulación .....	118
Figura 21: Variación del voltaje de la electrólisis versus tiempo de duración de la electrólisis .....	122
Figura 22: Diagrama de una Celda Electroquímica.....	124
Figura 23: Vaso de precipitado con electrodos de Hierro. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....	129
Figura 24: Sistema del Reactor por lotes. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....	130
Figura 25: Ventilador usado para enfriar el reactor por lotes. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....	131
Figura 26: Rectificador de corriente regulación fina. Voltaje 0 – 10 v. Amperaje 0 – 15 A .....	131

<b>Figura 27: Muestra del efluente ácido inicial (procedente de una planta productora de sulfatos de Zn y Mg).....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 28: Capa pasivante que se forma en los electrodos de Hierro luego de EC. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 29: Filtración al vacío luego de EC. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 30: Torta que se obtiene luego de la filtración al vacío .....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 31: (a) Muestra ácida inicial antes de iniciar proceso (b) Efluente obtenido luego de EC por lotes con electrodos de Fe.....</b>	<b>135</b>
<b>Figura 32: Electrocoagulación por lotes con electrodos de Aluminio. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>136</b>
<b>Figura 33: Electrodos de Aluminio con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>136</b>
<b>Figura 34: (a) Muestra ácida inicial antes de iniciar proceso (b) Efluente obtenido luego de EC por lotes con electrodos de Al.....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 35: Reactor flujo continuo diseñado para los experimento. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>142</b>
<b>Figura 36: Sistema de válvulas usadas para desfogue de lodos. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....</b>	<b>143</b>
<b>Figura 37: Vista lateral del reactor flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio N° 11.....</b>	<b>143</b>
<b>Figura 38: Vista superior del reactor flujo continuo (separación de electrodos). UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>144</b>
<b>Figura 39: Reactor flujo continuo tratando efluente industrial. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 40: Electrodos de Hierro. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 41: Capa pasivante en electrodos de Fe. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 42: Electrodo de Fe con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 43: Tanque de alimentación con efluente previamente tratado que ingresa al reactor flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....</b>	<b>147</b>
<b>Figura 44: Rectificador de corriente continua de regulación fina usado en experimentos con Reactor flujo continuo. Voltaje 0 – 10v. Capacidad 0 – 100 A.....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 45: Reactor flujo continuo en pleno proceso de EC. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....</b>	<b>149</b>
<b>Figura 46: Contactos eléctricos usados para conectar el reactor al rectificador. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11.....</b>	<b>149</b>
<b>Figura 47: Sistema de filtración al vacío. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11 .....</b>	<b>150</b>

<b>Figura 48: Bomba centrífuga utilizada para filtración al vacío. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	151
<b>Figura 49: Torta obtenida luego de filtración al vacío. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	152
<b>Figura 50: Efluente obtenido luego de EC con electrodos de Al. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	152
<b>Figura 51: Compresores de aire</b> .....	153
<b>Figura 52: Reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	154
<b>Figura 53: Efluente tratado con electrodos de Aluminio. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	154
<b>Figura 54: Desfogue de lodos del Reactor flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	155
<b>Figura 55: Electrodos de Aluminio con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	156
<b>Figura 56: Ánodo de Aluminio con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	156
<b>Figura 57: Secuencia de tratamiento del efluente UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	157
<b>Figura 58: Montaje del sistema flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	158
<b>Figura 59: Sistema de EC con flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11</b> .....	158
<b>Figura 60: Diagrama de flujo del desarrollo experimental</b> .....	163
<b>Figura 61: Esquema de un sistema de Electrocoagulación a escala industrial</b> .....	225

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor por lotes (pruebas M9 y M11) .....	173
Gráfico 2: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor por lotes (pruebas M13 y M16) .....	173
Gráfico 3: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor por lotes (pruebas M17 y M18) .....	174
Gráfico 4: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor por lotes (pruebas M9 y M11) .....	175
Gráfico 5: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor por lotes (pruebas M13 y M16) .....	175
Gráfico 6: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor por lotes (pruebas M17 y M18) .....	176
Gráfico 7: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M3, M4) .....	177
Gráfico 8: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (prueba M7) .....	178
Gráfico 9: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (prueba M8) .....	179
Gráfico 10: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M9, M11) .....	180
Gráfico 11: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M13, M16) .....	181
Gráfico 12: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M17, M18) .....	182
Gráfico 13: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3) .....	191
Gráfico 14: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6) .....	191
Gráfico 15: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C18, C19) .....	192
Gráfico 16: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C25) .....	192
Gráfico 17: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C26) .....	193
Gráfico 18: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C27) .....	193
Gráfico 19: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C28) .....	194
Gráfico 20: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3) .....	195
Gráfico 21: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6) .....	195

<b>Gráfico 22: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor flujo continuo (pruebas C18, C19)</b> .....	196
<b>Gráfico 23: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3)</b> .....	197
<b>Gráfico 24: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6)</b> .....	198
<b>Gráfico 25: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C18, C19)</b> .....	199
<b>Gráfico 26: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C25, C26, C27, C28)</b> .....	200
<b>Gráfico 27: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3)</b> .....	202
<b>Gráfico 28: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6)</b> .....	202
<b>Gráfico 29: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C18, C19)</b> .....	203
<b>Gráfico 30: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C25, C26, C27, C28)</b> .....	203
<b>Gráfico 31: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C1, C2, C3)</b> .....	204
<b>Gráfico 32: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C4, C5, C6)</b> .....	205
<b>Gráfico 33: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C18, C19)</b> .....	205
<b>Gráfico 34: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C25, C26, C27, C28)</b> .....	206
<b>Gráfico 35: Masa removida (g) por EC en reactor por lotes</b> .....	210
<b>Gráfico 36: Masa removida (g) por EC en reactor flujo continuo</b> .....	210
<b>Gráfico 37: Masa removida (g) entre consumo del ánodo (g) por EC en reactor flujo continuo</b> .....	212
<b>Gráfico 38: Masa removida (g) versus voltaje Reactor flujo continuo (muestras C0/C1/C2/C3)</b> .....	213
<b>Gráfico 39: Masa removida (g) versus voltaje Reactor flujo continuo (muestras C0/C4/C5/C6)</b> .....	213
<b>Gráfico 40: Masa removida (g) versus voltaje Reactor flujo continuo (muestras C0/C18/C19)</b> .....	214
<b>Gráfico 41: Masa removida (g) versus pH Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)</b> .....	216
<b>Gráfico 42: Masa removida (g) versus masa de lodos producidos (g) Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)</b> .....	216
<b>Gráfico 43: Gráfico 6.43: Masa removida (g) versus Caudal (Q) Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)</b> .....	217
<b>Gráfico 44: Masa removida (g) versus Turbidez Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)</b> .....	218
<b>Gráfico 45: Consumo del ánodo (g) versus Caudal (m<sup>3</sup>/h) Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)</b>	219

## LISTA DE APENDICES

<b>Apéndice 1: DIMENSIONADO DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN TIPO FLUJO CONTINUO</b> .....	243
<b>Apéndice 2: COTIZACION FILTRO PRENSA NATBIO S.A.C.</b> .....	246
<b>Apéndice 3: INFORME DE ENSAYO N° MAR1004.R11</b> .....	250
<b>Apéndice 4: INFORME DE ENSAYO N° MAR1055.R11</b> .....	257
<b>Apéndice 5: INFORME DE ENSAYO N° JUL1016.R11</b> .....	264
<b>Apéndice 6: INFORME DE ENSAYO N° AGO1003.R11</b> .....	272
<b>Apéndice 7: INFORME DE ENSAYO N° AGO1075.R11</b> .....	280
<b>Apéndice 8: INFORME DE ENSAYO N° SEP1015.R11</b> .....	288
<b>Apéndice 9: Concentración de metales pesados en ppm después de ser tratados en el reactor de Electrocoagulación</b> .....	296
<b>Apéndice 10: Cálculos para el diseño de un reactor de Electrocoagulación a escala industrial <sup>(30)</sup></b> .....	300
<b>Apéndice 11: Cálculos de la cantidad máxima de metal disuelto del ánodo metálico. <sup>(12)</sup></b> .....	303
<b>Apéndice 12: Ley General de Aguas DS N° 261-69-AP</b> .....	307
<b>Apéndice 13: Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas. Ministerio de Obras Públicas de Chile DN 609/98</b> .....	308

## CAPITULO 1: INTRODUCCION

El mayor desafío que enfrenta la humanidad en la edad moderna es la preservación del Planeta Tierra como un lugar hospitalario para la vida humana y todas las otras formas de vida. Por medio de su propio ingenio y las herramientas que han desarrollado durante siglos, los seres humanos han encontrado muchas maneras de explotar la Tierra y sus recursos. El resultado ha sido una acumulación de riqueza y bienestar material para un gran número de personas. La prosperidad, medida principalmente en términos de bienes materiales, ha cobrado un alto precio, el agua se ha contaminado, los residuos se han dispersado en la tierra o han sido enterrados en ella, dejando legados de veneno para las generaciones futuras. Y los recursos de la Tierra, minerales, agua potable, han disminuido seriamente o han sido dañados a un grado alarmante en un periodo de tiempo muy corto.

La electrocoagulación (EC), que ha sido exitosamente empleada durante los últimos 100 años para el tratamiento de agua residual permite remover gran variedad de sólidos suspendidos y contaminantes disueltos en el agua. En el pasado, su progreso y aplicación a gran escala ha sido obstaculizada por varios factores, dentro de los cuales cabe mencionar, limitaciones en términos de tamaño y costo del suministro de energía eléctrica necesario, complejidad de la química y escasez del entendimiento científico. Actualmente, superados parcialmente estos inconvenientes la técnica está en capacidad de competir con la coagulación convencional.

El fundamento de EC se basa en la operación coagulación – floculación, en donde las partículas que se hallan en suspensión en el agua tienen un carácter eléctrico que las hace recolectora de iones de carga opuesta, formando agregados mas grandes llamados “flocs”, los cuales por su mayor peso sedimentarán por gravedad.

Los iones necesarios para la coagulación en un proceso químico son aportados por compuestos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, que entran en disociación en solución, provocando el efecto deseado de la coalescencia de las partículas. Por otra parte en un proceso electroquímico, los iones son aportados



por el metal de los electrodos entre los cuales se aplica una diferencia de potencial, ocasionando un reacomodamiento de cargas lo que provoca la unión y/o aglomeración de partículas para su posterior sedimentación.

Las partículas suspendidas en el agua presentan un grado elevado de estabilidad debido a su carga, que generalmente es negativa; lo que se consigue con EC es, por medio de una corriente eléctrica, generar una buena cantidad de iones de carga contraria (positiva) que producen la neutralización (desestabilización) de esas partículas; la materia desestabilizada se agrega para formar partículas de mayor peso, lo que hace más fácil su eliminación por cualquier método de separación, como por ejemplo la filtración.

El fundamento principal del método que se ha aplicado en este trabajo es el de la coagulación-floculación, que consiste en la aglutinación de las partículas contaminantes en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, denominadas flocs. En la electrocoagulación se combinan los efectos de la producción por electrolisis, de gases como  $H_2$  y  $O_2$ , y la producción de cationes, tales como el  $Fe^{2+}$  y el  $Al^{3+}$  por la oxidación de ánodos de sacrificio. Los iones metálicos pueden reaccionar con el  $OH^-$  producido en el cátodo durante la formación del  $H_2$ , formando hidróxidos insolubles que adsorben los contaminantes y contribuyen a la coagulación.

EC tiene las siguientes ventajas: requiere equipos relativamente simples; es fácil de utilizar y su operación es flexible; los flóculos formados por EC son similares a los producidos por coagulación química (excepto que los primeros tienden a ser mucho más largos, contienen menos agua superficial, son ácido-resistentes y son más estables, y por ello pueden ser separados más fácilmente por filtración).

La aplicación de EC se da en diversos campos, principalmente en industrias, tales como:

- Galvanoplastia y recubrimiento de metales
- Tratamiento o pre tratamiento de emulsiones aceitosas o sintéticas
- Minería
- Papel, textil y tintado
- Alimentaria
- Agroquímicos

Hay que tener en cuenta que el efluente obtenido es de un proceso de producción de sulfatos, cuyo contenido de metales pesados se analizó antes de proceder a tratarlo electroquímicamente. El análisis por ICP se muestra en la tabla 1, donde podemos observar el alto contenido de metales pesados. En los procesos experimentales realizados se ha logrado obtener resultados muy satisfactorios, pues los porcentajes de remoción son altos, llegando a disminuir la concentración de metales pesados por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP).

**Tabla 1: Concentración, en ppm, de metales pesados contenidos en la muestra inicial (sin tratamiento) del efluente proveniente de la planta productora de sulfatos.**

Elemento	Concentración (ppm)	Elemento	Concentración (ppm)
Ag	0,099	Mg	541
Al	787	Mn	2798
As	28,619	Mo	13,73
B	6,569	Se	3,43
Ba	<0,001	Na	329
Be	0,0894	Ni	186
Bi	41,67	P	164
Ca	315	Pb	10,13
Cd	19350	Sb	49,359
Ce	<0,02	SiO <sub>2</sub>	133
Co	1210	Sn	1,451
Cr	6,534	Sr	0,5009
Cu	18915	Ti	13,75
Fe	1169	Tl	16,36
K	142	V	3,566
Li	0,905	Zn	50708

A continuación se muestran los porcentajes de remoción máximos alcanzados en el laboratorio de Físicoquímica N° 11 UNI - FIQT para distintos contaminantes (Tabla 2), además se indican los LMP del agua para descargas al sistema de alcantarillado según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, los cuales se comparan con los resultados obtenidos a través del reactor de electrocoagulación (Tabla 3). Finalmente se hace un paralelo entre los

resultados obtenidos y los valores máximos permitidos según la OMS (1995), Canadá, E.E.U.U., y Perú (Tabla 4).

**Tabla 2: Porcentaje de remoción máximo alcanzado UNI-FIQT – Laboratorio de Físicoquímica N° 11**

<b>Contaminante</b>	<b>Máximo % de remoción alcanzado</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Máximo % de remoción alcanzado</b>
Plata	97,98	Molibdeno	99,34
Aluminio	99,69	Selenio	99,42
Arsénico	99,97	Níquel	100
Bismuto	99,95	Fósforo	99,18
Berilio	99,66	Plomo	99,9
Cadmio	99,96	Antimonio	97,99
Cobalto	99,96	Sílice	97,07
Cromo	99,94	Estaño	99,93
Cobre	99,97	Titanio	99,93
Litio	99,56	Vanadio	99,92
Magnesio	99,35	Zinc	99,86
Manganeso	99,96		

**Tabla 3: Paralelo entre LMP y resultados obtenidos**

<b>Parámetro</b>	<b>LMP para descargas al sistema de alcantarillado (ppm)</b>	<b>Resultados Obtenidos (ppm)</b>
Aluminio	10	2,58
Arsénico	0,5	0,008
Boro	4	2,44
Cobre	3	1,351
Cromo hexavalente	0,5	0,004
Manganeso	4	1,193
Níquel	4	0,002
Plomo	0,5	0,01

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento Perú

**Tabla 4: Valores máximos recomendados por la OMS y valores máximos permitidos en 3 países de América (ppm)**

Norma	Concentración Elemento (ppm)		
	Plomo	Cobre	Cromo
OMS (1995) Valores Guía	0,010	2,00	0,05
PERU (1999) DIGESA	0,050	1,00	0,05
CANADA (1995) HE EHD	0,010	1,00	0,05
USA (1998) NP- DWR	0,00	1,30	0,10
Resultados Obtenidos	0,01	1,35	0,004

Fuente: Normas Internacionales para la Calidad del Agua de Bebida, CEPIS/OPS-OMS.

Cabe mencionar que todos los análisis han sido proporcionados por un laboratorio acreditado (CIMM-PERU) y que su nivel de confiabilidad es el adecuado para este tipo de tratamientos. Se ha hecho uso de una técnica denominada Metales Totales - ICP, que es una espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo para medir cuantitativamente concentraciones de aditivos, contaminantes y metales contenidos en un líquido.

### 1.1. Definición del problema

Los metales pesados son un problema grave para el ambiente, el efluente que se ha utilizado es proveniente de una fábrica productora de sulfatos, IC Industrial SRLTDA ubicada en el distrito de Ventanilla, Lima - Perú. El efluente es en sí una mezcla de varias líneas de producción de sulfatos; sulfato de cobre, sulfato de magnesio y sulfato de zinc. Esta mezcla de efluentes de varias líneas de producción, es el efluente con el que se ha hecho los experimentos en el laboratorio de Físicoquímica N° 11 UNI – FIQT.

Al mandar analizar este efluente se obtuvieron sus principales características, como por ejemplo, pH, concentración de metales

pesados, turbidez. Estos resultados se evidencian en la tabla 5. Como se mencionó al inicio de este punto el problema de los metales pesados presentes en los efluentes industriales es un problema que está afectando a todos los seres vivos del planeta, ya que como se explicará más adelante algunos los metales pesados tienen consecuencias letales en caso de entrar en contacto con nuestro organismo.

**Tabla 5: pH, concentración de metales pesados (ppm), turbidez (NTU), de la muestra ácida inicial.**

Parámetro			Ag(t)	Al(t)	As(t)	B(t)	Ba(t)	Be(t)	Bi(t)
Muestra	Fecha	Tipo	ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm
M1	22-02-11	Efluente	0,099	787	28,619	6,569	<0.001	0,0894	41,67

Parámetro			Ca(t)	Cd(t)	Ce(t)	Co(t)	Cr(t)	Cu(t)	Fe(t)
Muestra	Fecha	Tipo	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm
M1	22-02-11	Efluente	315	19350	<0.02	1210	6,534	18915	1169

Parámetro			K(t)	Li(t)	Mg(t)	Mn(t)	Mo(t)	Se(t)	Na(t)
Muestra	Fecha	Tipo	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm
M1	22-02-11	Efluente	142	0,905	541	2798	13,73	3,43	329

Parámetro			Ni(t)	P(t)	Pb(t)	Sb(t)	SiO2(t)	Sn(t)	Sr(t)
Muestra	Fecha	Tipo	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm
M1	22-02-11	Efluente	186	164	10,13	49,359	133	1,451	0,5009

Parámetro			Ti(t)	Tl(t)	V(t)	Zn(t)	pH	Turbidez
Muestra	Fecha	Tipo	ppm	ppm	ppm	ppm		NTU
M1	22-02-11	Efluente	0,01	0,05	0,003	50708	1,00	36,00

M1: Esta denominación fue usada para hacer los análisis, corresponde a la muestra del efluente inicial sin tratamiento.

Se desea plantear conceptos previos para poder dar una respuesta final a esta incógnita, la cual se hará al final del trabajo luego de haber explicado toda la investigación realizada.

Un metal pesado se define básicamente por ser un metal con densidad mayor a la del agua ( $\rho \geq 5\text{g/cm}^3$ ), además cuyo número atómico es mayor a 20 (excluidos alcalinos y alcalinotérreos). Los principales metales pesados son: Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn. La contaminación con metales pesados puede surgir de muchas fuentes, pero más comúnmente de la purificación de metales, por ejemplo, el smelting (proceso de extracción del metal de la piedra) del cobre o la preparación de combustible nuclear. La electrodeposición es la primera fuente de cromo y cadmio. Mediante la precipitación de estos compuestos o el intercambio de iones hacia los suelos y barros, los metales pesados se pueden localizar y quedar depositados. <sup>(1)</sup>

A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no decaen y presentan otros desafíos para remediarlos. El aluminio por ejemplo, inhibe la absorción de Fe y algunos procesos metabólicos; las raíces se atrofian y no se movilizan los nutrientes a las demás partes de la planta. El Cadmio produce disfunción renal, enfermedades pulmonares, y puede provocar osteoporosis. El cromo es cancerígeno, produce bronquitis crónica, ulceraciones, entre otros. El plomo produce fatiga, dolores de cabeza intensos, dolores óseos, impotencia, anemia, etc. <sup>(2)</sup>

Los límites máximos permisibles son una medida de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos o biológicos, que caracterizan un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Los criterios para la determinación de la supervisión y sanción son establecidos por dicho Ministerio. El LMP guarda coherencia entre el nivel de protección ambiental establecido para una fuente determinada y los niveles generales que se establecen en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). La implementación de estos instrumentos debe asegurar que no se exceda la capacidad de carga de los ecosistemas, de acuerdo con las normas sobre la materia. <sup>(3,4)</sup>

## **1.2. Objetivo general**

- 1.2.1. Estudiar la remoción de metales pesados de un efluente industrial procedente de una planta productora de sulfatos de Zinc y Magnesio mediante la técnica electroquímica de Electrocoagulación.

## **1.3. Objetivos específicos**

- 1.3.1. Disminuir la concentración, por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP), de los metales pesados presentes en el efluente procedente de un proceso de fabricación de sulfatos mediante la técnica electroquímica de electrocoagulación.
- 1.3.2. Diseñar un sistema de reactores electroquímicos para el proceso en flujo continuo.
- 1.3.3. Verificar si EC es un tratamiento suficiente para cumplir con las especificaciones vigentes en el sector industrial.

## **1.4. Hipótesis**

¿Sería posible disminuir la concentración de metales pesados, contenidos en el efluente de una planta productora de sulfatos, por debajo de los LMP mediante la técnica electroquímica de electrocoagulación?

## **1.5. Justificación**

La degradación ambiental ha sido reconocida como un problema mundial durante las últimas décadas. Varias naciones han empezado a tomar medidas, dirigidas principalmente a reducir la contaminación del agua, así como a disminuir los efectos de los residuos peligrosos dispuestos inadecuadamente. Todas las actividades del hombre generan un impacto sobre el medio ambiente. Los efluentes líquidos no son la excepción.

EC, es una técnica que permite tratar efluentes industriales, como en este caso un efluente de una industria de producción de sulfatos con alto contenido de metales pesados. La técnica aplicada ha permitido obtener un efluente amigable con el ambiente y que podría ser reusado nuevamente en el proceso.

A diferencia del tratamiento biológico, el sistema de electrocoagulación aplicado a aguas residuales requiere de una menor superficie (entre un 50 a 60% menor). Las unidades de EC son compactas, fáciles de operar, con un consumo de energía y producción de lodo (más compacto) inferior a los sistemas biológicos convencionales. No utilizan productos químicos, son unidades que se utilizan cuando se requieren.

Además, con este tratamiento se alcanzan porcentajes de remoción altos, como se muestra a continuación:

**Tabla 6: Porcentaje de remoción de metales pesados <sup>(5)</sup>**

<b>Metales Pesados</b>	<b>% de remoción</b>	<b>Metales Pesados</b>	<b>% de remoción</b>
Aluminio	> 99	Manganeso	83 – 85
Bario	> 98	Níquel	> 99
Cromo	> 99	Selenio	> 99
Cobre	> 99	Vanadio	95 – 98
Hierro	> 99	Zinc	> 99
Magnesio	98 - 99		

### **1.6. Alcances y limitaciones**

El tratamiento de las aguas residuales con la tecnología de EC se ha practicado durante la mayor parte del siglo 20 con gran éxito y la popularidad. En la última década, esta tecnología ha sido cada vez más utilizada en América del Sur y Europa para el tratamiento de aguas residuales industriales que contienen metales. También se ha observado, que en América del Norte la EC ha sido utilizado



principalmente para el tratamiento de aguas residuales de la industria de papel, minería y procesamiento de metales.

Además, EC se ha aplicado para tratar agua que contiene residuos de productos alimenticios, aceite de desechos, colorantes], partículas en suspensión, desechos químicos y pulido mecánico, la materia orgánica de lixiviados de vertederos, desfluoración de agua, efluentes de detergentes sintéticos, y solución conteniendo metales pesados que contiene. Normalmente, los estudios empíricos se llevan a cabo en la EC, para definir los principales parámetros de funcionamiento. La tecnología ha sido optimizada para minimizar el consumo de la energía eléctrica y maximizar las tasas de rendimiento de efluentes.

La coagulación es un fenómeno en el cual las partículas cargadas en suspensión coloidal son neutralizadas por colisión mutua con iones contrarios y son aglomerados, seguido por un proceso de sedimentación. En general se acepta que la coagulación se produce principalmente por la reducción de la carga superficial neta a un punto donde las partículas coloidales, que previamente se han estabilizado por la repulsión electrostática, pueden acercarse lo suficientemente cerca para que las fuerzas de Van der Waal puedan mantenerlos juntos y permitir la agregación. La reducción de la carga superficial es una consecuencia de la disminución del potencial de repulsión de la doble capa eléctrica por la presencia de un electrolito que tiene carga opuesta.

En el proceso de EC, el coagulante se genera in situ por oxidación electrolítica de un material del ánodo apropiado. En este proceso, la carga iónica de especies metálicas se elimina de las aguas residuales, permitiendo que reaccione (i) con un ión que tiene carga opuesta, o (ii) con flóculos de hidróxidos metálicos generado dentro del efluente. <sup>(6)</sup>

La tecnología EC ofrece una alternativa a la utilización de sales de metales o polímeros y poli electrolitos. Además de romper emulsiones estables y suspensiones, la tecnología elimina metales, sólidos coloidales, y contaminantes inorgánicos solubles en medios acuosos,

mediante la introducción de especies poliméricas altamente cargadas de hidróxido de metal. El tratamiento induce la precipitación de ciertos metales y sales. Las ventajas y desventajas de la EC se describen a continuación:<sup>(7)</sup>

Ventajas:

- La EC necesita de un equipo sencillo, fácil de operar, para manejar la mayoría de los problemas encontrados en su funcionamiento.
- Las aguas residuales tratadas por EC dan aguas claras, incoloras e inodoras.
- El lodo formado por EC tiende a ser fácilmente comprimible y libre de agua, porque está compuesto principalmente de óxidos metálicos o hidróxidos.
- Los flóculos formados por EC son similares a los flóculos producidos químicamente, excepto que el flóculo producido por EC tiende a ser mucho más grande, contiene menos agua, es resistente a los ácidos y más estable, y por lo tanto, puede ser separado por filtración rápida.
- La EC produce efluentes con menos sólidos disueltos totales (TDS) en comparación con el obtenido con tratamientos químicos. Si esta agua se reutiliza, el bajo nivel de TDS contribuye a una mayor recuperación de costos.
- El proceso de EC tiene la ventaja de eliminar las partículas coloidales más pequeñas, porque el campo eléctrico aplicado los pone en rápido movimiento, lo que facilita la coagulación.
- El proceso de EC evita el uso de productos químicos, y así no hay ningún problema de neutralizar el exceso de los productos químicos y sin la posibilidad de contaminación secundaria

causada por sustancias químicas añadidas en una concentración elevada como con la coagulación química.

- Las burbujas de gas producidas durante la electrólisis pueden llevar el contaminante a la parte superior de la solución, donde puede ser más fácilmente concentrado, recogido y retirado.
- Los procesos electrolíticos en la celda de EC son controlados eléctricamente sin partes móviles, por lo que requieren menos mantenimiento.
- La técnica de EC puede usarse convenientemente en las zonas rurales donde la electricidad no está disponible, desde un panel solar conectado a la unidad puede ser suficiente para llevar a cabo el proceso. <sup>(7)</sup>

#### Desventajas:

- Los electrodos de sacrificio se disuelven en el agua residual como resultado de la oxidación.
- El uso de la electricidad puede ser costoso en muchos lugares.
- Una película de óxido impermeable se puede formar en el cátodo que conduce a la pérdida de eficiencia de la unidad EC.
- Se requiere una alta conductividad en las aguas residuales.
- El Hidróxido gelatinoso generado puede tender a solubilizar en algunos casos. <sup>(7)</sup>

### **1.7. Tratamiento de efluentes industriales líquidos**

EC es una tecnología nueva, innovadora y preventiva, que se está adaptando al desarrollo de procesos de producción limpios, bien como tecnología curativa, utilizándose fundamentalmente en la depuración de

los efluentes industriales. El mayor entendimiento de la tecnología electroquímica y por ende de la EC, ha hecho que se empiece a utilizar en mayor cantidad esta tecnología para el tratamiento de efluentes líquidos.<sup>(8)</sup>

Este interés se ve reforzado por el hecho de que la electrólisis transcurre a través de un electrodo no consumible y emplea un reactivo sin masa, el electrón, lo que evita la adición de reactivos químicos (o la minimiza drásticamente), adición necesaria en los procesos de tratamiento convencionales (neutralización, precipitación, oxidación y reducción química) que da lugar a efluentes secundarios (lodos en proceso de precipitación y neutralización química para eliminar los iones metálicos contenidos en un efluente) que a su vez precisan de tratamiento posterior.<sup>(8)</sup>

## **1.8. Métodos de tratamiento de efluentes líquidos industriales**

### **1.8.1. Recuperación de metales**

La eliminación y recuperación de metales de efluentes acuosos es el área más conocida de la electroquímica y en la que se han aplicado un mayor número de diseños diferentes de celda como consecuencia de la gran diversidad de fuentes que los originan (galvanotecnia, decapado, baterías, licores de reacciones catalíticas, limpieza de metales, etc. Y su variada composición. En la mayoría de los casos, la concentración del metal en el efluente está comprendida entre 10 y 1000 ppm, y es frecuentemente necesario disminuirla por debajo de 1 ppm, lo que exige celdas con elevadas velocidades de transferencia de materia y electrodos con elevada área específica.<sup>(8)</sup>

### **1.8.2. Destrucción de compuestos químicos**

La destrucción electroquímica de compuestos químicos puede ser una alternativa económicamente viable a la incineración,

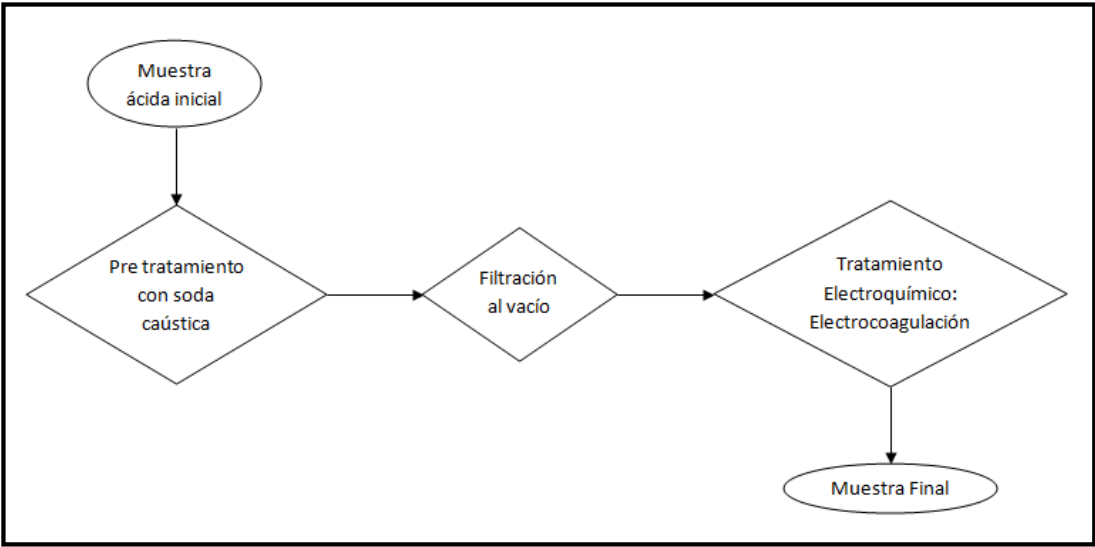
absorción sobre lechos de carbono activo y al vertido en pozos a gran profundidad pues es una solución final y no una mera transferencia de contaminantes desde un medio a otro. La oxidación completa de un compuesto orgánico a  $\text{CO}_2$  y agua es un proceso que requiere numerosos electrones por mol, por lo que es económicamente inaceptable salvo en el caso de que la concentración del contaminante sea baja.<sup>(8)</sup>

### 1.9. Metodología de trabajo

Se ha desarrollado una tecnología para el tratamiento de un efluente de una planta productora de sulfatos, pero en sí la ambición del proyecto es aplicar el diseño a cualquier tipo de efluente que sea desechado de las industrias nacionales.

El diseño empieza por determinar si es posible tratar al efluente mediante esta tecnología de electrocoagulación, para lo cual se realiza un procedimiento que se da en los siguientes niveles:

- Nivel de laboratorio: Con un equipo que permite realizar la electrocoagulación a pequeña escala, se definen los parámetros relevantes y se determina si el efluente está “apto” a la aplicación de la electrocoagulación. El equipo utilizado es un reactor por lotes o por lotes, el cual consiste en un recipiente de PVC, especialmente construido para trabajar con volúmenes pequeños, trabajar con seguridad y visualizar lo que ocurre en el transcurso de la reacción.
- Nivel planta piloto: es un reactor que trabaja a flujo continuo y que nos sirve para realizar pruebas de confirmación de los estudios preliminares hechos en el reactor tipo por lotes. El reactor en flujo continuo consiste en un recipiente de acrílico, construido para trabajar en flujo continuo, con una capacidad aproximada de 3 litros y que nos ha permitido obtener un flujo máximo de 1 L/min.



**Figura 1: Diagrama de bloques del proceso en general**

## CAPITULO 2: CONCEPTOS PREVIOS SOBRE ELECTROQUÍMICA

La electroquímica es una vieja ciencia que data del siglo pasado, pues ya en el año 1980 se inició la fabricación de cloro-sosa a escala industrial por vía electroquímica. A pesar de ello sigue siendo una disciplina bastante desconocida tanto en el ámbito académico como en el industrial. <sup>(9)</sup>

Los notables avances producidos en los últimos cuarenta años en el diseño de los reactores electroquímicos, de los materiales electródicos, así como el desarrollo de membranas selectivas de intercambio iónico como diafragmas, junto con un mayor conocimiento de los problemas de ingeniería relacionados con las dificultades de escalado, han permitido no sólo mejorar las aplicaciones tradicionales, sino desarrollar otras completamente nuevas en campos tan dispares como:

- Metalurgia
- Química inorgánica
- Industria alimentaria
- Biotecnología
- Ambiente
- Potabilización de aguas <sup>(9)</sup>

La electroquímica ofrece oportunidades únicas de conciliar los intereses industriales con los ambientales ya que, gracias a su extraordinaria versatilidad, es capaz de adaptarse, tanto a soluciones al final de la tubería, como a la filosofía actualmente imperante de evitar la contaminación en su origen, rediseñando y modificando los actuales procesos de fabricación, ofreciendo asimismo soluciones para la recuperación y reciclado al proceso de las materias primas en los efluentes. En efecto la electroquímica utiliza el electrón como reactivo, como fuerza impulsora en los procesos, en sustitución de los reactivos químicos convencionales de gran poder contaminante. Se clasifica pues, dentro de las tecnologías de producción limpias, que dan lugar a procesos de fabricación limpios o de menor impacto ambiental, y por lo tanto efluentes

industriales con una carga contaminante drásticamente reducida. Por otra parte, su facilidad de control (basta apretar un botón para que el proceso se detenga o se ponga en marcha instantáneamente) incrementa la seguridad de sus aplicaciones. <sup>(9)</sup>

## **2.1. Electrosíntesis**

Se puede definir una Electrosíntesis, como la tecnología mediante la que es posible producir una reacción química en una disolución en la que existen sustancias, inorgánicas u orgánicas, susceptibles de reducirse y oxidarse, mediante la aplicación por medio de una fuente de alimentación de corriente continua, de una diferencia de potencial que genere un paso neto de corriente eléctrica entre dos conductores, llamados electrodos, en contacto con dicha disolución. Característica común a todas las Electrosíntesis es que se tratan de procesos heterogéneos, en los que una de las fases es sólida (el electrodo), mientras que la otra es líquida, el electrolito. La utilización del electrón como sustitutivo de los reactivos químicos confiere a la Electrosíntesis una característica diferencial sumamente ventajosa sobre las tecnologías químicas convencionales. <sup>(9)</sup>

En efecto, la creciente conciencia social a nivel mundial de la necesidad de ahorrar energía y preservar el medioambiente mediante la eliminación de la contaminación en el origen (prevención) exige el desarrollo e implantación de tecnologías de producción limpias, energéticamente eficientes. Es este sentido, la Electrosíntesis permite compatibilizar el desarrollo industrial con el respeto al medio ambiente, con la ventaja añadida, de que se puede utilizar, bien como tecnología preventiva (procesos de producción limpios), bien como tecnología curativa (depuración de los efluentes generados por los procesos industriales actuales). <sup>(9)</sup>

Por otra parte si se le compara sobre una base molar, el electrón es el reactivo de oxidación-reducción más barato, puro y versátil. Además a



diferencia de otros reactivos de procesos redox que permanecen en el medio del proceso de reacción, lo que supone:

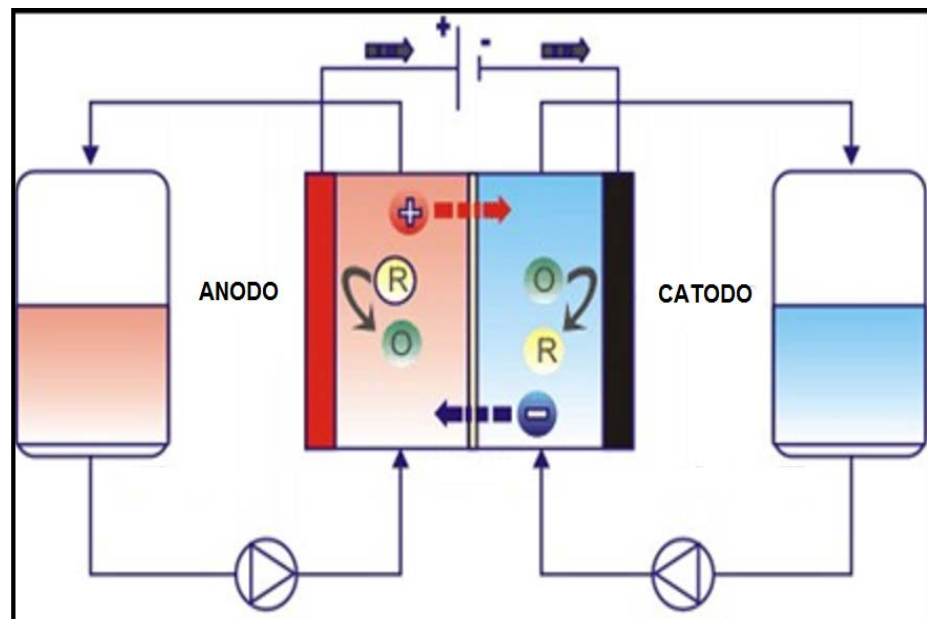
- Mayores costes de extracción y purificación de los productos.
- La generación de efluente con una elevada carga contaminante. La presencia de cinc, aluminio, litio y sales de manganeso, y cromo originan efluentes de gran poder contaminante debido a su elevada toxicidad. <sup>(9)</sup>

En contraposición, la utilización del electrón, un reactivo exento de masa, permite evitar los problemas mencionados. De ahí que sea el reactivo más puro de los conocidos. Su versatilidad surge del hecho de que, al contrario que los reactivos químicos convencionales, puede eliminarse (oxidación) o añadirse (reducción) al medio de reacción rápida y fácilmente. Controlando el potencial del electrodo es además posible, producir selectivamente un compuesto sin dar lugar a subproductos. <sup>(9)</sup>

Por otra parte, es imposible llevar a cabo procesos imposibles por vía química convencional, gracias a la inversión de la polaridad que la transferencia electrónica entre el electrodo y un sustrato producen los centros electro activos de éste. <sup>(9)</sup>

Por último, la disponibilidad comercial a partir de los años ochenta de celdas electroquímicas adaptables a diferentes tipos de proceso, diseñadas para ser energéticamente eficientes y fácilmente controlables, ha facilitado la introducción a escala industrial de la Electrosíntesis como tecnología de proceso y de tratamiento de efluentes, no sólo en la industria química, sino en cualquier otra que precise de algún proceso químico para llevar a cabo su actividad. <sup>(9)</sup>

En la siguiente figura puede observarse un esquema de un sistema electrolítico básico:



**Figura 2: Sistema de Electrocoagulación**

La celda esquematizada en la figura anterior, corresponde a uno de Los varios diseños empleados en Electrosíntesis, en concreto al tipo tanque, quizás el más conocido por su amplia utilización en la electrodeposición de metales. <sup>(9)</sup>

Las reacciones electroquímicas sólo son posibles gracias a la presencia en la celda tanto de un ánodo como de un cátodo. La necesidad de mantener un balance de cargas en todo el sistema electrolítico exige:

- El paso de los electrones desde el ánodo al cátodo.
- Que exista transporte de carga dentro de una celda. <sup>(9)</sup>

La primera condición se cumple merced a la existencia del circuito eléctrico externo. La segunda, por la presencia de iones en la disolución electrolítica:

- Aniones que transportan las cargas eléctricas negativas hacia el ánodo.
- Cationes que transportan las cargas eléctricas positivas hacia el cátodo. <sup>(9)</sup>

### 2.1.1. Clasificación

A grandes rasgos existen dos tipos de reacciones de Electrosíntesis:

- Directas
- Indirectas

En las reacciones directas el intercambio electrónico se realiza directamente, en la interfase electrodo-disolución (doble capa), entre el electrodo y la sustancia electro activa a transformar en un determinado producto. Son por lo tanto reacciones heterogéneas. La diferencia fundamental con respecto a las reacciones químicas heterogéneas estriba en que la interfase electrodo-disolución está electrificada, y en ella existen campos eléctricos tan altos como 107 V/cm, lo que permite llevar a cabo a temperaturas moderadas procesos inviábiles por vía química. <sup>(9)</sup>

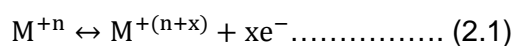
En las reacciones indirectas la transferencia electrónica se realiza entre el electrodo y un mediador que posteriormente reacciona químicamente en el seno de la disolución con el sustrato, regenerándose a continuación el mediador en el electrodo. Son principalmente utilizadas en la Electrólisis de compuestos orgánicos y en el tratamiento de aguas residuales en las que el agente oxidante ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NaClO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ) se electrógena in situ. El mediador es un agente oxidante o reductor inorgánico u orgánico, generalmente inorgánico. <sup>(9)</sup>

Las reacciones indirectas incluyen dos etapas de reacción:

- Una heterogénea, electroquímica, entre el electrodo y el mediador.
- Una homogénea, química, en la disolución electrolítica, entre el mediador y el sustrato. <sup>(9)</sup>

El proceso puede visualizarse mediante el siguiente esquema de reacción:

Reacción electroquímica:



Reacción química en disolución:



ó



Las ventajas de las Electrosíntesis indirectas sobre las directas son las siguientes:

- La etapa electrolítica puede realizarse en un electrolito de elevada conductividad a concentraciones del mediador lo

suficientemente elevadas como para poder operar a altas densidades de corriente obteniendo excelentes eficacias de corriente y bajos consumos específicos de energía. Con frecuencia se pueden utilizar celdas sin dividir.

- Es posible fabricar compuestos con una alta selectividad y eficacia de la corriente, imposibles de obtener por electroreacción directa. De hecho, la Electrosíntesis indirecta es una clara alternativa cuando la eficacia de la corriente obtenida por Electrosíntesis directa es muy baja. <sup>(9)</sup>

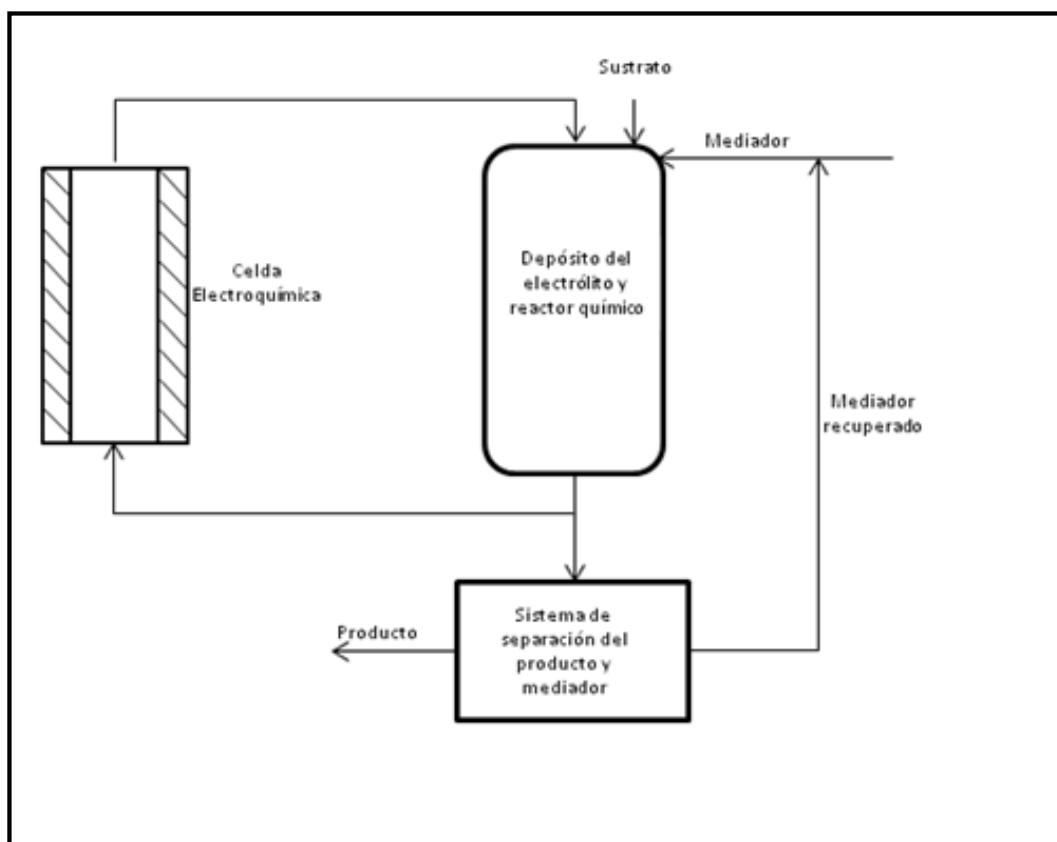
La principal desventaja radica en que engloban dos etapas de reacción secuenciales, con lo que las condiciones que favorecen una de ellas pueden ser negativas para la otra. <sup>(9)</sup>

La Electrosíntesis indirecta es siempre una alternativa a considerar en aquellos procesos químicos que empleen como reactivos generales redox inorgánicos, pues en principio permiten obtener los mismos rendimientos soslayando los inconvenientes económicos y ambientales relacionados con la utilización del mediador en cantidades estequiométricas o superiores, necesarias en los procesos químicos convencionales. <sup>(9)</sup>

Desde un punto de vista operativo las Electrosíntesis indirectas pueden realizarse de dos modos:

- In-cell
- Ex-cell

En el modo in-cell la reacción entre el sustrato y el mediador junto con la electro regeneración de éste se llevan a cabo dentro de la celda electroquímica. En el modo ex-cell la reacción química y la electroquímica se llevan a cabo en diferentes reactores. Ambos modos de operación se esquematizan a continuación: <sup>(9)</sup>



**Figura 3: Esquema de un proceso de Electrosíntesis indirecta In-Cell utilizando una celda sin dividir <sup>(9)</sup>**

Las ventajas de los procesos ex-cell con respecto a los in-cell son:

- Mayor flexibilidad, pues las etapas de reacción química y electroquímica pueden optimizarse separadamente, maximizando así la eficacia global del proceso.
- El reactivo redox producido en un único reactor electroquímico puede emplearse en varios procesos químicos para obtener diferentes productos, punto de importancia por ejemplo en el campo de la química fina. <sup>(9)</sup>

Su desventaja principal es que requieren un mayor número de equipos y sistemas de control que los procesos in-cell.

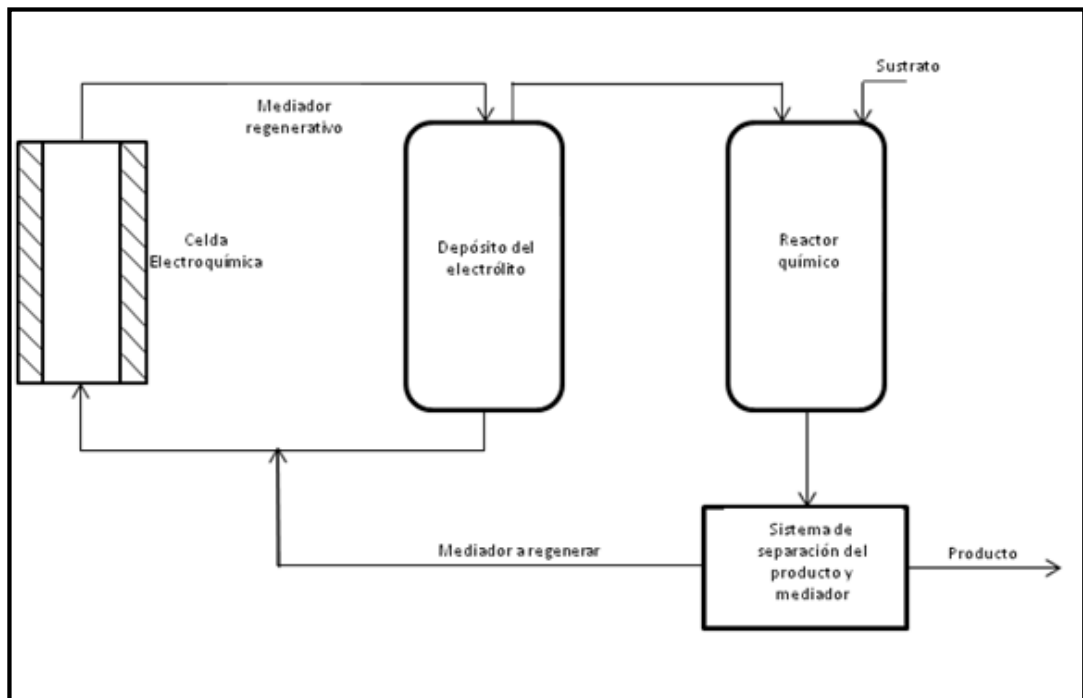


Figura 4: Esquema de un proceso de Electrosíntesis indirecta ex-cell utilizando una celda sin dividir <sup>(9)</sup>

Los criterios básicos para escoger una u otra forma de operar son, obviamente, la obtención de:

- Una elevada selectividad.
- Una alta eficacia de la corriente.
- Bajos costes de inversión y operación. <sup>(9)</sup>

### 2.1.2. La reacción electroquímica

En general, los procesos de Electrosíntesis están gobernados por un mayor número de variables que los procesos químicos convencionales. Algunas tales como el pH, la temperatura, el disolvente, la concentración de reactivos, los métodos de mezcla y el tiempo de reacción, son comunes a ellos aunque sus efectos pueden ser muy diferentes en las reacciones químicas que en las

reacciones electroquímicas. Otras son características de éstas, siendo las más importantes:

- El potencial de electrodo.
- El material electrodico.
- El tipo y geometría de la celda.
- La densidad de corriente. <sup>(9)</sup>

Este mayor número de variables complican el estudio de una reacción electroquímica, pero a la vez ofrecen la ventaja de un mayor número de grados de libertad y por lo tanto, de una mayor versatilidad de operación, que con frecuencia se traduce en la obtención de mejores resultados. <sup>(9)</sup>

#### **2.1.2.1. Modos de operación**

Los modos de operación se pueden clasificar según:

- La forma de aplicar la energía eléctrica. Son los que diferencian a las reacciones electroquímicas de las químicas.
- La manera de alimentar el medio de reacción a la celda. Son comunes a los procesos químicos convencionales. <sup>(9)</sup>

##### **2.1.2.1.1. Modos de aplicar la energía eléctrica**

Existen dos formas de operar:

- A potencial de electrodo constante.
- A intensidad de corriente constante.



Dado que el potencial del electrodo regula la eficacia de la corriente y la selectividad de una Electrosíntesis, bastaría con mantenerlo constante en un valor ligeramente inferior al correspondiente a la densidad de corriente limitante para obtener una selectividad y una eficacia de corriente del 100 por 100. <sup>(9)</sup>

La velocidad de una Electrosíntesis, y por lo tanto la productividad del proceso, es según la ley de Faraday, proporcional a la corriente que circula por la celda, y ésta a su vez es proporcional a la concentración de la especie electro activa, siempre y cuando se opere por debajo de la densidad de corriente limitante. En el curso de una Electrosíntesis la concentración del sustrato disminuye con el tiempo de operación. Por lo tanto, si el proceso se realiza a potencial constante, la corriente que circula por la celda disminuirá a lo largo del mismo y en consecuencia también la productividad. <sup>(9)</sup>

Por el contrario, en una Electrosíntesis a intensidad de corriente constante conforme se consume el sustrato el potencial del electrodo se desplaza hacia valores superiores, con objeto de mantener la velocidad de la reacción impuesta por la intensidad de la corriente. Por lo tanto, llega un momento en el que se alcanza un potencial en el que se produce una reacción electroquímica paralela, que puede ser:

- La conversión del sustrato o del producto deseado a un producto no deseado.

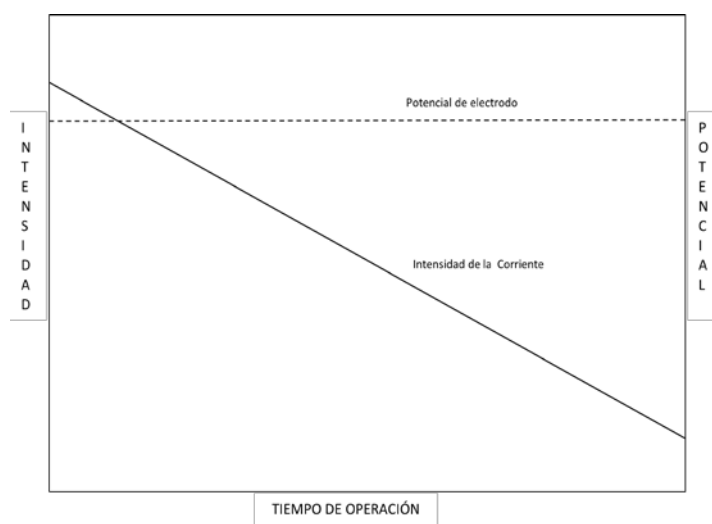
- La conversión del disolvente o del electrólito.<sup>(9)</sup>

En el primer caso, disminuye tanto la eficacia de la corriente como la selectividad. En segundo, disminuye la eficacia de la corriente, pero no la selectividad salvo que los productos producidos reaccionen con el producto deseado o con el sustrato (por ejemplo, si el agua es el disolvente, su electro reducción genera iones hidroxilo en el cátodo. El correspondiente aumento del pH puede alterar el curso del proceso).<sup>(9)</sup>

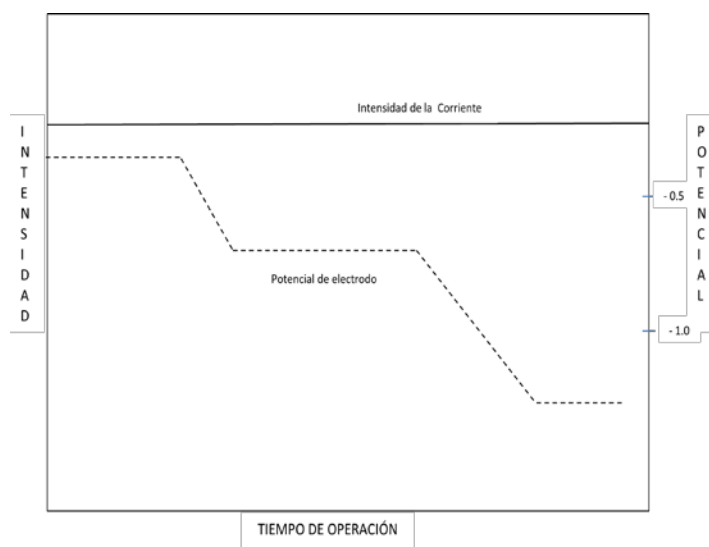
En base a la productividad y teniendo en cuenta que la utilización de un electrodo de referencia complica el diseño de la celda, industrialmente se trabaja a intensidad constante, ajustándose el resto de las condiciones para mantener el potencial del electrodo dentro de unos límites en los que al menos no afecte negativamente a la selectividad del proceso. Estrategias comunes son las siguientes:

- Operar en continuo, de tal forma que todas las condiciones de operación, incluido el potencial del electrodo, son constantes en el tiempo
- Utilizar un medio en el que la electro reducción competitiva no afecte a la selectividad del proceso de interés cuando el potencial alcance un valor tal que dicha reacción compita con la de interés.

- Disminuir escalonadamente la intensidad de corriente, conforme transcurre el tiempo de operación, de tal forma que se trabaje siempre a una densidad de corriente ligeramente por debajo de la limitante. Conceptualmente equivale a trabajar a potencial constante, pero sin utilizar el equipo experimental necesario para ello. <sup>(9)</sup>



**Figura 5: Electrosíntesis a potencial constante. Variación del potencial electrodo y la intensidad de la corriente de la celda en función del tiempo de operación <sup>(9)</sup>**



**Figura 6: Electrosíntesis a intensidad constante. Ejemplo de la variación de la intensidad de la corriente y del potencial de electrodo en función del tiempo de operación** (9)

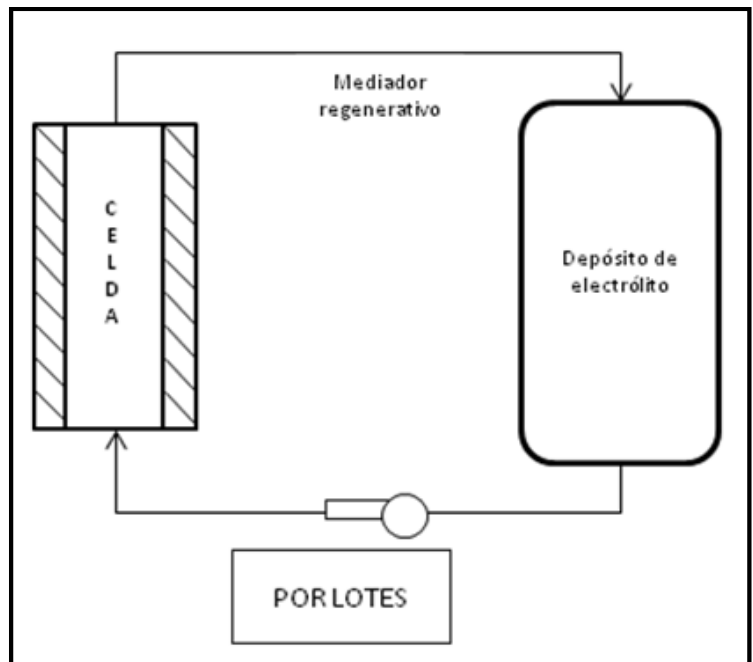
#### 2.1.2.1.2. Modos de alimentar el medio de reacción

Se puede operar:

- Por lotes (por cargas, en Batch).
- En continuo.

La operación por lotes consiste en añadir al inicio del proceso los reactivos, disolvente y electrólito a un depósito dotado de dos electrodos y aplicar una diferencia de potencial entre los mismos sin añadir reactivos ni retirar productos en el curso de la operación, agitando el electrólito por cualquier medio mecánico. (9)

La operación en continuo consiste en alimentar y eliminar continuamente el medio de reacción a un determinado caudal, de tal forma que la composición de reactivos y productos dentro de la celda es siempre constante. Una vez conseguidas las condiciones de fase estacionaria la densidad de corriente, el potencial, la temperatura y la concentración se mantienen constantes en el tiempo en cada punto. <sup>(9)</sup>



**Figura 7: Modos de operación respecto a la forma de alimentar y eliminar el medio de reacción: Por lotes <sup>(9)</sup>**

El medio de reacción puede realizar un solo paso por la celda o bien puede recircularse continuamente, procedente de un depósito en que se lleva a cabo su alimentación y eliminación

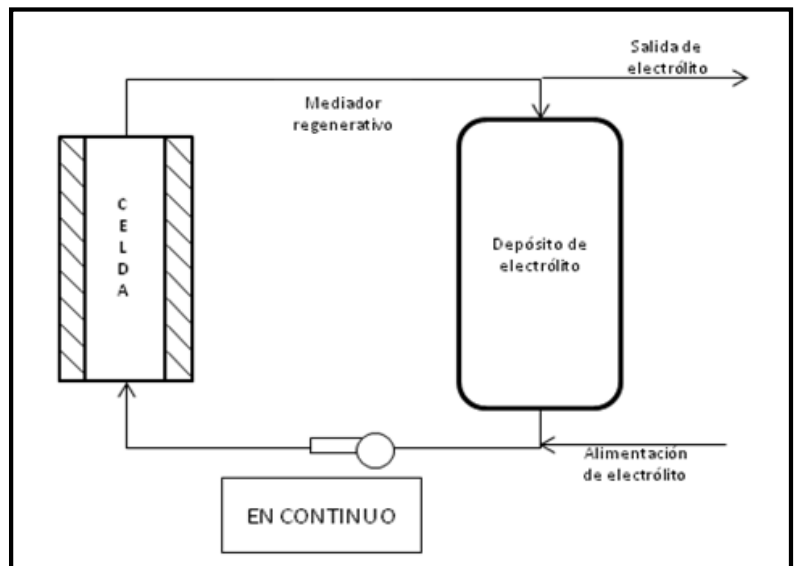
continua. Esta última forma de operar permite eliminar más fácilmente el calor generado en el interior de la celda. <sup>(9)</sup>

En la forma de operar en continuo existen dos condiciones extremas ampliamente estudiadas en los textos de ingeniería relacionadas con la forma en que cambian las concentraciones de reactivos con la distancia a lo largo del sistema de reacción. Para tener conocimiento de que tipos de reactores estamos hablando, mencionamos los siguientes:

- Reactores tanque continuamente agitados, CSTR.
- Reactores de flujo tipo pistón. <sup>(9)</sup>

En los reactores CSTR se supone que la mezcla del fluido en el interior de la celda es completa, de tal forma que la concentración de reactivos y productos es uniforme en cualquier punto de la misma e igual a la de la corriente que sale de la celda. La situación es similar a la correspondiente a una celda del tipo tanque dotada de una vigorosa agitación. <sup>(9)</sup>

En los reactores de flujo pistón se considera que no existe mezcla en el sentido de la dirección del flujo del electrólito, aunque pueda existir mezcla completa en dirección perpendicular. Por lo tanto, la composición del electrólito en el interior de la celda cambia a lo largo de la longitud del electrodo. Una situación de este tipo se daría en una celda muy estrecha y de gran longitud. <sup>(9)</sup>



**Figura 8: Modos de operación respecto a la forma de alimentar y eliminar el medio de reacción: En continuo <sup>(9)</sup>**

La Electrosíntesis en continuo es la forma de operar preferida en los procesos de gran capacidad de producción ya que permite controlar mejor las condiciones de operación, lo que se traduce en una selectividad, eficacia de corriente y productividad. Por otra parte, la corriente y el calor generado son constantes, el tiempo, lo que facilita el diseño de fuentes de alimentación e intercambiadores de calor más eficientes. <sup>(9)</sup>

La operación por cargas es muy utilizada en los procesos de baja producción. Operar por lotes no significa en absoluto que sea preciso desconectar la celda entre cada uno. Pueden colocarse dos depósitos de electrolito en paralelo de tal forma que en el momento en que finaliza una operación, una válvula aísla el depósito que en ese momento

alimenta la celda y da paso al medio de reacción contenido en otro, reiniciándose el proceso sin interrumpir la alimentación de corriente. <sup>(9)</sup>

La operación por cargas se utiliza siempre en los estudios iniciales de viabilidad a escala laboratorio, pues permite monitorizar como varía la selectividad del proceso a medida que disminuye la concentración de reactivos. La selectividad puede disminuir continuamente, mantenerse constante o pasar por un máximo en función de la conversión. Estos datos permiten escoger la composición de electrólito óptima para iniciar el estudio del proceso en continuo. <sup>(9)</sup>

### 2.1.3. Criterios de selección

Es necesario que cualquier proceso que aspire a ser realizado por vía electrolítica reúna a priori una serie de requisitos, como los que se citan a continuación:

- Electrodo estables: no deben pasivarse y su corrosión debe ser mínima. Si se pasivan deben poder reactivarse fácilmente, a ser posible sin desmontar la celda. Vida media superior a las 1000 horas.
- Empleo, a ser posible de celdas sin dividir. El coste de la celda puede disminuir hasta un 90 por 100, con respecto a una dividida. Asimismo, reducen el coste de los rectificadores, equipos de refrigeración, y los costes de mantenimiento. Puede interesar trabajar con celdas sin dividir, aún a costa de obtener una mayor selectividad.
- Un elevado rendimiento espacio-tiempo. Por lo general esto implica que el producto de interés sea de alto peso



molecular y el número de electrones involucrados en el proceso sea igual o inferior a cuatro por mol. <sup>(9)</sup>

#### 2.1.4. Ventajas y limitaciones

La Electrosíntesis es básicamente una tecnología de fabricación limpia, ambientalmente compatible. Por otra parte, al ser una tecnología emergente facilita el desarrollo de procesos y productos fácilmente patentables, y por tanto protegibles. En la siguiente tabla se desarrolla de manera compacta y práctica las ventajas y limitaciones de la Electrosíntesis: <sup>(9)</sup>

**Tabla 7: Ventajas y limitaciones de EC <sup>(9)</sup>**

<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
El electrón es un reactivo barato y versátil.	<b>TÉCNICAS</b>
Tecnología compatible con la preservación del ambiente.	Exige conocimientos más amplios y complejos.
Facilidad de control.	Menor rendimiento espacio-tiempo.
Alta selectividad. Simplificación, etapas de aislamiento y purificación.	<b>NO TÉCNICAS</b>
Seguridad de operación.	Miedo a tecnologías aún no probadas.
Patentes. Tecnologías de fácil protección.	

## 2.2. Reactor electroquímico. Componentes básicos

El reactor electroquímico, la celda, constituye el corazón de una Electrosíntesis, por lo que su adecuado diseño es de capital importancia para el éxito de este proceso. Los componentes básicos de un reactor se describirán más adelante, dado que dependen tanto del tipo de celda como del tipo de reacción electroquímica estudiada, no todas las celdas incorporan la totalidad de los mismos. <sup>(9)</sup>

### 2.2.1. Electroodos

Los electroodos son materiales conductores de la electricidad, a través de los cuales se verifica la transferencia electrónica con la disolución en la que se encuentran las sustancias cuya transformación se desea. <sup>(9)</sup>

Dado que este intercambio electrónico constituye la reacción electroquímica, puede afirmarse que los electroodos son los componentes más importantes de un sistema electrolítico. Su selección es sumamente importante puesto que influyen notablemente tanto sobre la selectividad de un proceso electroquímico como sobre su consumo energético. <sup>(9)</sup>

El electrodo donde se lleva a cabo la reacción electroquímica de interés se denomina electrodo de trabajo, mientras que el otro se llama el contra electrodo. En algunos procesos ambos electroodos son electroodos de trabajo (síntesis acopladas), lo que constituye la situación ideal puesto que se aprovecha al máximo tanto la energía eléctrica como el volumen de la celda. Es decir, se minimiza el rendimiento espacio-tiempo. <sup>(9)</sup>

El electrodo conectado al polo negativo de la fuente de la alimentación se denomina cátodo, y en él tiene lugar la reducción, es decir la transferencia electrónica desde el electrodo a la sustancia electro activa: <sup>(9)</sup>



El electrodo conectado al polo positivo se denomina ánodo y en él se lleva a cabo la oxidación, la transferencia electrónica desde la disolución electrónica al electrodo: <sup>(9)</sup>



Siempre que existan varios electrodos válidos para obtener un determinado producto por Electrosíntesis, las dos cualidades que priman desde un punto de vista industrial para decantarse por uno u otro son:

- Coste
- Vida media

Obviamente se escogerá el electrodo de menor coste y mayor vida media. En otras palabras, aquél que tenga una relación coste/ vida media menor. <sup>(9)</sup>

Cualquier reacción electroquímica conlleva una transferencia electrónica con una sustancia contenida en una disolución. Dado que dicha transferencia se realiza por medio de un electrodo, es de esperar que las características de éste decidan, de una u otra forma, el curso de la reacción. <sup>(9)</sup>

Los abundantes datos experimentales disponibles así lo demuestran. Los electrodos influyen en:

- La selectividad.
- La naturaleza de los productos.

- El consumo específico de energía.
- La eficacia de la corriente.
- La economía del proceso. <sup>(9)</sup>

#### **2.2.1.1. Tipos de electrodos**

Desde el punto de vista de su movilidad los electrodos se clasifican en:

- Estáticos.
- Dinámicos.

Industrialmente, los estáticos son los más utilizados puesto que tecnológicamente son menos problemáticos. Las ventajas de los dinámicos se centran en que el propio electrodo actúa como agitador, aumentando por lo tanto el coeficiente de transferencia de materia en la interfase electrodo-disolución, y en el que es fácil obtener una distribución uniforme de corriente y de potencial, sobre todo en los electrodos bidimensionales de disco y cilindros rotatorios. Por el contrario, si el electrodo es tridimensional se presenta una serie de inconvenientes. <sup>(9)</sup>

Desde el punto de vista de su geometría, los electrodos se dividen en:

- Bidimensionales
- Tridimensionales

Las ventajas de los electrodos bidimensionales son:

- Distribución uniforme de potencial y de corriente.

- Gran variedad de materiales comercialmente disponibles.

Su principal desventaja reside en el hecho de que por su propia naturaleza, el proceso electroquímico se realiza en dos dimensiones, al contrario que en los reactores electroquímicos convencionales, donde el proceso se lleva a cabo en tres dimensiones. Por lo tanto, en comparación con éstos, el rendimiento espacio-tiempo es pequeño. <sup>(9)</sup>

#### **2.2.1.2. Pasivación**

En el transcurso de un proceso electroquímico es posible que se produzca una pérdida gradual de la actividad del electrodo de trabajo con las siguientes consecuencias:

- Disminución de la selectividad.
- Disminución de la eficacia de la corriente.
- Aumento del consumo específico de energía. <sup>(9)</sup>

Tal fenómeno se denomina pasivación del electrodo. Básicamente se produce debido a alteraciones de la superficie electródica como consecuencia de las siguientes causas:

- Deposición de metales.
- Cambios en su morfología.
- Formación de películas no conductoras. <sup>(9)</sup>

La pasivación por deposición de metales es típica de las electro reducciones, en las que trazas de metales de bajo sobre voltaje de hidrógeno se electro depositan sobre el cátodo electrolizando la reducción de agua a hidrógeno, disminuyendo la eficacia de la corriente del proceso deseado. Tales trazas metálicas pueden proceder de:

- Impurezas en el disolvente (agua o mezclas de agua/disolvente orgánico).
- Impurezas en los reactivos y electrolitos.
- Corrosión, aunque sea muy pequeña, del ánodo. Por ejemplo, con ánodos de óxidos de metales preciosos (DSA) tales como el óxido de iridio o el platino, es muy probable la presencia de trazas de dichos metales en el electrolito que tras electro depositarse sobre el cátodo electro catalizan la reducción del agua. <sup>(9)</sup>

Para evitar una pasivación de este tipo se puede:

- Utilizar agua desionizada.
- Añadir al catolito trazas de un ion del mismo metal que constituye el cátodo. La electrodeposición del metal sobre la superficie catódica la regenera instantánea y continuamente, manteniendo su actividad en el tiempo. <sup>(9)</sup>

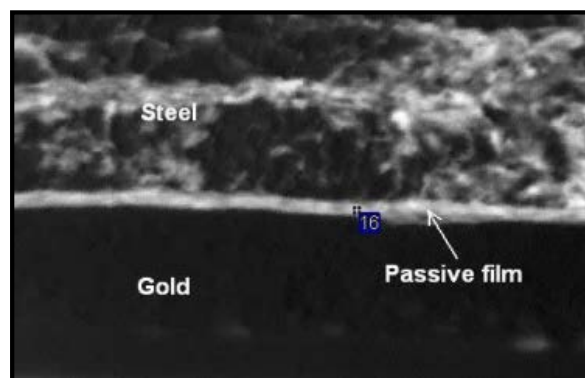
Los cambios en la morfología de un electrodo afectan a su actividad cuando posee actividad electro catalítica basada en una específica morfología meta estable de su superficie, lo que exige su regeneración periódica. <sup>(9)</sup>

La naturaleza de las películas no conductoras puede ser de diferentes tipos:

- Óxidos metálicos no conductores.
- Películas de compuestos orgánicos.
- Líquidos viscosos, alquitranes. <sup>(9)</sup>

La deposición de ciertos metales sobre un ánodo y su consiguiente oxidación puede dar lugar a la formación de películas de óxidos no conductores, que imposibilitan la transferencia electrónica. Un caso típico es el dióxido de titanio. <sup>(9)</sup>

La deposición de películas de materiales orgánicos sobre cátodos es típica de las reducciones de nitrocompuestos a anilinas. En algunos casos el fenómeno es deseado y provocado, pues el electrodo adquiere propiedades catalíticas. Este tipo de electrodos se denominan electrodos químicamente modificados. <sup>(9)</sup>



**Figura 9: Capa producto del proceso de pasivación**

### **2.2.1.3. Criterios de selección. Propiedades**

El comportamiento de un electrodo en un determinado proceso está estrechamente relacionado con sus propiedades, a pesar de lo cual no es todavía posible seleccionar el electrodo de trabajo óptimo para dicho proceso en base a consideraciones exclusivamente teóricas. <sup>(9)</sup>

La única vía segura para seleccionar el electrodo de trabajo es a través de una cuidadosa experimentación en el laboratorio, seguida por ensayos de larga duración en planta piloto con el fin de conocer su comportamiento a largo plazo. <sup>(9)</sup>

Afortunadamente, sí es posible establecer a priori unos criterios orientativos que ayuden a limitar el número de materiales con los que experimentar. Tales criterios de selección se basan en:

- Sus propiedades físicas.
- Sus propiedades químicas.
- Sus propiedades electro catalíticas.
- Factores económicos.
- Factores de proceso. <sup>(9)</sup>

#### **2.2.1.3.1. Propiedades físicas**

Las más importantes a tener en cuenta son:

- La resistencia mecánica.
- La procesabilidad.
- La conductividad eléctrica.
- La expansión lineal.



Es deseable una alta resistencia mecánica puesto que ésta determina si los electrodos pueden aguantar la compresión a que se les somete en diseños de celdas como las del tipo filtro prensa (la más asequible comercialmente) o pueden fabricarse por prensado o laminado a partir de formas físicas fácilmente disponibles. <sup>(9)</sup>

La procesabilidad de un material determina la facilidad con la que puede obtenerse en diferentes formas físicas o con la que puede alearse con otros materiales para mejorar sus propiedades. La obtención de una forma física adecuada es importante para adaptar el electrodo al diseño de la celda y facilitar su acoplamiento con las conexiones eléctricas. Un punto de fusión no demasiado elevado simplifica su aleación con otros materiales. <sup>(9)</sup>

La conductividad eléctrica es una propiedad clave para seleccionar un electrodo. Una alta conductividad facilitará una distribución uniforme de corriente y potencial en el electrodo, y contribuirá a disminuir el consumo específico de energía del proceso. <sup>(9)</sup>

Asimismo, es absolutamente imprescindible emplear materiales de elevada conductividad para efectuar las conexiones eléctricas al electrodo.

La expansión lineal es una propiedad importante en el caso de que dos materiales diferentes se unan en un mismo electrodo ya por recubrimiento, ya por sujeción, ya por chapado. Ambos materiales deben tener, en lo posible, el mismo coeficiente de expansión lineal ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) para evitar fisuras en la

estructura del electrodo como consecuencia de los cambios de temperatura que se producen sobre todo durante la puesta en marcha y parada del proceso. <sup>(9)</sup>

#### **2.2.1.3.2. Propiedades químicas**

Las características químicas del material electrodico deben ser tales que sea resistente a la:

- Corrosión
- Formación de óxidos aislantes en los ánodos.
- Formación de hidruros no deseables en los cátodos.
- Deposición de películas orgánicas no conductoras. <sup>(9)</sup>

A la hora de estudiar la estabilidad a la corrosión de un electrodo debe considerarse que las condiciones del proceso en el que participa varían en el tiempo. El electrodo debe ser estable tanto con respecto a los reactivos y el electrolito como con respecto a los productos formados y los intermedios de reacción. <sup>(9)</sup>

Si bien el fenómeno de la corrosión afecta fundamentalmente a los ánodos, debe tenerse en cuenta que es necesario parar todo el proceso electroquímico de cuando en cuando por cuestiones de mantenimiento, etc. En este caso, en ausencia de la polarización impuesta por el campo eléctrico, existe la posibilidad de que la disolución del cátodo

en contacto con su electrólito esté termodinámicamente favorecida. Tal fenómeno debe tenerse muy en cuenta para evitar consecuencias catastróficas para la economía del proceso. Puede detectarse midiendo el potencial de circuito abierto.<sup>(9)</sup>

Si el potencial de circuito abierto difiere del termodinámico en el medio en cuestión, significa que algo anormal está sucediendo. En estos casos el problema se solventa:

- Sustituyendo el electrólito por otro en el que el electrodo sea estable durante el periodo en que la celda esté fuera de servicio.
- Circulando por la celda una pequeña corriente eléctrica, con frecuencia unos pocos mA, para proteger catódicamente el electrodo.<sup>(9)</sup>

#### **2.2.1.3.3. Propiedades electrocatalíticas**

La importancia de la Electro catálisis no sólo radica en el esperado aumento de la selectividad del proceso, sino en que precisamente por ello disminuirán los costes totales del mismo al reducirse o simplificarse el número total de operaciones unitarias (simplificando las etapas de aislamiento o eliminando alguna etapa de purificación, por ejemplo de re cristalización).<sup>(9)</sup>

Una de las misiones de la Electro catálisis era inhibir las reacciones no deseadas. Se tratará aquí el caso de dos reacciones muy comunes en cualquier proceso electroquímico:

- La evolución catódica de hidrógeno.
- La evolución anódica de oxígeno. <sup>(9)</sup>

La evolución de oxígeno o de hidrógeno es con frecuencia la reacción deseada en el contra electrodo. La elección de un electrodo con un bajo sobre voltaje de oxígeno (reacción anódica) o de hidrógeno (reacción catódica) es importante con objeto de minimizar el consumo específico de energía. <sup>(9)</sup>

Tanto la evolución de oxígeno como la de hidrógeno son reacciones parásitas en el electrodo de trabajo, puesto que consumen innecesariamente energía. <sup>(9)</sup>

#### **2.2.1.3.4. Factores económicos**

La relación coste/vida media es un factor crítico a la hora de seleccionar un electrodo. Con objeto de minimizar los costes de fabricación, las técnicas actuales permiten obtener recubrimientos muy estables a la corrosión de tan solo unas pocas micras de espesor, esto contribuye a la larga vida de los electrodos de trabajo. <sup>(9)</sup>

#### **2.2.1.3.5. Factores de proceso**

Si bien el electrodo es una variable de importancia capital, en el éxito de cualquier proceso electroquímico influyen un gran número de variables. Por tanto, la elección del electrodo de trabajo adecuado no puede efectuarse sin tenerlas en cuenta. <sup>(9)</sup>

Hay dos factores de proceso que deben tenerse muy en cuenta:

- Facilidad de aislamiento del producto.
- Uso final del producto.

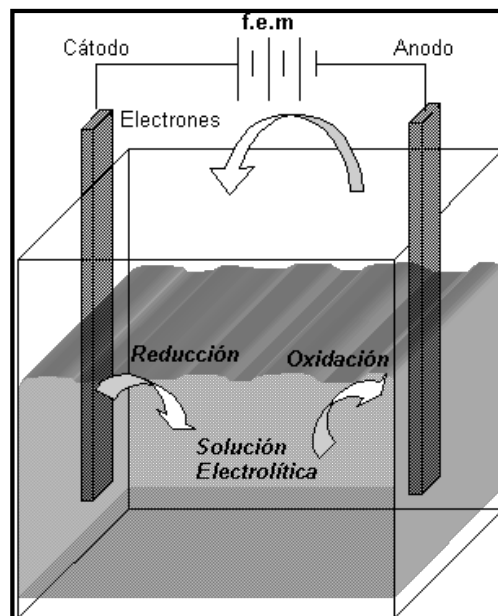
Si una Electrosíntesis puede realizarse con buenos rendimientos empleando diferentes electrodos, debe escogerse el electrodo que facilite las etapas de aislamiento y purificación, puesto que de esta forma disminuirán tanto los costes globales como el impacto ambiental del proceso. La pureza exigida a numerosos productos farmacéuticos, así como a los aditivos de uso en alimentación es muy elevada. Trazas de un metal pesado pueden obligar a costosas y engorrosas etapas de purificación por extracción, cromatografía y re cristalización. <sup>(9)</sup>

#### **2.2.2. Cuerpo de la celda**

Engloba en su interior todos los componentes de la celda. Dado que con frecuencia las disoluciones electrolíticas son corrosivas, es importante que el cuerpo de la celda se construya con materiales resistentes a la corrosión. En lo posible se utilizaran materiales

aislantes tales como los polímeros (PVC, PP, PE, PVDF, Teflón, etc.) en todas aquellas zonas en contacto con el electrolito. <sup>(9)</sup>

El empleo de materiales aislantes en las partes del cuerpo de la celda en contacto con los electrolitos es, además, importante por motivos de seguridad y para evitar la pérdida de eficacia de corriente, así como el incremento de la posibilidad de corrosión de los electrodos, como consecuencia de las corrientes de shunt (fugas de corriente entre compartimientos adyacentes), fenómeno que se produce cuando un material conductor se interpone en el paso normal de la corriente entre los electrodos a través de la disolución electrolítica y de los diafragmas cuando estos existen. <sup>(9)</sup>



**Figura 10: Celda Electrolítica**

### 2.2.3. Rectificadores

La corriente eléctrica constituye la fuerza primaria directora del proceso. El suministro de energía debe de realizarse a través de una fuente de alimentación de corriente continua, es preciso

emplear aparatos adecuados para rectificar la corriente alterna en continua. Tales aparatos se denominan rectificadores. <sup>(9)</sup>

A grandes rasgos un equipo de alimentación de corriente consiste de:

- Un transformador
- Un rectificador

El transformador es necesario puesto que la corriente eléctrica de la red se suministra a alto voltaje. Por lo tanto, es necesario transformarla a un voltaje correspondiente al específico de cada proceso. Por otra parte, la corriente de la red es alterna, lo que exige rectificarla a corriente continua por medio del rectificador. Si es posible se procuran conectar varias celdas en serie con el objeto de lograr que el voltaje se lo más próximo posible al de la red, minimizando así los costes de transformación. <sup>(9)</sup>

Los rectificadores actuales son de dos tipos:

- Diodos
- Tiristores

Factor sumamente importante en el diseño de un rectificador es lograr un factor de rizado pequeño. Dependiendo de los procesos el factor de rizado debe de ser inferior al 5 o 10 por 100. Nunca superior. Los más utilizados hoy en día son los tiristores. En lo referente a los costes y limitándonos exclusivamente a los rectificadores (no hay que olvidar que un sistema electrolítico consta de otros componentes lo que se trata es de minimizar el coste del conjunto, no de cada una de las partes), de ser posible se utilizan los de baja intensidad y alto voltaje, pues es la forma más eficiente de utilizar la energía eléctrica. <sup>(9)</sup>



**Figura 11: Rectificador de corriente directa**

## **2.3. Conceptos y unidades básicas**

### **2.3.1. Potencial de electrodo**

Cuando un material conductor (electrodo) se pone en contacto con una disolución electrolítica se produce espontáneamente una diferencia de potencial eléctrico en la interfase electrodo-disolución. Tal diferencia se denomina potencial de electrodo, y se mide en voltios (V).<sup>(9)</sup>

La diferencia de potencial representa el trabajo que hay que realizar para desplazar la unidad de carga eléctrica entre los dos extremos de la interfase. Si para desplazar un culombio es preciso realizar un trabajo de un julio, la diferencia de potencial es un voltio.<sup>(9)</sup>

Experimentalmente sólo se pueden medir potenciales de electrodo relativos, es decir, con respecto a un electrodo de referencia. Cuando se utiliza como electrodo de referencia el electrodo normal de hidrógeno (por conveniencia se le asigna un potencial de cero de voltios a todas las temperaturas), el potencial de electrodo se denomina potencial estándar.<sup>(9)</sup>



En la práctica se utilizan otros electrodos de referencia:

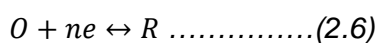
- Electrodo de calomelanos saturado (SCE)
- Ag/AgCl

La utilización de uno u otro electrodo de referencia depende de:

- Su estabilidad en el medio de electrólisis
- El propósito del trabajo

Si la diferencia de potencial electrodo-disolución no es suficiente para que se produzca una reacción electroquímica que genere un flujo de electrones, se dice que el electrodo está polarizado. El potencial de electrodo puede modificarse mediante la imposición de un potencial externo a través de una fuente de alimentación (rectificador) con objeto de que la reacción electródica deseada pueda llevarse a cabo. <sup>(9)</sup>

Si no existe un paso neto de corriente y bajo condiciones de equilibrio termodinámico el potencial de electrodo para la reacción:



Viene dado por la ecuación de Nerst:

$$E = E^0 - \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln \left(\frac{[R]}{[O]}\right) \dots\dots\dots(2.7)$$

Donde:

- E es el potencial de equilibrio.

- F es el equivalente electroquímico (Faraday =96500 culombios por equivalente gramo).
- $E^0$  es el potencial normal de electrodo.
- T, la temperatura absoluta, K.
- n, el número de electrones involucrados en la transferencia electrónica.
- [R], la concentración molar de la especie reducida.
- [O], la concentración molar de la especie oxidada.

En Electrosíntesis la anterior ecuación carece de valor práctico, pues es el sobre potencial del electrodo el que gobierna el curso de un proceso de Electrosíntesis o de Electrodiálisis, es decir, la diferencia entre el potencial aplicado al electrodo necesario para que el proceso de transferencia electrónica entre el mismo y una sustancia de la disolución se produzca, y el potencial de equilibrio termodinámico. <sup>(9)</sup>

### 2.3.2. Voltaje

El voltaje de una celda de Electrosíntesis o un módulo de Electrosíntesis es la diferencia de potencial, en voltios, entre los dos el electrodos extremos. Es la suma de varias contribuciones:

- Potencial de equilibrio del ánodo.
- Potencial de equilibrio del cátodo.
- Sobre voltajes.
- Caída óhmica en el o los electrodos.
- Caída óhmica en las membranas (Electrodiálisis) o en el diafragma (Electrosíntesis).

Es función creciente de la densidad de corriente. <sup>(9)</sup>

### 2.3.3. Intensidad

La intensidad de la corriente es el flujo de electrones que circulan por el circuito eléctrico en la unidad de tiempo. Se mide en amperios (A).

La velocidad de un proceso electroquímico es directamente proporcional a la intensidad de corriente. La relación entre la cantidad de producto oxidado o reducido (Electrosíntesis) o transportado a través de una membrana (Electrodialisis) y la intensidad de la corriente viene dada por la ley de Faraday, que a intensidad de corriente se expresa mediante la ecuación: <sup>(9)</sup>

$$m = \left(\frac{M}{nF}\right) ItE_c \dots\dots\dots(2.8)$$

Donde:

- m, es el peso en gramos de la sustancia oxidada o reducida, o transportada.
- M, su peso molecular, g/mol.
- I, la intensidad de la corriente, A.
- F, Faraday = 96500 culombios por equivalente.
- t, el tiempo durante el que se aplica la corriente, en segundos.
- $E_c$ , la eficacia de la corriente, en tanto por uno.

### 2.3.4. Densidad de corriente

Se define como la intensidad de la corriente por unidad de área efectiva de electrodo. Se mide en amperio por metro cuadrado ( $A/m^2$ ).

La densidad de corriente es un parámetro de suma importancia puesto que de la misma dependen:

- La velocidad del proceso.
- La selectividad.
- La eficacia de la corriente.
- El consumo específico de energía.
- La velocidad de corrosión de un electrodo.

La densidad de corriente y el potencial de un electrodo están relacionados, dentro de un determinado intervalo de potenciales, mediante la ecuación de Tafel. <sup>(9)</sup>

$$\eta = a + b \log i \dots\dots\dots(2.9)$$

$$a = \frac{2.3RT}{\alpha nF} \qquad b = \frac{-2.3RT}{\alpha nF} \dots\dots\dots(2.10)$$

Donde:

- $\eta$ : potencial de un electrodo
- $i$ : intensidad de corriente (A)
- $R$ : constante de los gases
- $T$ : temperatura absoluta (K)
- $\alpha$ : constante de la ecuación de Tafel
- $F$ : constante de Coulomb

Desde un punto de vista industrial interesa, siempre que se mantenga una alta eficacia de la corriente, trabajar a altas densidades de corriente, puesto que de esta forma se incrementa la productividad y se minimiza el coste de la inversión.

Naturalmente, para cada proceso existe una densidad de corriente máxima que no se debe sobrepasar, ya que:

- Aumenta el consumo específico de energía.
- Aumenta la posibilidad de corrosión.
- Aumenta el coste de evacuación del calor generado por efecto Joule.

Por lo general, las densidades de corriente geométricas (intensidad de la corriente con respecto al área geométrica de electrodo) a escala industrial son del siguiente orden:

- Electrosíntesis: 50 – 4000 A/m<sup>2</sup>
- Electrodiálisis: < 500 A/m<sup>2</sup>, excepto en Electro hidrólisis, donde están comprendidas entre 500 y 1500 A/m<sup>2</sup>.<sup>(9)</sup>

### 2.3.5. Resistencia eléctrica

La oposición que todo conductor presenta al paso de la corriente eléctrica se denomina resistencia eléctrica, y se mide en ohmios ( $\Omega$ ). Un ohmio representa la resistencia de un conductor al paso de una corriente eléctrica cuando la diferencia de potencial entre sus extremos es de un voltio.<sup>(9)</sup>

La intensidad de la corriente y el voltaje están relacionados con la resistencia eléctrica, a temperatura constante, por medio de la ley de Ohm:

$$V = IR \dots\dots\dots(2.11)$$

El término IR también se denomina caída óhmica. Es muy importante que la caída óhmica entre los dos electrodos de una celda o de un módulo sea lo más baja posible, con objeto de minimizar el consumo específico de energía del proceso. <sup>(9)</sup>

### 2.3.6. Resistividad

La resistencia eléctrica R es una función de las dimensiones del material conductor, de su naturaleza y de la temperatura. Viene dada por la siguiente expresión:

$$R = \rho(l/A) \dots\dots\dots(2.12)$$

Donde:

- R, es la resistencia eléctrica, en  $\Omega$
- l, la longitud del conductor, en cm.
- A, el área transversal del conductor, en  $\text{cm}^2$ .
- $\rho$ , la resistividad, en  $\Omega\text{cm}$

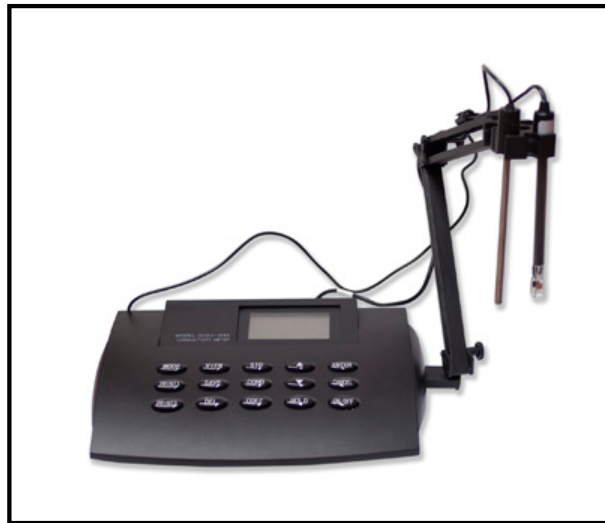
La resistividad representa la resistencia específica de un material de 1 cm de longitud y de sección transversal de  $1 \text{ cm}^2$ . Es una función de la temperatura y de la naturaleza del material. Con objeto de minimizar el consumo de energía es de interés que la resistividad de los electrodos sea lo más pequeña posible. <sup>(9)</sup>

### 2.3.7. Conductividad

Es igual al inverso de la resistividad. Se mide en S/cm (S=Siemens). Con objeto de minimizar la caída óhmica, y por lo tanto el consumo específico de energía, todas las partes por las que circula la corriente eléctrica (electrodos, electrolitos, circuito

externo, conexiones eléctricas, membranas) deben poseer una alta conductividad. <sup>(9)</sup>

Sin embargo, para evitar las fugas de corriente en las conexiones bipolares, los componentes de una celda no directamente involucrados en el transporte electrónico deben escogerse entre los de mínima conductividad. <sup>(9)</sup>



**Figura 12: Conductímetro de laboratorio**

## **2.4. Ingeniería electroquímica. Conceptos y unidades**

### **2.4.1. Eficacia de la corriente**

Es la fracción de la corriente, que siguiendo la ley de Faraday, se utiliza en la obtención del producto deseado (Electrosíntesis), en su destrucción (Electrosíntesis aplicada a la destrucción de compuestos químicos en aguas residuales) o en transportar los iones deseados (Electrodialisis).

De la eficacia de corriente en un proceso dependen:

- El consumo específico de energía.

- El área de electrodo de la planta industrial (Electrosíntesis).
- El coste de la inversión. <sup>(9)</sup>

#### 2.4.2. Rendimiento espacio-tiempo

Es la cantidad de producto obtenido el caudal tratado por unidad de tiempo y de volumen de celda, en Kg.m<sup>3</sup>/h.

Es una función de:

- La densidad de corriente.
- La eficacia de la corriente. Aumenta con ella.
- Área de electrodo por unidad de volumen de celda. Aumenta con ella.

A su vez, los anteriores parámetros dependen todos ellos del material electródico y su forma. <sup>(9)</sup>

La corriente es proporcional al área efectiva de electrodo y la obtención de un alto rendimiento espacio-tiempo precisa celdas compactas para obtener una elevada área por unidad de volumen. Ambos puntos sugieren la utilización de electrodos porosos o tridimensionales. De hecho, éstos son muy utilizados en todos aquellos procesos en los que la concentración del sustrato se baja como por ejemplo en:

- Electrosíntesis partiendo de materias primas poco solubles.
- Tratamiento de aguas residuales. Destrucción de orgánicos o recuperación de metales.

Con mucha frecuencia en lugar del rendimiento espacio tiempo se utiliza la productividad específica, definida como la cantidad de



producto producida por unidad de tiempo y área geométrica de electrodo (Electrosíntesis). Sus unidades son  $\text{kg/h.m}^2$  o  $\text{m}^3/\text{h.m}^2$ .<sup>(9)</sup>

#### **2.4.3. Área electro activa por unidad de volumen**

Es el área de electrodo por unidad de volumen de la celda, en  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . Para calcularla es en principio posible referir el área electro activa de electrodo a tres volúmenes:

- El volumen total de la celda.
- El volumen de la celda ocupado por el electrolito.
- El volumen del electrodo, cuando éste ocupa la parte de la celda.

Para producir una celda compacta es obvio que hay que maximizar el área electro activa de electrodo con respecto a todos estos volúmenes. La obtención de altas áreas electro activas de electrodo requiere el uso de electrodos tridimensionales.<sup>(9)</sup>

Aparentemente este punto no supone ningún problema, sin embargo constituye uno de los grandes retos de la ingeniería electroquímica puesto que en tales electrodos es difícil mantener una distribución uniforme de flujo, corriente y potencial a lo largo de toda su superficie. De no lograrse, la selectividad y la eficacia de la corriente disminuirán.<sup>(9)</sup>

#### **2.4.4. Consumo específico de energía**

Es el consumo de energía eléctrica por cantidad de producto producido o destruido (Electrosíntesis) o por volumen de agua tratada. Se mide en  $\text{kWh/kg}$  o  $\text{kWh/m}^3$ .

El consumo energético es de crucial importancia en numerosos procesos de Electrosíntesis pues constituye una fracción importante del coste total del producto, con excepción de las áreas relacionadas con la Química fina. El consumo específico de energía, CE, en kWh/kg, viene dado por la siguiente expresión:

$$CE = \frac{(26.8 * n * ET)}{EC * M} \dots\dots\dots(2.13)$$

Donde:

- ET es el voltaje total de la celda, en voltios.
- n, el número de electrones intercambiados por mol de producto.
- EC, la eficacia de corriente, en tanto por uno.
- M, el peso molecular del producto, g/mol.

Dado que para un proceso determinado n y M son constantes, la minimización del consumo específico de energía implica:

- Reducir el voltaje total de la celda.
- Aumentar la eficacia de la corriente.

El incremento de la eficacia de la corriente requiere una cuidadosa selección de un considerable número de variables, entre las que vale la pena citar, aparte de las variables físico-químicas convencionales:

- Material electródico.
- Densidad de corriente.
- Disolvente.
- Concentración y tipo de electrolito.
- Potencial de electrodo.

- Tipo de diafragma.
- Tipo de celda y su geometría.
- Transferencia de materia disolución-electrodo, disolución-membrana.
- Contra electrodo. <sup>(9)</sup>

#### 2.4.5. Tiempo de residencia

Es el tiempo que precisa un elemento infinitesimal de volumen de electrolito en pasar a través de la celda una sola vez. Se mide en segundos (s). Para una celda del tipo filtro prensa (muy común en Electrosíntesis) viene dado por la siguiente expresión:

$$t_r = \frac{l \cdot S}{Q} \dots\dots\dots(2.14)$$

Donde:

- $t_r$ , es el tiempo de residencia, en segundos.
- $l$ , la longitud del electrodo en sentido paralelo al flujo, en cm.
- $S$ , la sección transversal del canal del flujo, perpendicular al flujo de electrolito, en  $\text{cm}^2$ . El canal de flujo viene definido por la distancia entre los electrodos o entre un electrodo y el diafragma en Electrosíntesis.
- $Q$ , el caudal del electrolito que fluye por cada compartimiento de la celda, en  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

El tiempo de residencia es de suma importancia en aquellos procesos en los que se desee una alta conversión por paso, como en la recuperación de metales contenidos en bajas concentraciones en efluentes acuosos. <sup>(9)</sup>

La maximización del tiempo de residencia, está reñida con el hecho de que para evitar efectos negativos como la disminución de la eficacia de la corriente Electrosíntesis cuando el proceso está controlado por transferencia de materia (algo bastante común), es preciso lograr la máxima turbulencia, lo cual se consigue en las típicas celdas de flujo forzando el paso del electrólito a través de sus compartimientos con un caudal elevado, lo que impide superar un tiempo de residencia determinado. <sup>(9)</sup>

#### 2.4.6. Ley de Faraday

El número de moléculas que reaccionan involucradas en una reacción en el electrodo están relacionadas estequiométricamente con el número de cargas (electrones) que fluyen en el circuito. Éste es el argumento básico de las leyes formuladas por Michael Faraday en 1832 - 1833. <sup>(9)</sup>

La primera ley de Faraday dice lo siguiente: en la electrólisis, las cantidades de sustancias que intervienen en el cambio químico son proporcionales a la cantidad de electricidad que pasa a través del electrolito. <sup>(9)</sup>

La segunda ley de Faraday dice: las masas de diferentes sustancias en libertad o que se disuelve en una cantidad dada de electricidad son proporcionales a sus equivalentes químicos. <sup>(9)</sup>

En honor del descubrimiento de estas leyes, la cantidad de carga, lo que corresponde a la conversión de una sustancia química equivalente, ha sido nombrada la constante de Faraday. Una cantidad de carga  $\frac{nF}{v_j}$ , se requiere para convertir un mol de sustancia j. Cuando una cantidad de carga Q que se ha consumido en el electrodo, el número de moles de la sustancia  $n_j$  que se han formado o reaccionado está dada por: <sup>(9)</sup>

$$\Delta n_j = \frac{v_j Q}{nF} \dots\dots\dots(2.15)$$

Esta fórmula une a las dos leyes de Faraday.

Ya que la cantidad total de sustancia que se convierte es proporcional a la cantidad de carga, la velocidad de reacción específica  $v_j$ , que es la cantidad de sustancia  $j$  convertida en unidad de tiempo por unidad de superficie del electrodo, es proporcional a la densidad de corriente  $i$ : <sup>(9)</sup>

$$v_j = \frac{1}{S} \frac{dn_j}{dt} = v_j \frac{i}{nF} \dots\dots\dots(2.16)$$

Por esta razón, las tasas específicas de las reacciones de los electrodos se dan a menudo en las unidades eléctricas de la densidad de corriente.

## CAPITULO 3: MARCO TEORICO DE REFERENCIA

### 3.1. Concepto, alcances y teoría de la Electrocoagulación

EC es una tecnología electroquímica de tratamiento de aguas residuales que está experimentando creciente popularidad y considerables mejoras técnicas. Ha habido un esfuerzo relativamente pequeño para comprender mejor los mecanismos fundamentales de los procesos, particularmente aquellos que podrían proporcionar los parámetros de diseño para optimizar el rendimiento de esta técnica relativamente simple y barata.

EC es un proceso complejo que ocurre en varios pasos: reacciones electrolíticas en la superficie del electrodo, formación de coagulantes en la fase acuosa, adsorción de agentes contaminantes solubles o coloidales sobre los coagulantes que son removidos por sedimentación o flotación. EC consiste en la formación de hidróxidos metálicos mediante el suministro de corriente eléctrica actuando como coagulante de las partículas coloidales <sup>(10)</sup>.

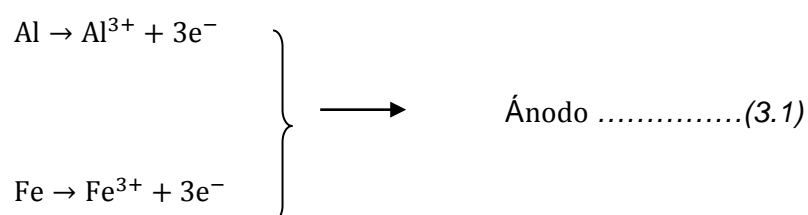
EC utiliza una corriente eléctrica a través de electrodos (Hierro o aluminio) produciendo iones positivos. Estos iones nulifican las cargas iónicas presentes en los contaminantes. Una vez neutralizadas las cargas iónicas, se obtienen compuestos eléctricamente estables que, obedeciendo a las fuerzas de Van der Waals, comienzan a atraerse entre sí. Esto genera partículas cada vez más grandes (700nm) que, por diferencia de densidades tienden a flotar o por gravedad se precipitan, haciendo posible su remoción por precipitación y/o filtración <sup>(11)</sup>.

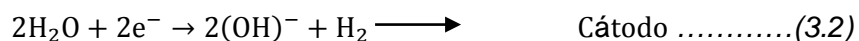
El proceso de Electrocoagulación es muy similar a un tratamiento químico típico de coagulación pero utilizando energía eléctrica. Ambos procesos tienen por objetivo la desestabilización de los coloides contenidos en un agua y se diferencian en el modo de adición del reactivo, en la coagulación convencional el reactivo se añade como sal y en EC se genera a partir de un metal <sup>(12)</sup>.

A diferencia de la coagulación química, el catión coagulante es generado en el agua contaminada por la oxidación electrolítica del ánodo. En este proceso, las especies iónicas son removidas por reacción con: a) un ión de carga opuesta, y b) con los flóculos de hidróxidos metálicos generados <sup>(13)</sup>.

Por lo tanto podemos definir a EC como un proceso electroquímico en el que a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, posibilitando su separación del agua mediante técnicas convencionales. Como consecuencia de su disolución, los ánodos van desapareciendo conforme transcurre el tratamiento, llegando un momento en el que es necesaria su reposición (ánodo de sacrificio) <sup>(12)</sup>.

Dentro de una serie de componentes que hacen posibles el proceso de EC está el reactor electroquímico que se compone de un depósito en el que se han sumergido dos o más electrodos (el ánodo y el cátodo o electrodo inerte) conectados a una fuente de alimentación. Al establecerse cierto potencial entre los electrodos, comienzan los procesos de reducción en el cátodo y los de oxidación en el ánodo (generándose el ión  $\text{Al}^{3+}$  si el ánodo es de aluminio, o el  $\text{Fe}^{3+}$  si es de acero). Estos iones de aluminio o hierro se hidratan rápidamente. A continuación, aparecen toda una serie de procesos de ionización, desestabilización, oxido-reducción, electrólisis, formación de radicales libres, campos electromagnéticos, rotura y separación de emulsiones <sup>(14)</sup>.





Además de la generación de coagulantes, en la celda electroquímica ocurren otros procesos con una gran importancia en el proceso de coagulación. Así, en las proximidades del ánodo, la generación de oxígeno por oxidación del agua da lugar a la formación de iones  $\text{H}^+$ , que dada su carga son atraídos hacia el cátodo. En el cátodo, la reducción del agua para formar hidrógeno da lugar a la formación de iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) que, al contrario que los anteriores, son atraídos hacia el ánodo. Como consecuencia, se genera un perfil de pH entre cada ánodo y cátodo, que favorece que aparezcan diferentes especies químicas en el reactor a partir de las electro-generadas en el ánodo y que, por tanto, ocurran diferentes procesos simultáneamente en el interior de una celda electroquímica <sup>(14)</sup>.

De acuerdo con la bibliografía, este perfil de pH es responsable de las menores cantidades de Al (o Fe) necesarias para conseguir un mismo rendimiento en el proceso, cuando se genera este componente electroquímicamente se requiere una décima parte de la cantidad de reactivo consumida por vía química. Asimismo también justifica que no sea necesaria la adición de coadyuvantes de la floculación, reactivos que se emplean en los tratamientos físicoquímicos convencionales para incrementar el rendimiento del proceso de floculación y para conseguir flóculos de mayor calidad. Del mismo modo, el incremento del pH que se genera en el cátodo puede favorecer la precipitación de iones metálicos contenidos en el agua residual, que a su vez pueden quedar adsorbidos sobre los flóculos <sup>(14)</sup>.

El mayor problema operativo proviene de la inutilización del ánodo por formación de recubrimientos a partir de los productos de reacción. Los hidróxidos insolubles pueden aglomerarse en la superficie del ánodo impidiendo el proceso de electrocoagulación. Para evitar este problema se pueden utilizar electrodos móviles o sistemas de generación de turbulencia (agitadores mecánicos, difusores de gas, etc.) <sup>(10, 11, 14)</sup>.



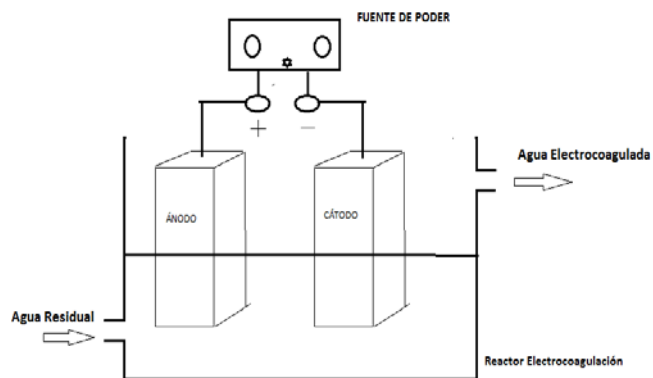
El aumento en el tamaño de los flóculos permite que éstos sedimenten con facilidad, o que si se generan micro-burbujas, éstas se adhieran a la superficie de los flóculos y los floten. En el interior de una celda electroquímica la carga de los coloides facilita su movimiento por el campo eléctrico generado por los electrodos, y la evolución electródica de gases (oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo) genera una mezcla suave. Como consecuencia se favorece el choque entre coloides y por tanto la floculación en el interior de la celda electroquímica sin necesidad de agitación mecánica. A este proceso se le denomina electro-floculación y, como se puede deducir, puede conseguir realizar en un reducido espacio los mismos procesos que ocurren en volúmenes muy superiores en los procesos convencionales. Asimismo, los gases generados en los electrodos pueden adherirse a la superficie de los flóculos disminuyendo la densidad del conjunto y posibilitando su separación por flotación. A este proceso se le conoce como electro-flotación <sup>(14)</sup>.

Normalmente el material anódico empleado consiste en planchas de aluminio o de acero. Al aplicar una diferencia de potencial a la celda, se consigue la generación de iones en disolución. Como consecuencia, se obtienen:

- Hidróxidos insolubles sobre los que quedan retenidos los contaminantes, que son fácilmente separados del agua, o
- Hidroxocomplejos catiónicos o aniónicos, que desestabilizan las fuerzas de repulsión electroestáticas existentes en la materia coloidal, favoreciéndose el posterior proceso físico de floculación.

La aparición de unas u otras especies depende de la concentración total del metal y del pH del agua residual. <sup>(14)</sup>

EC comprende diversos factores a estudiar como pH, densidad de corriente, temperatura del efluente dentro del reactor, etc. Todos estos factores han sido estudiados para el diseño óptimo de la celda de electrocoagulación en continuo.<sup>(14)</sup>



**Figura 13: Representación Básica del fenómeno de EC**

### 3.2. Historia y evolución de la Electrocoagulación

La electroquímica es una ciencia que nace a finales del siglo XVIII con los trabajos de Galvani y Volta, y ha tenido desarrollos y aplicaciones en múltiples áreas. Podemos mencionar su uso en el arranque de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de la contaminación.<sup>(7)</sup>

EC 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, pero se conocen desarrollos anteriores. Desde el siglo XIX, exactamente en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster. Su proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8 vatios entre los electrodos, distantes una pulgada, y una corriente anódica de 0.6 Amp/pie<sup>2</sup>.<sup>(7)</sup>

En 1893, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY. En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizaron ánodos de hierro y aluminio. En 1908 el proceso Webster se utilizó en Santa Mónica, con reducciones de 40% de materia orgánica. <sup>(7)</sup>

En 1914 se utilizó en New York una modificación del proceso Webster llamado Landreth. En éste se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito. En 1932 fue utilizada EC en Alemania, con eficiencias del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se dio por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos. <sup>(7)</sup>

En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso, obteniendo remociones de 70% al 80% para la DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis. <sup>(7)</sup>

En Noruega, Föyn combinó 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato, utilizando electrodos de carbón. Aunque la eficiencia del proceso fue buena, hubo problemas de corrosión. Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electroplateado, textiles y en procesos de potabilización del agua misma, entre otros. <sup>(7)</sup>

### 3.3. Restos y oportunidades de la Electrocoagulación

A pesar de que EC es una tecnología que se conoce hace ya más de cien años, no se ha desarrollado una investigación sistemática que pueda predecir el proceso desde su comportamiento químico, reacciones y mecanismos, ni provea las herramientas suficientes para el diseño y operación de los reactores. Es importante aclarar que en las diferentes publicaciones que se han venido haciendo sobre el tema se encuentran una serie de diseños a escalas de laboratorio y piloto, pero no hay diseños de reactores prototipos en uso hoy en día. La literatura disponible básicamente se limita a comparar los trabajos reportados. <sup>(7)</sup>

Esto se ha dado en parte por la reputación que ha adquirido EC como tecnología demandante de electricidad, la que puede ser costosa en muchos lugares obligando a que se abandonen sus estudios sin un análisis más detenido, y, por otra parte, a que esta tecnología se ha aplicado de manera empírica en muchos casos y como tratamiento puntual sobre un contaminante específico. <sup>(7)</sup>

En los últimos años, y debido a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales, se ha vuelto a considerar EC como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial, hecho éste que permitirá avanzar sobre los escollos que han dejado a esta tecnología rezagada durante varias décadas. Es así como nos enfrentamos al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática, de una forma que permita diseñar el proceso en su totalidad, desde su requerimiento de energía hasta su reactor para así optimizarlo, adaptarlo y aplicarlo, ubicando dicho proceso como una tecnología de punta que brinde sus ventajas en la protección y conservación del recurso hídrico. <sup>(7)</sup>

Aplicaciones de EC: Se ha aplicado EC para la remoción de diversas aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis

(electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas. <sup>(7)</sup>

Una de las aplicaciones más conocidas y populares de EC ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante. <sup>(7)</sup>

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo (+6), elemento de una alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial y para su remoción se utilizan métodos convencionales que incluyen adsorción, precipitación química y degradación biológica, entre otros. EC combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en esta agua residual. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5ppm. <sup>(7)</sup>

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte y la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasosos, que se caracterizan por presentar una gran estabilidad química de sus emulsiones aceite-agua. Esto representa una problemática ambiental importante. EC ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas. <sup>(7)</sup>

EC también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente. <sup>(7)</sup>

Una de las áreas de aplicación en las cuales se han desarrollado algunos avances importantes de esta tecnología y que incluso ha tenido mayor implementación de la misma, es el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color. <sup>(7)</sup>

EC también ha sido probada en la potabilización de aguas. Es importante resaltar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto que destruye, en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua. En esta misma aplicación se ha venido estudiando EC con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano contaminadas con arsénico, contaminación ésta que puede afectar la salud de la población mundial ya que puede ocurrir en cualquier región o país. Otras posibles aplicaciones de EC están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos. <sup>(7)</sup>

Finalmente, EC también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas y efluentes de la industria de los colorantes. <sup>(7)</sup>

### **3.4. Alcances técnicos de la Electrocoagulación**

En general se acepta que el proceso de EC implica tres etapas sucesivas: (a) formación de coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio, (b) la desestabilización de los contaminantes, la suspensión de partículas y la ruptura de las emulsiones, (c) la agregación de las fases desestabilizadas para formar flóculos. El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, la suspensión de partículas y de ruptura de las emulsiones se ha descrito en amplios pasos y pueden resumirse como sigue: <sup>(15)</sup>

- La compresión de la doble capa difusa alrededor de las especies cargadas, que se consigue por las interacciones de iones generados de la disolución del electrodo de sacrificio, debido al paso de corriente a través de la solución. <sup>(15)</sup>
- Neutralización de la carga de las especies iónicas presentes en las aguas residuales, que es causada por los iones contrarios, producidos por la disolución electroquímica del electrodo de sacrificio. Estos iones contrarios reducen la repulsión electrostática entre partículas de modo que la atracción de Van der Waals predomina, causando así la coagulación. Una carga neta cero resulta del proceso. <sup>(15)</sup>
- Formación de flóculos. El flóculo formado como resultado de la coagulación crea una capa de lodo que atrapa a las partículas coloidales que no han formado complejos. <sup>(15)</sup>

#### **3.4.1. Fenómenos producidos durante la electrólisis**

Durante la Electrólisis se produce un desprendimiento de Hidrógeno y Oxígeno gaseoso en sus respectivos electrodos. Estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos: <sup>(15)</sup>

- Ocurre un proceso de Autolimpieza, debido a la velocidad del flujo, lo que provoca una fuerza de arrastre considerable capaz de remover las películas de coloides depositadas en los electrodos. <sup>(15)</sup>
- Al interior de la celda se favorece la Mezcla del desestabilizado, ya que, por la presencia de los gases generados en la electrólisis, se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución, ocasionando una mayor probabilidad de contacto entre los coágulos formados. En algunos casos, esta agitación espontánea puede reemplazar una agitación mecánica externa. <sup>(15)</sup>

- Otra ventaja de este proceso, es que permite Elegir la Separación de Fases (clarificado – lodo), es decir, no sólo permite la extracción por sedimentación clásica, sino también, por flotación, debido a que los flóculos se saturan de gases provenientes del proceso de electrólisis. <sup>(15)</sup>

### 3.4.2. Factores que afectan la 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. <sup>(7)</sup>

**pH.** El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. 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. <sup>(7)</sup>

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7. <sup>(7)</sup>



Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH. <sup>(7)</sup>

**Densidad de corriente.** 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. <sup>(7)</sup>

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. <sup>(7)</sup>

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio  $Al^{+3}$  o hierros  $Fe^{+2}$ , liberados por los respectivos electrodos. <sup>(7)</sup>

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. 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. <sup>(7)</sup>

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes

respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción. <sup>(7)</sup>

**Conductividad.** Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. <sup>(7)</sup>

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl<sub>2</sub> generan un aumento en la conductividad del agua residual. Además se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO<sup>3-</sup> y SO<sup>4=</sup>, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> 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 Cl- alrededor del 20%.<sup>(7)</sup>

**Temperatura.** Los efectos de la temperatura sobre EC no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° 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. <sup>(7)</sup>

En la tabla 8 se presenta un resumen de algunas investigaciones, mostrando los valores de las variables más importantes en el proceso y la remoción alcanzada para diversos contaminantes en distintas aguas residuales industriales.

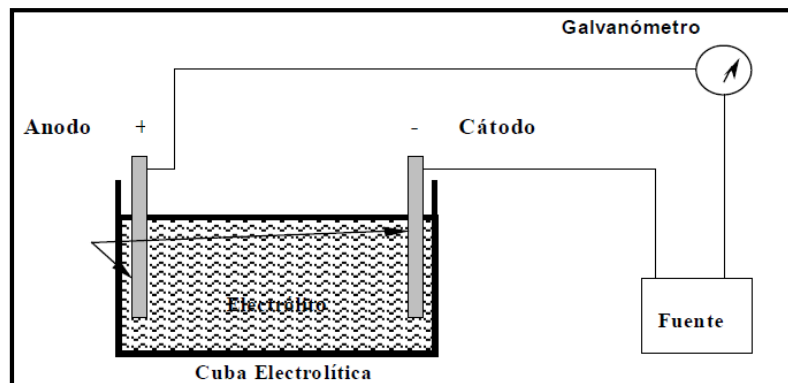
**Tabla 8: Valores de diferentes variables en el proceso de electrocoagulación para distintos contaminantes de diversas fuentes de aguas residuales <sup>(7)</sup>**

Agua Residual	Corriente	Ánodo/ Cátodo	Parámetro Eléctrico	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	Contaminante	Remoción, %	Tiempo (min)
Colorantes textiles	CD	Al/Fe	$\geq 150 \text{ A/m}^2$	1000-4000	3-6	Turbiedad	98	15
		Fe/Al	80-100 $\text{A/m}^2$			DQO	61-65	
					3-7	Turbiedad	75-98	10
						DQO	45-47	
		cerca o a 10	Turbiedad		87			
DQO	26							
Electroplateado, industria del Cr, fertilizantes e industria de los metales	-	Fe/Fe	30 $\text{A/m}^2$	1500	5-6	Cr+6	97	-
Restaurantes	CD	Al/Al	1,8-6,8V	1290	6,94	DQO	67	15
						Grasas y Aceites	>97	
						SS	90	
Alimentos (gelatinas)	CD	Fe/Al	6,26 $\text{A/m}^2$	1,2 Mhos	10,86	Grasas y Aceites	Agua cruda 1195 ppm	15
							Agua cruda 115 ppm	
Lavandería	CA	Al/	32V/30 <sup>a</sup>	-	5-9	DQO	70	5
						Turbiedad P- fosfato surfactante	90	
Agua para consumo	CD	Fe/	1,53 $\text{A/m}^2$	-	6-9	As	>99	20
		Al/					37	

humano		Ti/					>58	
Industria del boro	CD	Al/	1,2-6 mA/cm <sup>2</sup>	bajos	8	B	97	-
Suspensión de latex	CD	Fe/Fe	1,1 A/dm <sup>2</sup>	0,6-1 S/m	6,5-7	estireno	Remanente 7%	26
						vinilo	Remanente 8%	
Industria semiconductores (pulido mecánico químico)	CD	Al/Fe	93 A/m <sup>2</sup>	450-470	7,3	color	96	<30
						Cu	99	
						DQO	88,7	
Producción aceite de oliva	CD	Al/	75 mA/cm <sup>2</sup>	-	4-6	DQO	76	25
						polifenoles	91	
						color	65	

### 3.5. Aspectos técnicos de operación de la Electrocoagulación

La Coagulación Eléctrica pertenece a una rama de la Electroquímica, siendo ésta la encargada de estudiar las reacciones químicas que producen los efectos eléctricos y los fenómenos químicos causados por la acción de las corrientes o voltajes en medios acuosos (solución). Estos medios acuosos deben cumplir con una característica fundamental, ser Conductores Eléctricos. <sup>(16)</sup>



**Figura 14: Celda Electrolytica**

La coagulación se produce en la primera etapa, dando inicio al post-tratamiento, siendo además, la etapa más importante. Este sistema tiene como protagonista principal una componente llamada “Celda de Electrocoagulación”, la que está compuesta por Electroodos Atacables o Solubles inmersos en un Dieléctrico y una Fuente de Poder de corriente continua. <sup>(16)</sup>

La coagulación se produce en esta etapa, específicamente al interior de la Celda Electrolytica con la desestabilización y coagulación simultánea de los coloides producto de la aplicación de una diferencia de potencial, a través de pares de Electroodos Atacables o Solubles (cátodo/ánodo) de Aluminio o Hierro comercial sumergidos en un Dieléctrico y conectados a una Fuente de Poder, siendo el ánodo (+) el que aporta la especie catiónica como  $Fe^{+3}$  o  $Al^{+3}$  (Agentes Coagulantes) dependiendo del

caso, el que se unirá por enlaces iónicos a los coloides cargados opuestamente. <sup>(16)</sup>

En pocas palabras, la coagulación se produce gracias a un fenómeno llamado Electrólisis, el cual genera reacciones de óxido-reducción en sus ánodos y cátodos respectivamente, producto de la energía eléctrica externa aplicada al conjunto de placas dispuestas alternadamente (+ - +) al interior de la celda de electrocoagulación. <sup>(16)</sup>

Dentro de esta Celda de Electrocoagulación los electrodos están expuestos al "Ataque Electrolítico", lo que trae como consecuencia, el desgaste de estos electrodos, producto de la migración de especies catiónicas al cátodo por diferencias de potencial. <sup>(16)</sup>

El proceso de EC, comienza introduciendo una corriente eléctrica al agua, a través de placas dispuestas en forma paralela o tubular, generalmente hierro o aluminio. Estas reacciones simultáneas nos llevan a un estado de estabilidad, produciendo un sólido que menos coloidal y emulsionado (soluble) que el compuesto en los valores del equilibrio. <sup>(16)</sup>

A consecuencia y en el transcurso de dicho proceso electrolítico, las especies catiónicas producidas en el ánodo entran a la solución, reaccionando con las demás especies formando óxidos metálicos y precipitando los respectivos hidróxidos. En EC, a diferencia de la coagulación química, el catión proviene de la disolución del ánodo metálico, ya sea, Hierro o Aluminio. <sup>(16)</sup>

Las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación se encuentran directamente relacionadas con las condiciones del medio, es decir, con las características del RIL, entre las cuales encontramos variables determinantes como: Flujo, pH, carga contaminante, cantidad de sólidos suspendidos y disueltos, y especialmente de su conductividad. En general el tratamiento de las aguas residuales con esta tecnología requiere bajas aplicaciones de voltaje, dependiendo

directamente del amperaje el cual es variable, de acuerdo a las características químicas del agua. <sup>(16)</sup>

**Tabla 9: Características del proceso de EC <sup>(16)</sup>**

DETALLE	CARACTERISTICAS
Consumos de Energía	Se encuentra entre [0.5 – 0.8] kWh / m <sup>3</sup>
Desgaste de Electrodo	Reemplazo promedio de una a dos veces por año.
Condiciones de Operación	Funciona en forma automática, mediante controles electrónicos que regulan la corriente y voltaje.
Producción de Lodos	La cantidad y humedad (96 a 97%) del lodo es menor que los sistemas químicos y biológicos convencionales.

### 3.6. Mecanismos y Reacciones que ocurren en una celda de EC

Proceso de electrocoagulación: Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes. Estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. <sup>(7)</sup>

Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación. <sup>(7)</sup>

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar. <sup>(7)</sup>

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. <sup>(7)</sup>

Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua-contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua. <sup>(7)</sup>

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema. <sup>(7)</sup>

A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en EC el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. Como se explicó anteriormente, la producción de iones metálicos se da en el ánodo y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante. <sup>(7)</sup>

Según es expuesto por Mohllah et al., se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante. <sup>(7)</sup>



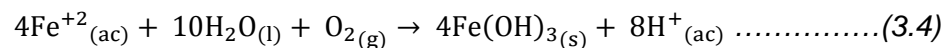
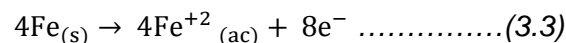
Reacciones involucradas en EC: Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en EC son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio, sino también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales. <sup>(7)</sup>

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante. <sup>(7)</sup>

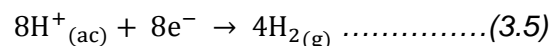
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  o hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . <sup>(7)</sup>

#### Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

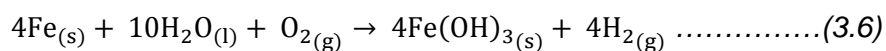
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

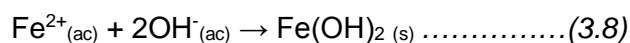
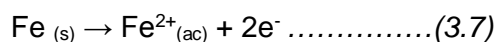


Reacción global:

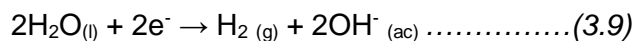


Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso

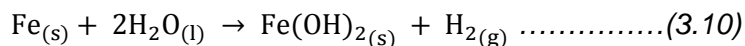
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



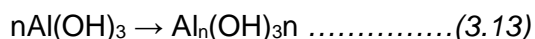
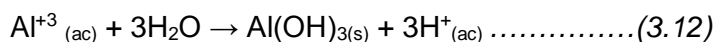
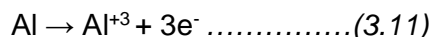
Reacción Global:



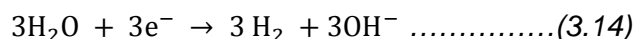
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. <sup>(7)</sup>

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes.

En el ánodo:



En el cátodo



Los iones  $\text{Al}^{+3}$  en combinación con los  $\text{OH}^{-}$  reaccionan para formar algunas especies monoméricas como  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ , y otras poliméricas, tales como  $\text{Al}_6(\text{OH})^{153+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})^{174+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})^{204+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})^{247+}$  y  $\text{Al}_{13}(\text{OH})^{345+}$  que por procesos de precipitación forman el  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ , como se muestra en la reacción de ánodo. El  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. <sup>(7)</sup>

El monitoreo de los niveles de pH durante el proceso de EC, tanto a nivel Batch o por lotes, como a nivel de flujo continuo dio como resultado lo siguiente:

- El pH del efluente ácido inicial estaba alrededor de 1 (rango de 0-1).
- Con el pre tratamiento con soda caustica se eleva el pH hasta un rango de 6-7.
- Al momento de poner en funcionamiento el reactor de EC se nota que se tiene un perfil de pH estándar y que se repite en los

diferentes experimentos hechos. Es decir el pH va de un rango de 7-10. Durante los experimentos tanto en el reactor por lotes como en el flujo continuo se nota la formación de una capa pasivante en los electrodos de trabajo lo que se confirma con el calentamiento de la celda (mayor necesidad del sistema de voltaje, es decir se regula el rectificador para aumentar el voltaje).

- El efluente obtenido, ya sea con electrodos de hierro o de aluminio o una combinación de éstos, está en un rango de pH de 10-11,5.

En este punto es necesario hablar sobre los Diagramas de Pourbaix de los electrodos utilizados en el reactor de Electrocoagulación. Un diagrama de Pourbaix es una representación gráfica del potencial (ordenada) en función del pH (abscisa) para un metal dado bajo condiciones termodinámicas estándar (usualmente agua a 25 °C). El diagrama tiene en cuenta los equilibrios químicos y electroquímicos y define el dominio de estabilidad para el electrólito (normalmente agua), el metal y los compuestos relacionados, por ejemplo, óxidos, hidróxidos e hidruros. Tales diagramas pueden ser construidos a partir de cálculos basados en la ecuación de Nernst y en las constantes de equilibrio de distintos compuestos metálicos.<sup>(17)</sup>

La presencia de agentes complejantes, como por ejemplo, cloruros, bromuros, cianuros, amoníaco, carbonatos, etc., puede modificar apreciablemente los diagramas de Pourbaix debido a la formación con el metal de complejos altamente estables en disolución o de sales insolubles. Como consecuencia, en los diagramas aparecen nuevos dominios para las especies iónicas en disolución que ocupan espacios más amplios que los correspondientes a los sistemas metal-agua. En los Diagramas de Pourbaix se pueden identificar tres tipos distintos de líneas:<sup>(17)</sup>

- Líneas horizontales. Indican reacciones con dependencia solamente del potencial.
- Líneas verticales. Indican reacciones con dependencia solamente del pH.
- Líneas oblicuas. Indican reacciones con dependencia tanto del potencial como del pH. <sup>(17)</sup>

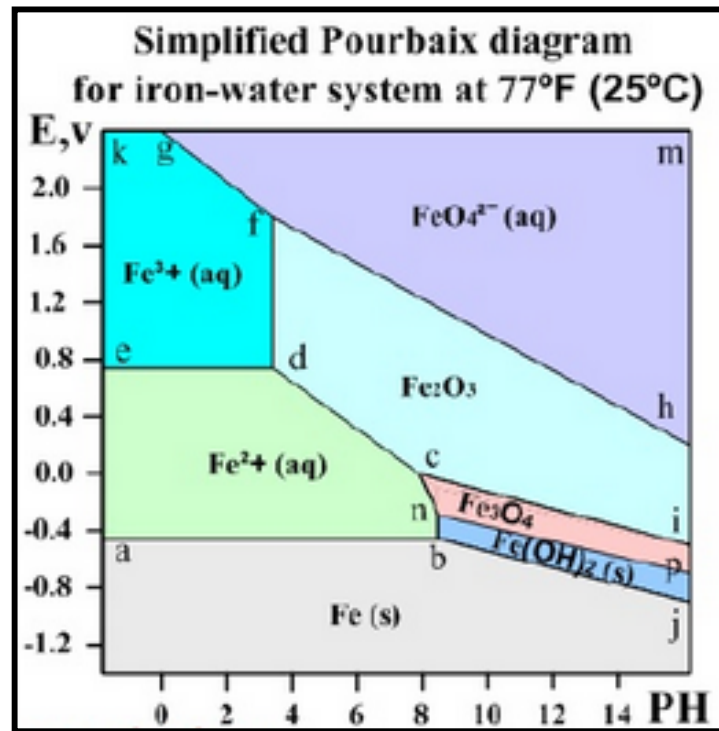
También puedes observar que estos tres tipos de líneas aparecen representadas en el diagrama con dos tipos de trazado: continuo y discontinuo fino. Si aparecen con trazado continuo indican un equilibrio bien entre dos especies sólidas o bien entre una especie sólida y una especie soluble con distintos valores de actividad ( $10^{-6}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^0$ ). Si aparecen con trazado discontinuo fino indican un equilibrio entre dos especies solubles. <sup>(17)</sup>

Los diagramas de Pourbaix son particularmente útiles en el estudio del comportamiento frente a la corrosión de materiales metálicos, ya que permiten predecir las zonas de inmunidad, corrosión y pasivación de un metal en un medio agresivo determinado. Si el metal en su forma elemental es la fase termodinámicamente estable, esto indicará condiciones de inmunidad. La corrosión ocurrirá si un catión soluble del metal es la fase termodinámicamente estable. Si un anión complejo soluble del catión en medio alcalino es la fase termodinámicamente estable, lo que ocurre en el caso de metales anfóteros, como por ejemplo, hierro, aluminio, cinc, etc., esto indicará condiciones de corrosión alcalina. La pasivación ocurrirá si un compuesto sólido del metal es la fase termodinámicamente estable, como por ejemplo, óxido, hidróxido o hidruros. Esta es la razón por la cual habitualmente en los estudios de corrosión los diagramas de Pourbaix aparecen de forma simplificada mostrando las regiones descritas y sin precisar cuáles son las especies estables en cada condición. <sup>(17)</sup>

Para el caso del Diagrama de Pourbaix del Hierro (Figura 15), se identifican las siguientes zonas:

- Por debajo de la línea a-b-j: Hierro sólido (zona de inmunidad). Las reacciones electroquímicas en esta zona son las correspondientes a la reducción de los iones hierro. No ocurre la reacción de corrosión en esta zona.
- Línea a-b-n-c-d-e: Solución acuosa de hierro  $Fe^{++}$  (zona de corrosión). El hierro metálico se corroe en esta zona.
- Línea e-d-f-g-k: Solución acuosa de  $Fe^{+++}$  (zona de corrosión). El hierro metálico se corroe en esta zona.
- Línea h-f-g-m: Solución acuosa de  $FeO_4$  (zona de corrosión).
- Línea c-d-f-h-i: Óxidos ferrosos sólidos  $Fe_2O_3$  (zona de pasivación). El hierro se oxida en esta zona, sin embargo, el resultado es una película de óxidos que disminuye el proceso de oxidación causando la pasivación (protección a la corrosión del metal debido a la formación de una película de productos sólidos de la reacción de oxidación).
- Línea n-c-i-p: Óxido sólido  $Fe_3O_4$  ( $Fe_2O_3 \cdot FeO$ ) zona de pasivación. La película de óxidos genera pasivación.
- Línea b-n-p-j: Hidróxidos sólidos  $Fe(OH)_2 / FeO \cdot nH_2O$  zona de pasivación

Por lo tanto, según las condiciones trabajadas en el laboratorio ( $pH = 7$ ,  $V > 2$  v) el Hierro siempre trabajará en una zona de corrosión y además en una zona oxidante donde el agua se descompone por desprenderse oxígeno en forma de gas.



**Figura 15: Diagrama de Pourbaix del Hierro.**

Para el caso del diagrama del Aluminio (Figura 16) En éste se puede observar la alta estabilidad del metal en el agua entre pH 4 y 9 debido a la formación del  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . En los experimentos se ha trabajado con los electrodos de Aluminio en un pH en el rango de entre 7 a 10 por lo que se concluye que el Aluminio es más estable y tiende a ser el electrodo más durable en comparación con el Hierro.

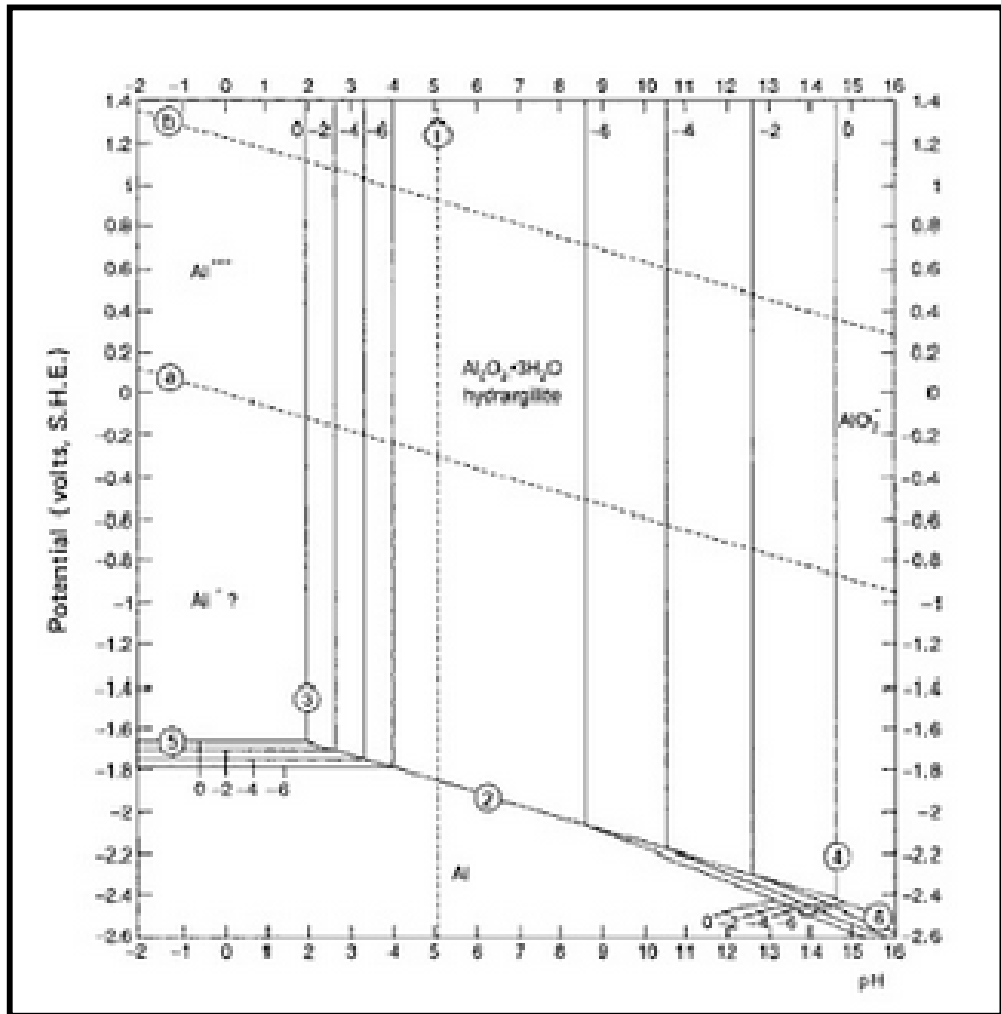


Figura 16: Diagrama de Pourbaix del Aluminio.



### 3.7. Análisis comparativo versus otros tratamientos

#### 3.7.1. Electrocoagulación (EC) v/s Tratamiento Físicoquímico

##### 3.7.1.1. Comparación General

**Tabla 10: Comparación general entre EC y el tratamiento Físicoquímico <sup>(16)</sup>**

DETALLE	ELECTROCOAGULACION	FISICOQUIMICO
Superficie	Representa entre [50–60]% de un Sistema Físicoquímico	Requiere de gran superficie.
Tiempo de Residencia de la reacción	Necesita de 10 a 60 segundos en la Celda de Electrocoagulación.	Tiempo de reacción química de 45 a 90 segundos
Obras Civiles	Son unidades compactas que NO requieren Obras Civiles.	Requieren de grandes obras civiles.
Costos de Inversión	Requiere de una inversión mayor en equipamiento.	Representa una inversión de 70 a 80 % de la EC (electro.)
Costos de Operación (Energía)	Entre [0.5 – 0.8] kWh/m <sup>3</sup> . En energía.	De 5 a 10% menor que el sistema de electrocoagulación.
Químicos	Representan [10 - 20]% de un sistema físicoquímico	Requiere de grandes cantidades de productos químicos
Lodos	Su generación es menor con una Humedad entre [96-97] %	Mayor generación de lodos con una Humedad entre [98-99]%

### 3.7.1.2. Comparación Técnico/Económica

**Tabla 11: Comparación técnico económica entre EC y el tratamiento Físicoquímico <sup>(16)</sup>**

DETALLE	ELECTROCOAGULACION	FISICOQUIMICO
Relación de Energía	[0.020-0.032] US\$ / m <sup>3</sup>	[0.25-0.30] US\$ / m <sup>3</sup>
Relación de Químicos	No usa químicos	[0.25-0.35] US\$ / m <sup>3</sup>
Tiempo de Residencia de la reacción	[10-60] s en la Celda de EC	Reacción química de 45-90 s.
Tiempo de Residencia de Sedimentación	15-20 min. En el estanque de Sedimentación	45-60 min. En el estanque de Sedimentación

### 3.7.2. Electrocoagulación (EC) v/s Tratamiento Biológico

#### 3.7.2.1. Comparación General

**Tabla 12: Comparación general entre EC y el tratamiento Biológico <sup>(16)</sup>**

DETALLE	ELECTROCOAGULACION	BIOLÓGICO
Superficie	Representa entre [50–60] % de un Sistema Biológico.	Requiere de gran superficie.
Tiempo de Residencia de la reacción	Necesita de 10 a 60 segundos en la Celda de Electrocoagulación.	Tiempo mínimo de 24 horas. En el estanque de aereación
Obras Civiles	Son unidades compactas que NO requieren Obras Civiles.	Requieren de grandes obras civiles.
Costos de Inversión	Representa el 50% de la inversión del sistema biológico.	Requieren una gran inversión en equipos y obras civiles.
Costos de Operación (Energía)	Entre [0.5 – 0.8] kWh/m <sup>3</sup> .	De 5 a 10% menor que el sistema de electrocoagulación.
Químicos	Sólo para ajustes de pH.	Los puede utilizar para la etapa de desinfección
Lodos	Su generación es menor, con una Humedad entre [96-97] %	Mayor generación de lodos con una Humedad entre [98-99]%

### 3.7.2.2. Comparación Técnico/Económica

**Tabla 13: Comparación técnico económica entre EC y el tratamiento Biológico <sup>(16)</sup>**

DETALLE	ELECTROCOAGULACION	BIOLÓGICO
Relación de Energía	[0.020 -0.032] US\$ / m <sup>3</sup>	[0.30-0.35] US\$ / m <sup>3</sup>
Relación de Químicos	No usa químicos	[0.008-0.009] US\$ / m <sup>3</sup> (Desinfección)
Tiempo de Residencia de la reacción	[10-60] s. En la Celda de EC	24 h. en el estanque de Aireación
Tiempo de Residencia de Sedimentación	15-20 min. En el estanque de Sedimentación	3-4 h. En el estanque de Sedimentación

### 3.8. Teoría de coloides

En química un coloide, suspensión coloidal o dispersión coloidal es un sistema físico-químico compuesto por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas, de tamaño mesoscópico (a medio camino entre los mundos macroscópico y microscópico). <sup>(18)</sup>

La ciencia de los coloides trata de los sistemas en los que uno o varios de los componentes tienen al menos una dimensión dentro del intervalo entre 1 µm y 1nm, es decir, estudia principalmente sistemas que contienen o moléculas grandes o partículas pequeñas. <sup>(18)</sup>

Así, se trata de partículas que no son apreciables a simple vista, pero más grandes que cualquier molécula. El nombre de coloide proviene de la raíz griega kolas que significa que puede pegarse. Este nombre hace referencia a una de las principales propiedades de los coloides: su tendencia espontánea a agregar o formar coágulos. <sup>(18)</sup>

Aunque el coloide por excelencia es aquel en el que la fase continua es un líquido y la fase dispersa se compone de partículas sólidas, pueden encontrarse coloides cuyos componentes se encuentran en otros estados de agregación. <sup>(18)</sup>

Los sistemas coloidales se pueden agrupar dentro de tres clasificaciones generales:

- Dispersiones coloidales: son termodinámicamente inestables debido a su gran energía libre de superficie y son sistemas irreversibles en el sentido de que no se pueden reconstruir fácilmente después de que haya una separación de fases.
- Disoluciones verdaderas de sustancias macromoleculares (naturales o sintéticas): son termodinámicamente estables y reversibles en el sentido de que se pueden reconstruir fácilmente después de separar el soluto del disolvente.
- Coloides de asociación (a veces llamados electrólitos coloidales), que son termodinámicamente estables.<sup>(19)</sup>

## **CAPITULO 4: PROYECTOS RELACIONADOS**

### **4.1. Estado del Arte**

#### **4.1.1. Generalidades**

A pesar del hecho de que la tecnología de electrocoagulación (EC) ha sido patentada hace más de un año, la ausencia de importantes know-how sobre esta tecnología es bastante decepcionante.

Dada la crisis mundial del agua prevista por la ONU y el Consejo Mundial del Agua, hay razones para creer que para el año 2020, 17% más agua de lo que es fácilmente disponible será necesaria para alimentar el mundo. Por lo tanto, la urgente la necesidad de soluciones sostenibles. Mientras ECO Systems proporciona resultados favorables al medio ambiente y rentable para la reutilización sostenible del agua, es desconcertante darse cuenta de cuántos lugares en el mundo siguen utilizando el agua dulce para fines de limpieza.

Por otra parte, el uso de energías renovables para operar el proceso de EC evitaría cualquier problema relacionado con el calentamiento mundial, debido a la energía eléctrica a partir de recursos fósiles. Los inconvenientes y las oportunidades del método de EC fueron evaluados técnica y económicamente, incluyendo la neutralización y eliminación de metales pesados, dentro de los requerimientos actuales de descarga conforme a lo estipulado por la ley.

El principio de funcionamiento detrás de electrocoagulación consiste en conceptos de química coloidal, que trata de la formación, la caracterización y modificación de los coloides. Esas estructuras particulares con propiedades singulares, con tamaños dentro del rango de 1m a 1 nm., se consideran lo suficientemente grande para hacer caso omiso efectos de mecánica cuántica, pero conservando en gran medida las propiedades termodinámicas de la mayor parte. El paso de la dispersión de las partículas

coloidales a través de filtros de membrana típica es mucho más restringido que el paso de los iones disueltos o moléculas que se absorben a través de la superficie vinculada grupos  $\text{OH}^-$  y luego se hace más fácil para separarlos de una solución.

Dado que los contaminantes coloidales de aguas residuales (orgánicos e inorgánicos) son retenidos en solución debido a sus superficies cargadas ( $\xi$ -potencial), opuestos iones cargados son necesarios para absorber en la superficie de las partículas a fin de efectuar una desestabilización con la aglomeración y precipitación concomitante. Para lograr esto, el aluminio sólido se disuelve anódicamente en un gel de hidróxido de coagulante o por medio de una corriente eléctrica dentro de tres etapas: hidrólisis, seguido por condensación y complejación de aglomerados.

#### **4.1.2. Evolución de la Electrocoagulación**

##### **4.1.2.1. Estudios realizados**

Cuando hablamos de Electrocoagulación, muchos dudamos o desconocemos qué es, y es porque en el Perú esta técnica no es conocida y no se aplica. El principal motivo de esta situación es el mismo que se vivió en otras partes del mundo y es el desconocimiento de esta técnica electroquímica para disminuir o eliminar contaminantes en los efluentes de diversas industrias.

El primer acercamiento que ha habido de esta técnica con el Perú fue en marzo de este año, cuando el ingeniero fabricante Daniel Spencer de la empresa norteamericana Gr Enterprises Latin America Division, hizo una demostración en un auditorio de la ciudad de Cajamarca, donde utilizó la técnica de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales de esa ciudad. Esta empresa cuenta con plantas en diferentes países del

mundo; entre ellos Estados Unidos, Venezuela, Ecuador, y varios países de Asia y Europa.

A nivel de Sudamérica existen pocos estudios sobre esta técnica tan sorprendente e innovadora. Por mencionar a un país, tal vez el único que haga estudios en Sudamérica sobre esta técnica, está Colombia. Pero a nivel de Norteamérica, hay estudios realizados en gran cantidad y calidad en los Estados Unidos y en México. Muchos de éstos han servido como información para realizar el estudio del presente trabajo de investigación y poder lograr los resultados alcanzados.

En Europa la técnica está más desarrollada y estudiada, tal vez por el gran capital que invierte el estado en estos tipos de proyectos de investigación de vanguardia. Por mencionar a una empresa que vende esta tecnología esta tecnología a nivel mundial esta PROCONTROL, que ha puesto más de 50 000 señales de medición y de actuación, para procesos productivos, energéticos, medio ambientales, entre otros. PROCONTROL ha patentado la tecnología de electrocoagulación, que según su página web, es similar al tratamiento físico – químico, pero utilizando energía eléctrica.

Para dar una mayor fuerza a este trabajo presentamos un cuadro comparativo entre las tecnologías convencionales (tratamiento físico – químico) y la de Electrocoagulación. Este cuadro ha sido extraído de la página web de PROCONTROL y nos muestra las ventajas con respecto al primer tratamiento.

**Tabla 14: Paralelo entre Electrocoagulación y tratamiento Físico – Químico <sup>(14)</sup>**

<b>Detalle</b>	<b>Electrocoagulación</b>	<b>Físico Químico (F - Q)</b>
Superficie Ocupada	50% del F –Q	-
Obras necesarias	Sistema modular sin obra civil	Grandes Instalaciones
Costes de inversión inicial	25% del F –Q	Gran inversión en equipos y obra civil
Lodos Generados	30% del F –Q	-
Consumos	40% del F –Q	-

#### **4.1.3. Resúmenes de artículos revisados**

**4.1.3.1. MARTÍN DOMINGUEZ, Alejandra.** Incidencia del gradiente de velocidad en la eficiencia de la Electrocoagulación para remover arsénico en un reactor a flujo pistón. Instituto Tecnológico de Durango, México. 2006 <sup>(20)</sup>

Se realizaron estudios a escala de laboratorio usando un reactor electroquímico a flujo pistón con electrodos de hierro, que produce hidróxidos de hierro en línea como coagulante.

Los objetivos fueron analizar la influencia de la turbulencia en el fenómeno de coagulación por neutralización de carga, así como definir los parámetros que más influyen en la eficiencia electroquímica de producción de hierro y en la remoción de los flocs formados.

Los resultados mostraron que las eficiencias de producción de hierro y de remoción de los flocs producidos aumentaron al incrementarse el gradiente de velocidad en el mezclado (G) y el producto de éste por el tiempo de



residencia en el reactor (Gt). La producción de hierro disminuyó conforme transcurrió el tiempo de operación del reactor; sin embargo, un valor de conductividad de  $600\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  originado por la adición de NaCl evitó este decremento y aumentó la eficiencia electroquímica. La presencia de cloro en el agua elevó significativamente la eficiencia en la remoción de hierro pero no influyó en la producción del mismo.

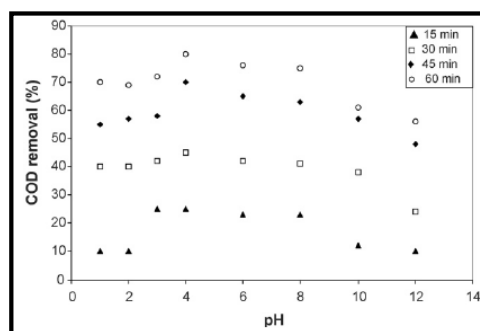
En el estudio se partió del supuesto que entre más hierro se removiera después de la sedimentación, mayor sería la cantidad de arsénico que se eliminaría del agua. Los resultados mostraron que hay una buena correlación entre la eliminación de los dos contaminantes.

La electrocoagulación es un sistema de tratamiento eficiente y con perspectivas interesantes para la eliminación de diferentes tipos de contaminantes en el agua. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que es susceptible a diferentes parámetros de operación que pueden modificar su eficiencia y variar los costos de operación. Uno de estos parámetros es el cloro, el cual no influye de manera significativa en la eficiencia de la producción del hierro, pero si mejora de manera importante la de remoción del mismo en las etapas de floculación y sedimentación. La conductividad del agua es otro factor que afecta directamente la eficiencia electroquímica, pero al aumentarla añadiendo una sal se elevan considerablemente los costos de operación del sistema. El Gt de la mezcla tiene un claro efecto sobre la eficiencia de la formación del floc y, por lo tanto, en la remoción del hierro producido en el reactor.

**4.1.3.2.** ROA-MORALES, Gabriela. Aluminum electrocoagulation with peroxide applied to wastewater from pasta and cookie processing. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química. México. 2006.<sup>(21)</sup>

La eliminación de contaminantes orgánicos de las aguas residuales de la industria de pastas y galletas mediante la Electrocoagulación utilizando proceso combinados con el Aluminio y el peróxido de hidrógeno fueron evaluados utilizando un reactor experimental por lotes. Bajo condiciones óptimas de pH 4 y con una densidad de corriente de  $18,2 \text{ mA/m}^2$ , el método electroquímico produce eliminación muy eficaz de la contaminación orgánica.

El tratamiento redujo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 90%, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) en un 96%, sólidos totales en un 95% y coliformes fecales en un 99,9%. Se determinó el efecto de reducir el pH de la solución acuosa con ácido sulfúrico en las especies químicas formadas y su efecto sobre la formación de fase lodo. La calidad de las aguas residuales se controló usando espectrometría UV-Vis y voltametría cíclica con el fin de caracterizar las aguas residuales crudas y tratadas. Finalmente, la morfología y composición elemental del lodo resultante se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectros de energía de dispersión (EDS).

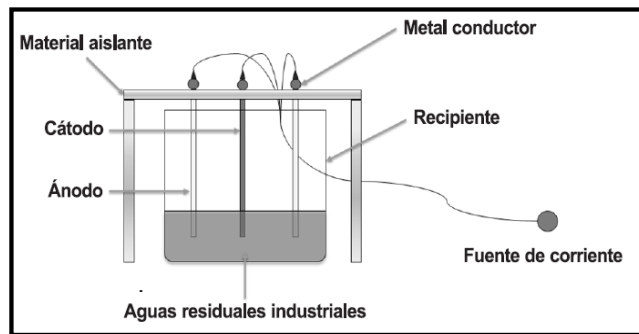


**Figura 17: Remoción de COD como función del pH y tiempo de tratamiento.**

La voltametría cíclica y la espectrometría UV-vis confirma la mejora en la calidad del agua residual después del tratamiento electroquímico. Finalmente, la microscopía electrónica de barrido y análisis elemental muestra la morfología de lodos y la presencia de C, O, Al y S como sus constituyentes.

**4.1.3.3. MORALES POSADA, Nelly Bibiana. SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES GALVÁNICAS.** Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.2010 <sup>(22)</sup>

Las aguas residuales industriales de origen galvánico se trataron a partir de ensayos realizados a estas aguas con contenido de metales, implementando un porcentaje mayor al 47% para la remoción de metales pesados como  $\text{Cr}^{+6}$ , Pb y Zn de tales aguas, mediante proceso de electrocoagulación. Para el estudio, se utilizaron 10L de agua residual correspondientes al vertimiento de la empresa Compañía Eléctrica Ltda.

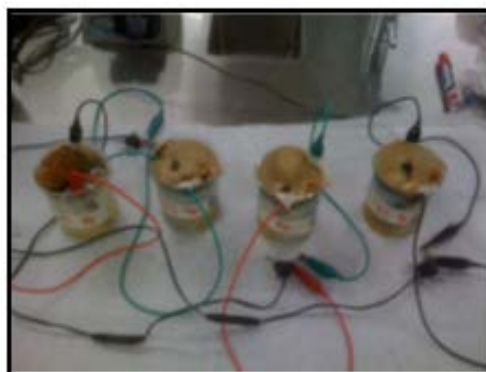


**Figura 18: Modelo de Reactor Electroquímico**

Los análisis se hicieron, mediante la confrontación de parámetros de Cu, Cr, Cr<sup>+6</sup>, Ni, Pb y Zn, antes y después del tratamiento de Electrocoagulación. Se obtuvo una reducción en Cr del 51.65%, donde el valor arrojado está por debajo de los estándares establecidos en materia de vertimientos (Res. No 1074 28 Oct. 1997), Ni del 18.09%, Pb del 50%, Zn del 47.37%, los cuales a pesar de la remoción producida, tienen valores superiores a lo estipulado en esta normativa. El Cu tuvo un aumento del 519.48%, debido a la placa empleada para el tratamiento. Los valores promedio obtenidos durante los ensayos fueron: pH: 3.18, conductividad: 21.83 mS/m y temperatura: 48.5 °C. A pesar de que los valores de las variables y los parámetros no se encuentran dentro de los rangos generalmente expuestos por la literatura consultada para sistemas de electrocoagulación con aguas residuales, se obtuvo una reducción relevante en cuanto a la presencia de los metales estudiados.

**4.1.3.4. GUERRA MILLÁN, Francisco José Electrocoagulación Asistida con  $H_2O_2$  de Aguas Residuales. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Equipo I-A. 2008. <sup>(23)</sup>**

El siguiente proyecto evalúa la remoción de contaminantes de agua residual tratada mediante electrocoagulación asistida con  $H_2O_2$  con electrodos de hierro y aluminio. Bajo condiciones de laboratorio, los rendimientos del método electroquímico resultaron efectivos para la reducción de todos los contaminantes del agua residual doméstica. La turbidez se redujo hasta un 98 %, la DQO hasta en un 83% y el OD hasta en un 79 %.



**Figura 19: Reactores Electroquímicos en serie**

La electrocoagulación es un proceso sumamente eficiente y fácil de aplicar para el tratamiento de aguas residuales. A lo largo de los resultados la turbidez se redujo hasta un 98 %, la DQO hasta en un 83% y el OD hasta en un 79 %. Cabe mencionar que la muestra AIR2, tratada con electrodos de aluminio es la que muestra el espectro más cercano al del agua destilada, una mayor reducción en el DQO así como un valor de turbidez muy cercano al de la norma, lo que podría indicar el mejor tratamiento. Esta

muestra contenía un mayor énfasis en la concentración de  $H_2O_2$  para determinar la concentración óptima, así como los efectos de escalado de dichas reacciones.

Con base en los resultados obtenidos es posible concluir que se llevó a cabo una experimentación correcta. Los errores si bien se pudieron haber minimizado son intrínsecos a la experimentación. No obstante, los objetivos fueron satisfechos. La electrocoagulación, como se mostró en el proyecto resulta sumamente fácil de aplicar y su efectividad es considerablemente alta.

**4.1.3.5. ÁVILA REYES; Deisy. ESTUDIO DE TRATABILIDAD POR ELECTROCOAGULACIÓN DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Química. 2003. <sup>(24)</sup>**

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la tratabilidad de los lixiviados del Relleno Sanitario La Esmeralda por electrocoagulación, a escala de banco, midiendo la disminución de carga orgánica obtenida por este proceso.



**Figura 20: Estado del efluente después de aplicar proceso de Electrocoagulación**

La electrocoagulación se realizó en el reactor electrolítico del laboratorio de aguas residuales de la Universidad Nacional. En este estudio se obtuvieron las condiciones de operación en sistema por lotes (voltaje, tiempo de operación y tipo de electrodo) para la electrocoagulación en el tratamiento de los lixiviados considerando para ello las mejores remociones de color, turbiedad, sólidos (totales, suspendidos y disueltos) y DQO; logrados al variar el voltaje, el tiempo de operación y el tipo de electrodo, manteniendo constante el volumen y la distancia entre electrodos. Para analizar la influencia del proceso físico-químico como tratamiento previo a la electrocoagulación se realizaron pruebas con lixiviado afluente y efluente de la planta de tratamiento del relleno; además se compararon las remociones logradas con electrocoagulación en sistema por lotes y en flujo continuo para las mejores condiciones de operación.

La gran variabilidad del comportamiento de los lixiviados influyó en las remociones de los diferentes parámetros medidos durante toda la investigación, presentándose mejores remociones para lixiviado crudo concentrado.

El costo debido al consumo energético del tratamiento de electrocoagulación en escala de banco, está definido por el voltaje aplicado, el tiempo de operación y la corriente desarrollada durante el proceso.

La cantidad de espuma formada se incrementó con el aumento del voltaje, esto es de gran importancia debido a la remoción obtenida en sistema continuo para grasas y aceites de 76,92%, lo cual confirma los resultados reportados en la literatura.

**4.1.3.6. ÖZACAR, Mahmut.** The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. <sup>(25)</sup>

La eliminación del color de las aguas residuales de síntesis que contienen reactivo Negro 5 se investigó experimentalmente mediante la tecnología de Electrocoagulación con electrodos de hierro. Los efectos de los parámetros operativos en la eficiencia de remoción tales como densidad de corriente, pH inicial, tiempo de electrólisis, concentración de colorante inicial y conductividad de la solución e fueron investigados en este estudio.

El rango de operación óptima para cada uno de estas variables operativas se determinó experimentalmente. Bajo las condiciones de una concentración de colorante inicial de  $100 \text{ mgL}^{-1}$ , pH inicial de 5, densidad de corriente de  $4.575 \text{ mA/cm}^2$ , concentración de sal de  $3000 \text{ mg/L}$ , temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , distancia inter electrodo de  $2,5 \text{ cm}$ , la eficacia de eliminación de color alcanzó  $98,8\%$ .

El consumo de energía eléctrica en las condiciones anteriores para la decoloración de la solución de tinte que contiene Reactivo Negro 5 fue de  $4,96 \text{ kWh / kg}$  de colorante. Los resultados muestran que la ecuación de velocidad de primer orden proporciona la mejor correlación de la tasa de decoloración del reactivo Negro 5.

La Electrocoagulación fue utilizada para eliminar el color de las soluciones de tinte que contiene el reactivo IC Negro 5 (RB5). La decoloración del reactivo con ánodo de sacrificio de hierro se vio afectada por el pH inicial, la densidad de corriente, la cantidad de NaCl y la concentración del colorante inicial.

Se encontró que el tiempo de electrólisis adecuada para la eliminación de color de estas soluciones de tinte era de  $5 \text{ min}$  para RB5.

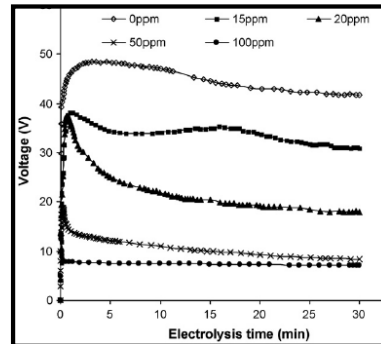


**4.1.3.7. MOUEDHENA, G.** Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. Unité de Chimie Industrielle et Matériaux (UCIM), ENIS, B.P.W. Sfax, Túnez. 2007. <sup>(26)</sup>

En el presente trabajo se ha investigado el proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio. Diferentes condiciones de operación tales como la composición de las soluciones basadas en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , el pH y la densidad de corriente fueron examinados de forma sistemática. Se investigó su influencia en (i) el fenómeno de la polarización de los electrodos, (ii) la evolución del pH durante la electrólisis y (iii) la cantidad de Al liberada (como coagulante).

Se encontró que (i) se requiere un mínimo de concentración del electrolito  $\text{Cl}^-$ , aproximadamente 60 ppm, para la ruptura de la película anódica pasiva y reducir considerablemente el voltaje de la celda durante la electrólisis, (ii) el importe global de coagulante ( $\text{Al}^{3+}$ ) generado tiene dos orígenes: oxidación electroquímica del ánodo y el ataque químico del cátodo.

Tomando en cuenta una ventaja de la evolución del pH observado durante la electrólisis, se realizaron pruebas de electrocoagulación para el tratamiento de un agua residual sintética que contiene iones metálicos pesados ( $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ). Las eficiencias de remoción que se alcanzaron fueron más del 98%.



**Figura 21: Variación del voltaje de la electrólisis versus tiempo de duración de la electrólisis**

**4.1.3.8.** ZONGO, Inoussa. Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance. Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS-Nancy Université, BP 20451, F-54001 Nancy, Francia. 2009. <sup>(27)</sup>

El tratamiento se llevó a cabo en un sistema discontinuo provisto de electrodos de aluminio o hierro, y con recirculación del líquido.

La eficiencia de la técnica dependió del material del electrodo en términos de tratamiento del agua, eficiencia de corriente, voltaje de la célula, consumo de energía para llegar a la DQO o reducción de la turbidez.

Además de COD, la absorbancia muestra seguir variaciones similares, a lo largo del tratamiento, los datos experimentales podrían ser interpretados por un modelo simple que implica el equilibrio global entre el metal disuelto en forma de hidróxidos y la sustancia contaminante. Con una fuerte reducción de la turbidez después de una fase preliminar, donde la

acumulación de hidróxido de metal no tiene ningún efecto sobre esta variable.

Considerando que la turbidez y la absorbancia a 436nm podrían ser totalmente eliminadas, la reducción de DQO varió de 74 a 88%. El modelo desarrollado para suspensiones concentradas fue adaptado para el caso de los residuos con un nivel moderado de COD.

Comportamientos diferentes de DQO y turbidez habían sido previamente observados con suspensiones concentradas de aceite, aunque con perfiles muy diferentes a lo largo del tratamiento.

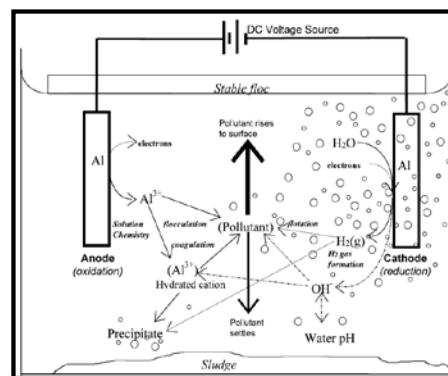
La respuesta específica de la DQO y la turbidez en el tratamiento de aguas residuales revela la dificultad en el desarrollo de modelos y teorías para el tratamiento de los residuos.

Se comparó el uso de los dos metales: mayores cantidades de hierro tienen que ser disueltas en comparación con el aluminio. Teniendo en cuenta los pesos moleculares de los dos metales, el número de electrones intercambiados en el proceso de ánodo juntos con la eficacia de la corriente, el tratamiento por Al o por Fe requiere comparables cantidades con respecto al consumo de energía. Sin embargo, el uso de electrodos de hierro a menudo da como resultado la formación de partículas de color marrón muy finas que son menos propensas a la sedimentación.

- 4.1.3.9.** HOLT, Peter K. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. Department of Chemical Engineering, University of Sydney, Sydney, NSW 2002. <sup>(28)</sup>

Un renovado interés en la Electrocoagulación se ha visto estimulada por la búsqueda de un tratamiento de agua confiable y rentable. Esta tecnología ofrece el coagulante in situ, conocido como ánodo de sacrificio, debido a un potencial aplicado mientras que la evolución simultánea de hidrógeno en el cátodo permite la eliminación de contaminantes por flotación.

La coagulación química se evaluó a través de pruebas de jarras con sulfato de aluminio (alumbre). Esto resultó ser más eficaz que la electrocoagulación bajo condiciones ácidas ( $\text{pH} = 4$ ) y bajos niveles de coagulantes ( $4 \text{ mg-Al} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>1)</sup> siendo la mínima capaz de desestabilizar eficazmente las partículas de arcilla coloidal). La coagulación de alta eficacia se observó en los niveles intermedios de dosificación de alumbre ( $4 - 20 \text{ mg-Al} \cdot \text{L}^{-1}$ ), donde el punto isoeléctrico se produjo en el  $\text{pH} = 7.8$ .



**Figura 22: Diagrama de una Celda Electroquímica**

Se identificaron tres etapas de funcionamiento (retrazo, reactiva y estable) en un reactor de electrocoagulación por lotes. En el punto isoeléctrico, que se produce durante la etapa de reactivo, se produce la mayor reducción de la

turbidez. Durante la fase estable, seguido de la precipitación de hidróxido de aluminio y una disminución de la turbidez indica un mecanismo de coagulación.

La corriente más alta (2A) redujo el nivel de contaminantes en el menor tiempo, 1% de turbidez residual después de 30 minutos, aunque la mayor eficiencia (en términos de contaminante eliminado por unidad de aluminio añadida) se logró a menor corriente (0,25 A).

- 4.1.3.10.** KOBYA, Mehmet. Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. Department of Environmental Engineering, Gebze Institute of Technology, Gebze, Turkey. ELSEVIER. 2007. <sup>(29)</sup>

Este trabajo presenta los resultados del tratamiento de un agua residual textil con la tecnología de EC. Los materiales de los electrodos, aluminio y hierro, se conectaron en tres modos, mono polar - paralelo (MP-P), mono polar - serie (MP-S), y bipolar – serie (BP-S). La DQO y turbidez fueron seleccionados como los criterios de desempeño. Para una remoción de DQO alto, el medio ácido es preferible para ambos electrodos. Para una eliminación de la turbidez alta, el medio ácido es preferible para el aluminio, y un medio neutro para hierro. La densidad de corriente alta es favorable para ambos electrodos, hierro y aluminio. En el caso de aluminio, la densidad de corriente exhibe un efecto pronunciado sobre la remoción de la DQO, dependiendo en gran medida del modo de conexión, pero tiene un efecto insignificante en la eliminación de la turbidez. MP-P con el hierro o el MP-S con el electrodo de aluminio son configuraciones adecuadas en relación con el proceso general de rendimiento.

Por otra parte, la economía del proceso es tan importante como la eficiencia de eliminación durante la tarea de evaluación del proceso. Varios gastos directos e indirectos han sido incluidos; los electrodos eléctricos, los electrodos de sacrificio, electrodos de trabajo, el manejo de lodos, el mantenimiento y costes de amortización se han considerado en el cálculo del costo total. Los resultados muestran que MP-P es el más rentable para ambos tipos de electrodos. Ambos electrodos muestran resultados similares en la reducción de la DQO y turbidez, pero se prefiere el hierro como un material de bajo costo.

Finalmente, un estudio comparativo mostró que la EC fue más rápida y más económica; consume menos material y produce menos lodo, y el pH del medio se estabiliza más que una coagulación química coagulación para similar COD y los niveles de remoción de turbiedad. Por otro lado, el hierro es el material del electrodo preferido en EC con el sistema MP-P, en condiciones experimentales, tales como,  $30\text{a}/\text{m}^2$  de densidad de corriente y 15 min de tiempo de tratamiento. El coste del tratamiento fue de \$ 0.245/ $\text{m}^3$ . En consecuencia, el costo de operación de la CC fue de 3,2 veces más alto que el costo de operación de EC.

## CAPITULO 5: DATOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se va a exponer todos los resultados que se han obtenido durante los experimentos. Esta presentación de resultados será dividida en dos, la primera será en el reactor por lotes para luego exponer los resultados del reactor en flujo continuo. El lugar de trabajo de los experimentos fue en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) / Facultad de Ingeniería Química y Textil (FIQT, Laboratorio de fisicoquímica N° 11).

Los materiales y equipos utilizados en los experimentos serán descritos brevemente antes de pasar a detallar los resultados obtenidos.

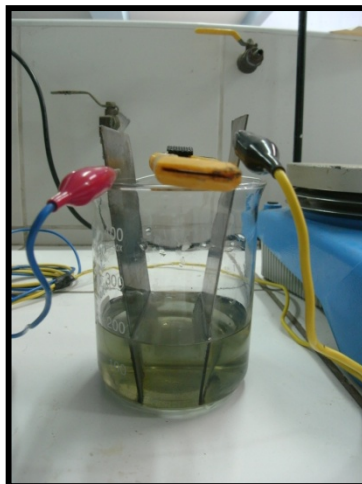
- **Probeta:** instrumento volumétrico, hecho de vidrio, que permite medir volúmenes considerables con un ligero grado de inexactitud. Sirve para contener líquidos. Está formado por un tubo generalmente transparente de unos centímetros de diámetro y tiene una graduación desde 0 ml hasta el máximo de la probeta.
- **Matraz de Erlenmeyer:** frasco de vidrio transparente de forma cónica, de base ancha y alargada, cuello muy estrecho, con una abertura en el extremo estrecho, prolongado con un cuello cilíndrico.
- **Agitador magnético:** es un equipo electrónico que consta de un motor que gira en un rango de rpm. Para que se puede mantener este el rango de rpm, el agitador cuenta con un dispositivo electrónico, el cual controla el movimiento giratorio y permite al usuario final ajustarlo a una velocidad determinada.
- **Vaso de precipitado:** es un recipiente cilíndrico de vidrio fino que se utiliza muy comúnmente en el laboratorio, sobre todo, para preparar o calentar sustancias y traspasar líquidos. Son cilíndricos con un fondo plano; se les encuentra de varias capacidades, desde 1 ml hasta de varios litros. Suelen estar graduados, pero esta graduación es inexacta por la misma naturaleza del artefacto; su forma regular facilita que pequeñas variaciones en la temperatura o incluso en el vertido pasen desapercibidas en la graduación

- Cronómetro: instrumento de medición, sirve para contabilizar el tiempo.
- Termómetro: es un instrumento de medición de temperatura. es un tubo de vidrio sellado que contiene mercurio, cuyo volumen cambia con la temperatura de manera uniforme. Este cambio de volumen se visualiza en una escala graduada.
- Embudo Büchner: es una pieza de porcelana utilizada para realizar filtraciones. Sobre la parte con forma de embudo hay un cilindro separado por una placa de porcelana perforada, con pequeños orificios.
- Bomba de vacío: son aquellos dispositivos que se encargan de extraer moléculas de gas de un volumen sellado, formando un vacío parcial, también llegan a extraer sustancias no deseadas en el producto, sistema o proceso.
- Turbidímetro: consiste en un nefelómetro es una fuente de luz para iluminar la muestra, y uno o más detectores fotoeléctricos con un dispositivo de lectura exterior para indicar la intensidad de luz dispersada a 90° de la vía de luz incidente. Se uso el Turbidímetro La Motte 2020.
- pH metro: es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución. La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones. Se uso el pH metro marca Lovibond.

### **5.1. Reactor por lotes**

Se acondicionó un recipiente de PVC para que sirviera como reactor por lotes y en donde se hicieron los primeros experimentos para probar si el tratamiento funcionaba con el efluente de la planta productora de sulfatos con el que se contaba. Pero luego se prefirió trabajar en un vaso de precipitado para poder visualizar que era lo que sucedía dentro del mismo (Figura 23).





**Figura 23: Vaso de precipitado con electrodos de Hierro. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

Luego de una serie de pequeñas pruebas se fue ultimando detalles de la operación en el reactor por lotes, el reactor en si es un vaso de precipitado dentro del cual estaba el efluente ácido inicial (figura 27), además estaban suspendidos los electrodos de Hierro que funcionaban como electrodos de sacrificio en La Electrocoagulación (EC), estos electrodos estaban suspendidos por medio de una pinza que estaba unida a un soporte universal. Los contactos eléctricos que eran parte del sistema eléctrico iban desde los electrodos cátodo (-) y ánodo (+) hasta el rectificador de corriente. El reactor por lotes iba encima de un agitador para que la solución siempre permaneciera perfectamente agitada y los iones se dispersen lo más uniformemente dentro del reactor (Figura 24).



**Figura 24: Sistema del Reactor por lotes. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

Al momento de realizar los experimentos con el reactor por lotes y los electrodos de Hierro se evidenciaba un calentamiento del reactor debido al calentamiento de los electrodos por el paso de la corriente, los electrodos a su vez calentaban la solución, por lo que se vio por conveniente instalar un ventilador al costado del sistema de trabajo para que funcionara como fuente de enfriamiento (Figura 25).



**Figura 25: Ventilador usado para enfriar el reactor por lotes. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

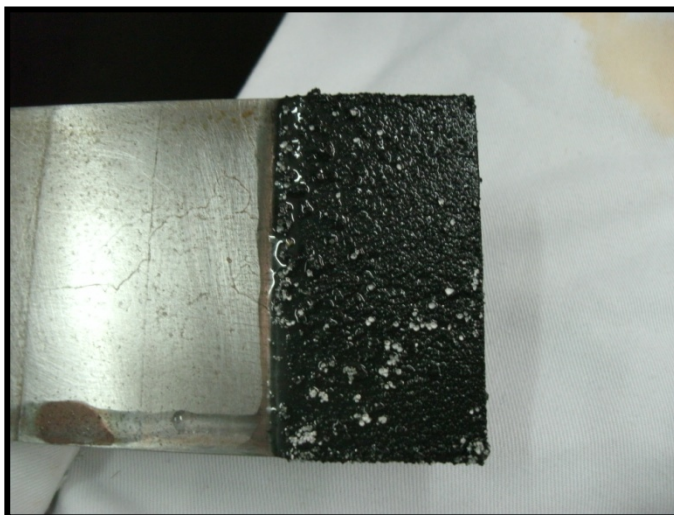


**Figura 26: Rectificador de corriente regulación fina. Voltaje 0 – 10 v. Amperaje 0 – 15 A**



**Figura 27: Muestra del efluente ácido inicial (procedente de una planta productora de sulfatos de Zn y Mg)**

Luego de realizadas los experimentos, se evidenciaba que conforme transcurría el tiempo en el reactor por lotes se tenía que incrementar el voltaje para poder mantener constante la densidad de corriente en el sistema. Al finalizar cada corrida experimental se pudo observar la formación de una capa en el ánodo, esta capa llamada pasivante es producto de la deposición de metales en la superficie del electrodo y cambios en la morfología del electrodo, es una película no conductora (Figura 28).



**Figura 28: Capa pasivante que se forma en los electrodos de Hierro luego de EC. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

El procedimiento para cada experimento es el siguiente:

- Al efluente ácido inicial se le trata con soda cáustica para subir el pH alrededor de 7.
- Al efluente obtenido del paso anterior se le filtra al vacío (figura 29), de este proceso se obtiene una torta (Figura 30) y un efluente que ingresa al reactor por lotes.
- Luego de tratar el efluente en el reactor por lotes se obtiene un efluente (Figura 31) que es (según resultados del análisis de metales pesados) más limpio que el efluente ácido inicial y puede ser reprocesado o eliminado de manera amigable al ambiente.

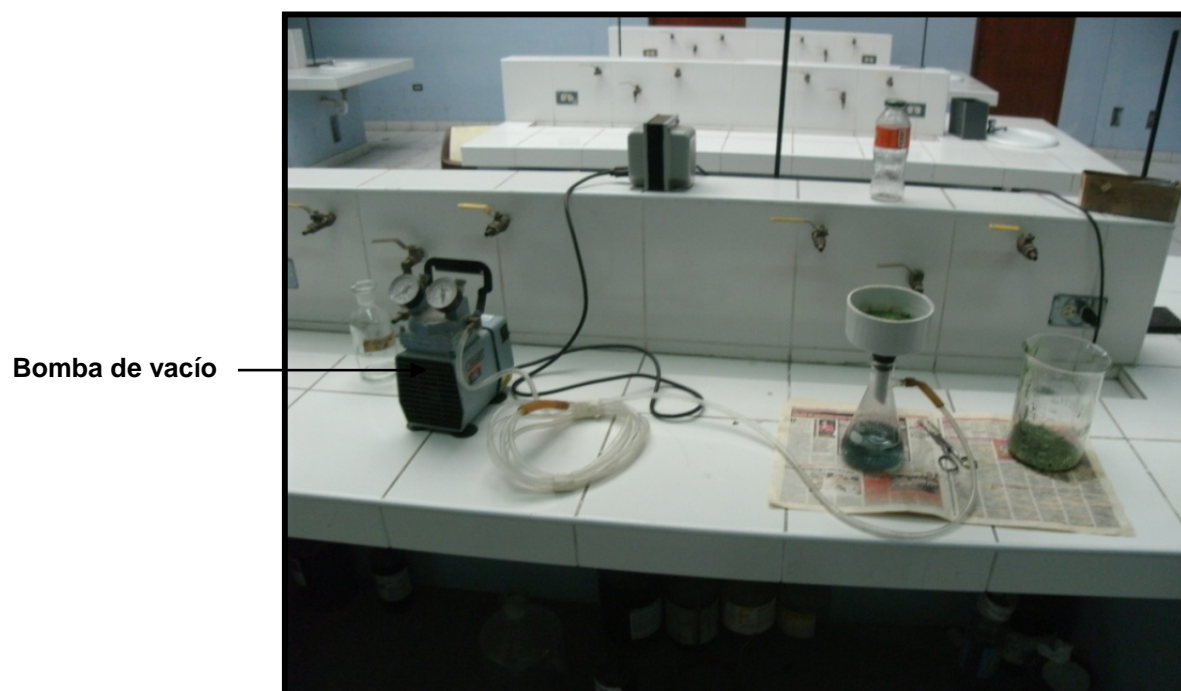
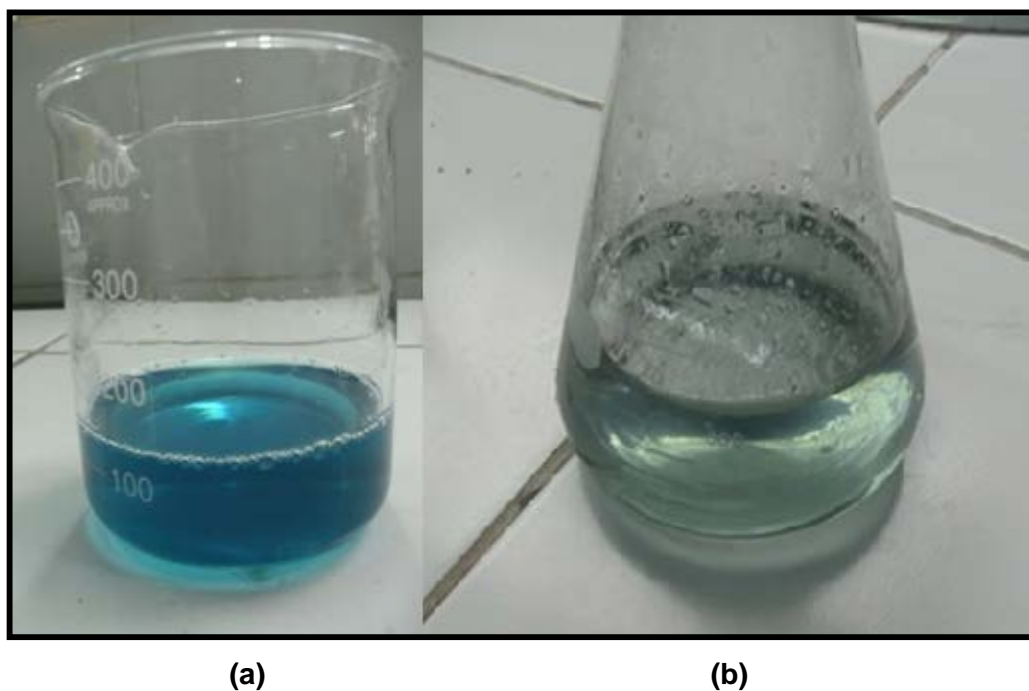


Figura 29: Filtración al vacío luego de EC. UNI – FIQT  
Laboratorio de fisicoquímica N° 11



Figura 30: Torta que se obtiene luego de la filtración al vacío



**Figura 31: (a) Muestra ácida inicial antes de iniciar proceso (b) Efluente obtenido luego de EC por lotes con electrodos de Fe.**

Para el caso del tratamiento con electrodos de Aluminio el procedimiento es similar al con electrodos de Hierro, pero la diferencia es que el efluente tiene que estar en un pH alcalino, alrededor de 8,5. Luego de esto igual se filtra al vacío y luego se ingresa el efluente obtenido al reactor por lotes para ser tratado (Figura 32).



**Figura 32: Electrocoagulación por lotes con electrodos de Aluminio. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

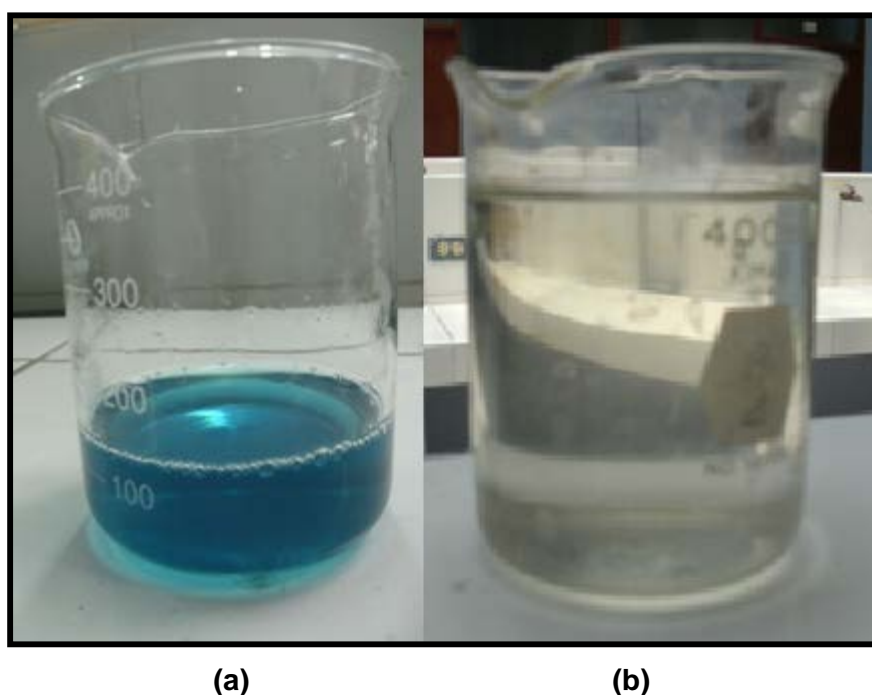
Al igual que con los electrodo de Hierro, en los electrodos de Aluminio se forma una capa pasivante en la superficie de los mismos, pero con la diferencia que esta capa pasivante (Figura 33) es mucho más delgada y fácil de retirar.



**Figura 33: Electroodos de Aluminio con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT laboratorio de fisicoquímica N° 11**



Se puede observar que en comparación con el efluente obtenido con electrodos de Hierro (Figura 31), el efluente obtenido con electrodos de Aluminio (Figura 34) es menos turbio, y según análisis de contenido de metales pesados por la técnica de ICP hecho en los laboratorios de CIMM – Perú es el más amigable con el ambiente.



**Figura 34: (a) Muestra ácida inicial antes de iniciar proceso (b) Efluente obtenido luego de EC por lotes con electrodos de Al.**

Los parámetros pH y densidad de corriente  $j$  ( $A/dm^2$ ) utilizados en los experimentos en el Reactor por lotes se evidencian en la tabla 15, el perfil de pH evidencia que los electrodos de Hierro trabajan en un pH cercano al neutro mientras que los electrodos de Aluminio trabajan en la zona alcalina.

**Tabla 15: Resultados experimentales de densidad de corriente y pH en reactor por lotes**

Muestra	Descripción (tratamiento reactor por lotes)	pH <sub>o</sub>	pH <sub>f</sub>	j (A/dm <sup>2</sup> )
<b>M1</b>	muestra ácida inicial	1		-
<b>M2</b>	muestra tratada con NaOH	5	-	-
<b>M3</b>	EC 10 min con Fe		8	3
<b>M4</b>	EC 20 min con Fe		8	3
<b>M7</b>	EC 10 min con Fe/10 min con Al		9	-
<b>M8</b>	EC 20 min con Al		9	5

Los resultados de los experimentos en el reactor por lotes se muestran en la tabla 16, donde se observa el comportamiento de variables, como por ejemplo como varía el voltaje manteniendo una densidad de corriente constante. Como varía el voltaje al transcurrir el tiempo, y como varían el pH y la temperatura en el transcurrir del tratamiento.

**Tabla 16: Resultados experimentales en el Reactor por lotes**

Volumen tratado por corrida = 0,5 L										
Voltaje (V)	Amperaje (A)	Área (dm <sup>2</sup> )	Densidad corriente j (A/dm <sup>2</sup> )	t (min)	pH	Muestra	T (°C)			
4	4,5	1,5	3	0	5	M9	25			
3,9				2			27			
3,8				4			29			
3,6				6			31			
3,3				8			32			
3,1				10	8		37			
4,1						0	5	M11	23	
3,9				2		25				
3,7				4		28				
3,5				6		30				
3,1				8		32				
2,9				10	8	39				
7,1				6	1,5	4	0	6,5	M13	24
6,5							2			26
6,1	4		29							
5,9	6		32							
5,6	8		34							
5,5	10	9	40							
7,1			0				6,5	M16	24	
6,7	2		25							
6,2	4		28							
5,8	6		30							
5,5	8		32							
5,3	10	9	41							
9,2	7,5	1,5	5				0	7	M17	23
8,7							2			26
8,3				4		29				
8				6		33				
7,7				8		36				
7,4				10	9	41				
9						0	7	M18	23	
8,6				2		25				
8,4				4		29				
8				6		32				
7,6				8		36				
7,3				10	9	42				

Los análisis ICP a cargo del laboratorio CIMM – Perú, evidencian una disminución en la masa de metales pesados luego de cada tratamiento con Electrocoagulación en el reactor por lotes, como se muestra en la tabla 17.

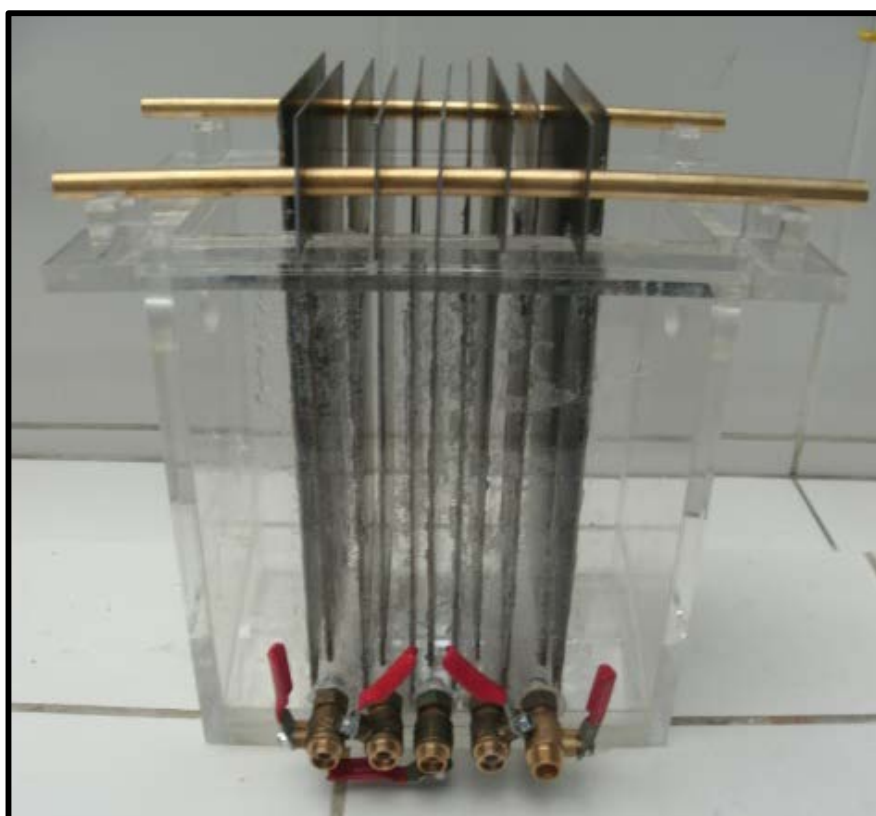
**Tabla 17: Masa en mg de metales pesados presentes en los efluentes tratados en el reactor por lotes\* (Apéndice 9)**

<b>SAMPLE</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Se</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>
<b>M1</b>	787	28,619	6,534	18915	13,73	3,43	164	10,13	49,359	1,451	13,75	3,566
<b>M2</b>	7,05	0,008	0,004	4122	1,961	2,7	31,94	3,16	7,98	1,559	0,1	0,18
<b>M3</b>	4,32	0,008	0,004	1981	1,697	1,63	20,77	2,07	6,364	0,007	0,03	0,044
<b>M4</b>	5,65	0,008	0,004	33,395	1,352	2,47	8,9	0,67	6,004	0,007	0,03	0,003
<b>M7</b>	444	0,008	0,004	3,653	0,299	0,02	3,3	0,51	0,008	0,007	0,01	0,04
<b>M8</b>	161	0,008	0,004	1,351	0,091	0,79	1,19	0,01	0,008	0,05	0,01	0,064
<b>M9</b>	10,89	0,008	0,004	1470	2,247	0,02	21,14	1,8	10,193	0,007	0,01	0,153
<b>M11</b>	9,5	0,008	0,004	2371	1,249	0,31	27,1	2,73	11,209	0,007	0,05	0,003
<b>M13</b>	14,04	0,008	0,004	1861	2,151	0,44	25,55	3,12	8,413	0,007	0,04	0,003
<b>M16</b>	8,43	0,008	0,004	308	2,068	0,02	12,22	0,01	6,205	0,007	0,02	0,003
<b>M17</b>	8,6	0,008	0,004	44,138	1,222	0,02	11,76	0,01	3,904	0,007	0,05	0,003
<b>M18</b>	9,45	0,008	0,502	6,437	1,815	0,17	14,36	0,01	6,281	0,007	0,02	0,003

\* Los tratamientos mencionados en esta tabla son los mismos de las tablas 15 y 16.

## 5.2. Reactor Flujo Continuo

Luego de haber hecho las pruebas preliminares en el reactor por lotes se decidió diseñar un reactor tipo flujo continuo (Figura 35) el cual como su nombre lo dice facilitaría trabajar el efluente de manera continua a un flujo preestablecido para que ingrese al reactor sea tratado ya sea con electrodos de Hierro o de Aluminio, para luego ser almacenado en un tanque para su posterior disposición final.



**Figura 35: Reactor flujo continuo diseñado para los experimento. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

El reactor que se diseñó fue hecho en material acrílico y tiene una entrada y una salida para tratar al efluente, además tiene las hendiduras para poder colocar de manera fácil los electrodos para la Electrocoagulación. Además el diseño inferior del reactor permite que los lodos que se generan en el proceso se acumulen en uno de los lados del reactor donde justamente hay un sistema de válvulas (Figura 36) usadas para el desfogues de estos lodos. Tanto los cátodos como los ánodos están unidos entre sí por un cilindro hueco hecho de cobre (30 cm largo x 1 cm diámetro exterior y 0,5 cm de diámetro interior) que funciona como conductor, al cual se le conectan los contactos eléctricos que van hacia el rectificador de corriente.

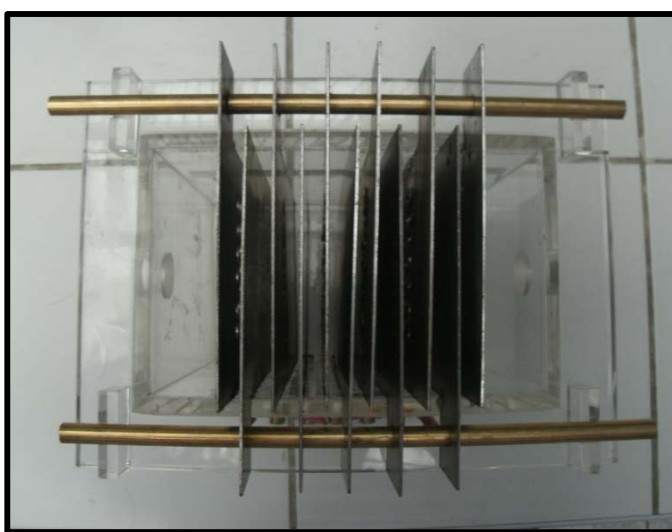


**Figura 36: Sistema de válvulas usadas para desfogue de lodos. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 37: Vista lateral del reactor flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio N° 11**

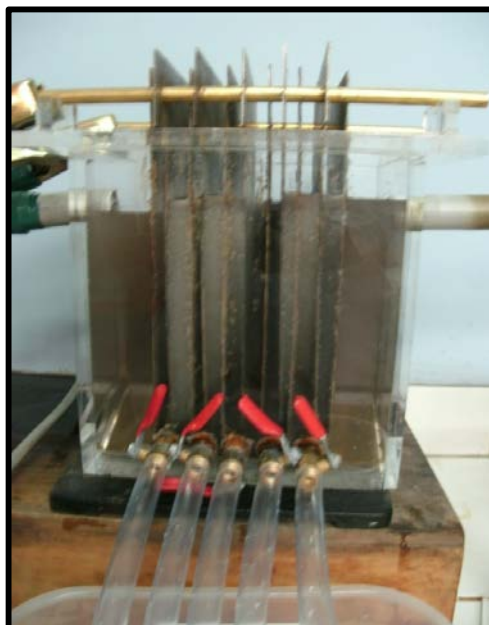
La separación entre los electrodos de trabajo es de 1 cm (Figura 38), se decidió por esta separación ya que según la bibliografía es la mejor distancia para que no haya un mal funcionamiento de la celda y la eficiencia de la misma sea la más óptima.



**Figura 38: Vista superior del reactor flujo continuo (separación de electrodos). UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

Los electrodos de Hierro y de Aluminio fueron usados de manera independiente para concluir con cuál de los dos la remoción de metales pesados es mejor. En la Figura 39 se visualiza al reactor flujo continuo en plena operación con electrodos de Hierro, y en la Figura 40 se pueden observar los electrodos de Hierro luego de una corrida experimental.





**Figura 39: Reactor flujo continuo tratando efluente industrial. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 40: Electrodo de Hierro. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

Al igual que con el reactor por lotes, en el reactor flujo continuo se hace presente la capa pasivante que cubre al ánodo de Hierro (Figura 41) y que no permite que siga trabajando de manera correcta. En la Figura 42 se observa cómo queda el electrodo de Hierro después de limpiarlo, para que pueda volver a trabajar en una próxima corrida experimental hay que lijarlo y dejarlo limpio.



**Figura 41: Capa pasivante en electrodos de Fe. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 42: Electrodo de Fe con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

El efluente a ser tratado se almacena en un tanque (Figura 43) que se conecta al reactor a través de una tubería de PVC y una llave tipo bola que permite regular el flujo de entrada al reactor, el cuál es una variable importante en cada experiencia, ya que nos permite saber el tiempo de residencia o el tiempo que una cantidad de efluente permanece dentro del reactor y es tratado con la técnica de Electrocoagulación.



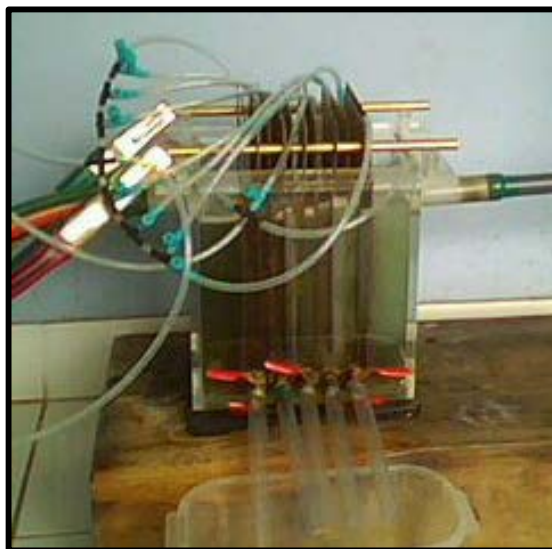
**Figura 43: Tanque de alimentación con efluente previamente tratado que ingresa al reactor flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

El rectificador que se usó en los experimentos con el reactor flujo continuo, se observa en la Figura 44, y es de mayor capacidad que el usado en el reactor por lotes, porque el área usada de los electrodos de trabajo en el reactor flujo continuo es mayor, por lo tanto para poder mantener constante la densidad de corriente óptima es necesario una mayor intensidad de corriente.



**Figura 44: Rectificador de corriente continua de regulación fina usado en experimentos con Reactor flujo continuo. Voltaje 0 – 10v. Capacidad 0 – 100 A.**

Al momento de trabajar con un rectificador de mayor capacidad, es necesario tener mayor cuidado por la corriente con la que se trabaja. Por eso los contactos eléctricos usados en estos experimentos (Figura 46) son más resistentes a la corriente de trabajo y además dan mayor seguridad para poder trabajar y evitar accidentes.



**Figura 45: Reactor flujo continuo en pleno proceso de EC. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 46: Contactos eléctricos usados para conectar el reactor al rectificador. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

Otro inconveniente que había que solucionar fue al momento de filtrar el efluente luego de subir el pH, como se trabajaba con mayor cantidad de efluente se necesitaba una bomba centrífuga de mayor capacidad que nos permitiera trabajar a un ritmo adecuado, porque la que se tenía al principio no tenía la capacidad suficiente. En la Figura 47 se observa el sistema de filtración al vacío con el que se trabajó en esta parte de los experimentos en flujo continuo. En la figura 48 se observa la bomba centrífuga que se consiguió para poder filtrar mayor cantidad de efluente en menor tiempo.



**Figura 47: Sistema de filtración al vacío. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 48: Bomba centrífuga utilizada para filtración al vacío. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

La torta obtenida (Figura 49) después de la filtración al vacío evidenciaba que el tratamiento con el reactor flujo continuo era mejor que con el por lotes porque la apariencia demostraba que no tenía tantos contaminantes, el color hacía ver que el efluente obtenido tiene menor contenido de algunos metales pesados en comparación que el efluente tratado con el reactor por lotes.

En la Figura 50 se observa el efluente obtenido luego de EC con electrodos de Aluminio, se observa un efluente más claro menos contaminado pero lo curioso es que luego de horas de haber sido tratado se formaban cristales de color transparente en la superficie del tanque de almacenamiento del efluente.



**Figura 49: Torta obtenida luego de filtración al vacío. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 50: Efluente obtenido luego de EC con electrodos de Al. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

En el reactor por lotes se utilizó un agitador magnético para poder uniformizar la transferencia de iones en todo el efluente tratado. Por la

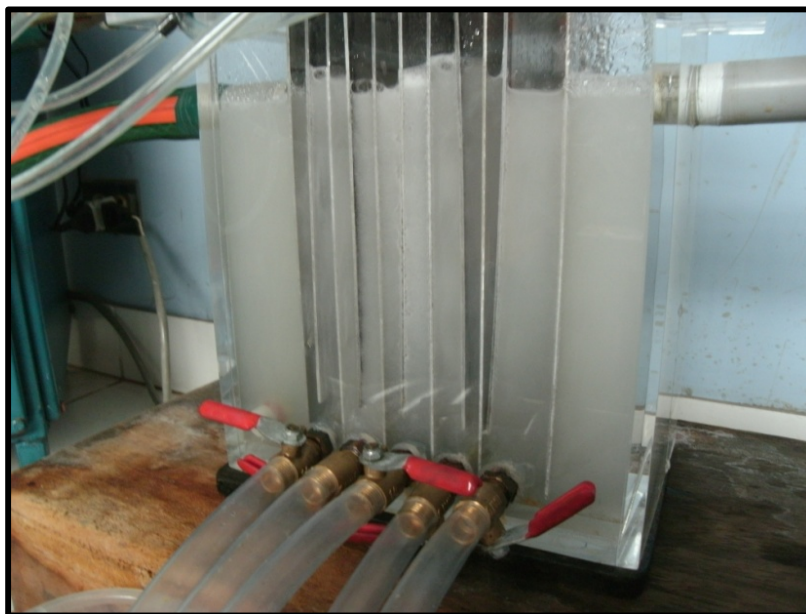


magnitud del efluente a tratar se optó por compresores de aire (Figura 51) que mantuvieran uniforme la transferencia de iones en todo el efluente tratado al interior del reactor flujo continuo.



**Figura 51: Compresores de aire**

Las figuras 52 y 53 evidencian el trabajo que se realizó en reactor flujo continuo con los electrodos de Aluminio, se observa un efluente más limpio que el tratado con electrodos de Hierro. Además se puede observar la separación entre electrodos que se pudo mantener para que el trabajo dentro del reactor sea el mejor posible y la eficiencia aumentara y así se pueda obtener un efluente con menor contenido de metales pesados.



**Figura 52: Reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



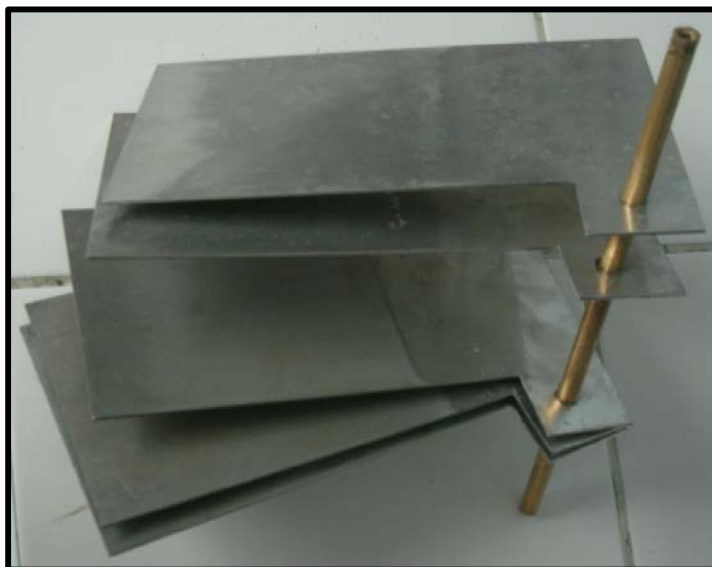
**Figura 53: Efluente tratado con electrodos de Aluminio. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

El sistema de válvulas utilizado permitió mantener el reactor operativo por más tiempo, ya que el desfogue de lodos (Figura 54) hizo posible más fluido el paso del efluente través del reactor flujo continuo.

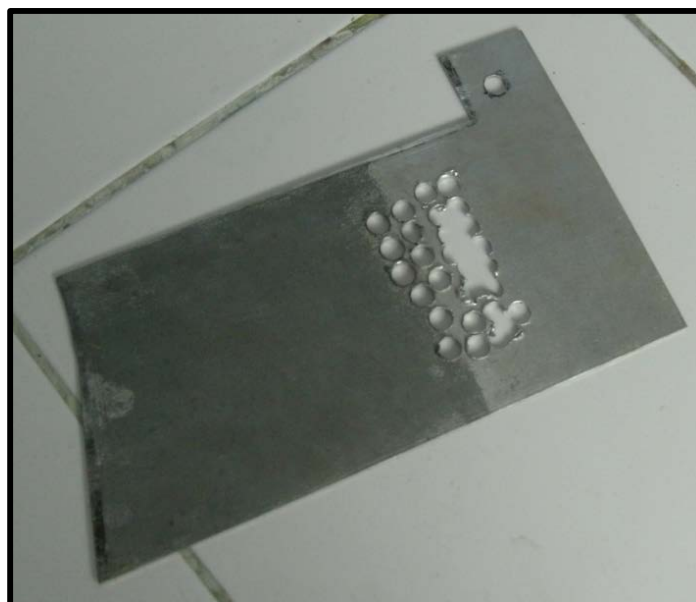


**Figura 54: Desfogue de lodos del Reactor flujo continuo. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

El tema de pasivación (Figura 55 y Figura 56) en los electrodos de Aluminio se observó en menor magnitud que con los electrodos de Hierro. La capa que se formaba en la superficie de los electrodos era más fácil de retirar, esto facilitó un mejor trabajo de limpieza si se contara con un mejor método para mantener a los electrodos libres de esta capa pasivante. Cabe resaltar que el sistema de los compresores de aire ayudaba a que los electrodos se mantuvieran por más tiempo libre de esta capa.

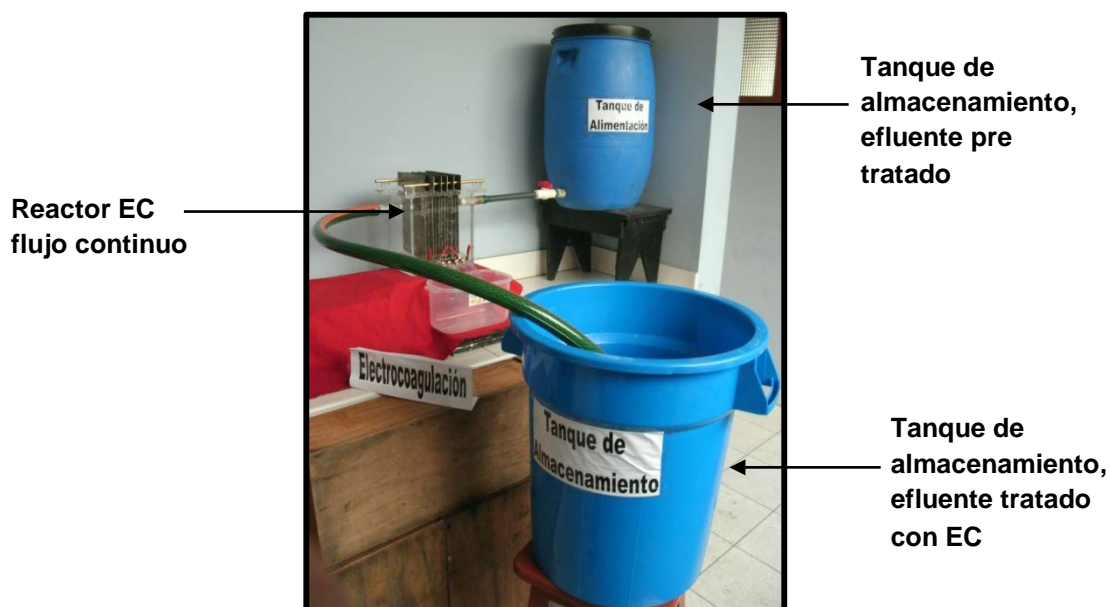


**Figura 55: Electrodo de Aluminio con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 56: Ánodo de Aluminio con presencia de capa pasivante. UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

La secuencia del tratamiento del efluente (Figura 57) consistía en el paso del efluente desde el tanque de almacenamiento al reactor flujo continuo para su posterior disposición a otro tanque de almacenamiento de donde se sacaban muestras para analizar la remoción de metales pesados después de un tiempo de Electrocoagulación.



**Figura 57: Secuencia de tratamiento del efluente UNI – FIQT Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

El sistema de tratamiento final que se utilizó en los experimentos del reactor tipo flujo continuo se puede observar en la Figura 59, donde se evidencia todos los equipos y materiales utilizados que tienen una determinada función dentro del sistema de tratamiento de efluentes.



**Figura 58: Montaje del sistema flujo continuo. UNI – FIQT  
Laboratorio de fisicoquímica N° 11**



**Figura 59: Sistema de EC con flujo continuo. UNI – FIQT  
Laboratorio de fisicoquímica N° 11**

En la tabla 20 se observan los parámetros utilizados en los experimentos con el reactor flujo continuo. Las variables voltaje, densidad de corriente, pH muestran un comportamiento muy parecido en comparación con los datos obtenidos en el reactor por lotes. Además en esta parte se cuentan con datos de turbidez, flujo del efluente, masas de lodos y cantidad de efluente obtenida por Electrocoagulación.

En las tablas 18 y 19 se muestran las masas en mg de metales pesados luego del proceso de Electrocoagulación. Se ha querido separar en dos grupos, los tratamientos en el sistema de flujo continuo, las muestras C1 hasta C6 son aquellas que han sido tratadas con electrodos de Hierro, mientras que las muestras C18, C19, C25-C28 son aquellas que han sido tratadas en el reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio y que evidencian una mayor remoción de metales pesados.

**Tabla 18: Masa en mg de metales pesados presentes en los efluentes tratados en el reactor flujo continuo con electrodos de Hierro. (Apéndice 9)**

	Al	As	Bi	Cr	Cu	Mo	P	Pb	Sb	SiO <sub>2</sub>	Sn	Ti	V
<b>C0</b>	2,4	0,01	0,04	0,004	965	0,38	4,1	1,0	1,5	20,29	0,01	0,03	0,018
<b>C1</b>	2,5	0,01	23,62	0,004	1516	0,29	6,0	1,5	1,8	34,89	0,01	0,01	0,003
<b>C2</b>	3,6	0,01	23,28	0,004	1500	0,26	6,3	1,4	2,0	35,32	0,01	0,01	0,003
<b>C3</b>	2,6	0,01	23,13	0,004	1385	0,27	6,2	1,4	2,1	35,9	0,01	0,01	0,003
<b>C4</b>	3,1	0,02	0,02	0,004	734	0,48	3,4	0,8	1,7	24,91	0,03	0,02	0,003
<b>C5</b>	2,9	0,01	0,02	0,082	501	0,43	1,4	0,7	1,4	21,22	0,01	0,02	0,003
<b>C6</b>	2,9	0,01	0,02	0,097	423	0,39	1,4	0,7	1,3	24,75	0,01	0,01	0,016

**Tabla 19: Masa en mg de metales pesados presentes en los efluentes tratados en el reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio. (Apéndice 9)**

	<b>Ag</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Bi</b>	<b>Ca</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Li</b>	<b>Mg</b>
<b>C18</b>	0,1	0,0	0,0	4,5	318,0	17693,0	844,0	0,0	4190,0	212,0	1,5	489,0
<b>C19</b>	0,1	0,0	0,0	4,2	318,0	14795,0	785,0	0,0	1842,0	1589,0	1,5	463,0
<b>C25</b>	0,0	0,0	0,0	7,7	8,5	1,3	0,1	0,0	1,3	0,1	0,0	0,5
<b>C26</b>	0,0	0,0	0,0	6,4	7,6	0,6	0,2	0,0	1,5	0,9	0,0	0,5
<b>C27</b>	0,0	0,0	0,0	6,4	7,1	0,6	0,2	0,0	1,5	1,2	0,0	0,4
<b>C28</b>	0,0	0,0	0,0	6,4	8,2	0,8	0,2	0,0	1,6	1,3	0,0	0,6
	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Na</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
<b>C18</b>	3664,0	0,4	111,0	18,3	6,7	3,2	1,3	34,9	0,1	0,0	0,2	47488,0
<b>C19</b>	3491,0	0,4	98,7	7,6	2,4	2,4	1,0	30,8	0,0	0,0	0,1	41966,0
<b>C25</b>	0,1	0,3	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	7,1
<b>C26</b>	1,3	0,2	0,0	0,4	0,1	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	23,1
<b>C27</b>	1,9	0,2	0,0	0,5	0,1	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	21,5
<b>C28</b>	2,2	0,2	0,0	0,5	0,2	0,0	0,1	2,9	0,0	0,1	0,0	25,2



**Tabla 20: Resultados experimentales en el Reactor flujo continuo**

Muestra	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Área (dm <sup>2</sup> )	j (A/dm <sup>2</sup> )	tiempo (min)	pH	Turbidez (NTU)	Volumen (mL)	tiempo (s)	Q (mL/s)	masa de lodo (g)	Volumen de efluente EC (L)				
C0	6,2	81	16,2	5	0	9	23			15,8	166,4	32				
C1	5,6				10		1,6	76	4,7							
C2	4,8				20		1,5	66	4,2							
C3	4				30	12	0,35	80	5,0							
C0	6	81			16,2	5	0	9	23			4,1	154,7	35		
C4	5,5						10		3,5	62	14,9					
C5	4,9						20		2,9	62	15,3					
C6	4,3						30	12	1,5	58	14,3					
C0	6	81					16,2	5	0	9	23			11,4	260,6	20
C18	5,5								10		1,6	94	8,2			
C19	4,5								20	12	1,4	94	8,2			

**Tabla 21: Resultados experimentales en el Reactor flujo continuo (continuación)**

Muestra	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Área (dm <sup>2</sup> )	j (A/dm <sup>2</sup> )	tiempo (min)	pH	Turbidez (NTU)	Volumen (mL)	tiempo (s)	Q (mL/s)	masa de lodo (g)	Volumen de efluente EC (L)						
C25	6	81	16,2	5	0	9,95	3	81	8,1	9,9	120	11						
	5,5				5			80	8,1									
	5				10			80	8,2									
C26	6	81			16,2	5	0	9,87	2	113	9,5	11,8	258,2	22				
	5,7						10			113	9,4							
	4,9						20			114	9,8							
C27	6	81					16,2	5	0	9,86	1	146	10,1	14,1	300,6	36		
	5,6								15			147	10,4					
	4,8								30			145	10,6					
C28	6,1	81							16,2	5	0	9,82	0,5	175	11,1	15,6	320,2	48
	5,5										20			175	11,2			
	4,5										40			174	11,2			

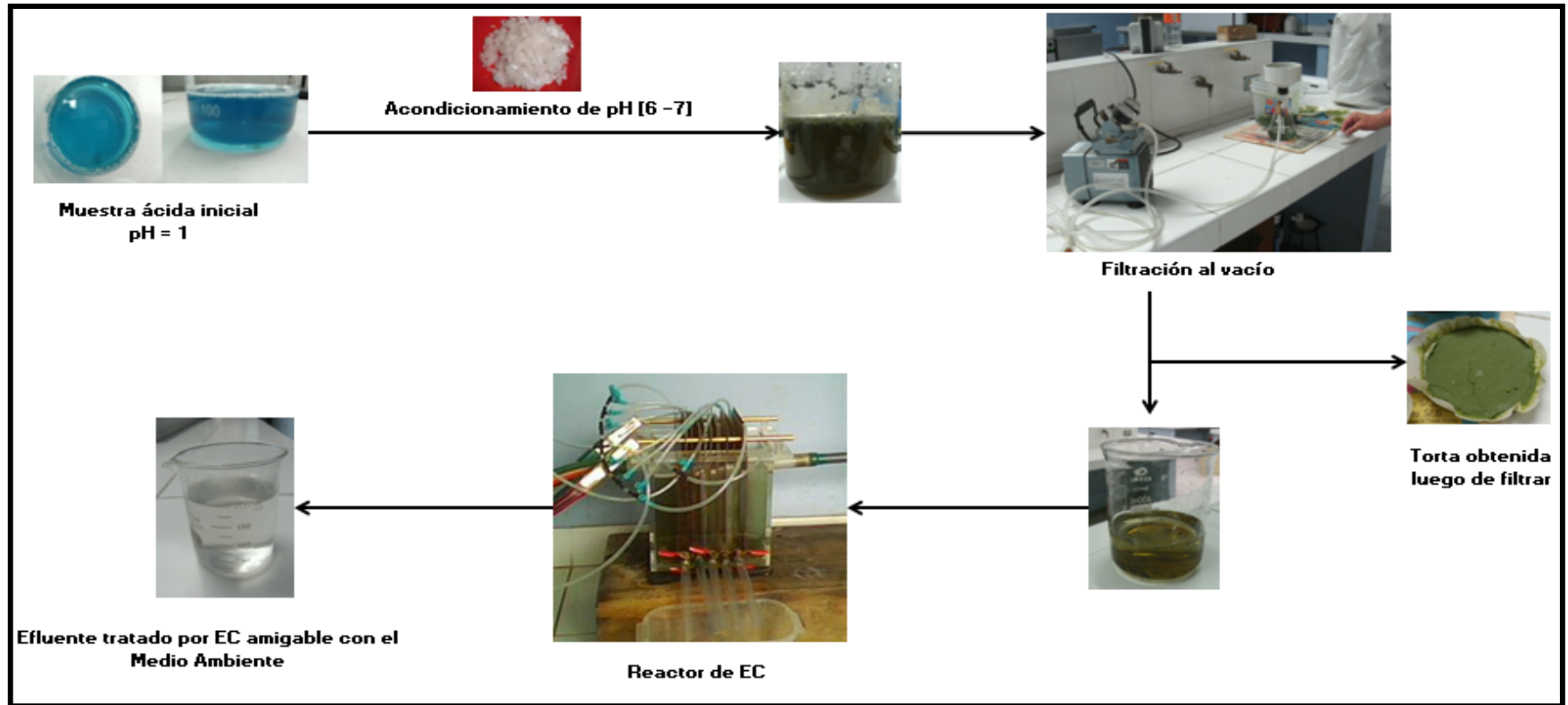


Figura 60: Diagrama de flujo del desarrollo experimental

En la Figura 60 se ha querido detallar todo el proceso que sigue el efluente desde su inicio a un pH de 1, para luego ser tratado con escamas de soda cáustica y obtener un efluente con pH alrededor de 7. Posteriormente se filtra y el efluente obtenido ingresa al reactor flujo continuo con electrodos de Hierro, este efluente obtenido nuevamente se trata con escamas de soda cáustica hasta llegar a pH alrededor de 9 para luego ser filtración al vacío e ingresar al reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio.

**Tabla 22: Masa de ánodos después de EC. Densidad de corriente constante, 5 A/dm<sup>2</sup>**

<b>Muestra</b>	C1	Tipo:	Fe
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	319	295,8	23,2
Ánodo 2	309,5	309	0,5
Ánodo 3	318,8	314,05	4,75
Ánodo 4	324,1	305	19,1
Ánodo 5	320	303,3	16,7
Ánodo 6	309,8	300,4	9,4
			73,65

<b>Muestra</b>	C3	Tipo:	Fe
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	

<b>Muestra</b>	C2	Tipo:	Fe
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	295,8	272,4	23,4
Ánodo 2	309	308	1
Ánodo 3	314,05	309,9	4,15
Ánodo 4	305	285,5	19,5
Ánodo 5	303,3	284,5	18,8
Ánodo 6	300,4	292,2	8,2
			75,05

<b>Muestra</b>	C4	Tipo:	Fe
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	

Ánodo 1	272,4	250	22,4
Ánodo 2	308	301,1	6,9
Ánodo 3	309,9	300,5	9,4
Ánodo 4	285,5	280,2	5,3
Ánodo 5	284,5	270,6	13,9
Ánodo 6	292,2	285,5	6,7
			64,6

<b>Muestra</b>	<b>C5</b>	<b>Tipo:</b>	<b>Fe</b>
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	230,9	220,2	10,7
Ánodo 2	295,2	287,8	7,4
Ánodo 3	290,8	280,1	10,7
Ánodo 4	268,5	257,8	10,7
Ánodo 5	258,4	249,5	8,9
Ánodo 6	278,7	274,2	4,5

Ánodo 1	250	230,9	19,1
Ánodo 2	301,1	295,2	5,9
Ánodo 3	300,5	290,8	9,7
Ánodo 4	280,2	268,5	11,7
Ánodo 5	270,6	258,4	12,2
Ánodo 6	285,5	278,7	6,8
			65,4

<b>Muestra</b>	<b>C6</b>	<b>Tipo:</b>	<b>Fe</b>
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	220,2	210,5	9,7
Ánodo 2	287,8	281,1	6,7
Ánodo 3	280,1	268,9	11,2
Ánodo 4	257,8	246,8	11
Ánodo 5	249,5	242	7,5
Ánodo 6	274,2	270,1	4,1

			52,9
--	--	--	------

<b>Muestra</b>	C18	Tipo:	Fe
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	319,5	296,2	23,3
Ánodo 2	308,5	305	3,5
Ánodo 3	317,9	313,1	4,8
Ánodo 4	322,9	306	16,9
Ánodo 5	319,1	305	14,1
Ánodo 6	320,9	303,3	17,6
			80,2

<b>Muestra</b>	C25	Tipo:	Al
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	120,06	119,91	0,15

			50,2
--	--	--	------

<b>Muestra</b>	C19	Tipo:	Fe
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	296,2	275,2	21
Ánodo 2	305	301,9	3,1
Ánodo 3	313,1	307	6,1
Ánodo 4	306	289,5	16,5
Ánodo 5	305	291,1	13,9
Ánodo 6	303,3	291,9	11,4
			72

<b>Muestra</b>	C26	Tipo:	Al
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	119,91	119,75	0,16

Ánodo 2	120,68	119,72	
Ánodo 3	119,4	119,29	0,11
Ánodo 4	119,8	116,58	3,22
Ánodo 5	119,94	119,79	0,15
Ánodo 6	119,43	119,16	0,27
			4,86

<b>Muestra</b>	C27	Tipo:	
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	119,75	119,55	0,2
Ánodo 2	118,9	117,85	1,05
Ánodo 3	119,25	119,18	0,07
Ánodo 4	114	111,2	2,8
Ánodo 5	119,64	119,55	0,09
Ánodo 6	119,02	118,88	0,14
			4,35

Ánodo 2	119,82	118,9	0,92
Ánodo 3	119,34	119,25	0,09
Ánodo 4	117,19	114	3,19
Ánodo 5	119,79	119,64	0,15
Ánodo 6	119,26	119,02	0,24
			4,75

<b>Muestra</b>	C28	Tipo:	Al
Electrodo	Masa Electrodo (g)		$\Delta$ masa (g)
	Antes	Después	
Ánodo 1	119,55	119	0,55
Ánodo 2	117,85	116,44	1,41
Ánodo 3	119,18	118,94	0,24
Ánodo 4	111,2	109,72	1,48
Ánodo 5	119,55	119,42	0,13
Ánodo 6	118,88	118,71	0,17
			3,98



Como se puede observar en la tabla 21 la pérdida de masa por parte de los ánodos dentro del reactor flujo continuo se debe a que éste libera los iones Fe o Al necesarios para actuar como coagulante en el proceso de electrocoagulación. Se puede concluir que la pérdida de masa es mucho mayor con los electrodos de Hierro que con los electrodos de Aluminio, por lo que se necesitaría una reposición más rápida con los de Hierro, incrementando así el coste de la operación.

## CAPITULO 6: TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Es este capítulo se va discutir los resultados obtenidos en los experimentos, tanto en el reactor por lotes como en el reactor flujo continuo por separado. El análisis es básicamente el mismo, porque se analizan los mismos parámetros. Pero para el caso del reactor flujo continuo se cuenta con data experimental más detallada porque se considera por los artículos leídos ya mencionados que la eficiencia y eficacia es mayor en este tipo de reactores.

### 6.1. Reactor por lotes

La diferencia de potencial, en voltios, entre los dos electrodos extremos presenta un comportamiento creciente de la densidad de corriente, es decir, cuando se aumenta la densidad de corriente en el sistema, también aumenta el voltaje.

El cálculo de la potencia consumida en el reactor tipo por lotes es como sigue:

$$P = V \cdot I \dots\dots\dots (6.1)$$

Como se tiene datos del voltaje en el tiempo para una determinada densidad de corriente constante, sacamos el voltaje promedio y lo multiplicamos por la intensidad de corriente, obteniendo unidades de potencia en wattios. Finalmente la potencia por el tiempo que ha estado operativo el reactor en segundos nos da unidades de energía en kWh.

$$E = V(v) \cdot I(A) \cdot t(s) / 3600000 \dots\dots\dots (6.2)$$

La energía consumida en el reactor por lotes está en el orden de los 0,01 kWh en promedio.

**Tabla 23: Cálculos de Energía Consumida Reactor por lotes**

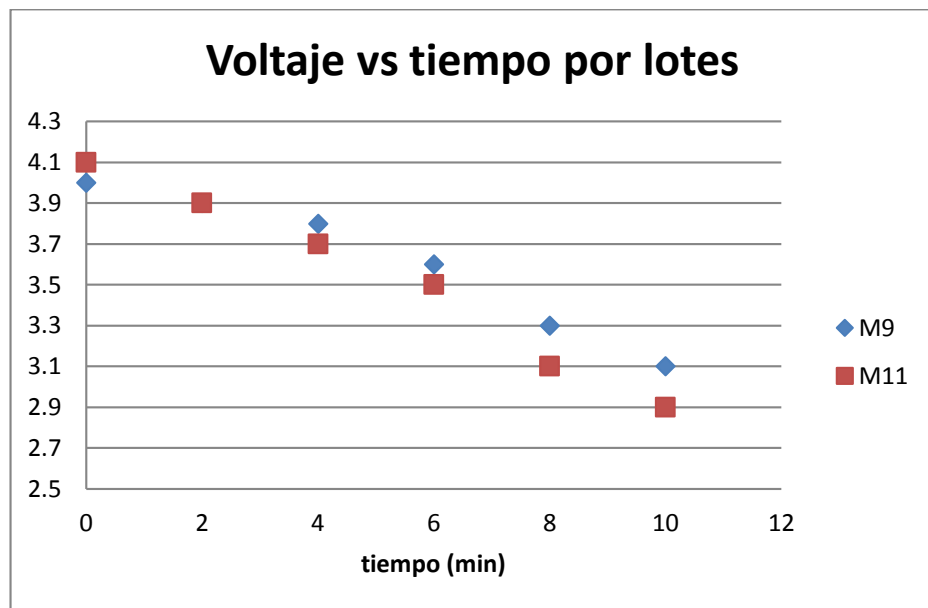
Muestra	Voltaje (V)	Amperaje (A)	tiempo (min)	tiempo (s)	POTENCIA CONSUMIDA: V(prom)*I (W)	ENERGIA CONSUMIDA: V*I(prom.)*t/3600000 (kWh)
M9	4	4,5	0	0	16,28	0,003
	3,9		2	120		
	3,8		4	240		
	3,6		6	360		
	3,3		8	480		
	3,1		10	600		
M11	4,1	4,5	0	0	15,90	0,003
	3,9		2	120		
	3,7		4	240		
	3,5		6	360		
	3,1		8	480		
	2,9		10	600		
M13	7,1	6	0	0	36,70	0,01
	6,5		2	120		
	6,1		4	240		
	5,9		6	360		
	5,6		8	480		
	5,5		10	600		
M16	7,1	6	0	0	36,60	0,01
	6,7		2	120		
	6,2		4	240		
	5,8		6	360		
	5,5		8	480		
	5,3		10	600		
M17	9,2	7,5	0	0	61,63	0,01
	8,7		2	120		
	8,3		4	240		
	8		6	360		
	7,7		8	480		
	7,4		10	600		

**Tabla 24: Porcentajes de Remoción más altos para el Reactor por lotes\***

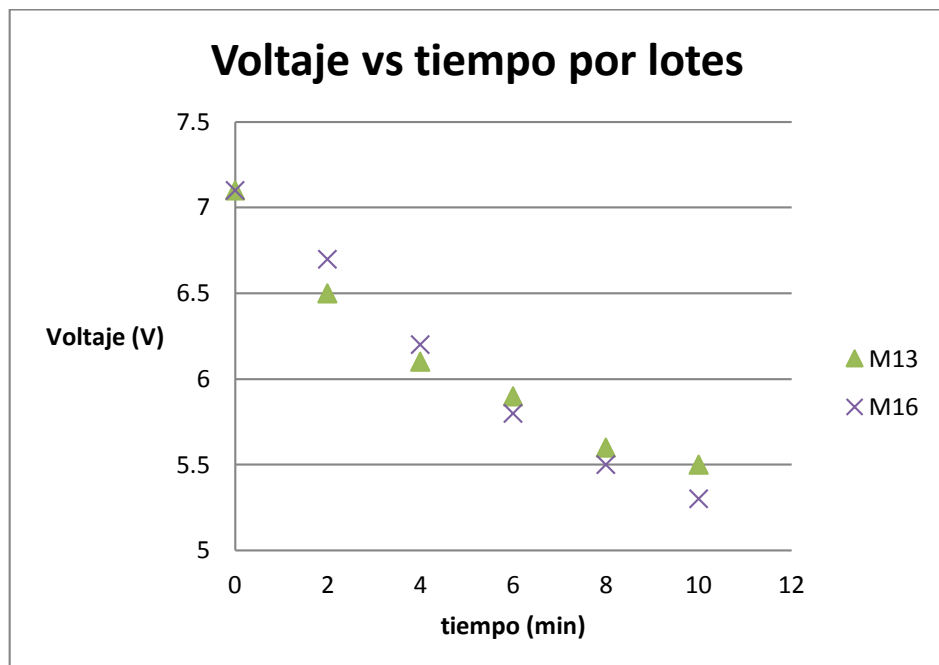
<b>SAMPLE</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Se</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>
<b>M2</b>	99,1	100,0	99,9	78,2	85,7	21,3	80,5	68,8	83,8	77,4	99,3	95,0
<b>M3</b>	99,5	100,0	99,9	89,5	87,6	52,5	87,3	79,6	87,1	99,5	99,8	98,8
<b>M4</b>	99,3	100,0	99,9	99,8	90,2	28,0	94,6	93,4	87,8	99,5	99,8	99,9
<b>M7</b>	43,6	100,0	99,9	100,0	97,8	99,4	98,0	95,0	100,0	99,5	99,9	98,9
<b>M8</b>	79,5	100,0	99,9	100,0	99,3	77,0	99,3	99,9	100,0	96,6	99,9	98,2
<b>M9</b>	98,6	100,0	99,9	92,2	83,6	99,4	87,1	82,2	79,3	99,5	99,9	95,7
<b>M11</b>	98,8	100,0	99,9	87,5	90,9	91,0	83,5	73,1	77,3	99,5	99,6	99,9
<b>M13</b>	98,2	100,0	99,9	90,2	84,3	87,2	84,4	69,2	83,0	99,5	99,7	99,9
<b>M16</b>	98,9	100,0	99,9	98,4	84,9	99,4	92,5	99,9	87,4	99,5	99,9	99,9
<b>M17</b>	98,9	100,0	99,9	99,8	91,1	99,4	92,8	99,9	92,1	99,5	99,6	99,9
<b>M18</b>	98,8	100,0	92,3	100,0	86,8	95,0	91,2	99,9	87,3	99,5	99,9	99,9

\* Porcentaje de remoción hallado con respecto a la muestra ácida inicial (M1).

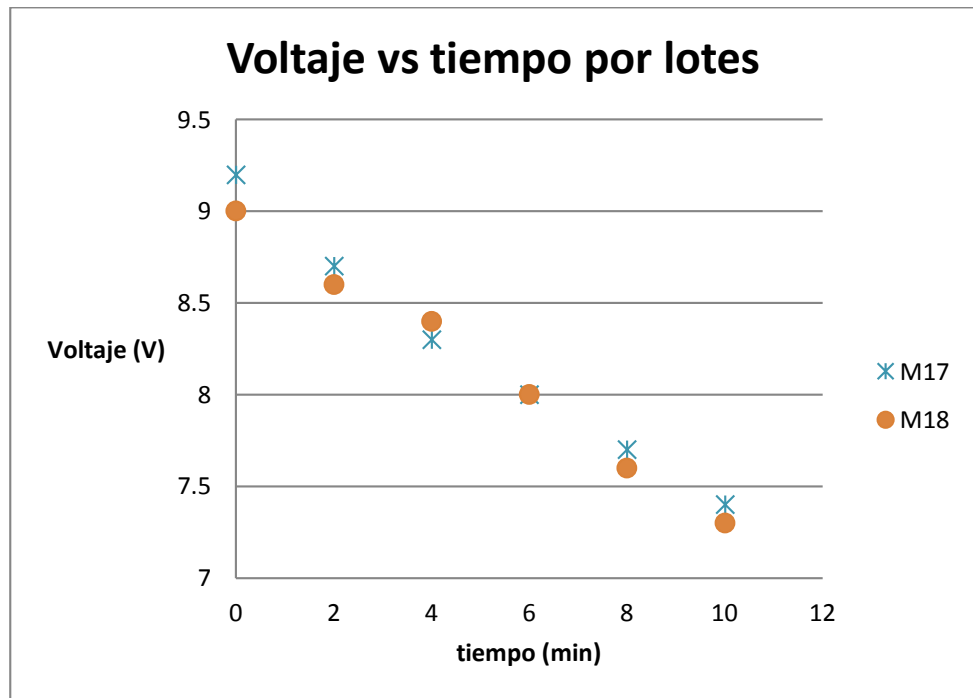
$$\%remoción = \left( \frac{\text{concentración metal pesado en M1} - \text{concentración metal pesado en } M_i}{\text{concentración metal pesado en M1}} \right) * 100 \dots \dots \dots (6.3)$$



**Gráfico 1: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor por lotes (pruebas M9 y M11)**

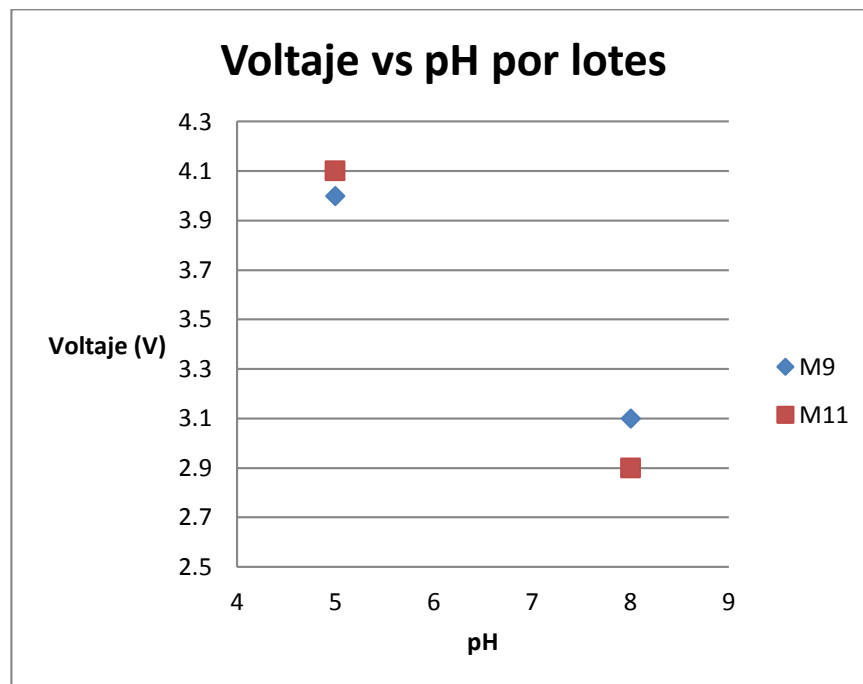


**Gráfico 2: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor por lotes (pruebas M13 y M16)**

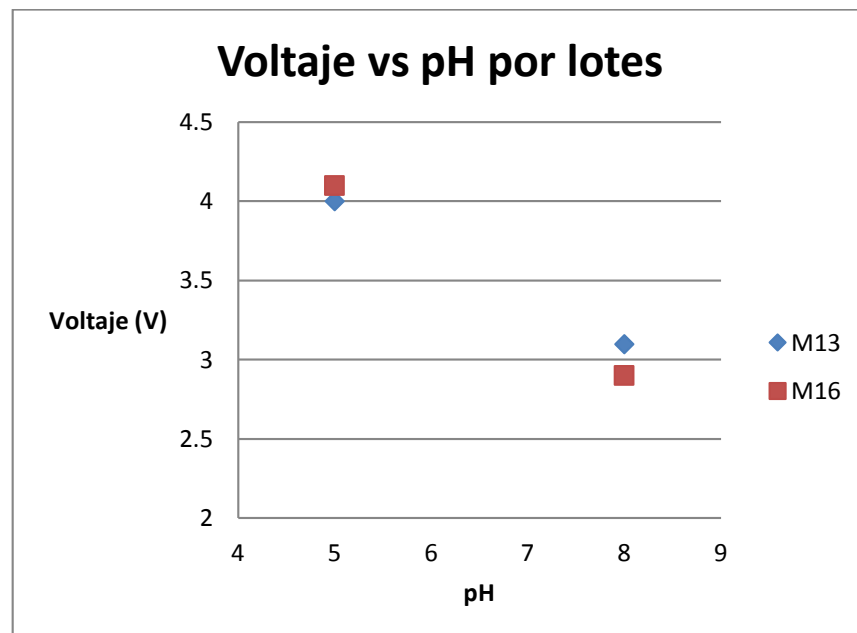


**Gráfico 3: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor por lotes (pruebas M17 y M18)**

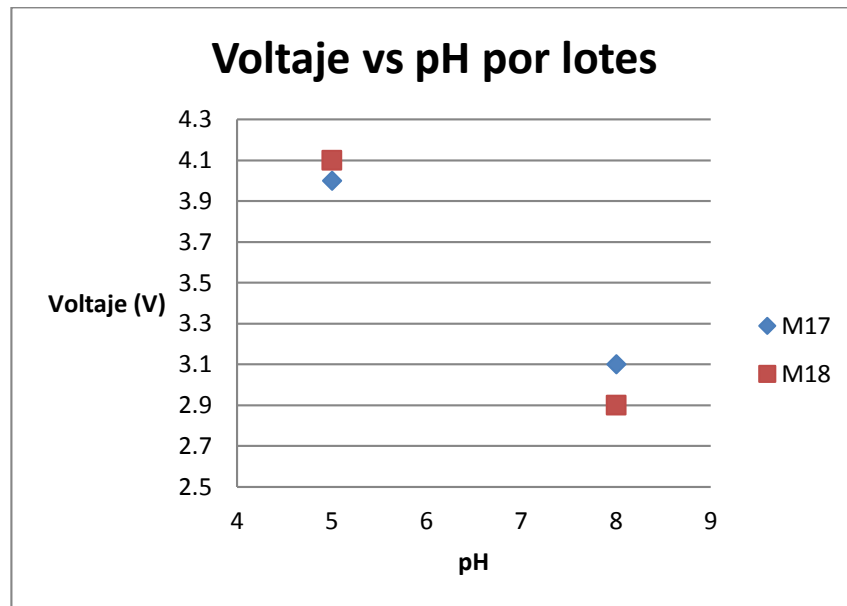
Los gráficos de voltaje versus tiempo correspondientes al reactor por lotes evidencian el comportamiento de la variable voltaje, es decir al transcurrir del tiempo el voltaje tienen una tendencia a disminuir mientras que la intensidad de corriente permanece constante para un determinado proceso.



**Gráfico 4: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor por lotes (pruebas M9 y M11)**



**Gráfico 5: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor por lotes (pruebas M13 y M16)**



**Gráfico 6: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor por lotes (pruebas M17 y M18)**

La dependencia de la variable voltaje con respecto al pH es inversamente proporcional, las gráficas muestran que conforme transcurre el tratamiento, el pH aumenta al interior de la celda pero el voltaje va disminuyendo.

Conforme transcurre el tratamiento el reactor por lotes se calienta debido a que en un afán de mantener constante la densidad de corriente se regula el rectificador y esto hace que se libere más energía en forma de calor.



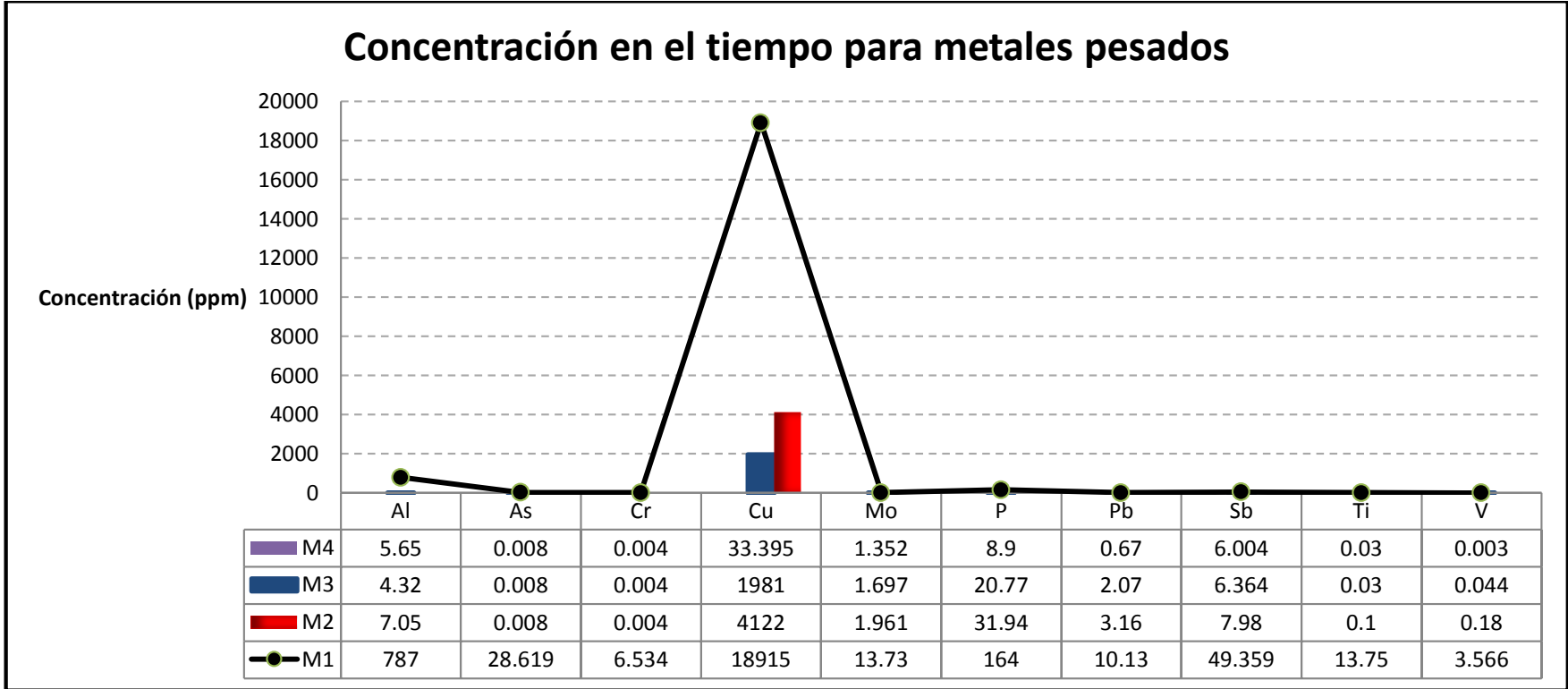
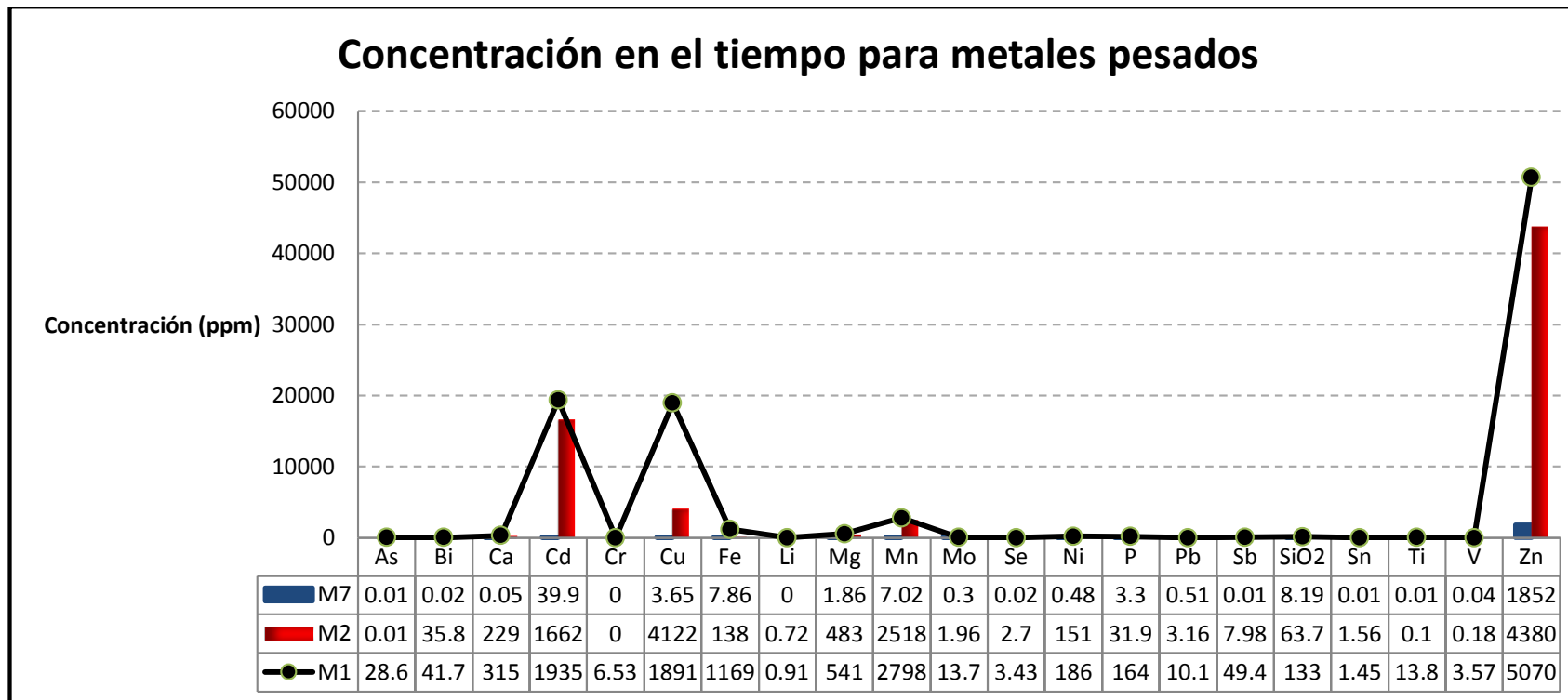
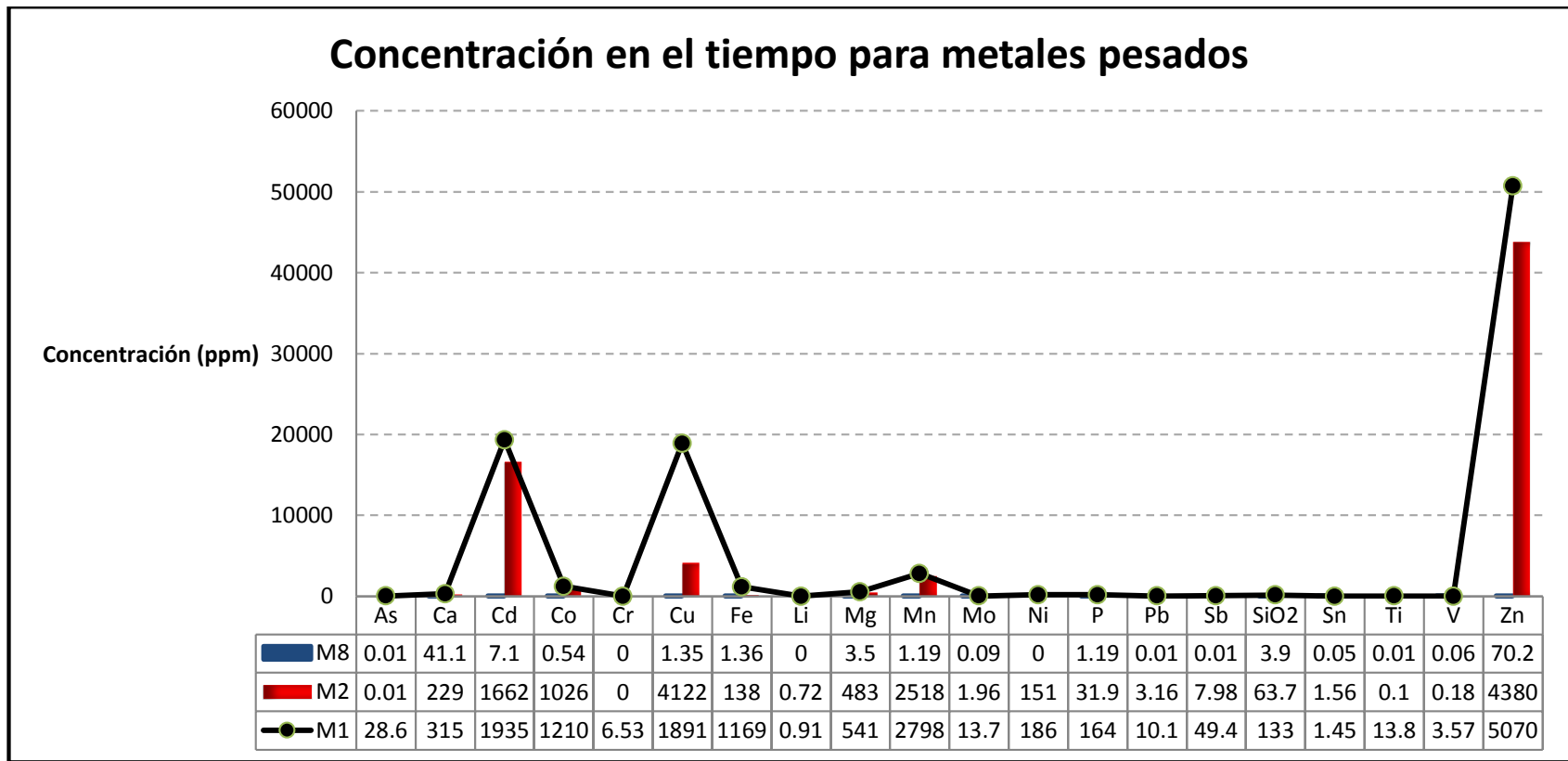


Gráfico 7: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M3, M4)



**Gráfico 8: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (prueba M7)**



**Gráfico 9: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (prueba M8)**

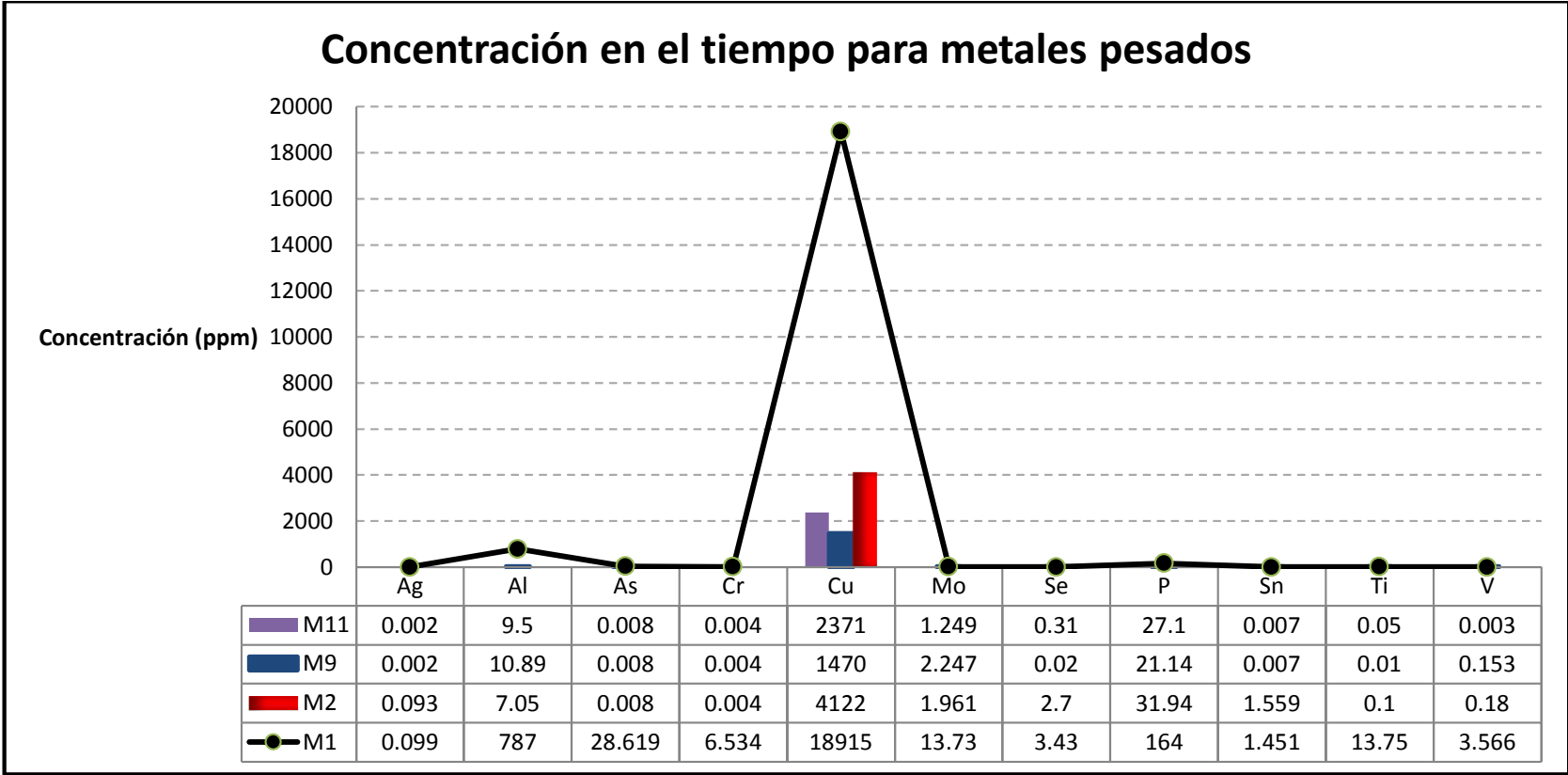


Gráfico 10: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M9, M11)

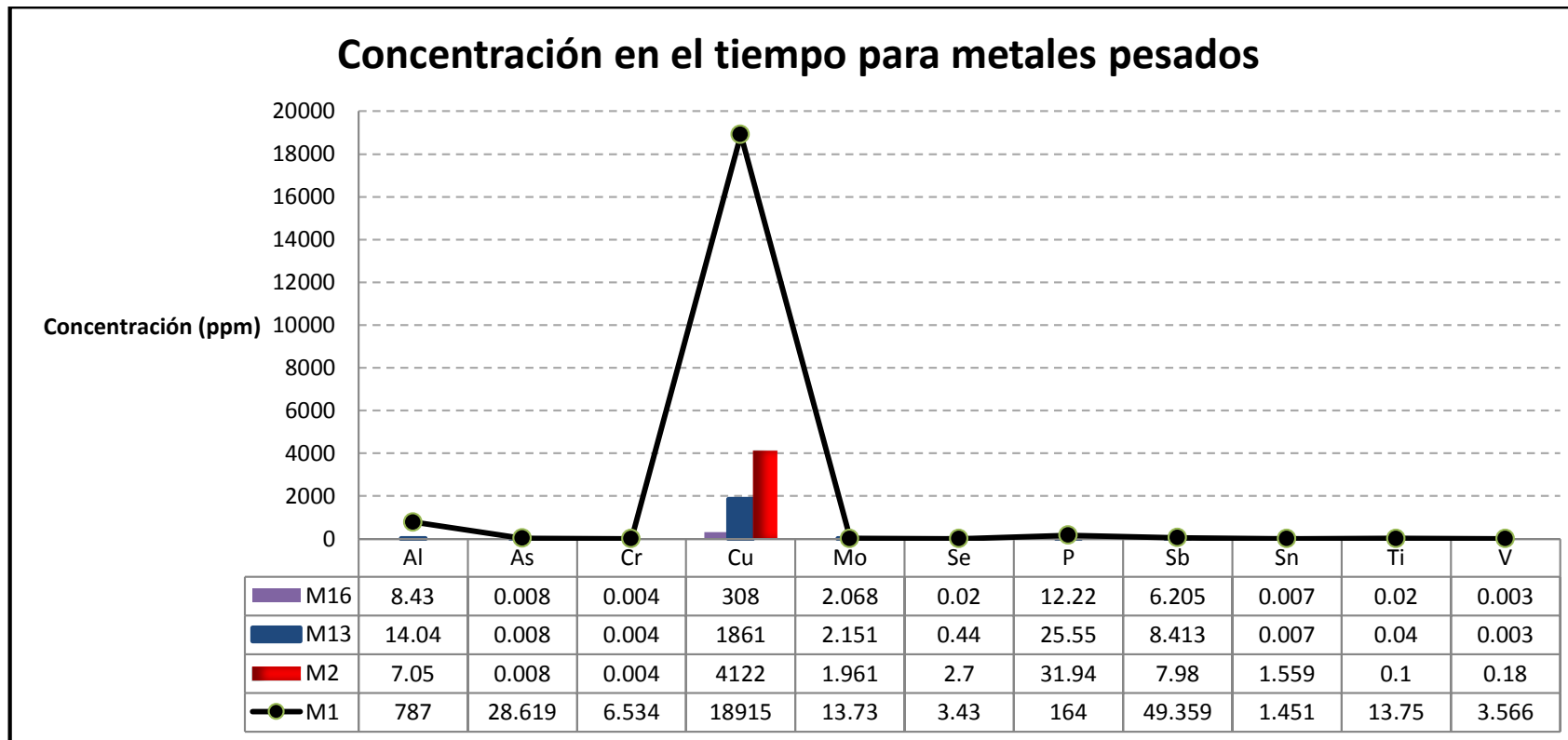


Gráfico 11: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M13, M16)

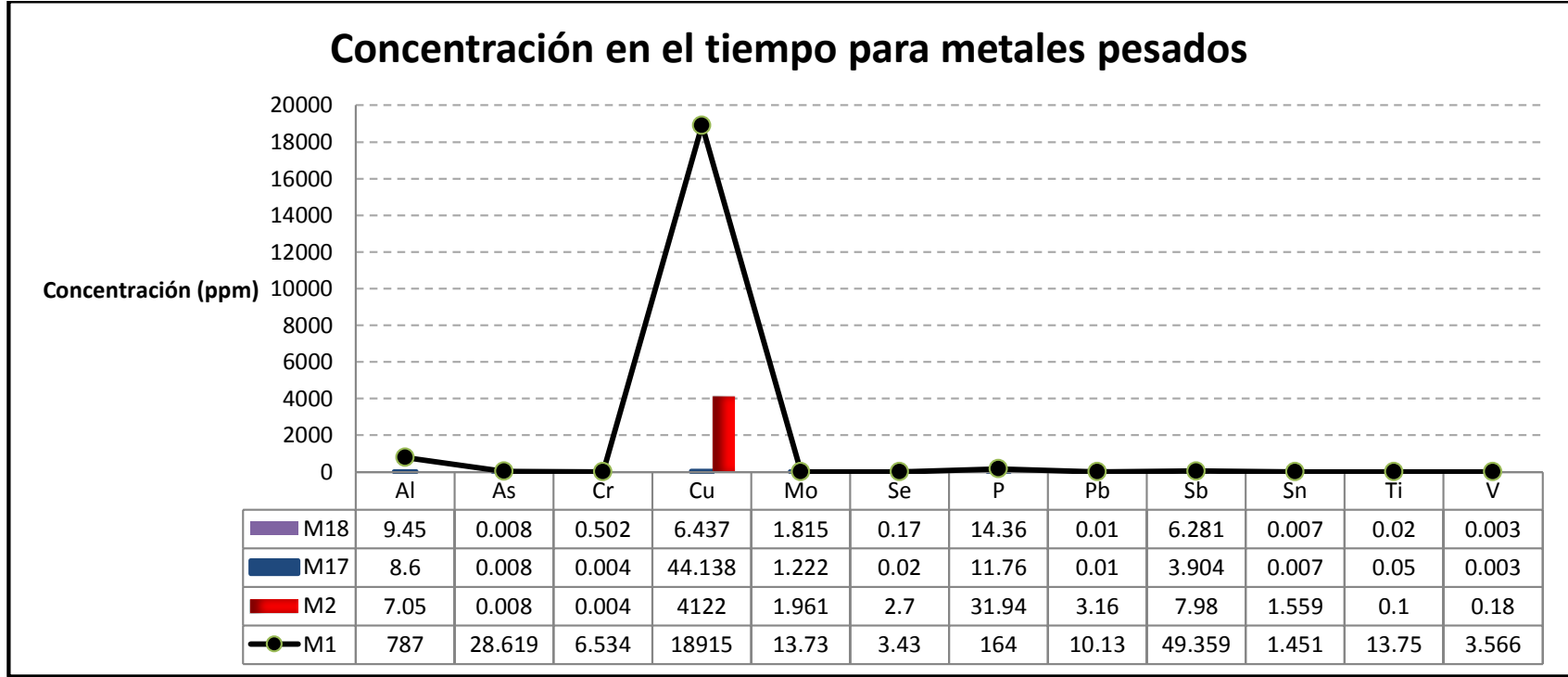


Gráfico 12: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor por lotes (pruebas M17, M18)

Todos los gráficos correspondientes a la concentración de metales pesados de las distintas muestras obtenidas del reactor por lotes evidencian que con respecto al efluente ácido inicial (M1), la concentración de metales pesados disminuye en una magnitud elevada. Por ejemplo para la muestra M2, que es el efluente ácido inicial tratado con escamas de soda cáustica hasta llegar a un pH alrededor de 7, la concentración de Aluminio, Arsénico, Cromo, Cobre Molibdeno, Fósforo, Plomo, Antimonio Titanio y Vanadio disminuyen hasta niveles muy cercanos a los Límites Máximos Permisibles.

**Tabla 25: Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite en cualquier momento</b>	<b>Límite para el promedio anual</b>
pH		6 - 9	6 - 9
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente	mg/L	0,1	0,08
Cobre total	mg/L	0,5	0,4
Hierro	mg/L	2	1,6
Plomo	mg/L	0,2	0,16
Zinc total	mg/L	1,5	1,2

Fuente: DS N° 010 – 2010 - MINAM

Del grupo de todas las muestras obtenidas del reactor por lotes los más destacables son el M7 y M8, porque disminuyen la concentración de más metales que los otros tratamientos. Pero si hablamos del tratamiento que logra disminuir la concentración de metales por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) serían dos, el M16 y M17, ambos lograron disminuir la concentración del Cromo a 0,004 mg/L y la de Plomo a 0,01 mg/L, ambas por debajo de los LMP según la tabla 24. Y en general son los dos tratamientos que han logrado disminuir la

concentración de metales a niveles muy bajos, por ejemplo el Aluminio bajo de 787 mg/L a 8,6 mg/L, el Estaño de 1,451 mg/L a 0,007 mg/L, el Titanio de 13,75 mg/L a 0,02 mg/L.

Todas estas observaciones se ven evidenciadas en los gráficos 11 y 12, donde la línea de color negro muestra la concentración de diversos metales pesados para la muestra ácida inicial y las barras muestras hasta que punto disminuye la concentración de metales con los tratamientos de Electrocoagulación con el reactor por lotes.



**Tabla 26: Masa de metales removidos por EC en reactor por lotes (Apéndice 9)**

Tratamiento	Masa de metales removidos (mg)															
	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li
<b>M2</b>	0,0	780,0	28,6	1,1	0,0	0,0	5,9	86,0	2723,0	0,0	184,0	6,5	14793,0	1031,0	0,0	0,2
<b>M3</b>	0,0	782,7	28,6	0,8	0,0	0,0	2,5	97,0	3871,0	0,0	193,0	6,5	16934,0	0,0	0,0	0,1
<b>M4</b>	0,0	781,4	28,6	0,0	0,0	0,0	4,3	70,0	6304,0	0,0	127,0	6,5	18881,6	0,0	0,0	0,0
<b>M7</b>	0,1	343,0	28,6	4,3	0,0	0,1	41,7	315,0	19310,1	0,0	1207,0	6,5	18911,3	1161,1	22,0	0,9
<b>M8</b>	0,1	626,0	28,6	4,1	0,0	0,1	41,7	273,9	19342,9	0,0	1209,5	6,5	18913,6	1167,6	23,0	0,9
<b>M9</b>	0,1	776,1	28,6	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1922,0	0,0	104,0	6,5	17445,0	0,0	0,0	0,0
<b>M11</b>	0,1	777,5	28,6	6,6	0,0	0,1	0,0	0,0	3104,0	0,0	145,0	6,5	16544,0	464,0	0,0	0,0
<b>M13</b>	0,0	773,0	28,6	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	3416,0	0,0	117,0	6,5	17054,0	376,0	0,0	0,0
<b>M16</b>	0,1	778,6	28,6	0,0	0,0	0,1	8,2	0,0	7710,0	0,0	102,0	6,5	18607,0	0,0	0,0	0,0
<b>M17</b>	0,1	778,4	28,6	0,0	0,0	0,1	4,5	0,0	7233,0	0,0	109,0	6,5	18870,9	0,0	0,0	0,0
<b>M18</b>	0,1	777,6	28,6	0,0	0,0	0,1	18,8	0,0	11554,0	0,0	120,0	6,0	18908,6	0,0	0,0	0,0

**Tabla 27: Masa de metales removidos por EC en reactor por lotes (Apéndice 9) (continuación)**

Tratamiento	Masa de metales removidos (mg)															
	Mg	Mn	Mo	Se	Na	Ni	P	Pb	Sb	SiO <sub>2</sub>	Sn	Sr	Ti	Tl	V	Zn
<b>M2</b>	58,0	280,0	11,8	0,7	0,0	35,0	132,1	7,0	41,4	69,3	0,0	0,1	13,7	0,0	3,4	6901,0
<b>M3</b>	41,0	363,0	12,0	1,8	0,0	38,0	143,2	8,1	43,0	72,5	1,4	0,0	13,7	0,0	3,5	7822,0
<b>M4</b>	22,0	92,0	12,4	1,0	0,0	35,0	155,1	9,5	43,4	67,6	1,4	0,0	13,7	0,0	3,6	5827,0
<b>M7</b>	539,1	2791,0	13,4	3,4	0,0	185,5	160,7	9,6	49,4	124,8	1,4	0,4	13,7	11,2	3,5	48856,0
<b>M8</b>	537,5	2796,8	13,6	2,6	0,0	186,0	162,8	10,1	49,4	129,1	1,4	0,0	13,7	11,3	3,5	50637,8
<b>M9</b>	15,0	424,0	11,5	3,4	0,0	26,0	142,9	8,3	39,2	65,6	1,4	0,0	13,7	0,0	3,4	0,0
<b>M11</b>	28,0	505,0	12,5	3,1	0,0	32,0	136,9	7,4	38,2	67,3	1,4	0,0	13,7	0,0	3,6	0,0
<b>M13</b>	16,0	468,0	11,6	3,0	0,0	33,0	138,5	7,0	40,9	67,2	1,4	0,0	13,7	0,0	3,6	0,0
<b>M16</b>	25,0	422,0	11,7	3,4	0,0	37,0	151,8	10,1	43,2	70,3	1,4	0,0	13,7	0,0	3,6	0,0
<b>M17</b>	26,0	428,0	12,5	3,4	0,0	46,0	152,2	10,1	45,5	70,4	1,4	0,0	13,7	0,0	3,6	0,0
<b>M18</b>	33,0	435,0	11,9	3,3	0,0	54,0	149,6	10,1	43,1	67,3	1,4	0,0	13,7	0,0	3,6	0,0

## 6.2. Reactor flujo continuo

Si bien el Reactor por lotes mostró resultados muy motivadores, el reactor flujo continuo muestra que tiene una mayor eficiencia en la remoción de metales pesados tales como Cromo, Hierro, Molibdeno, Zinc, Cadmio, Plomo, Estaño, Titanio, Vanadio, Plata, Cobre, Litio, entre otros.

**Tabla 28: Cálculos de Energía Consumida en el reactor flujo continuo**

Muestra	Voltaje prom (V)	Amperaje (A)	tiempo (min)	tiempo (s)	POTENCIA CONSUMIDA : $V(\text{prom}) * I$ (W)	ENERGIA CONSUMIDA: $V * I(\text{prom.}) * t / 3600000$ (kWh)
C0	6,2	81	0	0	417,2	0,21
C1	5,6		10	600		
C2	4,8		20	1200		
C3	4		30	1800		
C0	6	81	0	0	419,2	0,21
C4	5,5		10	600		
C5	4,9		20	1200		
C6	4,3		30	1800		
C0	6	81	0	0	432,0	0,14
C18	5,5		10	600		
C19	4,5		20	1200		
C25	6	81	0	0	445,5	0,07
	5,5		5	300		
	5		10	600		
C26	6	81	0	0	448,2	0,15
	5,7		10	600		
	4,9		20	1200		
C27	6	81	0	0	442,8	0,22
	5,6		15	900		
	4,8		30	1800		
C28	6,1	81	0	0	434,7	0,29
	5,5		20	1200		
	4,5		40	2400		

En la tabla 26 se evidencia que la energía consumida por el reactor flujo continuo es alrededor de 20 veces mayor que la consumida por el reactor por lotes. La energía consumida en el reactor flujo continuo es en promedio de 0,2 kWh.

**Tabla 29: Porcentajes de Remoción para el Reactor flujo continuo con electrodos de Hierro\***

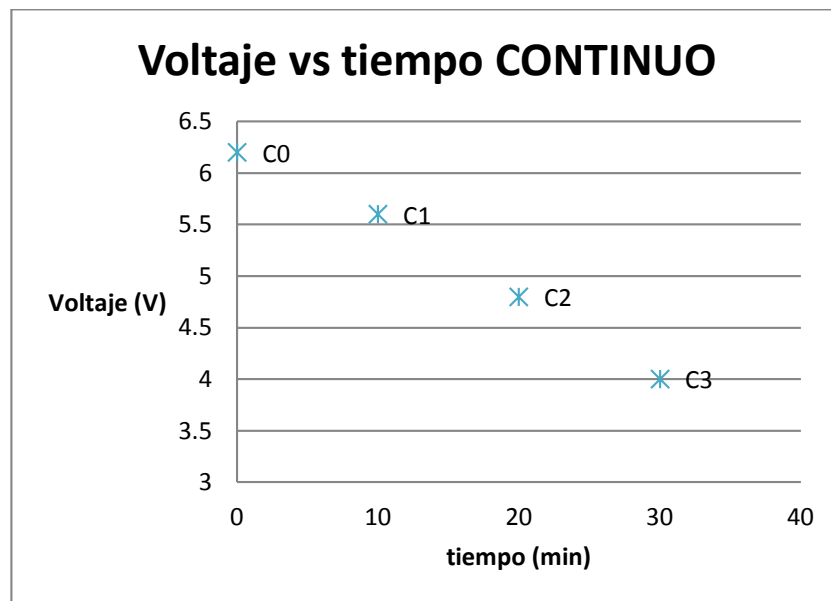
<b>SAMPLE</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>
<b>C0</b>	99,7	100,0	99,9	99,9	94,9	97,2	97,5	90,1	97,0	84,7	99,5	99,8	99,5
<b>C1</b>	99,7	100,0	43,3	99,9	92,0	97,9	96,3	85,6	96,3	73,8	99,5	99,9	99,9
<b>C2</b>	99,5	100,0	44,1	99,9	92,1	98,1	96,2	85,9	95,9	73,4	99,5	99,9	99,9
<b>C3</b>	99,7	100,0	44,5	99,9	92,7	98,1	96,2	86,7	95,8	73,0	99,5	99,9	99,9
<b>C4</b>	99,6	99,9	100,0	99,9	96,1	96,5	97,9	91,8	96,5	81,3	97,8	99,9	99,9
<b>C5</b>	99,6	100,0	100,0	98,7	97,4	96,8	99,1	93,4	97,1	84,0	99,5	99,9	99,9
<b>C6</b>	99,6	100,0	100,0	98,5	97,8	97,1	99,2	93,5	97,3	81,4	99,5	99,9	99,6

\* Porcentaje de remoción hallado con respecto a la muestra ácida inicial (M1).

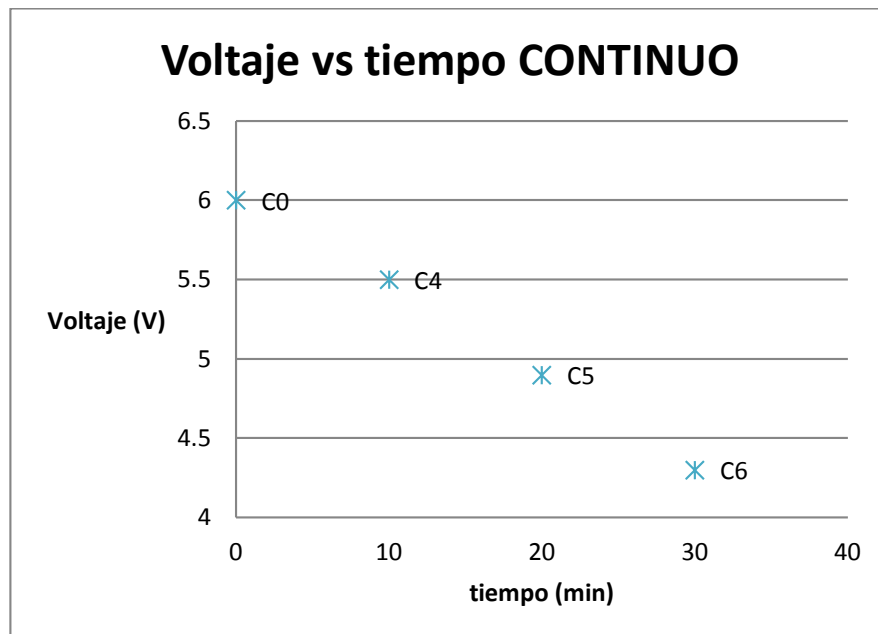
**Tabla 30: Porcentajes de Remoción para el Reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio\***

<b>SAMPLE</b>	<b>Ag</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Bi</b>	<b>Ca</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Li</b>	<b>Mg</b>
<b>C18</b>	-29,3	100,0	99,8	89,3	-1,0	8,6	30,2	99,9	77,8	81,9	-68,1	9,6
<b>C19</b>	4,0	100,0	99,8	89,9	-1,0	23,5	35,1	99,3	90,3	-35,9	-64,2	14,4
<b>C25</b>	87,9	100,0	99,8	81,6	97,3	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	99,4	99,9
<b>C26</b>	87,9	100,0	99,8	84,7	97,6	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	99,0	99,9
<b>C27</b>	88,9	100,0	99,8	84,6	97,7	100,0	100,0	99,8	100,0	99,9	99,2	99,9
<b>C28</b>	84,8	100,0	99,8	84,8	97,4	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	99,6	99,9
<b>SAMPLE</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Na</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
<b>C18</b>	-31,0	97,2	66,3	90,2	95,9	68,5	97,4	73,8	95,7	99,7	94,6	6,4
<b>C19</b>	-24,8	97,4	70,0	95,9	98,6	76,1	98,0	76,9	97,2	99,9	98,1	17,2
<b>C25</b>	100,0	98,2	100,0	99,8	99,9	99,9	100,0	98,7	99,5	99,9	99,9	100,0
<b>C26</b>	100,0	98,3	100,0	99,8	99,9	99,9	100,0	98,4	99,5	99,8	99,5	100,0
<b>C27</b>	99,9	98,3	100,0	99,7	99,9	99,9	100,0	98,4	99,5	99,7	99,5	100,0
<b>C28</b>	99,9	98,3	100,0	99,7	99,9	99,9	99,9	97,8	99,5	99,6	99,4	100,0

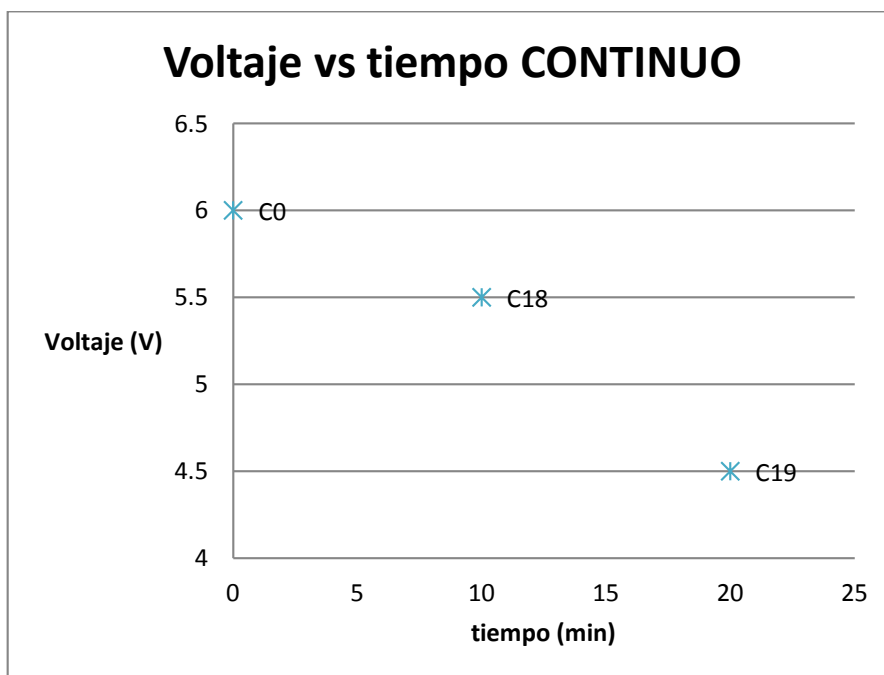
\* Porcentaje de remoción hallado con respecto a la muestra ácida inicial (M1).



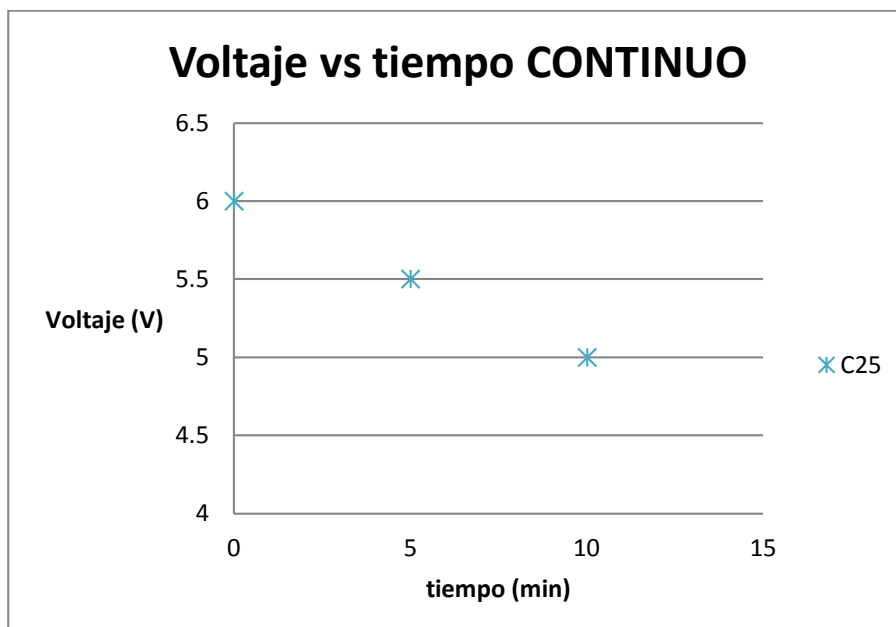
**Gráfico 13: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3)**



**Gráfico 14: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6)**

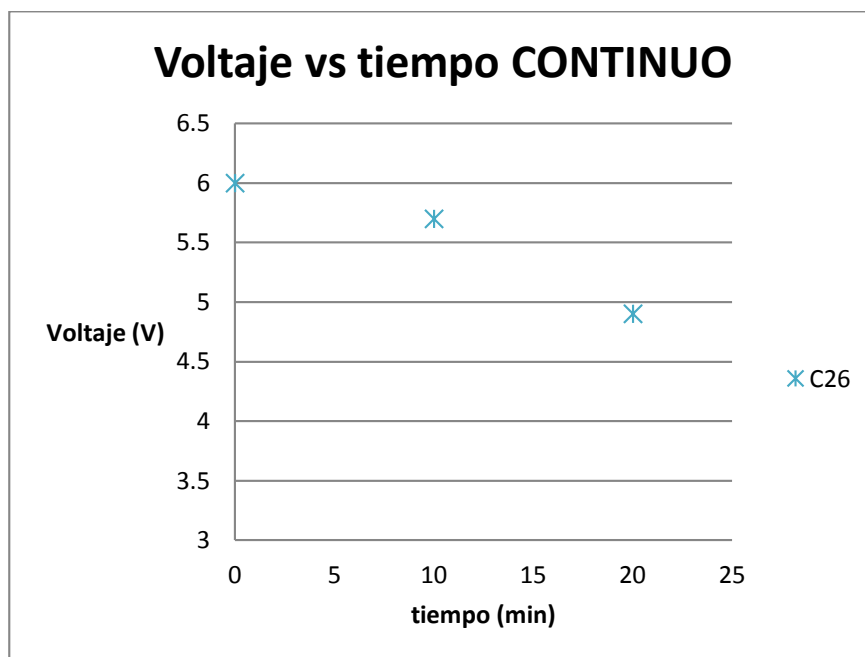


**Gráfico 15:** Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C18, C19)

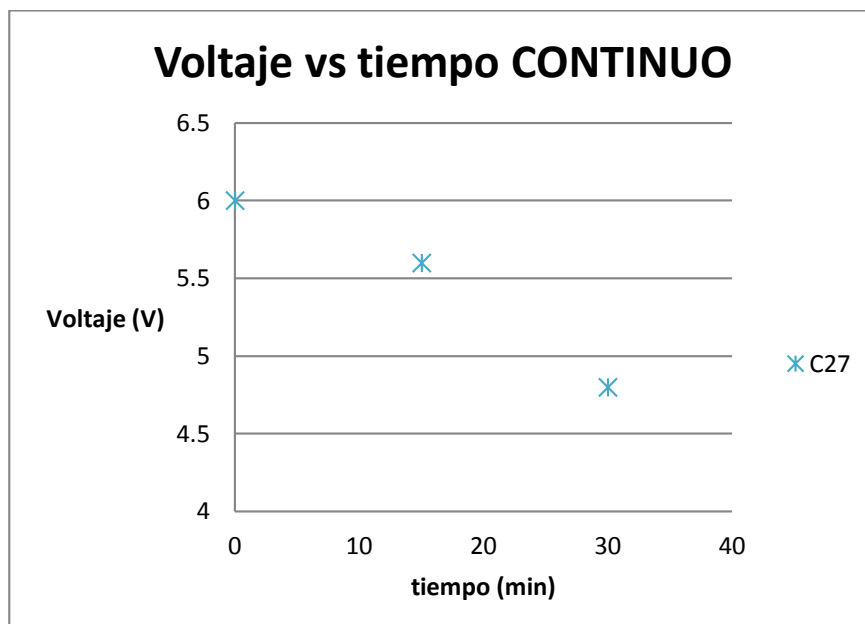


**Gráfico 16:** Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C25)

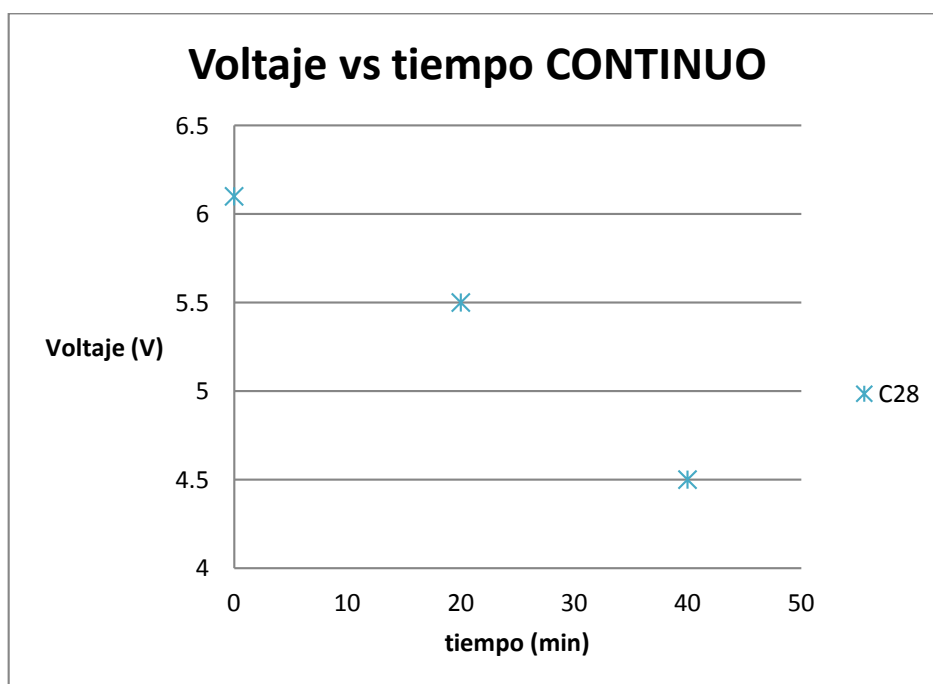




**Gráfico 17: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C26)**

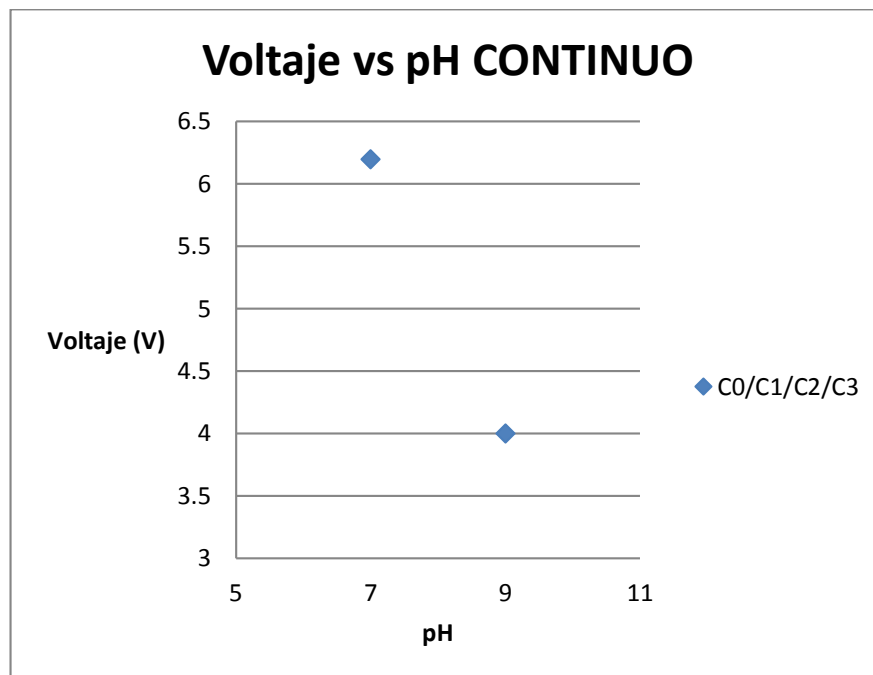


**Gráfico 18: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C27)**

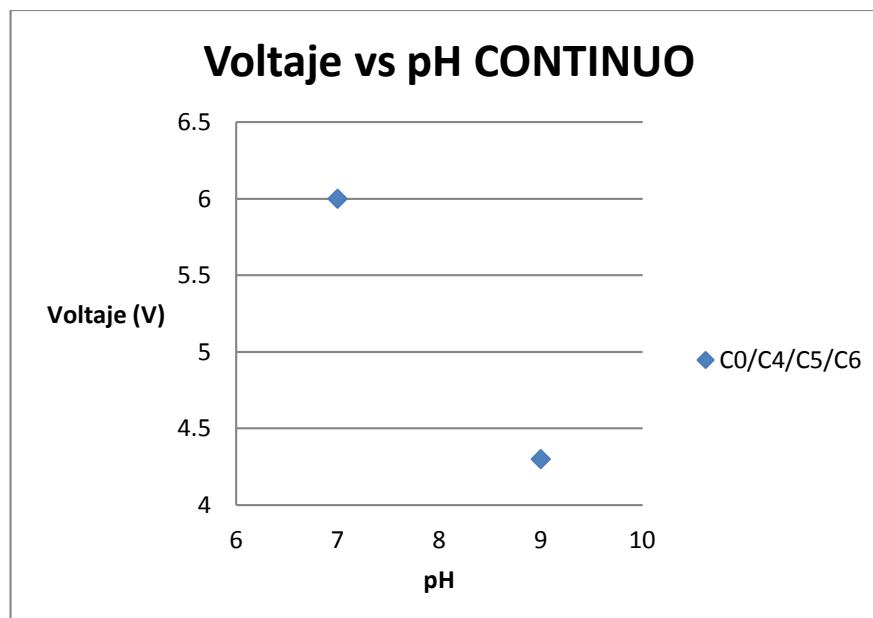


**Gráfico 19: Comportamiento del voltaje vs tiempo para reactor flujo continuo (prueba C28)**

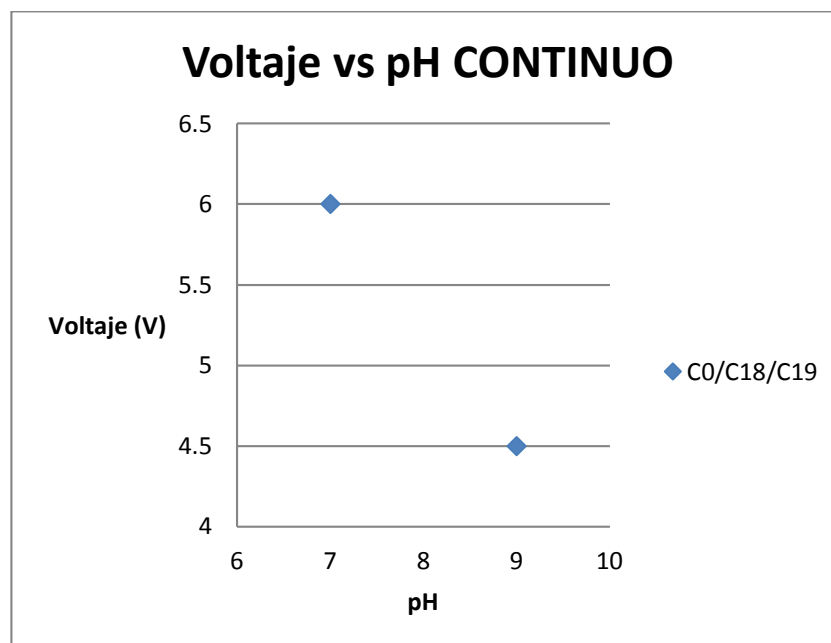
El comportamiento que se evidencia en las gráficas del voltaje en el transcurso del tratamiento de Electrocoagulación es similar al del reactor por lotes, ya que conforme el tratamiento transcurre el voltaje disminuye para poder mantener constante la densidad de corriente en el reactor.



**Gráfico 20: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3)**



**Gráfico 21: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6)**



**Gráfico 22: Comportamiento del voltaje vs pH para reactor flujo continuo (pruebas C18, C19)**

El perfil de pH es similar en el reactor flujo continuo en comparación con el reactor por lotes, ya que conforme el tratamiento transcurre el pH aumenta, mientras que el voltaje disminuye. Nuevamente se evidencia un calentamiento del reactor debido a la liberación de calor producida por la intensidad de corriente.

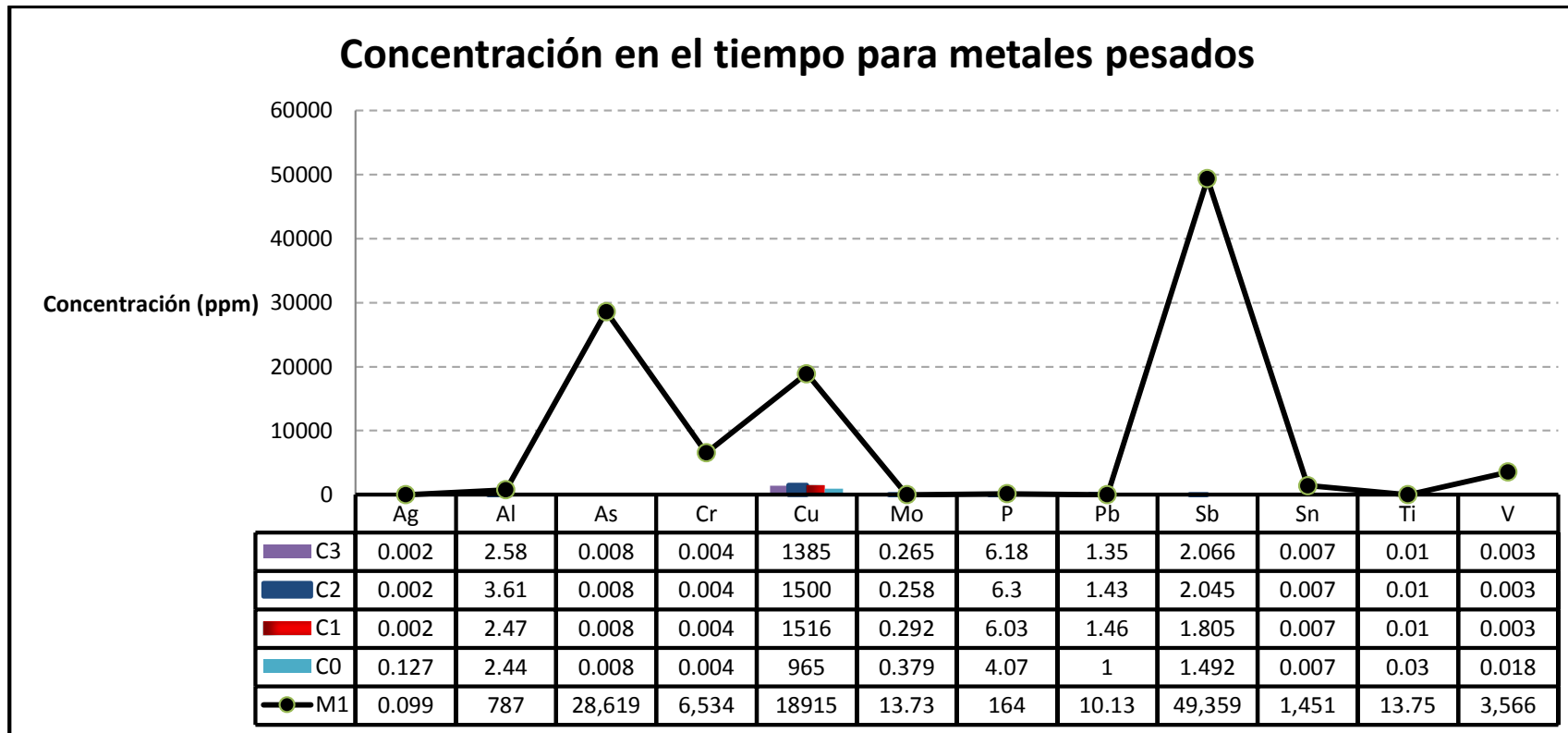


Gráfico 23: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3)

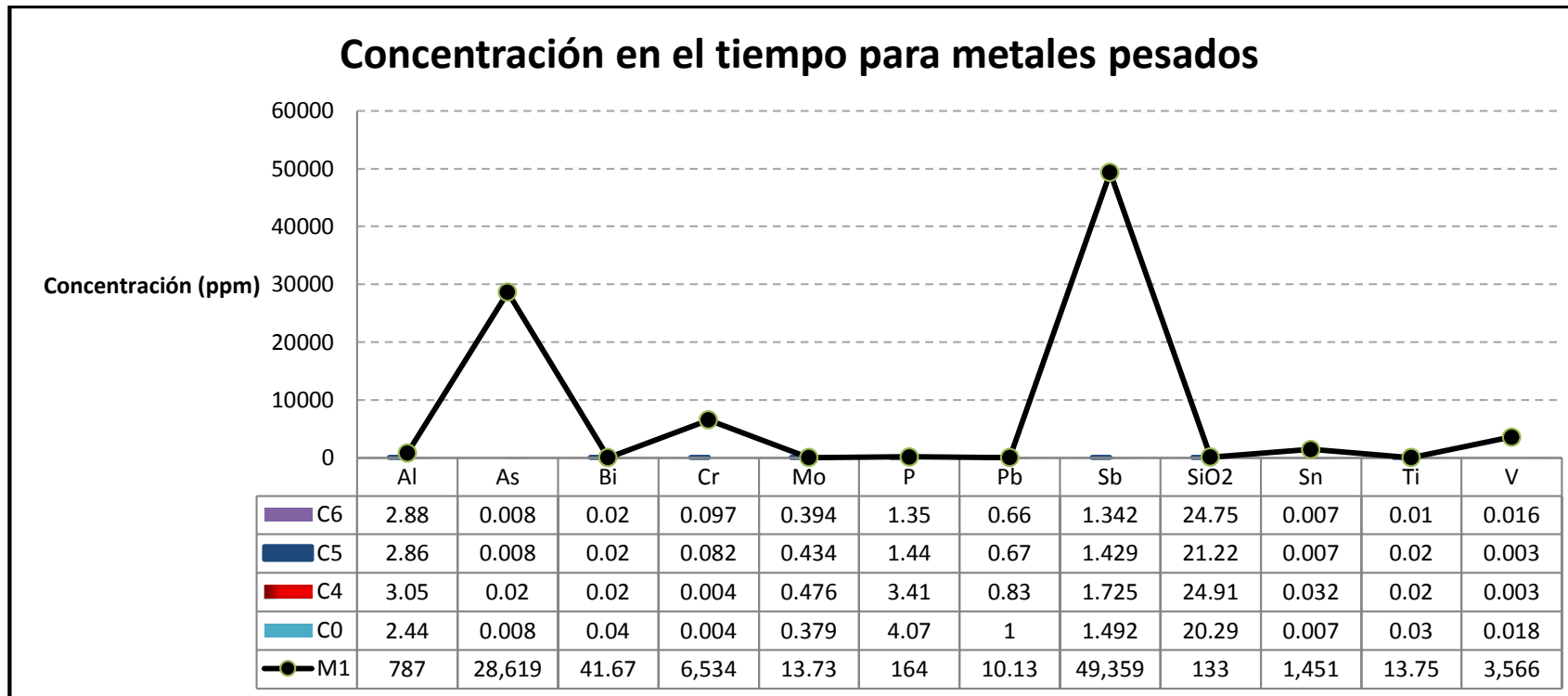


Gráfico 24: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6)

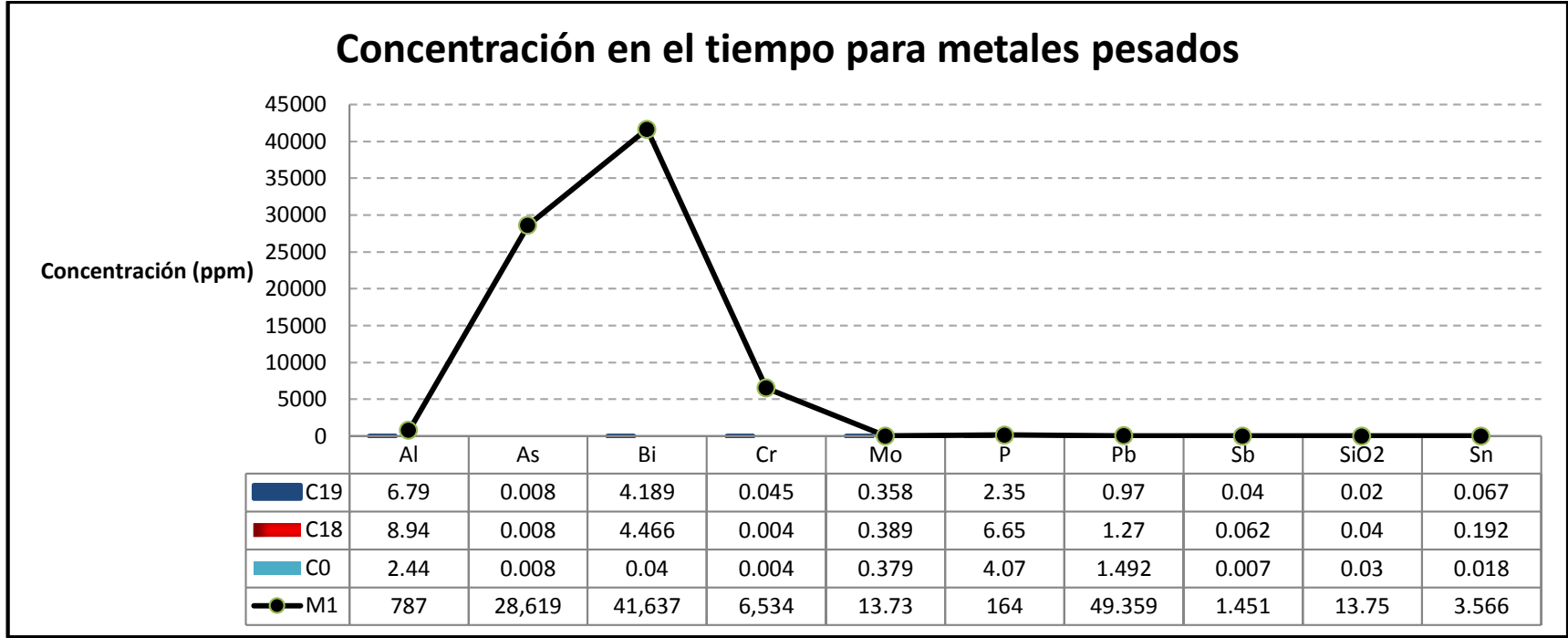


Gráfico 25: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C18, C19)

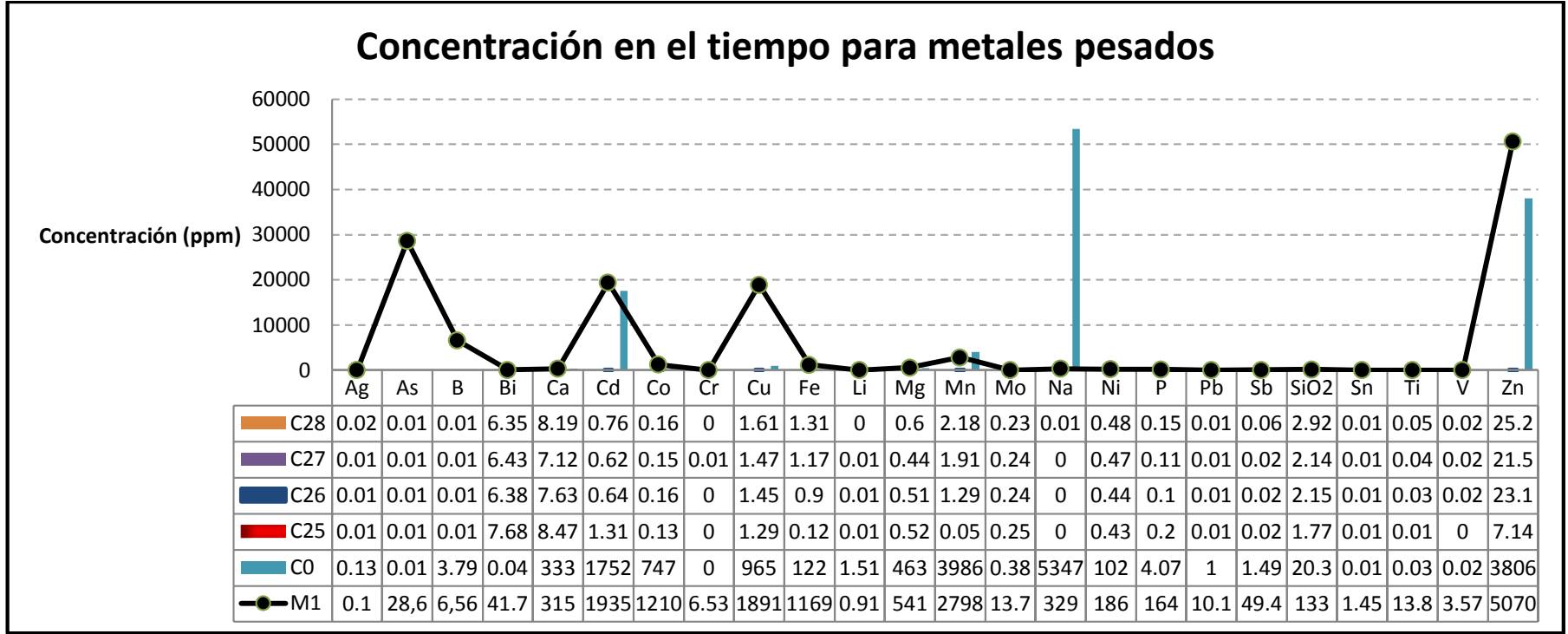


Gráfico 26: Concentración en el tiempo para metales pesados, Reactor flujo continuo (pruebas C25, C26, C27, C28)



Lo que es sorprendente en el reactor flujo continuo, es el nivel de remoción de metales pesados, pues en algunos casos se alcanza remociones de 100% como en el caso de Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cobre, Manganeso, Antimonio y Zinc. Además se obtienen porcentajes de remoción entre 96% y 99%, como en el caso del Boro, Calcio, Cromo, Hierro, Litio, Magnesio, Molibdeno, Plomo, Titanio y Vanadio.

Los metales pesados, que según la tabla 24, están por debajo de los LMP son; el Cromo con 0.004 mg/L, Hierro con 0.12 mg/L, y el Plomo con 0.008 mg/L. Esto es un resultado muy importante y que a pensar que otros metales pesados estén muy por debajo de los LMP como los antes mencionados lo evidencian.

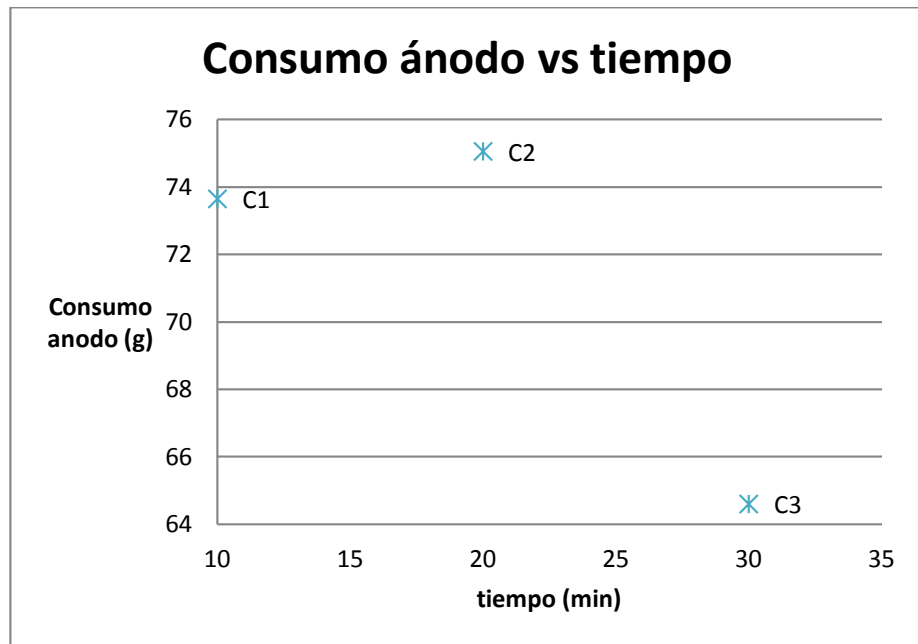


Gráfico 27: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C1, C2, C3)

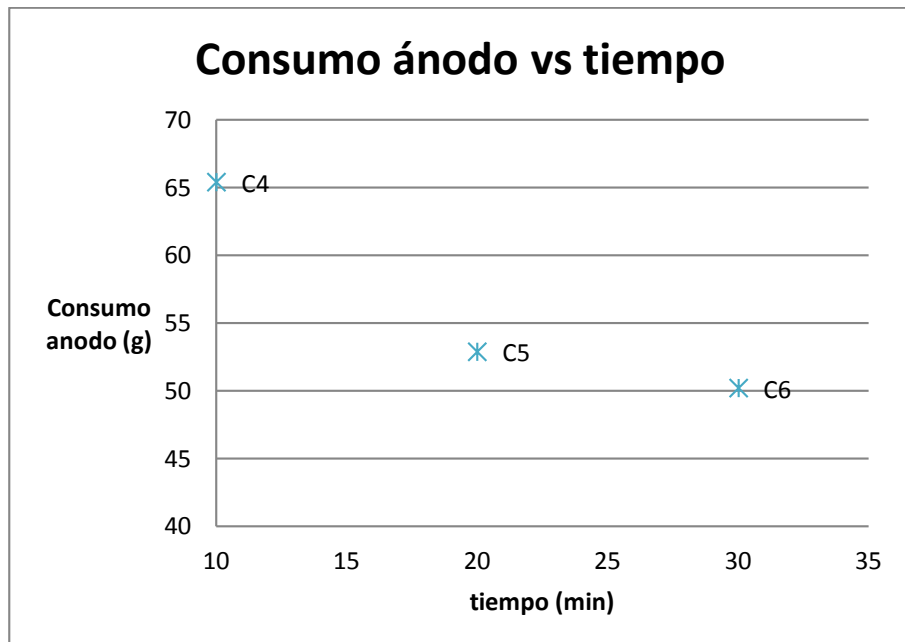


Gráfico 28: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C4, C5, C6)

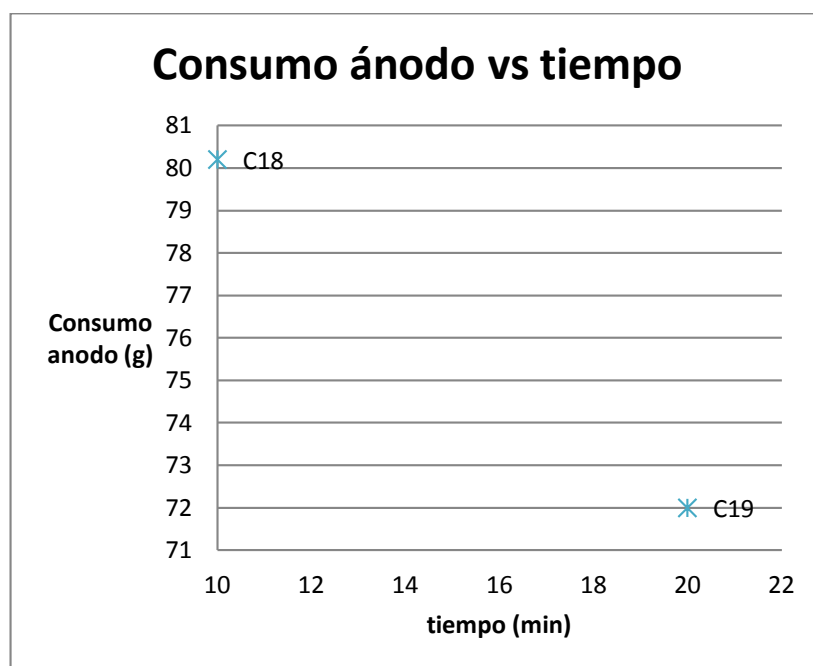


Gráfico 29: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C18, C19)

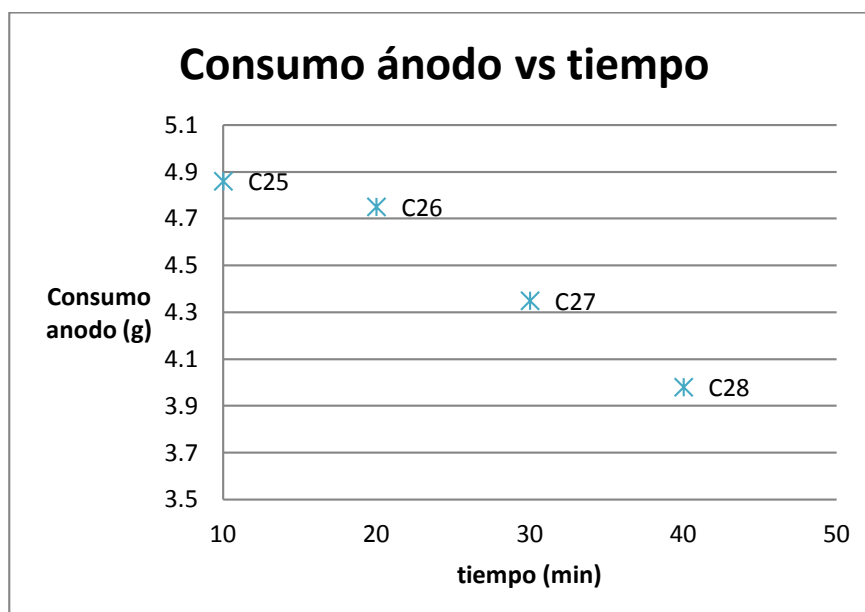


Gráfico 30: Consumo ánodo vs tiempo para reactor flujo continuo (pruebas C25, C26, C27, C28)

El consumo del ánodo de Hierro con respecto al ánodo de Aluminio es muy diferenciado, ya que el consumo del primero está por el orden de los 70 gramos en un tratamiento de 30 minutos mientras que el consumo del ánodo de Aluminio está alrededor de 6 gramos en un tratamiento de 30 minutos. Además los resultados con el reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio son mucho mejores en cuanto al porcentaje de remoción obtenido. Todos los datos graficados con respecto a los consumos de masa del ánodo se han obtenido de la tabla 21.

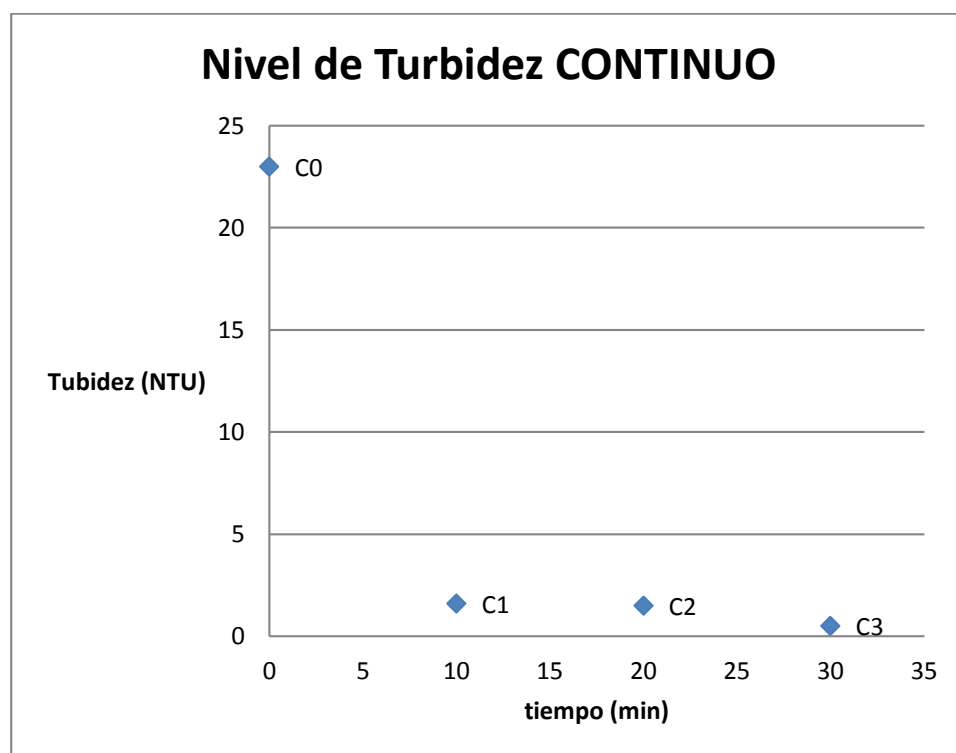


Gráfico 31: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C1, C2, C3)

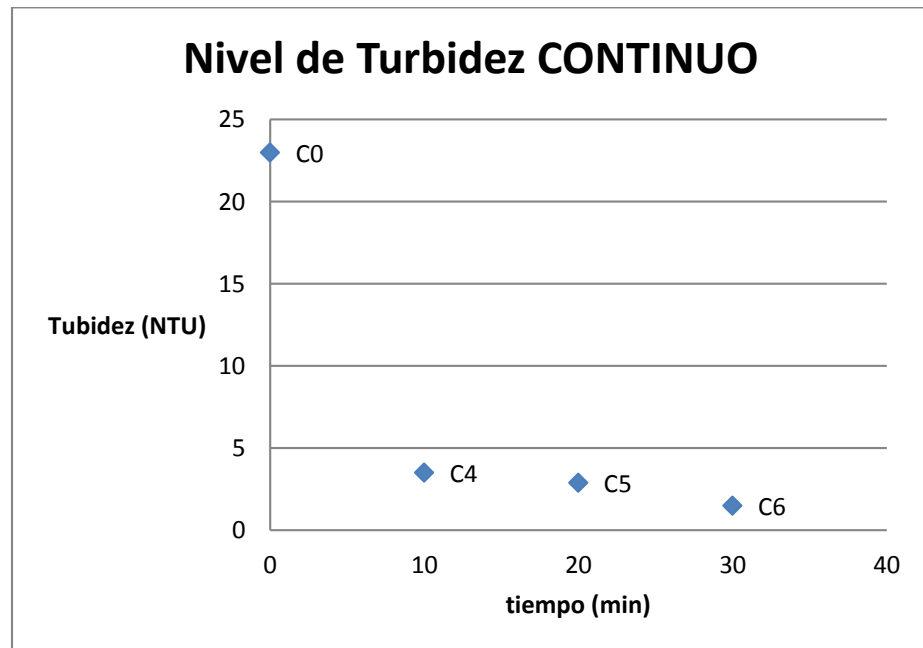


Gráfico 32: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C4, C5, C6)

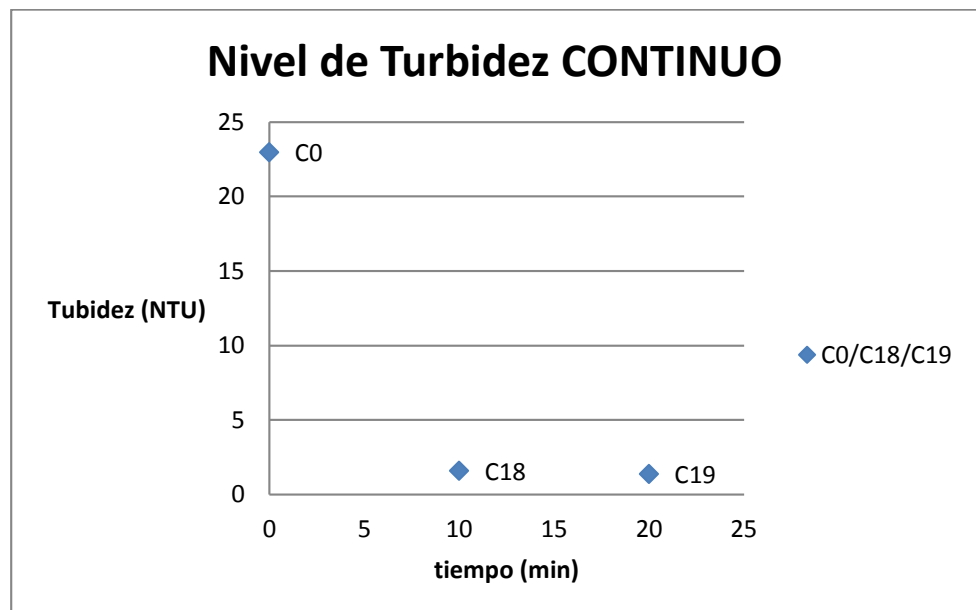
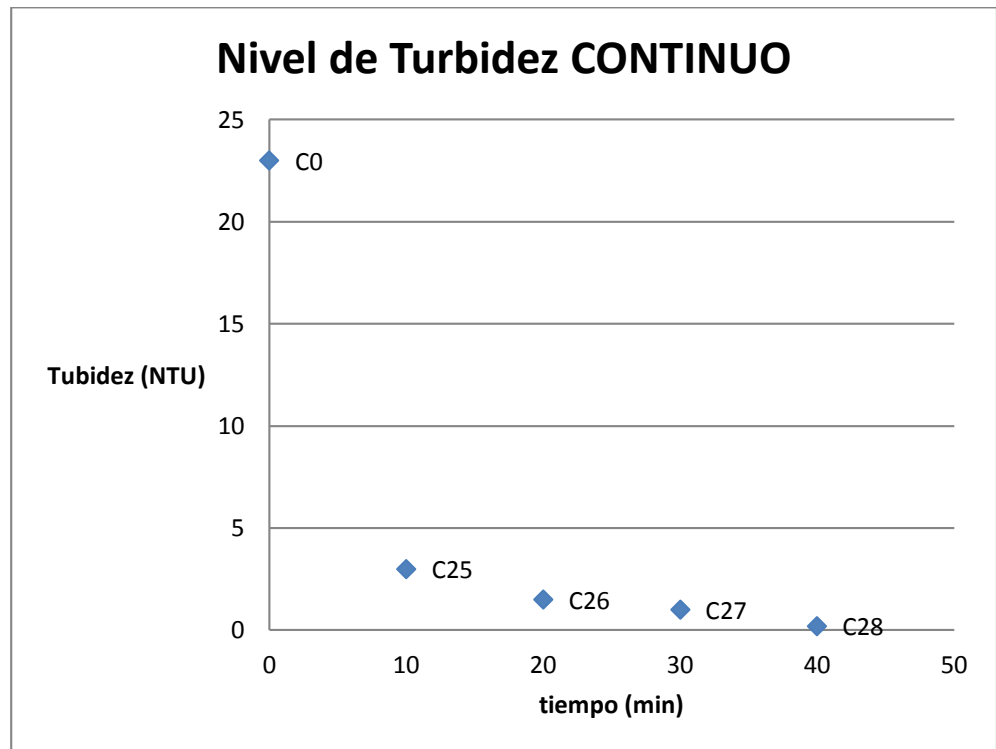


Gráfico 33: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C18, C19)



**Gráfico 34: Nivel de Turbidez (Pruebas C0, C25, C26, C27, C28)**

Con los datos que se tienen de los experimentos con el reactor flujo continuo que se tienen en la tabla 19, se observa que la turbidez con que inició la muestra inicial fue de 36 NTU, y en los gráficos 31 al 34 se evidencia que la turbidez llegó a niveles por debajo de 1 NTU. Los tratamientos que siguen siendo más eficientes en todas las áreas siguen siendo los C25, C26, C27, y C28, ya que con ellos se llega a niveles de 3; 1,5; 1; 0,2 NTU respectivamente.

**Tabla 31: Masa de metales removidos por EC en reactor flujo continuo (Apéndice 9)**

Tratamiento	Masa de metales removidos (mg)															
	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li
<b>C0</b>	0	784,56	28,611	2,781	0	0,0744	41,63	0	1826	0	463	6,53	17950	1047	0	0
<b>C1</b>	0,097	784,53	28,611	1,531	0	0,0651	18,05	0	365	0	269	6,53	17399	1010	0	0
<b>C2</b>	0,097	783,39	28,611	1,426	0	0,0645	18,39	0	686	0	269	6,53	17415	911	0	0
<b>C3</b>	0,097	784,42	28,611	1,503	0	0,0653	18,54	0	1385	0	261	6,53	17530	799	0	0
<b>C4</b>	0	783,95	28,599	2,654	0	0,0751	41,65	0	2855	0	451	6,53	18181	597	0	0
<b>C5</b>	0	784,14	28,611	2,735	0	0,0764	41,65	0	5316	0	446	6,452	18414	0	0	0
<b>C6</b>	0	784,12	28,611	2,646	0	0,0767	41,65	0	4082	0	454	6,437	18492	0	0	0
<b>C18</b>	0	778,06	28,611	6,559	0	0,0694	37,204	0	1657	0	366	6,53	14725	957	0	0
<b>C19</b>	0,004	780,21	28,611	6,553	0	0,0694	37,481	0	4555	0	425	6,489	17073	0	0	0
<b>C25</b>	0,087	786,67	28,611	6,555	0,001	0,0694	33,988	306,53	19348,7	0	1209,9	6,53	18913,7	1168,9	0	0,9
<b>C26</b>	0,087	534	28,611	6,555	0,001	0,0094	35,286	307,37	19349,4	0	1209,8	6,53	18913,5	1168,1	0	0,896
<b>C27</b>	0,088	439	28,611	6,555	0,001	0,0494	35,24	307,88	19349,4	0	1209,9	6,522	18913,5	1167,8	0	0,898
<b>C28</b>	0,084	363	28,611	6,556	0,001	0,0694	35,319	306,81	19349,2	0	1209,8	6,53	18913,4	1167,7	0	0,901

**Tabla 32: Masa de metales removidos por EC en reactor flujo continuo (Apéndice 9) continuación**

	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Se</b>	<b>Na</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>Ti</b>	<b>Tl</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
<b>C0</b>	78	0	13,351	2,41	0	84	159,93	9,13	47,867	112,7	1,444	0	13,72	6,4	3,548	12646
<b>C1</b>	178	0	13,438	2,11	0	106,391	157,97	8,67	47,554	98,11	1,444	0	13,74	6,66	3,563	4293
<b>C2</b>	172	0	13,472	2,01	0	105,972	157,7	8,7	47,314	97,68	1,444	0	13,74	6,66	3,563	3474
<b>C3</b>	171	0	13,465	1,96	0	106,689	157,82	8,78	47,293	97,1	1,444	0	13,74	6,78	3,563	3890
<b>C4</b>	60	0	13,254	2,4	0	85	160,59	9,3	47,634	108,1	1,419	0	13,73	7,17	3,563	12166
<b>C5</b>	70	0	13,296	2,55	0	93,242	162,56	9,46	47,93	111,8	1,444	0	13,73	8,07	3,563	12286
<b>C6</b>	64	0	13,336	2,61	0	90,796	162,65	9,47	48,017	108,3	1,444	0	13,74	7,41	3,55	11535
<b>C18</b>	52	0	13,341	0	218	167,75	157,35	6,939	48,089	98,13	1,389	0	13,71	4,97	3,374	3220
<b>C19</b>	78	0	13,372	0	230,323	178,37	161,65	7,707	48,389	102,3	1,411	0	13,73	6,62	3,499	8742
<b>C25</b>	540,48	2797,95	13,482	0	328,998	185,57	163,8	10,122	49,339	131,2	1,444	0,2149	13,74	12,9	3,563	50700,9
<b>C26</b>	540,49	2796,71	13,494	0	328,998	185,56	163,9	10,122	49,339	130,9	1,444	0,2212	13,72	13,07	3,549	50684,9
<b>C27</b>	540,56	2796,1	13,491	0	328,998	185,53	163,89	10,122	49,339	130,9	1,444	0,223	13,71	13,21	3,549	50686,5
<b>C28</b>	540,4	2795,82	13,496	0	328,995	185,52	163,85	10,122	49,299	130,1	1,444	0,2112	13,7	13,17	3,543	50682,8



En las tablas 24 y 28 se han calculado las masas removidas de los metales por efecto de los diversos tratamientos, tanto en el reactor por lotes (M2, M3, M4, M7, M8, M9, M11, M13, M16, M17, M18) como en el reactor flujo continuo (C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C18, C19, C25, C26, C27, C28). Los resultados del laboratorio CIMM – Perú nos da concentración de los diversos metales y aplicando la siguiente fórmula obtenemos masa.

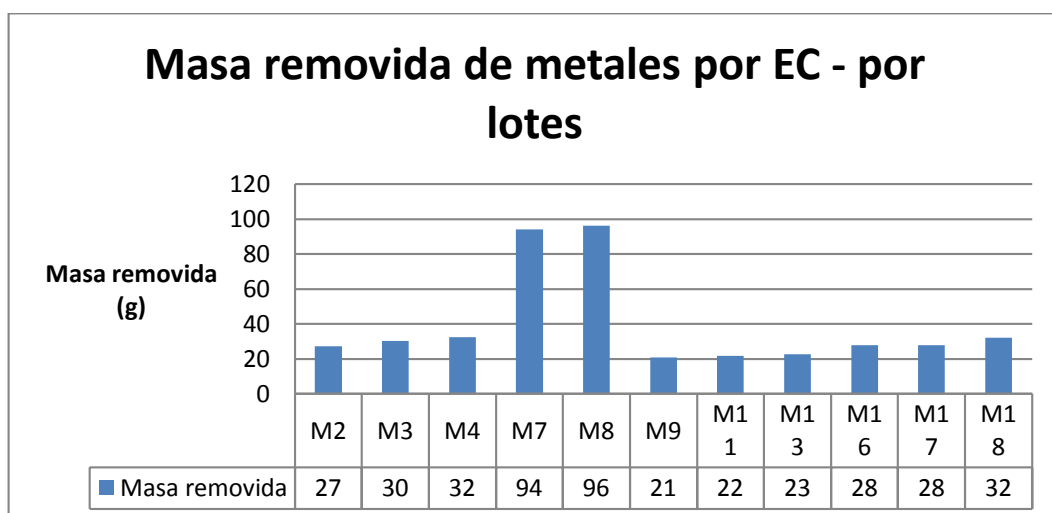
$$\text{Concentración} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \dots\dots\dots(6.4)$$

$$\text{Masa} = \text{Concentración} * \text{Volumen} \dots\dots\dots(6.5)$$

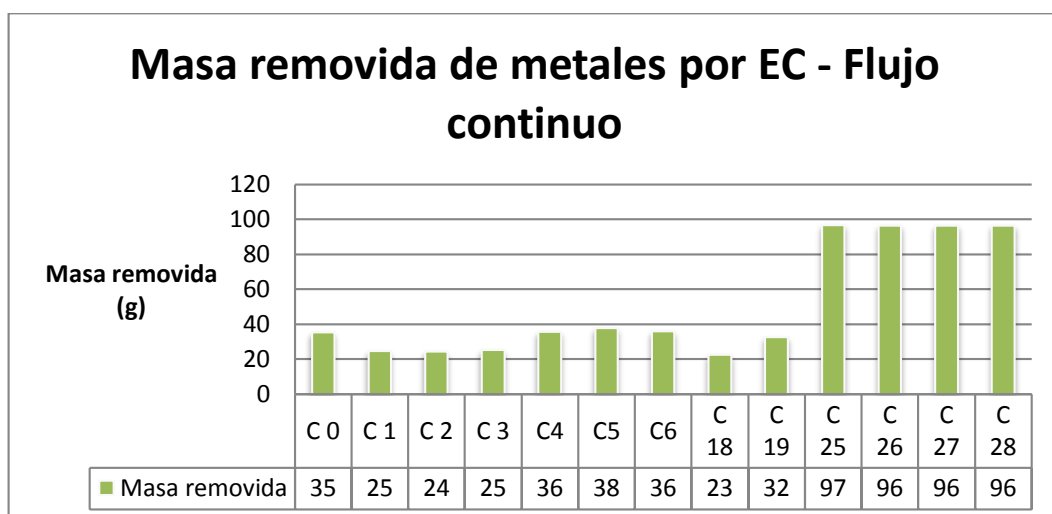
$$[\text{Masa}] = \left[ \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] * [\text{L}] = [\text{mg}] \dots\dots\dots(6.6)$$

Como para cada muestra se utilizó un volumen de 1 Litro, entonces los valores de concentración (mg/L) que se encuentran en los apéndices, serán los mismos para la masa de metales en mg.

Por lo tanto como se tiene que la muestra M1 es la inicial, es decir es el efluente ácido inicial con el que se trabajo desde el inicio, lo único que hay que hacer es restar la concentración de cada metal de la muestra M1 con el mismo metal de cada una de las demás muestras para obtener la masa de metal que se ha removido con el tratamiento de Electrocoagulación.



**Gráfico 35: Masa removida (g) por EC en reactor por lotes**



**Gráfico 36: Masa removida (g) por EC en reactor flujo continuo**

En el gráfico 35 se evidencia que la masa removida de metales pesados por medio del tratamiento de EC en un reactor por lotes da mejores resultados cuando se utilizan electrodos de Aluminio como se hizo en los tratamientos M7 y M8, donde se obtiene en ambos una masa removida

de metales pesados de 96 g. Mientras que en el gráfico 36 se evidencia que nuevamente la mayor cantidad de metales pesados se remueven con electrodos de Aluminio, como se utilizó en los tratamientos C25, C26, C27, C28, y cuya cantidad de metales pesados que se removió fue de 96 g.

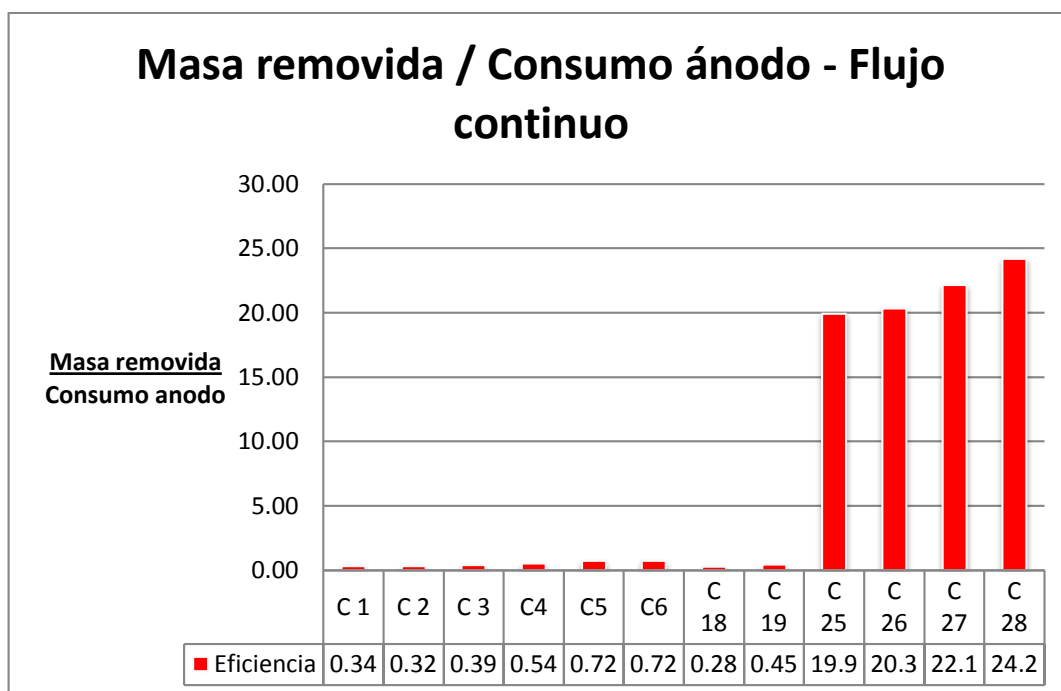
**Tabla 33: Masa de metales removidos por EC versus consumo de ánodo en reactor flujo continuo**

Tratamiento	Masa removida (mg)	Masa ánodo consumido (g) *	Masa ánodo consumido (mg)	Masa sólidos removidos / masa consumo ánodo
<b>C 1</b>	24813,1	73,7	73650,0	0,3
<b>C 2</b>	24223,8	75,1	75050,0	0,3
<b>C 3</b>	25334,4	64,6	64600,0	0,4
<b>C4</b>	35625,6	65,4	65400,0	0,5
<b>C5</b>	37863,3	52,9	52900,0	0,7
<b>C6</b>	35951,8	50,2	50200,0	0,7
<b>C 18</b>	22567,1	80,2	80200,0	0,3
<b>C 19</b>	32499,7	72,0	72000,0	0,5
<b>C 25</b>	96764,8	4,9	4860,0	19,9
<b>C 26</b>	96496,5	4,8	4750,0	20,3
<b>C 27</b>	96403,0	4,4	4350,0	22,2
<b>C 28</b>	96320,5	4,0	3980,0	24,2

\* Se obtiene de la tabla 20

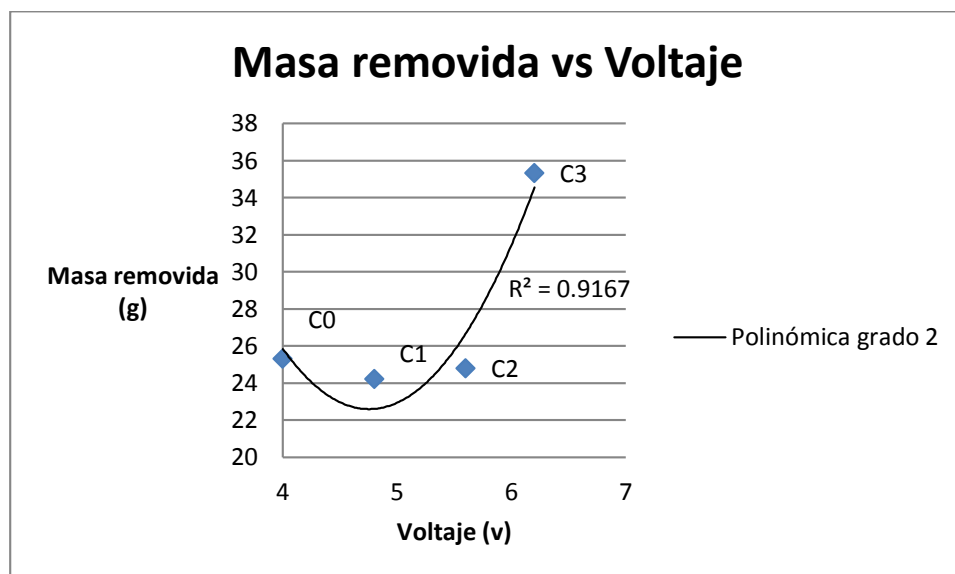
De la tabla 27, sumando la masa de todos los sólidos (metales) removidos se obtiene la tabla 28., donde se muestra la masa de sólidos removidos entre el consumo del ánodo del reactor flujo continuo. Se evidencia que el coeficiente es mayor en los tratamientos C25, C26, C27, C28, es decir que con un menor consumo del ánodo se obtiene una mayor cantidad de metales removidos en el efluente. La eficiencia es mayor con los electrodos de Aluminio que con los electrodos de Hierro, ya que los tratamientos C25 - C28 fueron realizados con electrodos de

Aluminio, y se evidencia en el gráfico 37, donde en promedio del coeficiente de masa removida y consumo del ánodo fue de 21,6.

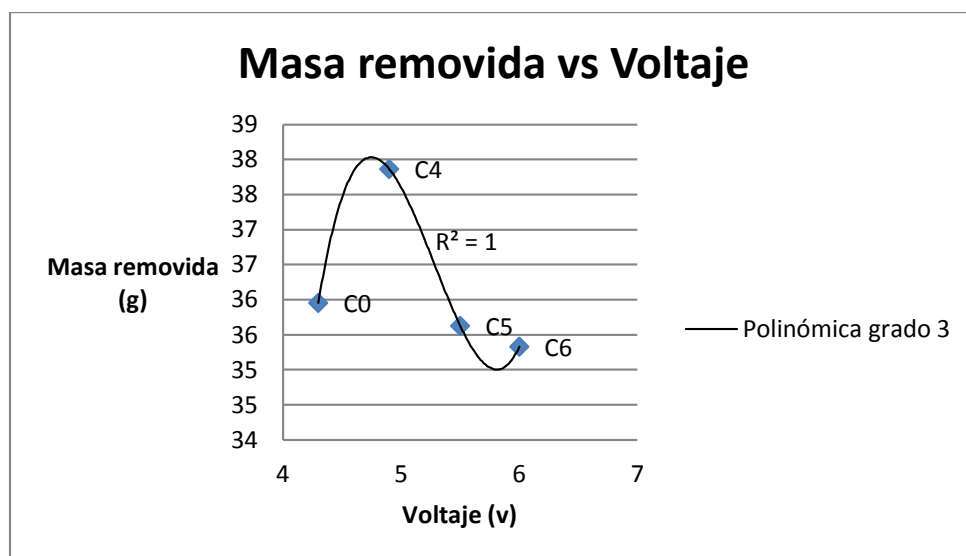


**Gráfico 37: Masa removida (g) entre consumo del ánodo (g) por EC en reactor flujo continuo**

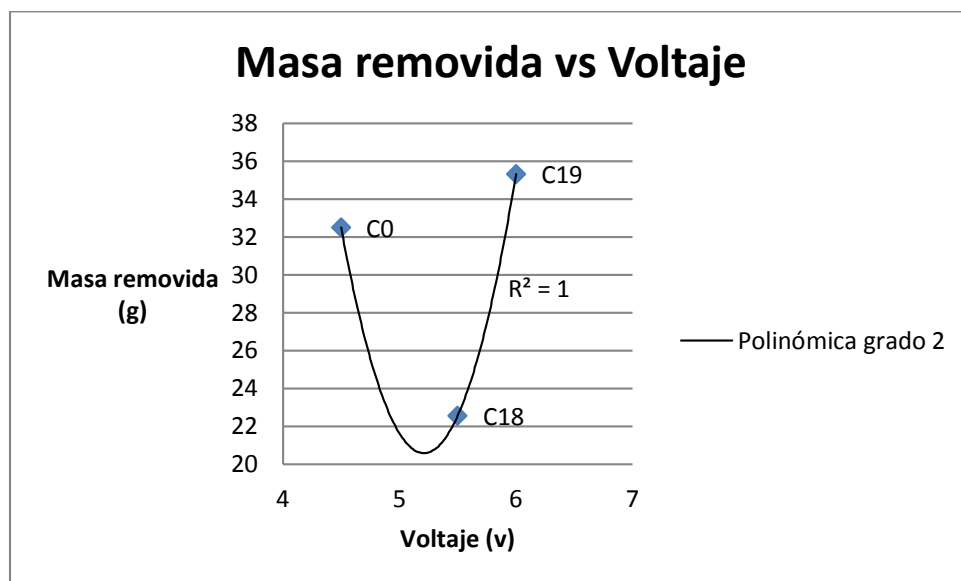
Luego de tener la cantidad de metales pesados que se ha removido por el tratamiento de Electrocoagulación en el reactor flujo continuo se pueden presentar las siguientes gráficas para su respectivo análisis:



**Gráfico 38: Masa removida (g) versus voltaje Reactor flujo continuo (muestras C0/C1/C2/C3)**



**Gráfico 39: Masa removida (g) versus voltaje Reactor flujo continuo (muestras C0/C4/C5/C6)**



**Gráfico 40: Masa removida (g) versus voltaje Reactor flujo continuo (muestras C0/C18/C19)**

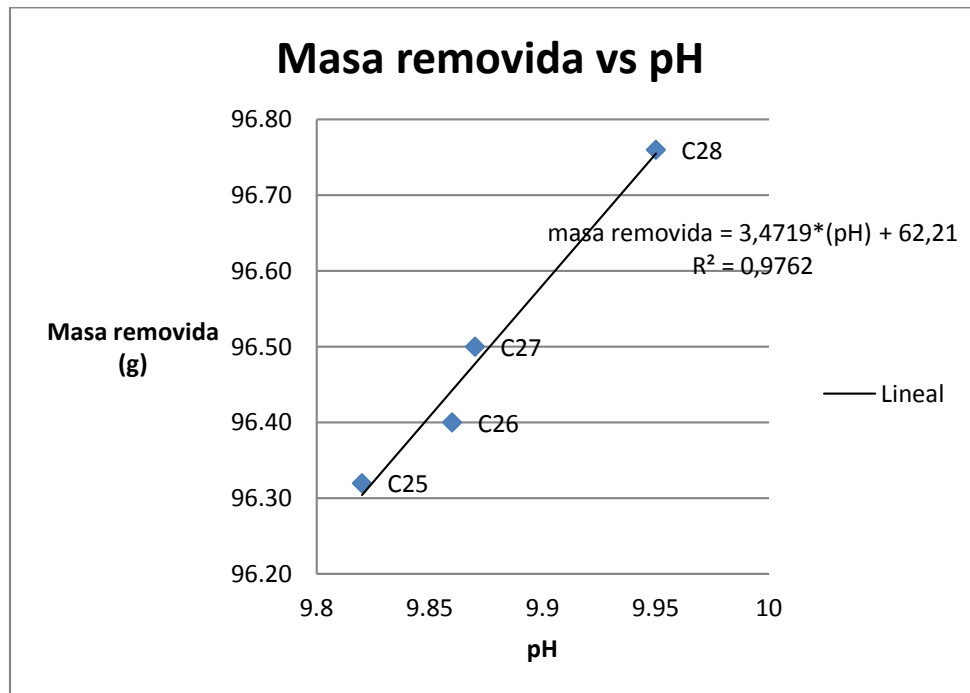
Como se puede apreciar en los gráficos de masa de metales removidos versus voltaje, no hay una correspondencia similar entre ellos. En el gráfico 38 correspondiente a las muestras C0 – C3, se observa la cantidad de metales removidos tiene un mínimo entre los puntos C1 y C2 y que alcanza un máximo en C3 que vendría a ser un punto óptimo ya que tiene la mayor cantidad de metales removidos. En cambio en la gráfica 39 se tiene un comportamiento diferente ya que se evidencia que se pasa por un mínimo en el punto C0, luego se alcanza un máximo en remoción de metales, punto C4 y luego la gráfica tiende a ir a un mínimo para luego nuevamente tender a un punto más alto. La gráfica 40 tiene un comportamiento muy parecido a la gráfica 37. Todas las gráficas tienen una línea de tendencia con un factor  $R^2$  alto, indica que la elección del ajuste es adecuada.

**Tabla 34: Cuadro resumen tratamientos C25 – C28, flujo continuo**

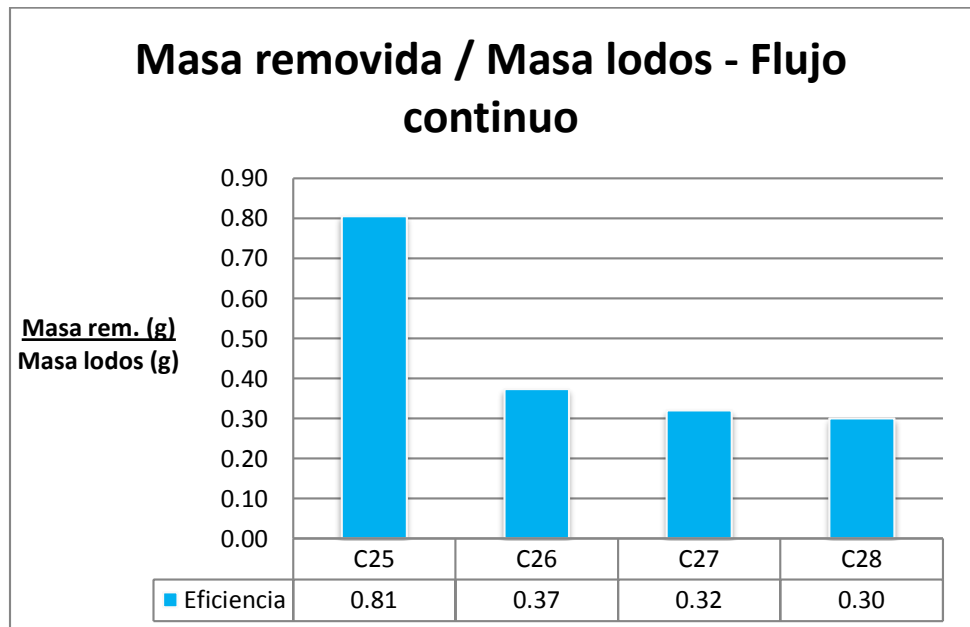
Tratamiento	pH	masa removida (g)	masa lodos (g)	masa removida/masa lodos	Q (m <sup>3</sup> /h)	Turbidez (NTU)	Vol. efluente obtenido (L)
C25	9,95	96,76	120,00	0,81	0,04	3,00	11,00
C26	9,87	96,50	258,20	0,37	0,04	1,50	22,00
C27	9,86	96,40	300,6	0,32	0,05	1,00	36,00
C28	9,82	96,32	320,2	0,30	0,06	0,20	48,00

Como ya antes se ha mencionado los tratamientos más eficientes en cuanto a remoción de metales pesados son los C25, C26, C27 y C28. En la gráfica 41 se ve el comportamiento del pH versus la cantidad de metales pesados removidos. La línea de tendencia más apropiada es una tipo lineal con un factor de correlación 0,9762. Teniendo en cuenta que se desea eliminar el efluente con un nivel de pH lo más cercano a 7 (neutro), el mejor tratamiento en cuanto al nivel de pH sería el C27.

En el gráfico 42 se puede observar que por cada gramo de lodos producidos el tratamiento que más metales pesados remueve es el C25, 0,81 gramos. Esto quiere decir que concerniente a la cantidad de lodos generados este tratamiento es el más eficiente.

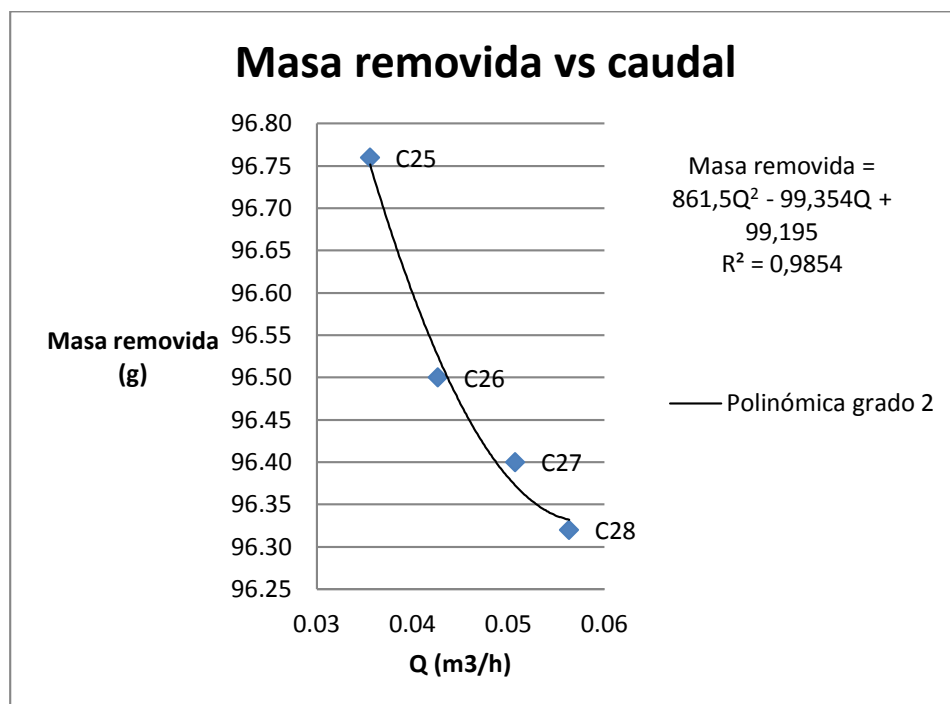


**Gráfico 41: Masa removida (g) versus pH Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)**



**Gráfico 42: Masa removida (g) versus masa de lodos producidos (g) Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)**

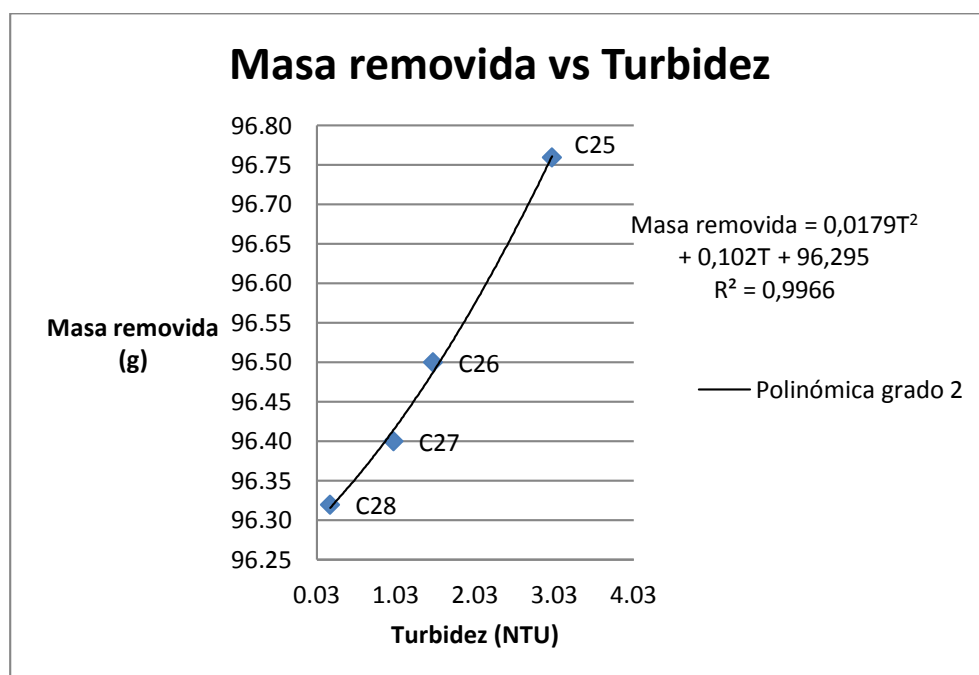




**Gráfico 43: Gráfico 6.43: Masa removida (g) versus Caudal (Q) Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)**

Cuanto menor es el Caudal, mayor es la cantidad de metales removida. Esto se evidencia en la gráfica 43. El tratamiento que se hizo a menor caudal de ingreso de efluente fue el C25, por lo tanto permitió que la cantidad de metales removidos fuera menor que los demás tratamientos. Sólo para no olvidar está sobreentendido que cuanto mayor sea el caudal de efluente que ingrese al reactor flujo continuo, mayor será la cantidad de efluente tratado, esto se evidencia en la tabla 31

La gráfica 44 evidencia que cuánto menor es la turbidez de la muestra mayor será la cantidad de metales pesados presentes, en otras palabras la cantidad de metales pesados removidos será menor.



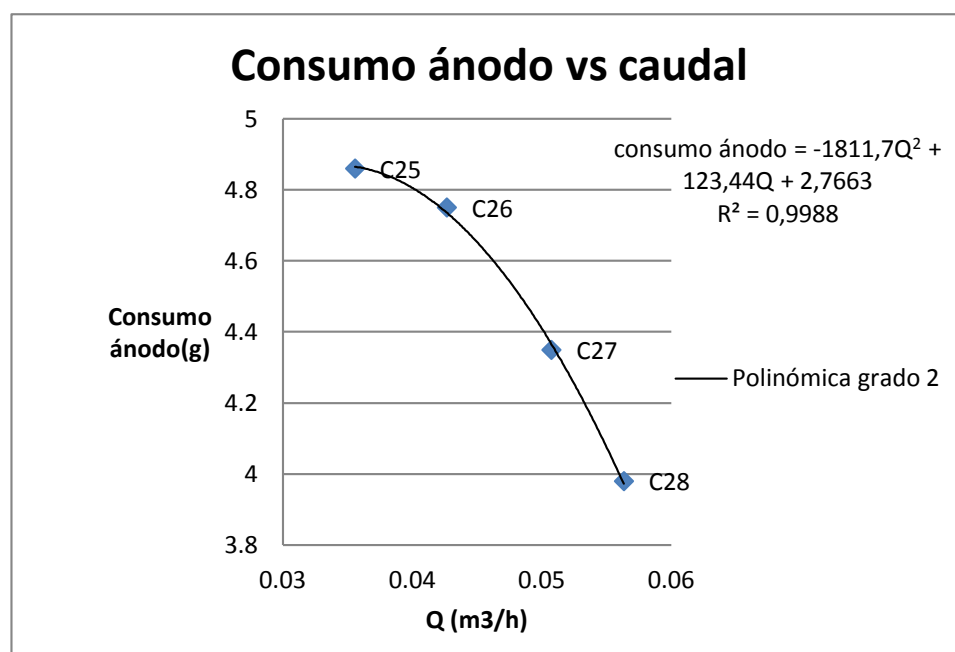
**Gráfico 44: Masa removida (g) versus Turbidez Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)**

**Tabla 35: Consumo de soda cáustica en escamas para el pre tratamiento**

Volumen tratado (L)	Masa soda cáustica (g)
0,4	26
0,5	42
1	83
3	240

Una parte esencial del trabajo en general es el pre tratamiento que se le da al efluente con soda cáustica para poder elevar el pH y así el tratamiento, tanto con electrodos de Hierro como de Aluminio y en reactor por lotes como en el reactor flujo continuo sea eficiente. En la tabla 32 se evidencia la cantidad de soda cáustica que se usó para tratar diferentes volúmenes de efluente, en promedio se puede decir que se

necesitan 85 gramos de soda cáustica en escamas para hacer un adecuado tratamiento de un litro de efluente. Recordando la figura 60, el tratamiento del cual estamos hablando corresponde al acondicionamiento de pH entre un rango de 5 – 7 para tratar un efluente con electrodos de Hierro y un acondicionamiento de de pH entre un rango de 7.5 – 9 para un tratamiento con electrodos de Aluminio. Donde la cantidad de soda cáustica usada es muy similar para ambos pre tratamientos.



**Gráfico 45: Consumo del ánodo (g) versus Caudal (m<sup>3</sup>/h) Reactor flujo continuo (muestras C25/C26/C27/C28)**

Finalmente se observa en el gráfico 45 que conforme aumenta el caudal del efluente que ingresa al reactor flujo continuo, el consumo de los ánodos de Aluminio (muestras C25, C26, C27, C28) va disminuyendo proporcionalmente. Esto puede deberse a que conforme el caudal del efluente entrante aumenta hay menos tiempo para que este interactúe con los electrodos del reactor, desprendiéndose así menor cantidad de ánodo en el proceso.

## CAPITULO 7: ANALISIS ECONOMICO DEL PROCESO INDUSTRIAL

Es importante diseñar una celda de Electrocoagulación para alcanzar la máxima eficiencia posible, por lo que se deben considerar los siguientes factores:

- Se debe minimizar el sobre potencial entre electrodos causado por la resistencia de la solución y la acumulación de burbujas en la superficie de los electrodos.
- Se debe maximizar la transferencia de masa entre electrodos.<sup>(8)</sup>

El transporte de masa se puede incrementar aumentando la turbulencia de la solución en el reactor. Las burbujas gaseosas de oxígeno e hidrógeno que se forman alrededor de los electrodos son de forma esférica y a medida que se acumulan en la superficie de los electrodos se incrementa la resistencia eléctrica de la celda y como resultado de esto se requiere mayor cantidad de energía para lograr la eficiencia de remoción óptima; para minimizar esta acumulación de las burbujas se puede emplear vibraciones.<sup>(8)</sup>

El mejoramiento del desempeño se logra usando electrodos mono polares conectados tanto en paralelo como en serie. El arreglo en paralelo esencialmente consiste de un par de placas de metal ubicadas en medio de dos electrodos paralelos y una fuente de energía de corriente directa.<sup>(8)</sup>

En un arreglo mono polar cada par de electrodos de sacrificio están internamente conectados entre sí, y no tiene interconexión con los electrodos externos. Este arreglo de electrodos mono polares con celdas en serie es eléctricamente similar a una celda con múltiples electrodos e interconexiones. El montaje experimental requiere además de una caja de resistencias para regular el flujo de corriente y un multímetro para leer los valores de corriente. Las placas de metal se conocen comúnmente como electrodos de sacrificio (el electrodo de sacrificio y el cátodo pueden ser de materiales diferentes o iguales).<sup>(8)</sup>

Se debe tener en cuenta que una diferencia de potencial mayor se requiere para un mismo flujo de corriente cuando se realiza el arreglo en serie, por que las celdas conectadas en serie tienen una mayor resistencia mientras que en un arreglo en paralelo la corriente eléctrica se divide entre los electrodos de manera proporcional a la resistencia de la celda individual.<sup>(8)</sup>

Para mejorar el desempeño de la Electrocoagulación se recomienda intercambiar la polaridad de los electrodos de manera intermitente.<sup>(8)</sup>

En el reactor flujo continuo se intentó incrementar la transferencia de masa aumentando la turbulencia al interior del reactor con la presencia de los compresores de aire que liberaban burbujas. Según la bibliografía esta liberación de burbujas afectan al sistema creando una mayor resistencia eléctrica necesitándose mayor cantidad de energía pero esto se podría eliminar o disminuir empleando un sistema vibratorio. La utilización de electrodos mono polares, electrodos de sacrificio, fue para mejorar el desempeño del reactor de Electrocoagulación.

El proceso de Electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias. El capital y los costos de operación son mucho menores comparativamente con un tratamiento por coagulación química, incluso se puede llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año. Estos costos dependen del caudal a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos y de la región o localidad en la que se desea realizar el tratamiento (por el costo de energía eléctrica).

Se ha estimado que los costos de operación para tratar por Electrocoagulación 1'500.000 GPA (5 GPM) de agua residual con contenidos de TSS, grasas y aceites, y algunos metales como níquel y zinc, es de US\$ 1.500, mientras que los costos para tratar la misma agua residual por medio de coagulación química es del orden de US\$ 45.000, para un ahorro anual del orden de US\$ 43.500 cuando se aplica Electrocoagulación en lugar de coagulación química. Estos costos no incluyen transporte y disposición de lodos ni mano de obra.<sup>(8)</sup>

Cuando se compara la coagulación con alumbre y la Electrocoagulación, este último tratamiento produce 83% menos volumen de lodos que el primero, lo cual representa diferencias significativas en los costos del transporte y disposición final de los lodos.<sup>(8)</sup>

Los costos de operación dependen en buena medida del material de los electrodos. Por ejemplo, cuando se trata el agua residual de la industria textil por Electrocoagulación con electrodo de hierro como electrodo de sacrificio, los costos de operación son del orden de US\$ 0.1 por kg de DQO removido y cuando

el electrodo de sacrificio es de aluminio, su costo de operación es del orden de US\$ 0.3 por kg de DQO removido. Los costos del electrodo de sacrificio son alrededor del 50% de los costos totales para el hierro, y del 80% para el aluminio. También se ha observado que la densidad de corriente influye sobre los costos operativos, en general el comportamiento depende del material del electrodo gastado. <sup>(8)</sup>

Para la industria textil, en el caso del hierro hay un comportamiento lineal de los costos. Para incrementos de densidad de corriente de 50 a 200 Am<sup>-2</sup> los costos de operación se incrementan del 48% al 62%, mientras que para el aluminio hay una disminución de los costos de operación por kilogramo de DQO removido de alrededor de 100 Am<sup>-2</sup>. <sup>(8)</sup>

Finalmente la inversión inicial involucra los costos de la fuente de energía y la celda, además de adecuaciones y otros equipamientos. Este costo inicial es del orden de US\$ 107.000 para tratar 1,5 GPM, y de US\$112.000 para tratar 3GPM. <sup>(8)</sup>

### **7.1. Inversión involucrada al proyecto**

Los gastos correspondientes a la realización de la tesis se detallan en la tabla 33. El gasto principal son los análisis ICP que se realizaron en el laboratorio de CIMM – Perú (25 análisis que se adjuntan en los apéndices 3 – 8), seguido de la construcción de los reactores flujo continuo en material acrílico (plano se adjunta en el apéndice 1).

El monto total incluido IGV, que se gastó en la tesis es s/. 4000.70 (cuatro mil y 70/100 nuevos soles). Esto incluye todos los materiales que se necesitó para la construcción del reactor flujo continuo, y lo que se gastó en la parte de los experimentos en el reactor por lotes.

**Tabla 36: Gastos detallados concernientes a la realización de Tesis**

<b>Descripción</b>	<b>Monto incluido I.G.V. (s/.)</b>
Análisis ICP	2354,9
Reactor EC flujo continuo - acrílico	566,4
Maquinado láminas Fe - Al	360
Soda caustica	160,4
Análisis turbidez	100
Llave 1/4" bronce	60
Tachos de basura	57
Reactor PVC	50
Plancha de Aluminio	70
Análisis pH	32
Compresor	30
Mangueras y válvulas	15
Papel filtro	30
Plancha de Hierro	40
Recipiente 25 L	25
Papel pH 0-14	16
Contactos eléctricos	14
Barras de cobre	9
Tuberías de PVC	5
Llave tipo bola	5
Niple	1
<b>TOTAL</b>	<b>4000,7</b>

Para que no haya dudas sobre lo que significa cada concepto se detalla cada uno de ellos: el maquinado de las láminas de Hierro y Aluminio se refiere al corte que se le hizo a la plancha original para poder obtener los electrodos para el reactor flujo continuo. El total de la soda cáustica que se uso durante todas las experiencias en el laboratorio asciende a s/. 160.40 (ciento sesenta y 40/100 nuevos soles). Los análisis de turbidez y de pH que se hicieron fueron solamente a las muestras C25, C26, C27 y C28 por ser las que mejores porcentajes de remoción presentaban. La llave de bronce de ¼" se usó para regular la salida del flujo del reactor flujo continuo. Los tachos de basura se acondicionaron para ser

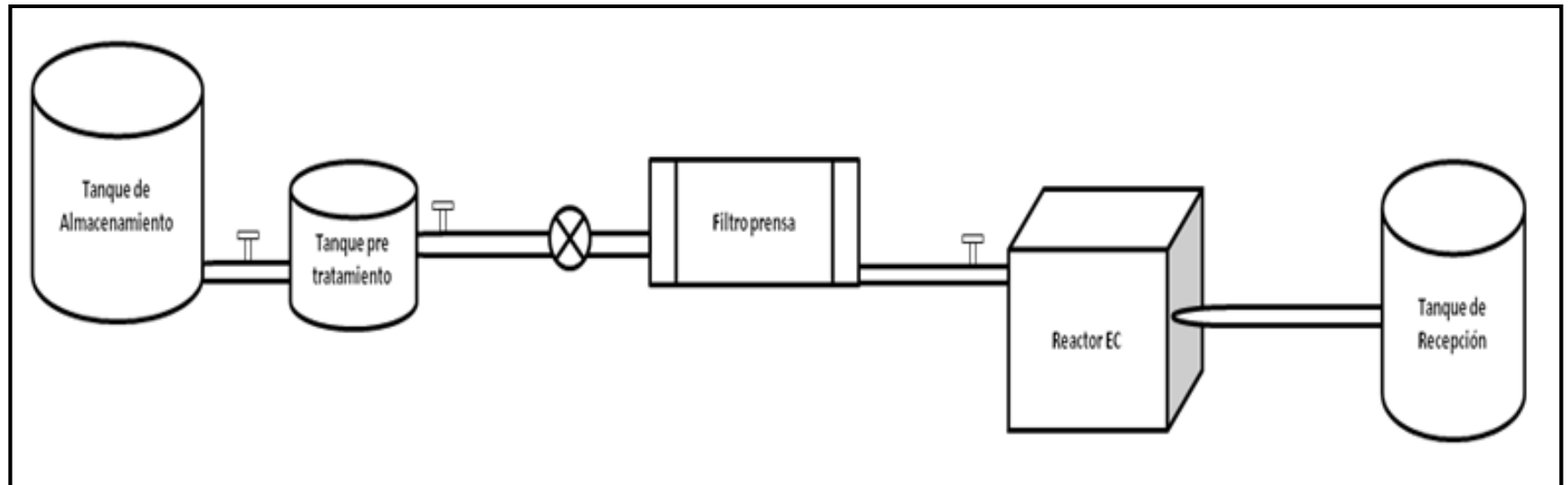
utilizados como tanques de almacenamiento del efluente antes y después de ser tratado. Los contactos eléctricos que se usaron fueron de tipo industrial para el reactor flujo continuo. Las dos barras de cobre se utilizaron para unir el juego de cátodos y ánodos, por separado, al rectificador de corriente. El recipiente de 25 L se usó como tanque de alimentación al sistema del reactor flujo continuo. La llave tipo bola se utilizó para regular el flujo que entraba al reactor de EC tipo flujo continuo. Finalmente las tuberías de PVC junto con el Niple se usaron para conducir el efluente desde el tanque de alimentación hasta el reactor, y desde el reactor al tanque de almacenamiento. Los demás materiales como papel filtro y papel pH fueron utilizados a lo largo de todas los experimentos para filtrar el efluente pre tratado y medir el pH respectivamente.

Durante la investigación y los experimentos que se realizaron a lo largo de la duración del proyecto se vio por conveniente diseñar un sistema de tratamiento con la tecnología de Electrocoagulación que pueda tratar efluentes procedentes de cualquier industria a un flujo mayor con el que se trabajó en el reactor flujo continuo.

Con los datos experimentales que se tienen se podrán hallar costos que estén relacionados directamente con el correcto funcionamiento del proceso, tales como la construcción de un reactor de Electrocoagulación con mayor capacidad de tratamiento, consumo de electrodos y un sistema de filtrado que pueda asumir el reto de no ser un cuello de botella dentro del sistema de tratamiento de efluentes.

En la figura 61 se muestra un diagrama básico del diseño del sistema de Electrocoagulación a escala industrial.





**Figura 61: Esquema de un sistema de Electrocoagulación a escala industrial**

Para poder hacer un escalamiento del reactor flujo continuo utilizado en los experimentos se hará uso del factor de escalamiento y así obtener un reactor flujo continuo para tratar efluentes a escala industrial. Todos los cálculos asociados a esta parte se encuentran en el apéndice 10.

<b>L</b>	0,39 m
<b>W</b>	0,26 m
<b>H</b>	0,36 m

Donde:

L: largo del reactor de EC

W: ancho del reactor de EC

H: altura del reactor de EC

<b>distancia a cara lateral</b>	0,05 m
<b>distancia entre electrodos</b>	0,02 m
<b>espesor electrodos</b>	0,00900 m

Con las dimensiones del reactor obtenido se hallaron los costos involucrados en construir un reactor hecho de acero de 1/8" de espesor recubierto con PVC. Este reactor tendría un costo de US\$ 1000,00 incluido I.G.V.

Al diferencia que en el reactor flujo continuo los electrodos dentro del reactor de EC escala industrial estarían distanciados 2 cm entre sí y serán de 9 mm de espesor, debido a que la longitud de este reactor es mayor y hay más espacio para poder poner electrodos que interactúen con el efluente que pase por el reactor.

En cuanto al filtro prensa, una de las alternativas que se manejó fue diseñar uno haciendo experimentos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FIQT pero por diversas circunstancias no se pudieron realizar los experimentos. La otra alternativa fue cotizar un filtro prensa a una empresa especializada en este tipo de tecnologías, como lo es la empresa Natbio S.A.C. La cotización se muestra en el apéndice 2, es un

filtro prensa de cámaras recesadas que trabaja a presión constante igual a 60 psi. Para poder hallar la capacidad de filtrado del efluente que se desea desarrollar es necesario que se tengan los siguientes datos:

- Volumen de filtración
- Tiempo en el cual se desea que filtre

Todos estos detalles son importantes para poder dimensionar el tamaño del filtro prensa para que cumpla las necesidades del sistema. Así mismo es importante hacer unas pruebas de filtración del efluente con el filtro prensa prototipo, cuyas fotos se encuentran en el apéndice 2, y hacer el levantamiento de estos datos el cual dará una evaluación completa. El costo del filtro prensa prototipo es de US\$ 4850,00 + IGV.

Del apéndice 10 se ha podido dimensionar el rectificador de corriente necesario para el sistema de Electrocoagulación. Este rectificador tendría una entrada de 220 v y una capacidad de corriente de 450 Amperios. Se cotizó el rectificador requerido en US\$ 2500,00 incluido I.G.V.

Adicionalmente habría que tener en cuenta que se utiliza ánodos de sacrificio de Aluminio, que tienen un costo involucrado. En el apéndice 10 se hallaron la cantidad de electrodos necesarios para el sistema de Electrocoagulación a escala industrial. De los 7 electrodos, 4 serán usados como ánodos y 3 como cátodos. Pero como el desgaste sólo ocurre en el ánodo, cuando se tenga que reemplazar los ánodos podrán ser reemplazados con los cátodos por estar casi intactos luego del proceso.

*Número de electrodos = 7*

*Número de ánodos = 4*

*Número de cátodos = 3*

En el apéndice 11 se ha hallado la cantidad de floculante necesaria para un flujo establecido en el apéndice 10 (500,84 L/h).

**Tabla 37: Cantidad de floculante necesario para la Electrocoagulación**

<b>Aluminio</b>		
<b>Cantidad de floculante (mg/L)</b>	<b>Volumen electrodo (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa electrodos (Kg)</b>
29,83	0,003864	10,43

<b>Hierro</b>		
<b>Cantidad de floculante (mg/L)</b>	<b>Volumen electrodo (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa electrodos (Kg)</b>
115,29	0,003864	30,33

Finalmente del apéndice 11 se pudo hallar que los electrodos de aluminio necesitan ser cambiados cada 29 días, mientras que los de Hierro cada 21 días.

Como ambas planchas, la de Hierro y de Aluminio vienen en las mismas dimensiones se puede saber cuántos electrodos de cada metal se pueden obtener de cada plancha. Como cada plancha es de 1,2 m por 2,4 m. de cada plancha se pueden obtener 27 electrodos de 0,26 m por 0.36 m.

**Tabla 38: Dimensiones y precios de planchas de 9 mm de Aluminio y Hierro**

<b>Aluminio</b>		
<b>Ancho</b>	<b>largo</b>	<b>Precio (US\$)</b>
1,2 m	2,4 m	89,56

<b>Hierro</b>		
<b>Ancho</b>	<b>largo</b>	<b>Precio (US\$)</b>
1,2 m	2,4 m	212,4

Para saber el número de cambios al año:

$$\text{Aluminio: } \frac{365 \text{ días al año}}{29 \text{ días que dura el electrodo}} = 13 \text{ cambios al año}$$

$$\text{Hierro: } \frac{365 \text{ días al año}}{21 \text{ días que dura el electrodo}} = 18 \text{ cambios al año}$$

Como para el reactor se usan 7 electrodos.

Aluminio:

13 cambios al año \* 7 electrodos en cada cambio = 91 electrodos al año

Hierro:

18 cambios al año \* 7 electrodos en cada cambio = 126 electrodos al año

Como de cada plancha se pueden obtener 27 electrodos, se necesitarían la siguiente cantidad de planchas de cada electrodo:

<b>Aluminio</b>	<b>Hierro</b>
<b>#planchas</b>	<b>#planchas</b>
4,00	5,00

De la tabla 35 se tiene el precio unitario de cada plancha y ya que se necesitan 4 planchas de Aluminio y 5 de Hierro la inversión en electrodos sería de:

<b>Aluminio</b>	<b>Hierro</b>
<b>Gasto al año (US\$)</b>	
358	1062

Sumando un total de US\$ 1420,00 incluido I.G.V.

Totalizando toda la inversión necesaria para poner en funcionamiento un sistema de Electrocoagulación a escala industrial se tendría:

**Tabla 39: Inversión total en nuevos soles para un sistema de Electrocoagulación a escala industrial**

<b>Descripción</b>	<b>Monto (US\$)</b>
Reactor EC	1000,00
Filtro Prensa	5723,00
Electrodos	1420,00
Rectificador de corriente de 450 A	2500,00
Tanques de Almacenamiento de efluente de PVC	800,00
Tanque de pre tratamiento + agitador mecánico	2500,00
<b>TOTAL</b>	<b>13943,00</b>

Se necesitaría una inversión total de US\$ 13943 (trece mil novecientos cuarenta y tres dólares americanos) para tener un sistema de Electrocoagulación que trate un efluente procedente de una planta de sulfatos de Zinc y Magnesio a un flujo de 500 L/h.

## **7.2. Potenciales Beneficiarios**

Cuando hablamos de Electrocoagulación, estamos hablando de una tecnología de vanguardia que demuestra muchos beneficios con respecto a los tratamientos convencionales, así mismo, estamos hablando de mayores beneficios económicos con un menor gasto en equipos, instalaciones, obras civiles y gasto de reactivos.

La Electrocoagulación como se ha mencionado antes tiene un campo de aplicación muy amplio y que puede ser aprovechado por las diversas industrias a nivel nacional. La disminución de la concentración de metales pesados, reducción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la reducción de la cantidad de aceites y grasas, que se ve aprovechada por las siguientes industrias:

- Minería
- Petróleo y Gas
- Alimentaria
- Textil

- Papel
- Calzado
- Recubrimiento de metales
- Galvanoplastia
- Lubricantes

En el caso práctico que se ha realizado se ha tratado de disminuir la concentración de metales pesados dentro de un efluente procedente de una planta productora de sulfatos, que es un efluente muy parecido a uno procedente de una industria minera, debido al alto contenido de metales pesados presentes.

## CONCLUSIONES

1. La densidad de corriente óptima tiene un valor de 5 A/dm<sup>2</sup>. A un mayor valor de densidad de corriente, es mayor la disolución del metal (Ley de Faraday), con una mayor velocidad de formación de hidróxidos de Hierro y Aluminio que se traduce en una mayor eficiencia de remoción. Los tratamientos M17 y M18 fueron los que removieron mayor cantidad de metales pesados y mayor variedad de metales pesados (mayor selectividad), además la velocidad con que se desgastaron los electrodos fue menor. Por eso se decidió trabajar con esta densidad de corriente constante para el reactor flujo continuo.
2. La energía consumida en el reactor flujo continuo es 20 veces mayor a la consumida en el reactor por lotes debido a que se trabajo con menor cantidad de efluente y menor área expuesta de electrodos. La liberación de calor fue mayor en el reactor flujo continuo debido al efecto joule.
3. El voltaje tuvo valores aproximados para los reactores por lotes y flujo continuo a pesar que la intensidad de corriente fue de 7 Amperios en el primero y de 81 A en el reactor flujo continuo.
4. El pH de trabajo, tanto para el reactor flujo continuo como para el reactor por lotes estuvo en un rango de 5 a 7 cuando se trabajó con electrodos de Hierro, y en un rango de 8 a 10 cuando se trabajo con electrodos de Aluminio. El aumento de pH es atribuido al consumo de iones H<sup>+</sup> para la formación de H<sub>2</sub> (g) sobre el cátodo y/o formación de radicales hidroxilos sobre el ánodo. En el apéndice 8 se puede verificar que el pH de las muestras C25, C26, C27, C28 estuvo alrededor de 9,8 que está ligeramente por encima del Límite Máximo permitido para descargas de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas que se muestra en el apéndice 12.
5. Para poder hacer un pre tratamiento (acondicionamiento de pH) al efluente antes de ingresar al reactor de EC es necesario de 85 g. de soda cáustica en escamas por cada litro de efluente.



6. El porcentaje de remoción tanto con electrodos de Hierro como de Aluminio fue mayor en el reactor flujo continuo que en el reactor por lotes, debido a que había una mayor liberación de coagulante en efluente, y de una mejor distribución de los iones debido a la misma fuerza del flujo y también debido a los compresores de aire presentes en el reactor flujo continuo.
7. Según la tabla 24 los tratamientos que lograron disminuir la concentración de metales pesados por debajo de los LMP fueron:

<b>Metal Pesado</b>	<b>Concentración en ppm (DS-010-2010 MINAM)</b>	<b>Concentración en ppm (tratamiento de EC)</b>
<b>Cr</b>	0,08	0,004 (C0 - C4, C25, C26, C28)
<b>Fe</b>	1,6	0,12 (C25); 0,9 (C26); 1,17 (C27); 1,31 (C28)
<b>Pb</b>	0,16	0,008 (C25 - C28)

El Cromo se logró disminuir hasta 0,004 ppm por debajo de 0,08 ppm que establece la ley; el Hierro se logró disminuir hasta 0,12 por debajo de 1,6 que establece la ley; y finalmente el Plomo se logró disminuir hasta 0,008 ppm por debajo de 0,16 ppm que establece la ley.

De la información en los apéndices 9, 12 e 13 se resume:

<b>Parámetro</b>	<b>Valor según apéndice 12 (ppm)</b>	<b>Valor según apéndice 13 (ppm)</b>	<b>Valor del mejor tratamiento con EC (ppm)*</b>
Aluminio	-	10	0,33
Boro	-	4	0,01
Cadmio	0,01	0,5	0,61
Cobre	1	3	1,3
Cromo	0,05	0,5	0,004
Fósforo	-	10-45	0,1
Manganeso	-	4	0,051
Níquel	0,002	4	0,002
Plomo	0,05	1	0,008
Selenio	0,01		0,02

\* Ver apéndice 9

La concentración de los metales pesados, que están listados en la tabla líneas arriba, ha disminuido a valores muy por debajo de los LMP según las normas que se mencionan en los apéndices 12 y 13. Por lo tanto los resultados obtenidos cumplen con estándares internacionales.

- 8.** Se logró disminuir el nivel de Turbidez desde 36 NTU (valor de la muestra ácida inicial) hasta 1,0 NTU, valor de la muestra C25 (ver valor en el apéndice 8) que es un tratamiento de EC con electrodos de Aluminio en el reactor flujo continuo por un tiempo de 40 minutos.
- 9.** El total de metales pesados removidos por cada ensayo fue mayor en el reactor flujo continuo. Los tratamientos C25 al C28 lograron remover en promedio 96 gramos.
- 10.** El menor consumo de ánodo de sacrificio se dio con los electrodos de Aluminio en el reactor flujo continuo, donde por cada gramo de ánodo que se consume se logró remover en promedio 22 gramos de metales pesados en total.
- 11.** Los mejores tratamientos de todo el grupo de ensayos practicados son el C25, C26, C27 y C28 que fueron realizados en el reactor flujo continuo con electrodos de Aluminio en un tiempo de 10, 20, 30 y 40 minutos respectivamente. Son los mejores tratamientos porque se logró remover mayor cantidad de metales pesados en total, porque se logró disminuir el nivel de turbidez a valores por debajo de los permisibles, y además porque se logró disminuir por debajo de los LMP para metales pesados como el Cromo, Hierro y Plomo.
- 12.** La producción de lodos en los tratamientos C25 al C28 indican que el tratamiento C25 produce 1 gramo de lodo por cada 0,81 gramos de metales pesados removidos en total.
- 13.** El caudal óptimo se estableció en 10 mL/s (0,05 m<sup>3</sup>/h) correspondiente al tratamiento C25. Se intentó trabajar a 4 mL/s pero la selectividad en la remoción de metales pesados además de la cantidad total removida de metales pesados fue mucho mejor a 10 mL/s.
- 14.** La inversión inicial para montar un sistema de Electrocoagulación que trate el efluente procedente de una planta productora de sulfatos de Zinc y Magnesio a un flujo de 500 L/h es de aproximadamente US\$ 15000,00.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda estudiar el patrón de flujo en un reactor de flujo continuo para verificar que tipo de flujo (laminar o turbulento) es el que da mejores resultados en cuanto a remoción de metales pesados.
2. Se recomienda estudiar el efecto del pH sobre la polarización de los electrodos de Hierro y Aluminio. Para poder aumentar el tiempo de trabajo del reactor flujo continuo y ya no hacer paradas para limpiar los electrodos con presencia de capas pasivantes.
3. Se recomienda modificar el diseño del reactor flujo continuo (apéndice 1) para poder mejorar la recolección de los lodos por la parte inferior a través del sistema de válvulas de desfogue. Además se podría modificar la entrada y salida del efluente para aprovechar parámetros como la caída por gravedad que no se pudieron aprovechar en el diseño actual.
4. Se recomienda trabajar a una distancia de separación entre electrodos distinta a 1 cm, que fue la que se uso en el reactor flujo continuo. Esto para poder analizar de que manera la separación entre electrodos influye en un mejor performance del reactor flujo continuo. Además la mayor separación ayudaría a mantener limpios los electrodos y así evitar la formación de capa pasivante que impida el correcto trabajo del reactor.
5. Se recomienda estudiar el efecto del transporte de masa (curvas de polarización) a diferentes velocidades de rotación de un electrodo giratorio.
6. Se recomienda hacer experimentos para determinar el costo real de uso de corriente eléctrica, y uso de ánodos de sacrificio para poder determinar la ventaja económica que tiene el tratamiento de Electrocoagulación con respecto al tratamiento convencional.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS

**Acidez:** Concentración de iones de hidrógeno de una solución, se expresa con un valor en la escala pH.

**Agente oxidante:** Es una sustancia que causa la oxidación de otra especie en una reacción redox. El agente oxidante gana electrones; se reduce.

**Agente reductor:** Es una sustancia que causa reducción de otra especie en una reacción redox; es decir, el material pierde electrones - se oxida.

**Agua potable:** Agua que puede beberse sin riesgos para la salud.

**Aguas residuales:** También llamadas “aguas negras”. Son las contaminadas por la dispersión de desechos humanos, procedentes de los usos domésticos, comerciales o industriales. Llevan disueltas materias coloidales y sólidas en suspensión. Su tratamiento y depuración constituyen el gran reto ecológico de los últimos años por la contaminación de los ecosistemas.

**Conservación:** Gestión dirigida a la preservación y uso racional de los recursos naturales, para asegurar el mejor beneficio que tiende al desarrollo sustentable de la sociedad. \*Es la administración del uso humano de la biosfera de modo que pueda producir los mayores beneficios sustentables para las generaciones actuales y a la vez mantener sus posibilidades de satisfacer las necesidades y aspiraciones de las futuras. En consecuencia, la conservación es positiva y comprende la preservación, el mantenimiento, la utilización sustentable, la restauración y el mejoramiento del entorno natural. Protección y administración de los recursos naturales en forma continua, a los efectos de asegurar su existencia.

**Contaminación:** (Del latín contaminare = manchar). Es un cambio perjudicial en las características químicas, físicas y biológicas de un ambiente o entorno. Afecta o puede afectar la vida de los organismos y en especial la humana.

**Corriente eléctrica:** Flujo de cargas consecuencia del movimiento de cargas eléctricas debido a una diferencia de potencial. En los conductores metálicos, es

el movimiento ordenado de los electrones entre dos puntos con distinto potencial. En algunos semiconductores la corriente se debe al movimiento de cargas positivas y en los electrolitos y gases ionizados al de ambos tipos de cargas.

**Desarrollo sostenible:** Es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. Al mismo tiempo que distribuye de forma más equitativa las ventajas del progreso económico, preserva el medio ambiente local y global y fomenta una auténtica mejora de la calidad de vida.

**Descarga:** Indica una situación en la que las sustancias (sólidas, líquidas o gaseosas) ingresan al medio ambiente. Generalmente: emisión está referida al ingreso de gases a la atmósfera, provenientes de fuentes fijas o fuentes móviles; descarga está referida al ingreso de líquidos a distintos cuerpos receptores.

**Disposición Final:** Se entiende por disposición final toda operación de eliminación de residuos peligrosos que implique la incorporación de los mismos a cuerpos receptores, previo tratamiento. Constituyen disposiciones finales las siguientes operaciones de eliminación: depósito permanente dentro o sobre la tierra. Inyección profunda. Embalse superficial. Rellenos especialmente diseñados. Vertido en extensión de agua dulce. Depósito permanente. Los vertidos y emisiones resultantes de operaciones de tratamiento, reciclado, regeneración y reutilización de residuos peligrosos.

**Efluente:** Producto de desecho de un proceso gaseoso, líquido o sólido que es descargado al ambiente. Estos desechos pueden haber sido tratados o no. Cualquier sólido, líquido, gas o semisólido que entra en el ambiente como un subproducto de actividades humanas.

**Impacto ambiental:** Es la repercusión de las modificaciones en los factores del Medio Ambiente, sobre la salud y bienestar humanos. Y es respecto al bienestar donde se evalúa la calidad de vida, bienes y patrimonio cultural, y concepciones estéticas, como elementos de valoración del impacto.

**Medio ambiente:** Es el entorno en el cual opera una entidad gestionada, incluyendo tanto los elementos inanimados como los seres humanos y otros

sistemas bióticos. \*Entorno en el cual opera una organización, el que incluye el aire, el agua, el suelo, los recursos naturales, la flora, la fauna, los seres humanos, y su interrelación. En este contexto, el medio ambiente se extiende desde el interior de una organización hasta el sistema global.

**Oxidación:** Este término es utilizado para referirse a reacciones químicas en la que un elemento o compuesto cede electrones a un elemento más electronegativo. (Desde el punto de vista de transferencia electrónica, oxidación ocurre cuando ocurre una pérdida de electrones en el sistema.)

**pH:** Es una medida de la concentración del ión hidrógeno en el agua. Se expresa la concentración de este ión como pH, y se define como el logaritmo decimal cambiado de signo de la concentración de ión hidrógeno. \*Símbolo que se utiliza para la concentración de hidrogeniones, los valores de pH abarcan de 0 a 14 correspondiendo un valor de pH 7 si es neutro siendo menor a 7 ácido y mayor a 7 alcalino. Concentración del ion hidrógeno y de la acidez de soluciones acuosas.

**Reutilización o reuso:** Uso de un material, subproducto o producto residual más de una vez.

**Turbidez:** Grado de opacidad producido en el agua por la presencia de partículas en suspensión

**Turbiedad de un agua residual:** Es una característica física que indica la presencia en el agua de sustancias en suspensión y/o material coloidal, estos materiales dispersan o absorben la luz impidiendo su transmisión.

**Técnica:** es un conjunto de saberes prácticos o procedimientos para obtener el resultado deseado. La técnica requiere de destreza manual y/o intelectual, generalmente con el uso de herramientas. Las técnicas suelen transmiten de persona a persona, y cada persona las adapta a sus gustos o necesidades y puede mejorarlas.

**Tecnología:** es un concepto amplio que abarca un conjunto de técnicas, conocimientos y procesos, que sirven para el diseño y construcción de objetos para satisfacer necesidades humanas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) [http://www.uclm.es/users/higueras/mga/Tema08/Minerales\\_salud\\_1\\_4.htm](http://www.uclm.es/users/higueras/mga/Tema08/Minerales_salud_1_4.htm)
- (2) <http://www.lenntech.es/metales-pesados.htm>
- (3) <http://www.hospitalesdecaldas.com/documentos/manualgerencia/saludocupacional/LIMITESMAXIMOSPERMISIBLES.pdf>
- (4) [http://www.minam.gob.pe/index.php?option=com\\_content&view=article&id=100](http://www.minam.gob.pe/index.php?option=com_content&view=article&id=100)
- (5) ECOLIMPIO DE MEXICO, 2002. Electrocoagulación por ECOFLOW: la tecnología más moderna y barata para tratamiento de agua contaminada. México.
- (6) PEREZ LOZANO, Victor. 2003. Eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales por electrocoagulación (EC). Universidad de Alicante. España.
- (7) RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia et al. 2006. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de agua. Universidad Pontificia Bolivariana.
- (8) (2012). Quimica. BuenasTareas.com. Recuperado 11, 2012, de <http://www.buenastareas.com/ensayos/Quimica/6182129.html>
- (9) OCHOA GÓMEZ, José Ramón. Electrosíntesis y Electrodiálisis, Fundamentos, aplicaciones tecnológicas y tendencias.
- (10) ARISTIZÁBAL CASTRILLÓN, Adriana. 2007. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingeniería Facultad de Ingeniería Química. Medellín.
- (11) PIÑON MIRAMONTES, Manuel. 2002. Diseño de un equipo de electrocoagulación para la eliminación de flúor en agua subterránea. Universidad Autónoma de Chihuahua. México.
- (12) PROCONTROL, S.L. 2005. Artículo técnico: Descontaminación de aguas residuales por electrólisis en continuo. Patente nº 200502291 O.E.P.M. Barcelona: España.

- (13) GACETA DEL IMTA. 2009. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de agua contaminada con arsénico. IMTA: México.
- (14) CAÑIZARES, P. 2004. El tratamiento electroquímico en la depuración de efluentes industriales líquidos. Universidad de Castilla – La Mancha: España.
- (15) N&F de Colombia. Sistema de tratamiento para las aguas residuales mediante la tecnología de Electrocoagulación.
- (16) GLOBAL WATER SYSTEMS S. A. Innovaciones que crean Futuro. Sistemas de tratamiento para las aguas residuales mediante la tecnología de electrocoagulación.
- (17) MUÑOZ PORTERO, María José. Características y usos de los diagramas de Pourbaix. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería química
- (18) MARTINEZ, Armando. 1977. Introducción a la química de superficies y coloides. Editorial Alhambra S.A. Madrid. España.
- (19) TREYBAL, Robert E. Transferencia de Masa. Segunda Edición. México: Editorial McGraw-Hill.
- (20) MARTÍN DOMINGUEZ, Alejandra. 2006. Incidencia del gradiente de velocidad en la eficiencia de la Electrocoagulación para remover arsénico en un reactor a flujo pistón. Instituto Tecnológico de Durango, México.
- (21) ROA-MORALES, Gabriela. 2006. Aluminum electrocoagulation with peroxide applied to wastewater from pasta and cookie processing. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química. México.
- (22) MORALES POSADA, Nelly Bibiana. 2010. SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES GALVÁNICAS. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- (23) GUERRA MILLÁN, Francisco José. 2008. Electrocoagulación Asistida con  $H_2O_2$  de Aguas Residuales. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Equipo I-A.
- (24) ÁVILA REYES; Deisy. 2003 ESTUDIO DE TRATABILIDAD POR ELECTROCOAGULACIÓN DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO



SANITARIO LA ESMERALDA. Universidad Nacional de Colombia.  
Facultad de Ingeniería Química.

- (25)** ÖZACAR, Mahmut. 2008. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*.
- (26)** MOUEDHENA, G. 2007. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Unité de Chimie Industrielle et Matériaux (UCIM), ENIS, B.P.W. Sfax, Túnez*.
- (27)** ZONGO, Inoussa. 2009. Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance. *Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS-Nancy Université, BP 20451, F-54001 Nancy, Francia*.
- (28)** HOLT, Peter K. 2002. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Department of Chemical Engineering, University of Sydney, Sydney, NSW*
- (29)** KOBYA, Mehmet. 2007. Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. *Department of Environmental Engineering, Gebze Institute of Technology, Gebze, Turkey. ELSEVIER*.
- (30)** ARANGO RUIZ, Álvaro. 2007. Diseño de una celda de Electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Universidad Eafit. Medellín. Colombia*.