

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

***“DISEÑO DE UN REACTOR ELECTROQUÍMICO PARA LA DEGRADACIÓN DE  
ACEITE MINERAL (ACEITE DE MOTOR)”***

**PARA OPTAR AL GRADO DE  
LICENCIADA EN CIENCIAS QUÍMICAS**

**PRESENTADAS POR:**

**BR. NATALIA MARGARITA ARÉVALO PÉREZ**

**BR. ROSA ARELY JULIAN ZARCEÑO**

**DOCENTE DIRECTOR**

**MSc. ERICK EDGARDO MÉNDEZ**

**1 DE SEPTIEMBRE DE 2017**

**SANTA ANA**

**EL SALVADOR**

**CENTROAMÉRICA**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**



**RECTOR**

MTRO. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

**VICE-RECTOR ACADEMICO**

DR. MANUEL DE JESÚS JOYA

**VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO**

ING. NELSON BERNABÉ GRANADOS

**SECRETARIO GENERAL**

LICENCIADO CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

**DEFENSORIA DE LOS DERECHOS UNIVERSITARIOS**

MSC. CLAUDIA MARIA MELGAR DE ZAMBRANA

**FISCAL GENERAL INTERNA**

DINA ALHELY CASTELLÓN

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**



**DECANO**

DR. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ

**VICE-DECANO**

ING. ROBERTO CARLOS SIGUENZA

**SECRETARIO DE LA FACULTAD**

DAVID ALFONSO MATA ALDANA

**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

LICDO Y MED. MIGUEL ANGEL CRUZ

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente a **Dios** por brindarme sabiduría y la fe necesaria para cumplir mi meta.

A **mis padres:** Maura Pérez Umaña y Francisco Antonio Arévalo Elías por apoyarme en mis decisiones y en mis estudios. A mi mamá por ser mi guía, animarme para seguir adelante tanto en la vida como en mi carrera, gracias por sus consejos, su dedicación y sacrificios; a estar siempre a mi lado. También enseñarme a ser una persona de bien y cumplir mis objetivos.

A **mis hermanas:** Claudia Melissa Arévalo Pérez y Fátima Antonieta Arévalo Pérez. A mi hermana Fátima por apoyarme en casi toda mi carrera haciendo a que aprovechase al máximo las horas de mis estudios y trabajos académicos.

Al docente **Licenciado Salvador Antonio López Méndez:** Por haberme apoyado incondicionalmente en mi proyecto de tesis, por brindarme sus conocimientos profesionales de la química, gracias a su ayuda no habría sido posible llevar a cabo esta investigación en la Universidad de El Salvador Multidisciplinaria de Occidente, a pesar de su pronta partida me motivó a que soy capaz de ampliar mis conocimientos científicos, a ser creativa, de no limitarme y seguir creciendo como profesional. Lo recordare siempre Lic. López, que descanse en paz.

Al **docente director:** Master Erick Edgardo Méndez, por ofrecer asesoramiento y brindar apoyo para seguir adelante con el trabajo de graduación y llegar hasta el final, sin su ayuda no habría sido posible lograr terminar la investigación.

A los demás docentes que impartieron las asignaturas, gracias a ellos me ayudaron a conocer, a adquirir experiencias y ser partícipe en todas las ramas de la química que existen en el departamento de química. Agradecer a los amigos y compañeros de la licenciatura por el apoyo mutuo en el transcurso de toda la carrera.

**NATALIA MARGARITA ARÉVALO PÉREZ.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todo poderoso por haberme permitido culminar esta carrera. “A Dios sea la gloria por lo que hizo por mí”.

A mis padres José Albero Julia Heredia y Rosa Amelia Zarceño, por haberme enseñado e instruido por el mejor camino, enseñándome a esforzarme cada día por obtener los mejores resultados en la vida.

A mis hermanos por su incondicional apoyo, y por siempre estar ahí cuando los he necesitado.

A mi esposo Israel Campos, mi hija Mily Campos, mi cuñada Eugenia Campos, quienes se han convertido en un motivo más para poder vivir y seguir luchando por conseguir los mejores ideales en la vida.

A mis compañeras y amigas Vilma y Naty por haber contado siempre con ellas en todas las etapas de nuestra carrera recordando con alegría y nostalgia tantas vivencias que tuvimos en nuestra etapa por la universidad.

A mis maestros de la escuela, tercer ciclo, bachillerato y universidad, por haber compartido de sus conocimientos y aun hasta la fecha siguen marcando mi vida por la enseñanza que obtuve de cada uno de ellos.

A la Universidad de El Salvador por haberme brindado todas las condiciones necesarias para mi carrera, ya que sin Dios y sin ella no hubiera sido posible este sueño.

**ROSA ARELY JULIAN ZARCEÑO.**

## INDICE DE CONTENIDO

<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
<b>RESUMEN</b>	<b>IX</b>
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>10</b>
<b>1.1. Justificación</b>	<b>10</b>
<b>1.2. Alcances</b>	<b>11</b>
<b>III. MARCO TEÓRICO</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Aceite mineral</b>	<b>12</b>
2.1.1. Uso personal	13
2.1.2. Uso industrial y científico	13
2.1.3. Uso culinario	14
2.1.4. Usos médicos	14
<b>2.2. Parafina</b>	<b>14</b>
<b>2.3. Reacción anódica</b>	<b>15</b>
<b>2.4. Propiedades físicas del cobre (electrodo ánodo)</b>	<b>16</b>
2.4.1. Distribución y usos	17
<b>2.5. Grafito (electrodo cátodo)</b>	<b>17</b>
2.5.1. Tipos de grafito naturales	17
2.5.2. Tipos de grafito sintéticos	18
2.5.3. Propiedades del grafito	19
<b>2.6. Electrolisis del agua</b>	<b>20</b>
2.6.1. Principio	20
2.6.2. Ecuaciones	20
<b>2.7 Reactores electroquímicos y su comportamiento</b>	<b>21</b>
2.7.1. El reactor de baño simple	21
2.7.2. El reactor flujo pistón	23
2.7.3. El reactor continuo de tanque agitado	23
2.7.4. Estudios realizados con reactores electroquímicos	24
<b>III. OBJETIVOS</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Objetivo general</b>	<b>35</b>

<b>3.2. Objetivos específicos</b>	<b>35</b>
<b>IV. HIPÓTESIS</b>	<b>35</b>
<b>V. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>35</b>
<b>5.1. Universo</b>	<b>35</b>
<b>5.2. Muestras</b>	<b>36</b>
<b>5.3. Método de investigación</b>	<b>36</b>
<b>5.4 Clase de investigación</b>	<b>36</b>
<b>5.5 Tipo de investigación</b>	<b>36</b>
<b>5.6 Diseño experimental</b>	<b>36</b>
5.6.1 Dibujos del reactor electroquímico mediante el programa AutoCAD, para su construcción y caracterización.	36
5.6.2 Determinación de la ley de velocidad de reacción.	37
5.6.3 Procesamiento y análisis de datos.	37
<b>VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>38</b>
<b>6.1. Piezas del reactor electroquímico dibujadas por medio del programa AUTOCAD.</b>	<b>38</b>
6.1.1 Electrodo Ánodo	38
6.1.2 Reactor	39
6.1.4 Electrodo cátodo	40
6.1.9 Partes del filtro	41
6.1.10 Tanque	43
6.1.14 Planta del reactor electroquímico	43
6.1.15 El interior del electrodo ánodo.	45
<b>6.2. Curva de calibración del aceite mineral (aceite de motor).</b>	<b>46</b>
<b>6.3. Estudio cinético de los espectros en el UV-Vis.</b>	<b>47</b>
6.3.1 Análisis de los espectros de absorción UV-Vis del aceite mineral durante la reacción de electrodegradación.	48
6.3.2 Análisis cinético por UV-Vis del aceite mineral de la mezcla mediante el reactor electroquímico.	49
6.3.3. Linealidad de la cinética de la degradación del aceite mineral.	50
6.3.4. Tiempo de residencia media del aceite mineral.	51

<b>6.4. Análisis de los espectros Infrarrojo (IR) del aceite mineral antes del tratamiento electroquímico.</b>	<b>52</b>
6.4.1 Análisis de las muestras del aceite mineral de la mezcla después del tratamiento electroquímico con sus respectivos tiempos.	53
6.4.2. Estudio cinético por el infrarrojo del aceite mineral de la mezcla mediante el reactor electroquímico.	54
<b>6.5. Comparación del aceite mineral antes y después del tratamiento con el reactor electroquímico.</b>	<b>55</b>
<b>VII. CONCLUSIONES</b>	<b>56</b>
<b>VIII. RECOMENDACIONES</b>	<b>57</b>
<b>IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>57</b>
<b>X. ANEXOS</b>	<b>60</b>

## RESUMEN

El aceite mineral (aceite de motor) es utilizado para lubricar los motores de combustión interna, reduciendo así la fricción, además de limpiar e inhibir la corrosión reduciendo así la temperatura del motor. En la actualidad existen pocas alternativas para tratar los aceites que se desechan cuando estos terminan su vida útil para mantener el motor en óptimas condiciones.

Esta investigación se centra en una nueva alternativa del tratamiento del aceite mineral (aceite de motor), como un aporte a la tecnología que tenga como objetivo la satisfacción de la degradación del aceite mineral a partir de un reactor electroquímico de manera que permita un cambio en la estructura química.

Las piezas que conforman el reactor electroquímico para la degradación del aceite mineral fueron dibujadas mediante el programa AUTOCAD, siendo dibujadas un total de 7 piezas. En su totalidad las piezas diseñadas fueron ensambladas exitosamente cumpliendo así cada una su funcionamiento.

Para los análisis y resultados de las muestras (aceite mineral electrodegradado) han sido tratados mediante el modelo matemático de mínimos cuadrados, los equipos utilizados para las pruebas experimentales fueron analizadas por medio de los equipos del espectrofotómetro Infrarrojo y el espectrofotómetro UV-Vis, encontrando así, la curva de calibración en las bandas de absorción del UV-Vis del aceite mineral (aceite de motor) dando una máxima de absorción de 0.11932917 y una mínima de 0.1046698. También en el Ultra Violeta Visible se observó una banda de absorción del aceite mineral (aceite de motor) cuyo máximo de longitud de onda se sitúa a los 275 nm, con las concentraciones encontradas del aceite de motor se realizó la gráfica de la velocidad de degradación. Para el análisis de los espectros del infrarrojo de las muestras obtenidas del aceite mineral con sus respectivos tiempos de tratamiento, se identificaron las bandas de absorción y se realizaron comparaciones de cada una de ellas tanto antes y después de la electrodegradación. Se graficó la velocidad de degradación.

Se espera que el nuevo producto obtenido, a partir de la degradación anódica del aceite mineral (aceite de motor), sea aprovechado para la fabricación de materia prima reciclada para el consumo de las personas y reducir la contaminación ayudando a proteger al medio ambiente.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El manejo ambiental aceptable de los desechos aceitosos a nivel mundial provenientes de la función lubricante que resulta ser un producto disperso, manejado por la ciudadanía en los diferentes componentes sociales y productivos: talleres mecánicos lavadores de automotores, servicio de cambios de aceite automotriz y la industria en general, siendo el aceite un componente que causa un impacto significativo a la problemática de la contaminación medioambiental principalmente la del agua.

Si bien existe una gran recuperación de aceite de motor usado por parte de empresas que se dedican al reciclaje del aceite de motor así como leyes emitidas por el gobierno para el manejo de desechos de aceites de motores, no se dispone de un seguimiento eficiente hasta la disposición final por ello es necesario buscar otras alternativas viables para tratar esta problemática.

### **1.1. Justificación**

En la actualidad el problema de los desechos del aceite mineral (aceite de motor) causa un sin número de problemas, es por ello el interés de buscar soluciones para disminuir el impacto ambiental que estos ocasionan. Por tal motivo surge la necesidad de aplicar una tecnología que sea capaz de operar de manera conjunta la degradación anódica de aceite mineral (aceite de motor) por medio de un reactor electroquímico, el cual será diseñado con la capacidad de degradar la materia orgánica que componen los aceites de motor.

Este tipo de estudio pretende disminuir la contaminación y además ser un aporte para los tratamientos ya existentes, entre estos, rellenos sanitarios, incineración por plasma, este nuevo método de degradación anódica del aceite mineral plantea a diferencia de los otros métodos la revalorización molecular dando lugar a nuevos productos. Tomando en cuenta que es un estudio que da lugar a nuevos avances científicos, utilizando métodos de bajo costo que pueden funcionar a través de energía limpia renovable.

Otra causa de interés es el manejo inadecuado del aceite mineral, por su estructura de cadena lineal abierta que contiene una serie de hidrocarburos que no son biodegradables pero con la

ayuda de un reactor electroquímico será capaz de formar un grupo funcional y así poder reutilizar el material.

Queda claro que se necesitan procedimientos innovadores para enfrentar éstos problemas, que varían notablemente en la escala de su aplicación y en la complejidad de los problemas a resolver.

La solución a la propuesta del problema se centrará en el funcionamiento del reactor electroquímico para la degradación anódica del aceite mineral (aceite de motor); lo que implica además las mejoras que se le podrían hacer al reactor electroquímico a futuras investigaciones con respecto al tema tratado.

## **1.2. Alcances**

Éste tema es poco investigado ya que la eliminación del aceite mineral que se presenta hoy en día no es eficiente, y se tiene poco interés por los tratamientos que se le da en algunos países como el nuestro, pero no se registran en las bases de datos investigaciones para la degradación del aceite mineral (aceite de motor) o son muy pocos los estudios en cuanto al debilitamiento o cambio de estructura de ésta sustancia. Los tipos de alcance se mencionan a continuación:

**Alcance descriptivo:** la investigación posee un alcance descriptivo en cierta manera, porque a través de nuestro trabajo se obtendrá información del tema de estudio, además se pretende definir o visualizar que se medirá.

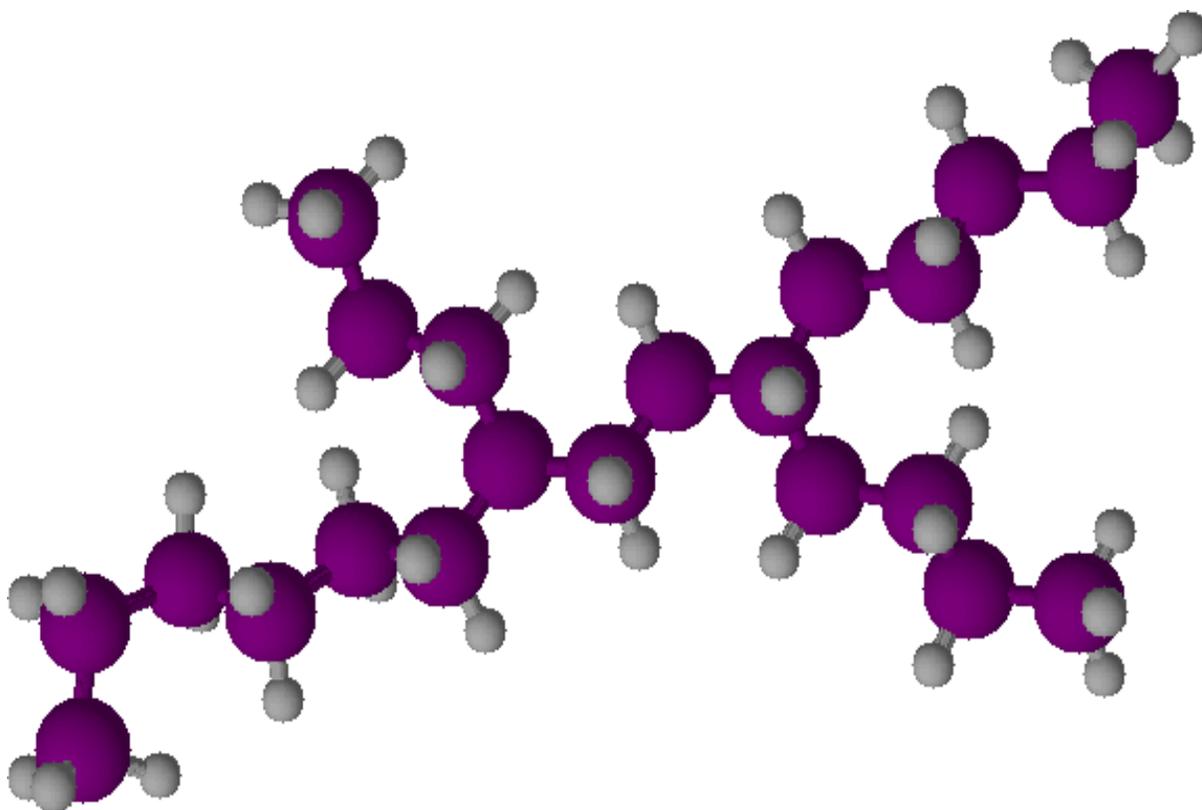
**Alcance explicativo:** La gran mayoría el aceite mineral (aceite de motor) acaba siendo desechada sin control, contaminando tanto en los ríos, en los lagos y en los mares, así también, en las ciudades causando un gran impacto medio ambiental.

En presencia del oxígeno, el aceite mineral es mucho menos estable. Se han observado cambios en las propiedades físicas y químicas que indican oxidación y degradación de las moléculas del hidrocarburo. Por esta razón, el uso de un reactor electroquímico será capaz de producir reacciones químicas de oxidación-reducción, haciendo que el aceite mineral que capture un grupo funcional, cambiando su peso molecular.

### III. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Aceite mineral

En general el aceite mineral un subproducto líquido de la destilación del petróleo desde el petróleo crudo. Un aceite mineral en este sentido es un aceite transparente incoloro compuesto típicamente de alcanos es decir son hidrocarburos (entre 15 a 40 carbonos). El aceite mineral es un lubricante o más bien conocido como aceite de motor. Según los expertos, si no se recoge adecuadamente el aceite de motor usado podría causar graves problemas a nuestro entorno. Esta sustancia contiene una serie de hidrocarburos que no son degradables biológicamente y que destruyen el humus vegetal y acaban con la fertilidad del suelo.<sup>1</sup>



**Figura 1:** Estructura molecular del aceite mineral.<sup>2</sup>

El aceite mineral se puede utilizar en muchos campos.

### **2.1.1. Uso personal**

Son muchos los productos de cosmética que llevan aceite mineral entre sus ingredientes, incluyendo productos para el cuidado de la piel de marcas muy conocidas y caras. La mayoría de cremas para bebés y muchos ungüentos de uso médico utilizan aceite mineral en su composición. Un tipo de aceite mineral purificado de consistencia semisólida se usa a menudo como base para apósitos protectores, cremas y suavizantes cutáneos, se cree ampliamente que es uno de los humectantes para la piel más eficaces.<sup>1</sup>

El uso de aceites minerales en cosmética cuenta con muchos detractores y críticas. Algunas toxinas se eliminan por la piel a través del sudor y los críticos contra el uso de aceites minerales sobre la piel se basan en que podrían impedir la eliminación de estas toxinas. Sin embargo, la mayoría de investigaciones apuntan a que el aceite mineral refinado utilizado en cosmética no obstruye los poros y que su uso es seguro en la mayoría de tipos de piel. Existe también preocupación sobre las impurezas que pueda contener y se cree que el uso de petrolatum y de parafina líquida puede hacer la piel más sensible a la exposición solar.<sup>1</sup>

### **2.1.2. Uso industrial y científico**

El uso a nivel industrial y en los laboratorios se debe principalmente a dos propiedades del aceite mineral no conduce calor ni electricidad y aísla del aire y humedad. Por ello es muy utilizado para proteger componentes de maquinaria industrial de la corrosión así como herramientas, superficies metálicas y piezas de embarcaciones para evitar su oxidación. También resiste la compresión, por lo que se usa como lubricante en prensas hidráulicas.

El aceite mineral previene también la absorción de humedad del aire y por ello se usa como protector en metales alcalinos (litio, sodio, potasio, entre otros). Estos elementos son muy reactivos y se almacenan sumergidos en aceites para evitar que reaccionen con el aire. En algunos laboratorios el aceite mineral también se utiliza como sustrato en cultivo microbiológico.<sup>1</sup>

### **2.1.3. Uso culinario**

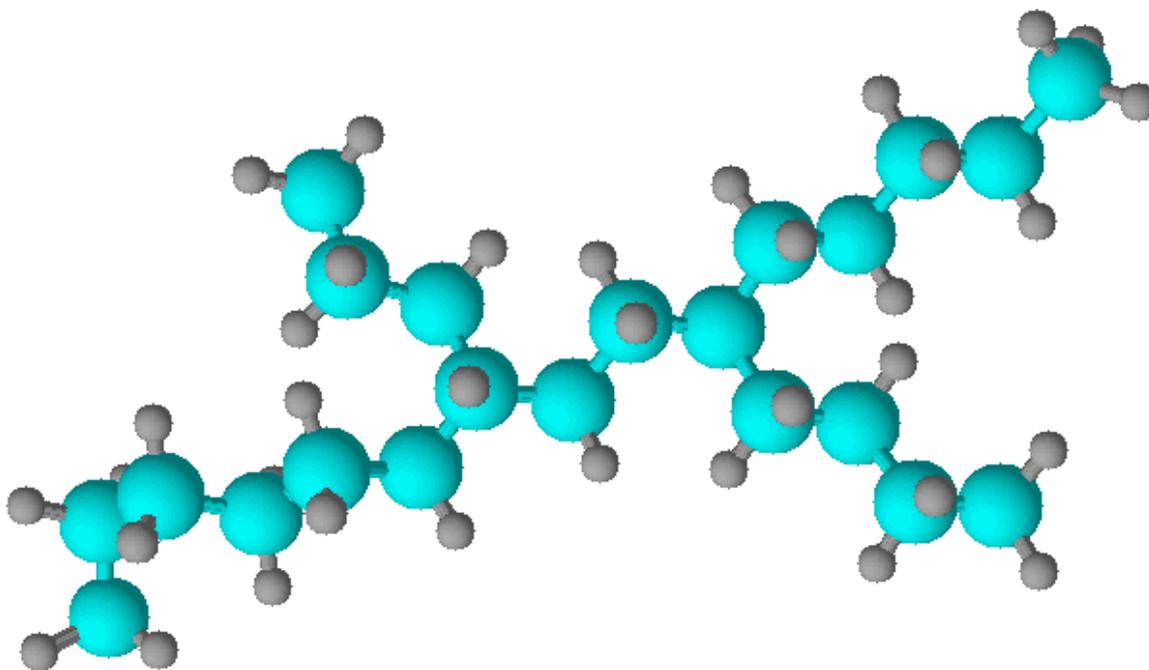
Variedades de aceites minerales muy refinados obtienen la autorización para usos alimentarios y se utilizan en recubrimientos de utensilios de madera, tablas de cortar y otros utensilios de cocina. El objetivo es repeler el agua recubriendo con una capa de aceite mineral; no da sabor ni olor y se puede evitar, por ejemplo, que la madera absorba agua y restos de alimentos y que proliferen bacterias.<sup>1</sup>

### **2.1.4. Usos médicos**

El aceite mineral ha sido utilizado ampliamente para tratar el estreñimiento. Ingerido en pequeñas cantidades recubre las paredes del intestino actuando como lubricante; además, también impide que se absorba agua (y algunos tipos de nutrientes) haciendo las heces más líquidas. El aceite mineral también se utiliza para ablandar la cera de los oídos; se dejan caer un par de gotas de aceite mineral templado (no caliente) dentro del oído. Se espera un poco y se irriga con agua o agua oxigenada.<sup>1</sup>

## **2.2. Parafina**

Etimológicamente el nombre parafina quiere decir de escasa afinidad, en alusión al hecho de que las parafinas no mantienen afinidad con ninguna otra sustancia por su escasa reacción química. Se extrae principalmente del petróleo crudo. Se puede extraer también de la cera de abeja y de las plantas. Las parafinas son hidrocarburos saturados y son sometidas por etapas de refinado para obtener los aceites lubricantes. Un destilado a vacío de crudo parafínico cuenta en su composición con una proporción importante, en torno al 15 % en peso de parafinas, sólidas a temperatura ambiente y que por tanto han de ser separadas para que los aceites lubricantes posean puntos de congelación igual o inferiores a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las cadenas de carbono son lineales con longitudes entre los veinte y sesenta átomos de carbono, acompañadas de cadenas que presentan ramificaciones de  $\text{C}_1\text{-C}_6$  y ciclos saturados con 5 ó 6 átomos de carbono.<sup>3</sup>



**Figura 2:** Estructura química de una parafina.<sup>3</sup>

Las parafinas normales de un determinado número de átomos de carbono están acompañadas por parafinas ramificadas o isoparafinas y por cicloparafinas del mismo número de átomos de carbono. Por ejemplo: las cadenas con 30 átomos de carbono lineales coexisten con una o varias cadenas de otros 30 átomos de carbono totales, que se presentan en forma de estructuras ramificadas con diferentes radicales metilo, etilo... y también con una o varias moléculas de 30 átomos de carbono, de los cuales 5 ó 6 están integrados como grupos ciclopentilos o ciclohexilos. El predominio de unas u otras estructuras determinará las características del producto.<sup>3</sup>

### 2.3. Reacción anódica

En la electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la oxidación), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y

cátodos, para que este tipo de oxidación pueda tener lugar. La naturaleza electroquímica resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%.<sup>4</sup>

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente.<sup>4</sup>

La reacción anódica tiene lugar durante la oxidación puede ser escrita de la siguiente manera:



Esto significa que del metal  $M$  resulta la oxidación del metal  $M$  unida a una valencia de carga positiva y la liberación de  $n$  electrones, el valor de  $n$  depende generalmente de la naturaleza del metal.

#### **2.4. Propiedades físicas del cobre (electrodo ánodo)**

El cobre posee varias propiedades físicas que propician su uso industrial en múltiples aplicaciones, siendo el tercer metal, después del hierro y del aluminio, más consumido en el mundo. Es de color rojizo y de brillo metálico y, después de la plata, es el elemento con mayor conductividad eléctrica y térmica. Es un material abundante en la naturaleza; tiene un precio accesible y se recicla de forma indefinida; forma aleaciones para mejorar las prestaciones mecánicas y es resistente a la corrosión y oxidación.

El cobre (Cu) es maleable y dúctil, un excelente conductor del calor y la electricidad, y su capacidad funcional se altera muy poco con la exposición al aire seco. Si se encuentra en una atmósfera húmeda con anhídrido carbónico, se cubre con una capa verde de carbonato. Distribución y usos El cobre se encuentra principalmente en forma de compuestos minerales en los que el  $^{63}\text{Cu}$  constituye el 69,1 % y el  $^{65}\text{Cu}$  el 30,9 % del elemento.<sup>5</sup>

### **2.4.1. Distribución y usos**

El cobre está ampliamente distribuido en todos los continentes y forma parte de la mayoría de los organismos vivos. Aunque se han descubierto algunos depósitos naturales de cobre metálico, generalmente se extrae en forma de sulfuros, como es el caso de la covelita ( $\text{CuS}$ ), la calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la bornita ( $\text{Cu}_3\text{FeS}_3$ ); o de óxidos, como la malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ); la crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y la calcantita ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Debido a sus propiedades eléctricas, más del 75% del cobre que se produce se utiliza en la industria eléctrica. Entre otros usos de este metal se encuentra la fabricación de cañerías para el agua, material para techumbres, baterías de cocina, equipos químicos y farmacéuticos y producción de aleaciones de cobre.<sup>5</sup>

### **2.5. Grafito (electrodo cátodo)**

Se trata de un mineral considerado de carbono casi puro, de brillo metálico y color negro algo graso al tacto. El grafito procede de las rocas carbonosas que han sufrido metamorfismo, se extrae de esta forma de las minas, más predominante en Asia. En el grafito los átomos de carbono están fuertemente unidos en el plano mediante enlaces covalentes, configurando capas (planos basales). Estas capas están apiladas paralelamente y unidas entre sí por fuerzas de Van der Waals, más débiles. Para ser más precisos, la distancia entre planos basales es de 0.335 nm. Cuando se habla de grafito lo más indicado es utilizar el término capa, y el de lámina cuando esa capa ya está aislada y constituye el grafeno propiamente dicho. Los grafitos se pueden dividir en dos grandes grupos de acuerdo con su origen, natural o sintético.<sup>6</sup>

#### **2.5.1. Tipos de grafito naturales**

El grafito natural es el producto de la recristalización metamórfica de la materia orgánica contenida en las rocas. Cuando este proceso se produce sobre capas de carbón, o sobre rocas que contienen hidrocarburos líquidos, es decir, petróleo, se generan yacimientos que también pueden tener origen volcánico o hidrotermal. El grafito natural es relativamente abundante en

la naturaleza, constituido mayoritariamente por carbono en un 80% – 90% y presenta impurezas inorgánicas de distinta naturaleza (sílice, alúmina, óxido férrico, etc.), que se eliminan mediante procesos de flotación en disolventes. Si se requiere un mayor grado de pureza, deben utilizarse tratamientos químicos. Sus propiedades y composición vienen determinados por su localización geológica.<sup>6</sup>

Se presenta en tres formas: grafito cristalino en escamas, flake en inglés, grafito cristalino de veta (término reservado a un grafito especial que procede de Sri Lanka) y grafito amorfo (denominación algo errónea si se considera que tiene cierto grado de orden estructural, con cristales de pequeño tamaño). Otras clasificaciones se limitan a considerar solo dos tipos de formas de grafito: microcristalino (integrado por escamas y cristales de tamaño relativamente pequeño) y macrocristalino (integrado por escamas y cristales de mayor tamaño). El grafito cristalino en escamas, el utilizado principalmente en la preparación de grafeno, está constituido por partículas discretas en forma de placas planas con bordes angulosos, redondeados o irregulares. Se encuentra en rocas metamórficas como el mármol gneiss, el cuarzo o la mica. Su contenido en carbono es del 70% al 96%.<sup>6</sup>

### **2.5.2. Tipos de grafito sintéticos**

Los grafitos comerciales tradicionales son poligranulares, palabra que incluye a todos los grafitos sintéticos compuestos de granos que pueden distinguirse claramente en un microscopio, siendo el de tipo Achson y los isótropos los más habituales.<sup>6</sup>

El grafito isótropo se utiliza en la fabricación del grafito moldeado. Para su obtención se calienta una mezcla de coque y un aglomerante (brea de alquitrán de hulla o de petróleo, habitualmente) a baja temperatura (~ 150 °C) para que funda el aglomerante y se mezclen; esta mezcla se prensa, se carboniza y se grafitiza. Finalmente, puede tener lugar un proceso de mecanizado.<sup>6</sup>

El grafito pirolítico también es un grafito sintético que se obtiene mediante el depósito de carbono a partir de un hidrocarburo gaseoso (metano, acetileno, etileno) a temperaturas superiores a 1.800 °C (proceso que se conoce como CVD, Chemical Vapour Deposition) o por

tratamiento térmico de grafitización de un material de carbono pirolítico previamente preparado. Este tipo de grafitos presentan un alto grado de orientación cristalográfica. Si el grafito pirolítico se trata, a su vez, a temperaturas superiores a 2.500 °C y bajo presión da lugar a un grafito pirolítico con una estructura cristalina aún más orientada que recibe el nombre de grafito pirolítico altamente orientado (HOPG, Highly Oriented Pyrolytic Graphité). Este tipo de grafito es fácilmente exfoliable y genera unas láminas de grafeno de gran calidad. El principal inconveniente es la pequeña cantidad que se obtiene mediante este procedimiento.<sup>6</sup>

### **2.5.3. Propiedades del grafito**

Puede ser considerado un buen conductor del calor en la dirección paralela a los planos basales, mientras que en la dirección perpendicular su conductividad cae de manera importante y se comporta como un aislante térmico.<sup>6</sup>

La expansión térmica depende también de la fortaleza del enlace atómico, por lo que en la dirección de los planos basales es baja, inferior a la de la mayor parte de los materiales, mientras que en la dirección perpendicular, donde los enlaces son más débiles, la expansión térmica supera a la anterior en un orden de magnitud.

Las propiedades eléctricas también varían considerablemente, siendo un buen conductor eléctrico en la dirección paralela a los planos y un aislante en la perpendicular. Una propiedad muy importante del grafito con relación a la producción de grafeno es que se deslaminan fácilmente en la dirección perpendicular a los planos, donde la fuerza de los enlaces es baja, mientras que en el plano basal su ruptura es difícil.

El grafito es uno de los materiales más inertes, siendo resistente a la mayoría de los ácidos, bases y agentes corrosivos. La principal excepción a su excelente resistencia química son los elementos del grupo 16 del sistema periódico (oxígeno, azufre, selenio y telurio), con los que reacciona a temperaturas superiores a 400 °C.<sup>6</sup>

## 2.6. Electrolisis del agua

Es la separación de elementos o compuestos de un producto de partida, mediante el paso de una corriente eléctrica continua en una celda electroquímica. Para que la corriente eléctrica pueda circular, en la celda electroquímica debe haber iones, para lo cual debe haber un electrolito fundido o disuelto en agua.<sup>7</sup>

En el caso de la electrolisis del agua, es tradicional utilizar ácido sulfúrico diluido, o sulfato de sodio diluido, para liberar hidrógeno y oxígeno en el cátodo (polo -) y el ánodo (polo +) respectivamente.<sup>7</sup>

### 2.6.1. Principio

Una fuente de alimentación eléctrica está conectada a dos electrodos, o dos placas (por lo general hechas de un metal inerte como el platino o acero inoxidable) que se colocan en el agua. En una celda diseñada correctamente, el hidrógeno aparece en el cátodo (el electrodo con carga negativa, donde los electrones entran en el agua), y el oxígeno aparecerá en el ánodo (el electrodo con carga positiva). Suponiendo el ideal de Faraday de eficiencia, la cantidad de hidrógeno generado es el doble del número de moles de oxígeno, y ambos son proporcionales al total de carga eléctrica llevada a cabo por la solución. Sin embargo, en muchas células compiten reacciones secundarias dominantes, dando lugar a diferentes productos y menos de la eficiencia Faraday ideal. La electrólisis del agua pura requiere el exceso de energía en forma de sobretensión para superar la activación de diversas barreras. Sin el exceso de energía de la electrólisis del agua pura se produce muy lentamente o nada. Esto se debe en parte a la limitada auto-ionización del agua. El agua pura tiene una conductividad eléctrica cerca de una millonésima de agua de mar. Muchas celdas electrolíticas también pueden carecer de la necesaria electrocatalizadores. La eficacia de la electrólisis se incrementa a través de la adición de un electrolito (tales como sal, un ácido o una base) y el uso de electrocatalizadores.<sup>7</sup>

### 2.6.2. Ecuaciones

En el agua el cátodo es cargado negativamente, una reducción de la reacción se lleva a cabo, con los electrones ( $e^-$ ) desde el cátodo está dando a los cationes de hidrógeno para formar gas hidrógeno (la semirreacción balanceada con ácido):<sup>7</sup>

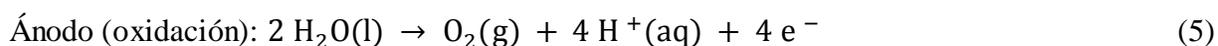
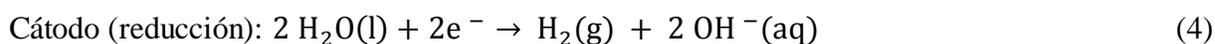
Reducción en el cátodo:



En el ánodo cargado positivamente, una oxidación produce la reacción, la generación de gases de oxígeno y dando electrones hacia el ánodo para completar el circuito:<sup>7</sup>



Las reacciones también pueden ser equilibradas con las bases que se enumeran a continuación. No todas las reacciones medias deben ser equilibradas con el ácido o base. Muchos lo hacen como la oxidación o reducción de agua figuran en esta lista.<sup>7</sup>



## **2.7 Reactores electroquímicos y su comportamiento**

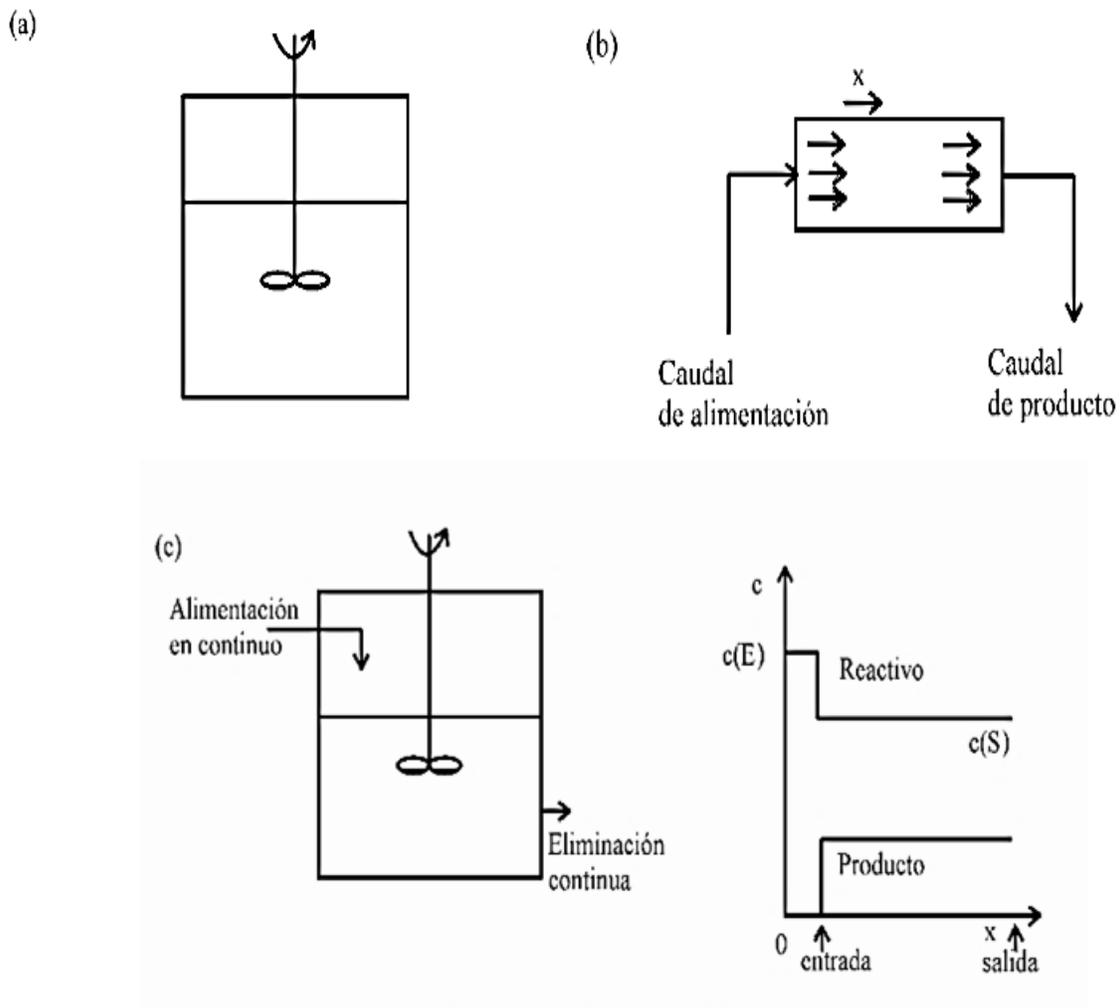
La ingeniería electroquímica o ciencia y tecnología de los procesos electroquímicos, surge cómo una rama de la Ingeniería Química a principios de los años setenta y desde entonces constituye una disciplina plenamente establecida<sup>8</sup>. Con el objetivo de predecir o racionalizar el comportamiento de un reactor electroquímico, es útil adoptar un modelo simple. Dicho modelo conlleva una clasificación del reactor y las divisiones están normalmente relacionadas con el número de fases presentes, el modo de operación, las condiciones de flujo dentro del reactor y las condiciones de temperatura. Los reactores electroquímicos son heterogéneos en el sentido de que la reacción siempre ocurre en la interfase electrodo/electrolito. Con respecto a las condiciones de flujo dentro de un reactor, se pueden considerar los casos límite de un reactor de baño simple (RBS), un reactor flujo-pistón (RFP) o reactor continuo de tanque agitado (RCTA).<sup>9</sup>

### **2.7.1. El reactor de baño simple**

Este tipo de reactor se carga con reactivos y el electrolito se agita continuamente durante un periodo de tiempo en el cual tiene lugar la reacción. Luego el electrolito se descarga del reactor y el producto puede ser aislado, bien por tratamiento del electrolito o retirándolo del

electrodo. Durante la operación de baño, la concentración de reactivos y productos cambiará progresivamente con el tiempo de una manera determinada por la cinética de la reacción, la geometría del electrodo, las condiciones de flujo y el volumen del electrolito. No obstante, en cualquier instante, la composición del electrolito es uniforme a través del reactor.<sup>9</sup>

La operación de baño es discontinua y tiende a ser intensamente laboriosa debido a la necesidad de carga, descarga (y a veces limpieza) del reactor durante la secuencia del proceso. Se tiende a utilizar en los siguientes casos:



**Figura 3:** Tipos ideales de reactores químicos. (a) reactor de baño simple (RBS). (b) reactor flujo pistón (RFP). (c) reactor continuo de tanque agitado (RCTA).

- i. Durante el desarrollo de procesos, de tal forma que se pueda estudiar la cinética del reactor en un amplio rango de concentraciones de reactivos y productos y se lleven a cabo estudios paramétricos con el mínimo consumo de reactivos químicos.
- ii. Cuando no son adecuados sistemas de flujo sofisticados debido a la toxicidad o coste del electrolito, reactivo o producto.
- iii. Donde se necesita desarrollar electrolisis a intervalos intermitentes debido a las demandas del proceso o imperativos del mercado.<sup>9</sup>

### **2.7.2. El reactor flujo pistón**

Este reactor de flujo continuo, también llamado reactor de tubo, opera con concentraciones en estado estacionario. La mezcla reactiva fluye a velocidad constante a través del reactor y el producto (junto con el reactivo no convertido) salen continuamente. No hay mezcla del electrolito en la dirección del flujo entre la entrada y la salida. Las concentraciones de reactivo y producto son función de la distancia entre la entrada y salida. Muchos reactores reales se aproximan bien al comportamiento RFP y entre los ejemplos destacan la geometría cilíndrica concéntrica con electrodos estáticos, las células filtro-prensa de placas paralelas y muchas células de electrodos tridimensionales porosos.<sup>9</sup>

### **2.7.3. El reactor continuo de tanque agitado**

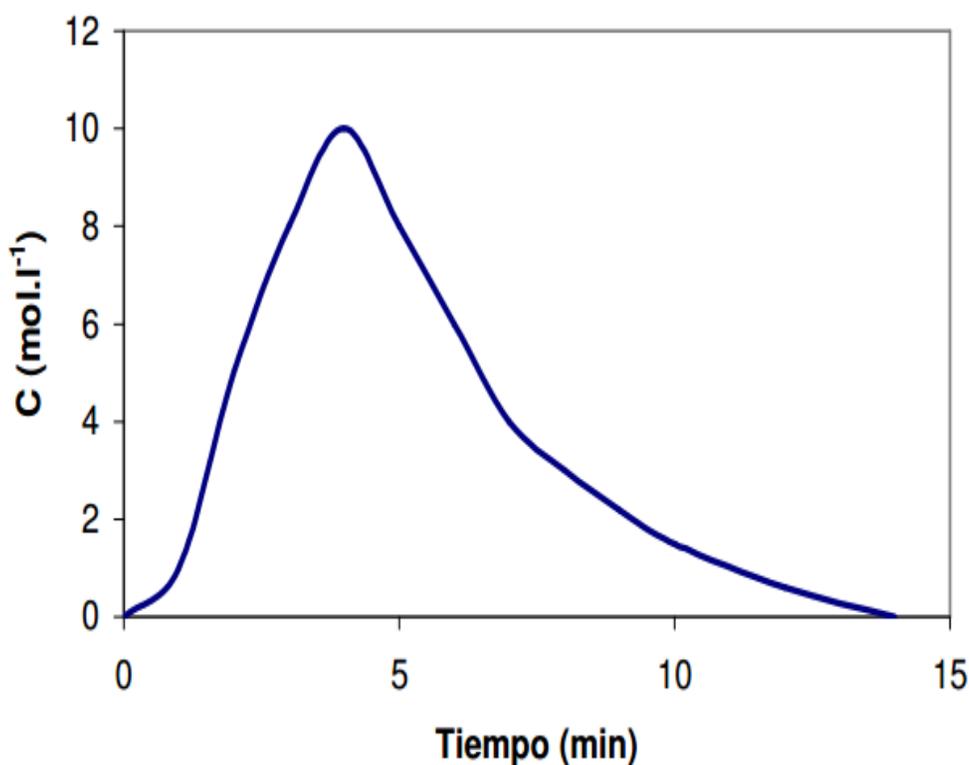
El RCTA o reactor de retomezcla consiste en un flujo de electrolito continuo a través de un tanque con agitación perfecta. El reactivo se añade continuamente a la entrada y el producto (junto con reactivo no convertido) se retira continuamente a la salida. Debido a la mezcla perfecta en el reactor, la concentración de las especies en la salida es idéntica a la de dentro del reactor. Por lo tanto, los cambios de concentración tienen lugar en realidad entre la corriente de entrada y el reactor. Las condiciones de electrolito perfectamente agitado dentro de un RCTA requieren un movimiento relativamente vigoroso entre el electrodo y el electrolito.<sup>9</sup>

#### 2.7.4. Estudios realizados con reactores electroquímicos

Una breve descripción de algunos estudios referentes a los reactores se menciona a continuación:

En el 2013, Henry Reyes y sus colaboradores estudiaron el comportamiento de un reactor electroquímico a escala piloto de compartimentos separados por separadores cerámicos, con una configuración de tipo filtro prensa, el cual fue aplicado para la recuperación de cromo hexavalente, procedente de la industria del metalizado de plásticos.<sup>10</sup>

En una entrada por impulso, cierta cantidad de trazador  $N_0$  se inyecta repentinamente y en una sola ocasión en la corriente de alimentación en el reactor, tardando el menor tiempo posible. Posteriormente se mide la concentración a la salida en función del tiempo. La curva de concentración típica a la salida del reactor frente al tiempo se conoce como curva C, y un ejemplo típico se muestra en la figura 3.<sup>10</sup>



**Figura 4:** Curva C. Curva de concentración típica a la salida del reactor. Se graficó la concentración en  $\text{molL}^{-1}$  en el eje “y” versus el tiempo en minutos en el eje “x”.

Para determinar el tiempo medio de residencia del reactivo dentro del reactor es necesario calcular el área que hay debajo de la curva C:

$$A = \int_0^{\infty} C dt \cong \sum_i C_i \Delta t_i = \frac{M}{v} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (6)$$

Mientras que el tiempo medio de residencia:

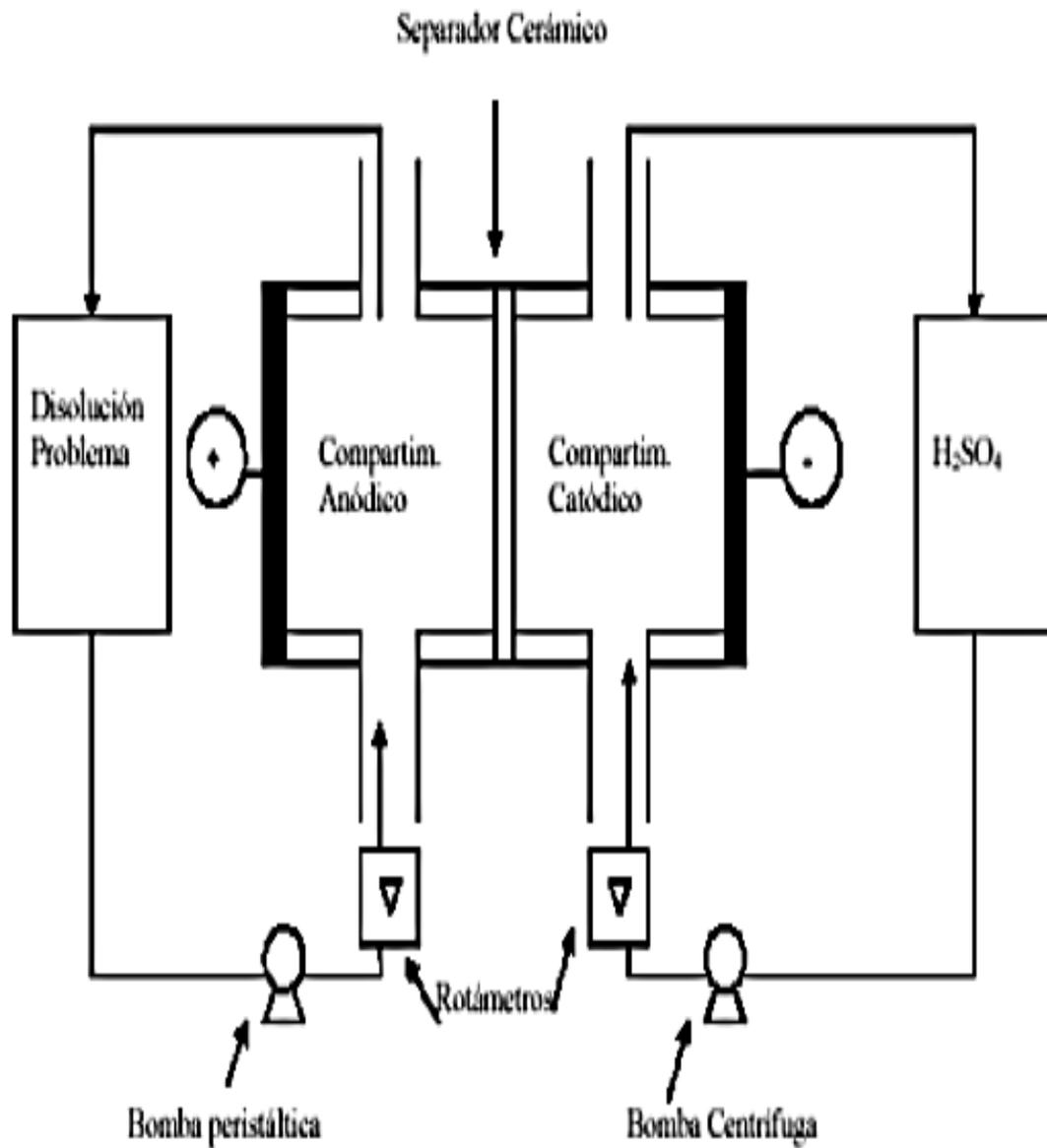
$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \cong \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} = \frac{V}{v} \quad (\text{s}) \quad (7)$$

En donde el tiempo medio de residencia se representa por  $\bar{t}$ ,  $C$  es la concentración,  $V$  es el volumen del reactor,  $v$  el flujo volumétrico de entrada del fluido y  $\Delta t$  es el diferencial del tiempo en el cual, la inyección del flujo no debe tardar más de un período muy corto en comparación con los tiempos de residencia en los distintos segmentos del reactor o sistemas de reactores, y debe haber una dispersión insignificante entre el punto de inyección y la entrada del sistema del reactor.<sup>10</sup>

**Montaje experimental:** La figura 4 muestra el montaje experimental cuando se utiliza el reactor con dos compartimentos. El montaje consta de dos tanques de almacenamiento de las disoluciones de trabajo, que se tratan de una disolución de NaCl 0.1 M para las experiencias de determinación de la distribución de tiempos de residencia, o de una disolución procedente de un baño de mordentado agotado real (disolución problema), que se alimenta en el compartimento de oxidación del reactor, y de una disolución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 M que se alimenta en el compartimento catódico, cuando el reactor piloto se aplica a la regeneración de los baños de mordentado agotados. Las disoluciones se alimentan al reactor mediante una bomba centrífuga de teflón y una peristáltica, y los caudales se miden mediante sendos rotámetros provistos de válvulas que permiten regular el caudal de cada disolución.<sup>10</sup>

El reactor de dos compartimentos, se realizó pruebas a voltajes constantes de 5 y 7.5 V. Todos los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente. El separador cerámico utilizado es de

forma cuadrada y dimensiones 13.6 x 13.6 cm con espesor, *de* 0.7 cm. Su composición es: 50.5 % caolín, 49.5 % alúmina.<sup>10</sup>



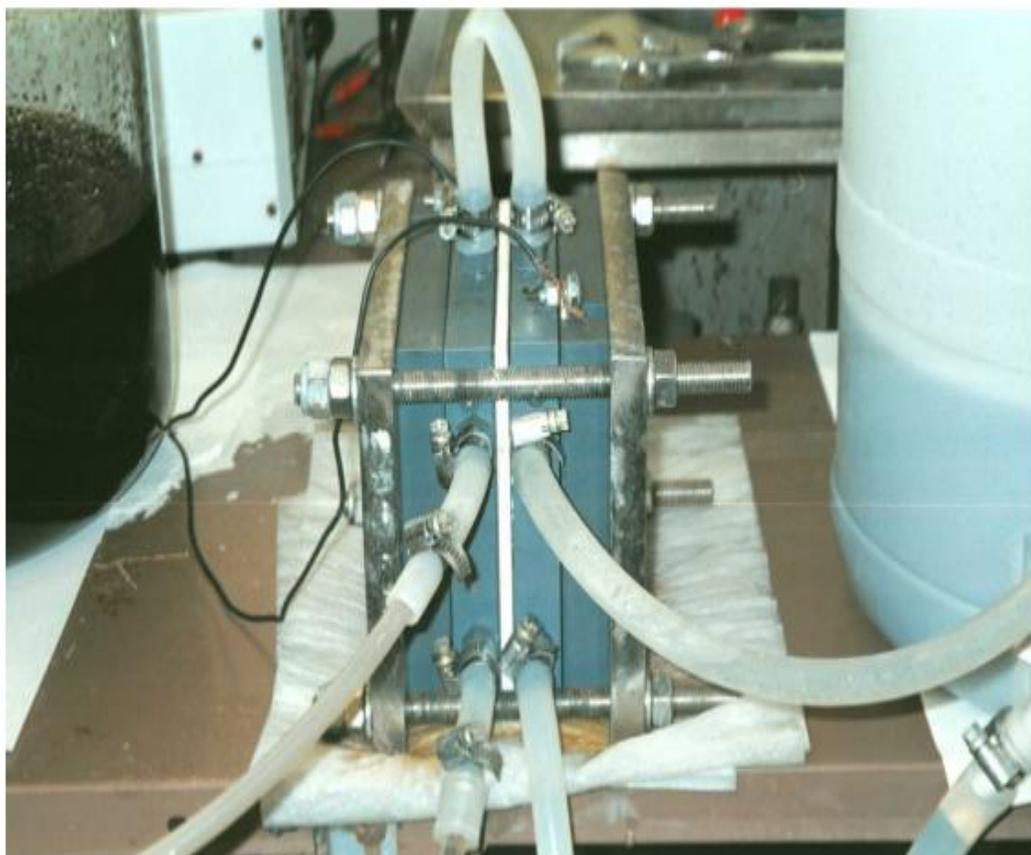
**Figura 5:** Esquema del montaje experimental con dos compartimentos y un separador cerámico.

Se llevó a cabo experiencias de voltajes constantes de 5 y 7.voltios. Todos los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente. El separador cerámico utilizado es de forma cuadrada con dimensiones de 13.6 x 13.6 cm y un espesor de 0.7 cm.<sup>10</sup>

**Procedimiento experimental:** Para la determinación de la (DTR), se utilizó agua de red que circulaba de forma continua en el reactor y en un momento determinado, a la entrada del compartimento anódico se introducían 1 ml de una disolución de NaCl 0.1 M por la parte inferior del reactor, en forma de impulso mediante una jeringuilla, midiéndose la evolución de la conductividad de la disolución a la entrada y a la salida del reactor de forma continua mediante un sistema de adquisición de datos. Estas experiencias se llevaron a cabo a varios caudales comprendidos entre 6 y 60 L/h. Se utilizaron tres tipos de promotores de turbulencia: bolas de vidrio de 3 mm de diámetro, bolas de vidrio de 5 mm de diámetro, y partículas de grafito de forma irregular y 5 mm de diámetro medio. Estas experiencias permitieron seleccionar los promotores de turbulencia y el caudal de trabajo que garanticen una distribución de electrolito uniforme y una distribución de corriente uniforme dentro del reactor.

En el caso del reactor de tres compartimentos los electrodos se podrían configurar de forma monopolar o bipolar. Se ha optado por la configuración monopolar para tener polarizado siempre los electrodos desde la fuente de alimentación y evitar que una de las caras del electrodo central se pasive o sea inactiva desde el punto de vista de la reacción electroquímica.

Los dos compartimentos anódicos se conectan al polo positivo y el electrodo del compartimento catódico se conecta al polo negativo. Conexiones eléctricas reactor electroquímico con dos separadores cerámicos. Además, los electrodos se conectan a la fuente de alimentación de corriente continua en paralelo, de tal forma que la intensidad aplicada es aproximadamente el doble a la obtenida cuando se trabaja con la configuración de dos compartimentos, mientras que el voltaje obtenido entre ánodo y cátodo es similar al aplicado cuando se trabaja con la configuración de dos compartimentos.<sup>10</sup>



**Figura 6:** Esquema del reactor electroquímico tipo filtro prensa a escala piloto.

En el 2004, Ángel Frías-Ferrer y sus colaboradores se centraron en obtener una mayor comprensión de la importancia del tamaño en los reactores electroquímicos filtro prensa a escala laboratorio a la hora de realizar posibles escalados y efectos de entrada y salida. Los investigadores mencionan que se debe considerar una serie de aspectos de similaridad entre la célula pequeña y el tamaño deseado (geometría, forma y tamaño, mecánica de fluidos, distribución de concentraciones, composición química de los reactivos, distribuciones de corriente y transferencia de calor).<sup>11</sup>

Este procedimiento se encuentra muy bien documentado e implica el estudio de una reacción electroquímica controlada por el transporte de materia. En el electrodo de trabajo la reacción viene dada por:

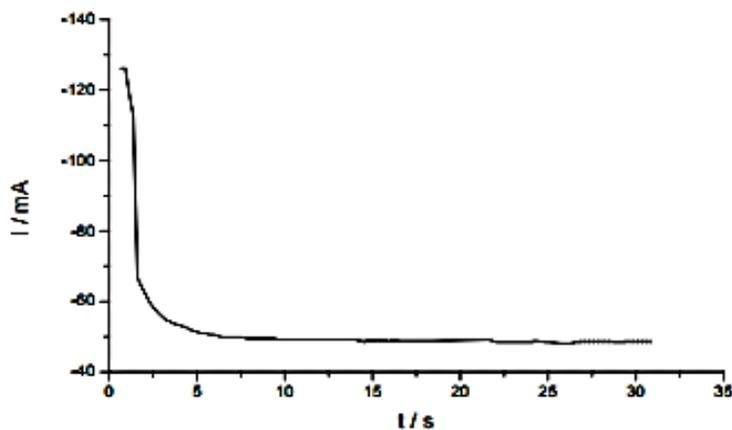


En donde **Ox** es la especie oxidada en el seno de la disolución, **n** es el número de electrones transferidos y **Red** es la especie reducida.<sup>11</sup>

Usando la ecuación (9) se puede obtener fácilmente el valor del coeficiente de transporte de materia  $k_m$  ( $\text{m s}^{-1}$ )

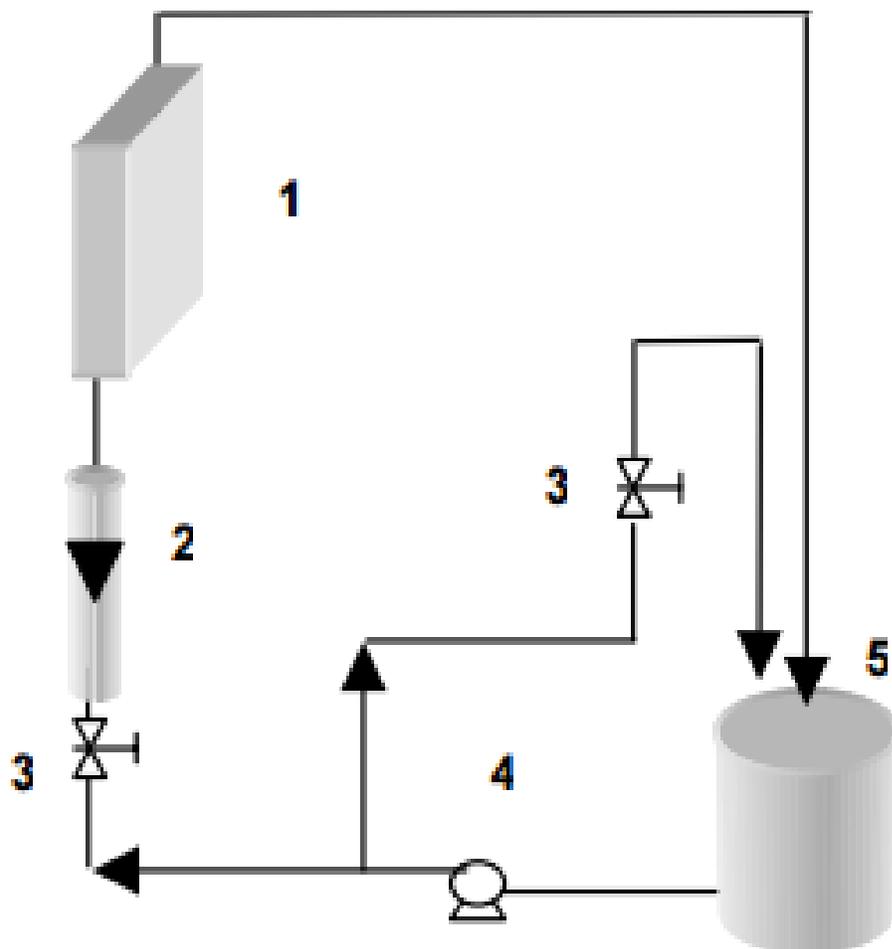
$$k_m = \frac{I_L}{A \cdot n \cdot F \cdot c} = \frac{D}{\delta_N} \quad (9)$$

En donde  $A$  es el área del electrodo ( $\text{m}^2$ ),  $n$  el número de electrones transferidos,  $F$  la constante de Faraday ( $96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $c$  la concentración de las especies reaccionantes ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $I_L$  es la corriente límite (A),  $D$  el coeficiente de difusión de las especies reactivas ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) y  $\delta_N$  el espesor de la capa de difusión de Nernst. Por tanto, el valor de  $k_m$  depende directamente del espesor  $\delta_N$ , y por medio de corriente límite  $I_L$  esta ligada directamente por  $k_m$ . En sistemas turbulentos el valor de  $k_m$  será superior que en sistemas laminares ya que  $\delta_N$  será menor. Esto implica que el estudio de las intensidades límite a diferentes caudales de flujo de electrolito nos permitirá saber si el sistema estará operando en condiciones más o menos turbulentas, ya que se podrán comparar valores de  $k_m$ , a mayor  $k_m$  mayor turbulencia. Al comienzo de cada experimento se observará que la corriente alcanza valores muy elevados, debidos a procesos no-farádicos e inmediatamente decaerá hasta un valor estable de  $I_L$ .<sup>11</sup>



**Figura 7:** Clásica curva  $I$  vs.  $T$  para la determinación de  $I_L$ .

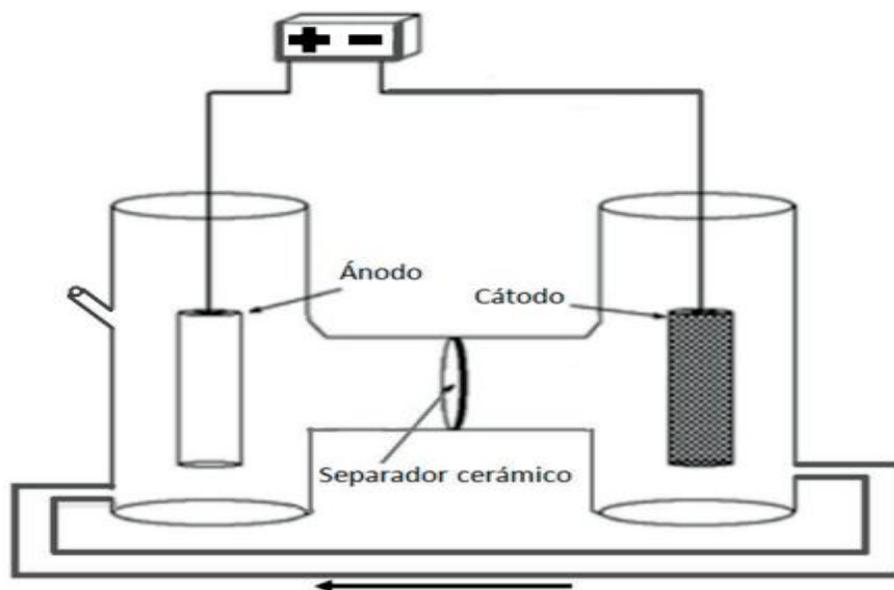
**Procedimiento:** Se realiza el montaje experimental del sistema y del reactor filtro prensa. Se procede a preparar una disolución de  $\text{CuSO}_4$  150 ppm y se llena el depósito con ella. Se acciona la bomba y se fija un caudal de trabajo. Conviene comenzar a trabajar desde caudales inferiores hasta caudales superiores. Una vez fijado el caudal se realiza la experiencia de salto potencioestático (-500 mV vs SCE). Se registra la curva de I vs tiempo. Acto seguido aumentamos el caudal y se repite el salto potencioestático. Una vez finalizado el ultimo caudal sometido a estudio se para el sistema y se procede a su vaciado y desmontaje del reactor. Se rellena ahora el compartimento de reacción con una clase de promotor de turbulencia y se repiten las experiencias de saltos potencioestáticos para diferentes caudales.<sup>11</sup>



**Figura 8:** Esquema del montaje hidráulico. 1) Reactor; 2) Caudalímetro; 3) Válvula; 4) Bomba; 5) Depósito.

En 2013, Luis Echeverri y Henry Reyes, investigaron que la técnica epitaxia en fase líquida, utilizada para elaborar películas semiconductoras de Ga, In, As y Sb, la cual genera, en promedio, un desecho de 1457 mg, constituido, en mayor proporción, por galio, indio y antimonio, que pueden ser recuperados por procesos electroquímicos. El propósito de la investigación fue reciclar y cristalizar estos metales puros a bajo costo, con cero productos de desechos metálicos en la fabricación de películas semiconductoras. Los estudios se llevaron a cabo en un reactor electroquímico de compartimentos separados, inyectando una solución trazadora de NaCl en el compartimento catódico, determinándose la conductividad a la entrada y a la salida del reactor.<sup>12</sup>

**Diseño de la celda:** El reactor electroquímico diseñado consta de dos compartimentos contruidos en vidrio, con una capacidad de 250 mL; los compartimientos fueron tubos de 60 mm de diámetro por 12 cm de altura, con flanches centrales, fondo redondo, desprendimiento inferior con olivas y desprendimiento superior izquierdo de diámetro interno 2 cm para la alimentación de la solución trazadora con abrazadera en policloruro de vinilo (PVC). Los compartimientos catódico y anódico están separados por membrana Nafion 117, para evitar mezcla de los productos de reacción en el cátodo y el ánodo, con migración selectiva del catión por depositar. La celda de electrodeposición se representa en la figura 5. Las ventajas de este reactor son la facilidad de funcionamiento y el bajo costo de los materiales utilizados.<sup>12</sup>

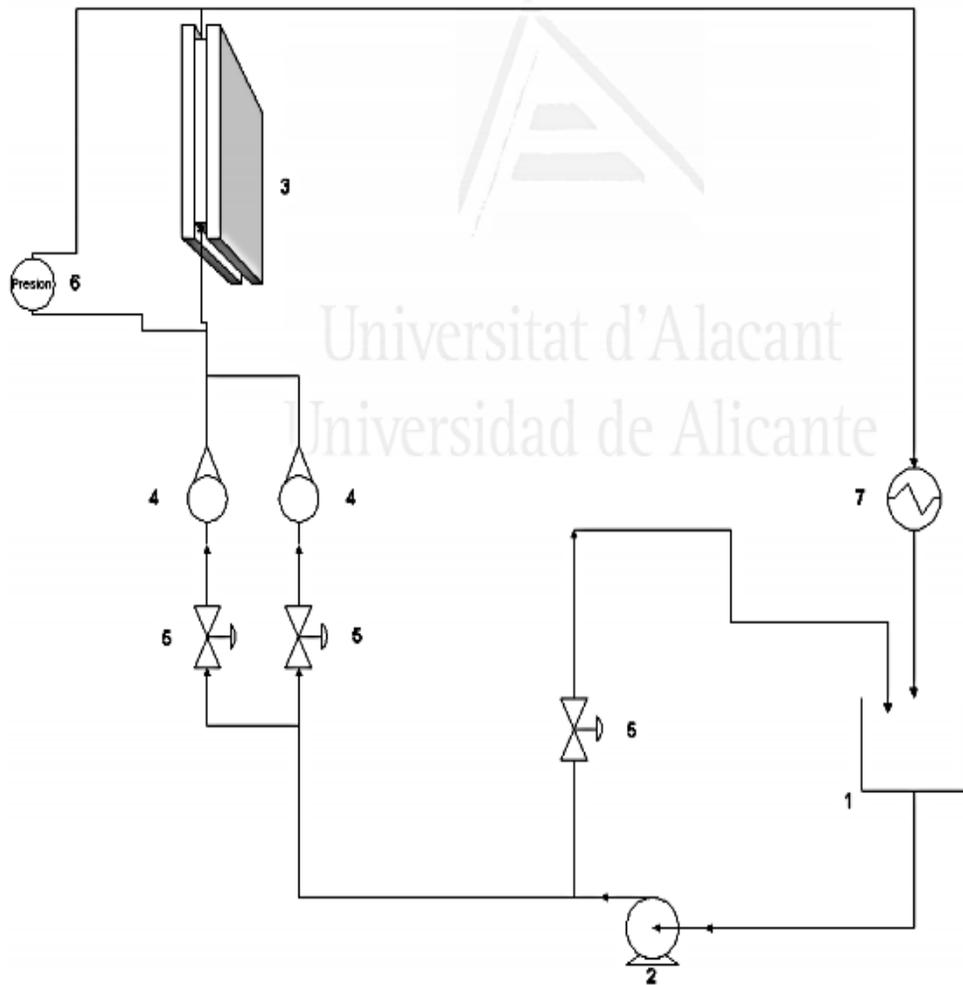


**Figura 9:** Reactor de electrodeposición para la recuperación de Ga, In y Sb.

**Electrodos:** El cátodo es una barra cilíndrica de grafito, de 8 cm de largo con 0,5 cm de diámetro, y el ánodo, de PbSn (5%) tratado previamente con una solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1 M durante dos días con el fin de obtener una película de óxido de plomo, fundamentalmente  $\text{PbO}_2$  sobre la superficie del electrodo, la cual es buena conductora de la corriente eléctrica y protege al electrodo de la corrosión. La geometría del ánodo es cúbica, con 8 cm de largo, 2 cm de ancho y 0.1 cm de espesor. Los electrodos se conectan a una fuente de alimentación para operar en modo potencioestático o en modo galvanostático. El compartimento anódico y el catódico se encuentran divididos por una membrana polimérica Nafion 117. Adicionalmente, los dos tanques están unidos a un sistema de recirculación por gravedad desde el compartimento catódico al anódico, para efectuar un máximo agotamiento de los cationes de interés en la solución electrolítica.<sup>12</sup>

**Electrolitos:** Las soluciones electrolíticas utilizadas en este estudio fueron: en el compartimento de reducción, 100 mL de ácido sulfúrico 95-97% P.A., suministrado por la casa científica Merk Colombia, y en el compartimento anódico, la aleación Ga, In y Sb (residuo del proceso epitaxial) en 100 mL de ácido sulfúrico 95-97% P.A. Para determinar la distribución de tiempos de residencia (DTR), se utilizó una solución trazadora de cloruro de sodio (NaCl) 0.1 M, adicionada en el compartimento anódico en forma de impulsos mediante una jeringa, y midiéndose la evolución de la conductividad a la entrada y a la salida del reactor electroquímico de forma continua por medio de dos conductímetros.<sup>12</sup>

En 2004, Ángel Frías Ferrer investigó a cerca de la optimización de la hidrodinámica de reactores electroquímicos tipo filtro prensa y es una de las más ampliamente utilizadas ya que permite el uso en diversas configuraciones adaptables a una gran variedad de procesos. Las ventajas que se tiene es de su sencilla construcción, el fácil uso y en su escaso mantenimiento.<sup>13</sup>



**Figura 10:** Diagrama del sistema experimental. (1) depósito; (2) Bomba centrífuga; (3) Reactor; (4) Caudalímetros; (5) Valvulas; (6) Manometro; (7) Intercambiador de calor.

Para los estudios de hidrodinámica los investigadores explican que se empleó la clásica técnica de impulso respuesta o técnicas de seguimiento de un trazador a la salida del compartimiento. Esta técnica consiste básicamente en la inyección de un pulso de trazador, que en el caso de ellos fue una disolución saturada de NaCl, a la entrada del reactor y un seguimiento a la salida del mismo de alguna propiedad medible de dicho trazador, utilizando la variación de la conductividad de la disolución a la salida del compartimiento. Para todo ello se utilizó una sonda de conductividad Ingold unida a un conductímetro Crison 522 y a un registrador analógico Philips PM833 X-t. Como líquido transportador del trazador se usó agua

destilada bombeada al interior del reactor por medio de una bomba centrífuga. Con el fin de controlar los caudales se usaron válvulas de membrana de polipropileno así como caudalímetros de sección variable, (rotámetros).<sup>13</sup>

Para los estudios de transporte de materia, tanto el electrodo de trabajo como el contraelectrodo fueron placas lisas de cobre de 2.5 mm de espesor. El electrolito era bombeado al sistema a través de una bomba centrífuga de arrastre magnético modelo MSE-EP-R (March May). Se usaron caudalímetros de área variable y válvulas de membrana de polipropileno para el control y medición del flujo. Para el control de la temperatura se usaron intercambiadores de vidrio así como sondas de Pt para las medidas de conductividad.<sup>13</sup>

Los experimentos de transporte de materia se realizaron usando las técnicas de corriente límite. Tanto el electrodo de trabajo como el contraelectrodo eran electrodos planos de cobre. Con el fin de determinar el factor de corrección se emplearon también parcialmente bloqueados. Estos electrodos parcialmente bloqueados presentan unas tiras de polímero no conductor de unos 4cm de longitud y anchura igual a la anchura del compartimiento en sus extremos entrada y salida. Como electrodo de referencia se usó un electrodo de calomelanos saturado (ECS). La reacción test empleada fue la reducción catódica de Cu (II) en una disolución 0.5 M de sulfato sódico.<sup>13</sup>

En la literatura se han realizado diversos trabajos que estudian los diferentes tipos de reactores, en esta investigación el diseño del reactor electroquímico está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito). La configuración más sencilla del reactor consiste en la utilización de los electrodos, ánodo y cátodo, sumergidos en una disolución conductora y ambos conectados externamente a través de un circuito eléctrico que incluye una fuente reguladora. Conociendo qué la oxidación se lleva a cabo en el ánodo, el cual puede ser de cobre con una cubierta de níquel para aumentar su eficiencia.

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

- Diseñar, construir y caracterizar un reactor electroquímico para la degradación del aceite mineral por medio de una corriente eléctrica, que oxida el material cambiando así su estructura.

#### **3.2. Objetivos específicos**

1. Diseñar y construir un reactor electroquímico.
2. Demostrar la degradación del aceite mineral utilizando un reactor electroquímico.
3. Determinar la ley de la velocidad de reacción del aceite mineral.

### **IV. HIPÓTESIS**

- A través de un reactor electroquímico se puede degradar el aceite mineral.

### **V. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **5.1. Universo**

Nuestro universo lo constituye el aceite mineral que fue degradada haciendo uso del reactor electroquímico.

## **5.2. Muestras**

Muestras de 1 mL de aceite mineral (aceite de motor), en solución de sulfato de sodio con una concentración al 3% para ser tratada por oxidación reducción.

## **5.3. Método de investigación**

Hipotético-Deductivo.

## **5.4 Clase de investigación**

Investigación aplicada y exploratoria.

## **5.5 Tipo de investigación**

Investigación cuantitativa.

## **5.6 Diseño experimental**

### **5.6.1 Dibujos del reactor electroquímico mediante el programa AutoCAD, para su construcción y caracterización.**

Las piezas del reactor se dibujaron por medio del programa AutoCAD, especificando las dimensiones que llevan cada una. Posteriormente se consiguieron los materiales para la construcción del reactor electroquímico. Se realizaron pruebas de su funcionamiento, existieron algunas fallas pero fueron analizadas y corregidas probando nuevamente el dispositivo. Cuando el reactor funcionó de forma esperada, se prosiguió a realizar el experimento.

### **5.6.2 Determinación de la ley de velocidad de reacción.**

Se tomaron muestras del aceite tratado a 1 mL en distintos tiempos (0, 4, 8, 12, 16, 20) horas, primero colocando una pequeña cantidad de sulfato de sodio al 3% en el reactor, luego depositando 100 mL del aceite mineral formando una mezcla heterogénea, después se llenó el tanque con el electrolito (sulfato de sodio al 3%), posteriormente es encendida la bomba, se observó a que el flujo llegara a los electrodos y cuando el electrolito sale por el orificio inferior del ánodo indica que es el momento de conectarlos a la fuente reguladora de 5 amperios, los electrodos son conectados por cargas opuestas, es decir, que el ánodo se conectó a la fuente de carga positiva y el cátodo a la carga negativa. Se esperó cuatro horas para sacar la muestra N° 1 de la reacción (1 mL), guardándolo en un tubo de ensayo con tapón. Se hizo extracción del aceite de la reacción con éter etílico. Tomando 5 mL de éter etílico y colocándolo en el tubo de ensayo que contiene el aceite (muestra N° 1) y se agitó la mezcla. Después se realizó un secado con sulfato de sodio, agregando 0.1 g de sulfato de sodio a la muestra N° 1 agitándolo nuevamente y dejando reposar por 20 minutos. Después se tomaron los espectros IR y UV-Vis. Para el análisis del UV-Vis: Se depositó 1 gota del extracto etéreo en 3 mL de agua destilada y se tomó el espectro. Para el análisis de IR: Se depositó 1 gota del extracto etéreo en el ATR y también se tomó el espectro. Se repitió el mismo procedimiento para las muestras restantes. Se utilizó el mismo aceite mineral para las demás muestras. Las concentraciones obtenidas en los espectrofotómetros del ultravioleta visible y del infrarrojo fueron los datos que se utilizaron para determinar la ley de velocidad de reacción haciendo uso del modelo matemático de mínimos cuadrados.

### **5.6.3 Procesamiento y análisis de datos.**

Se realizó una curva de calibración para una determinada longitud de onda; preparando solución estándar de concentraciones en partes por millón (ppm) que se graficaron utilizando los valores de concentración en el eje “x” versus la absorción en el “y”, obteniendo así la ecuación del gráfico (la pendiente y el intercepto) y la línea de tendencia, para encontrar  $\epsilon = m/1$ ; la absortividad encontrada fue de  $0.000001 \text{ ppm}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ; con las concentraciones del aceite mineral a los distintos tiempos de medición se calcularon utilizando la ley de Lambert-

Beer ( $C = \frac{A}{\epsilon l}$ ).

Después de establecer la ley de velocidad de reacción del aceite mineral, se procedió a calcular el tiempo de residencia del aceite en el sistema de reacción; para calcular el tiempo se utilizó la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C - \text{el } 20\% \text{ de } C}\right)}{k} \quad (10)$$

Donde:

$C_0$  = concentración inicial.

$C$  = concentración final.

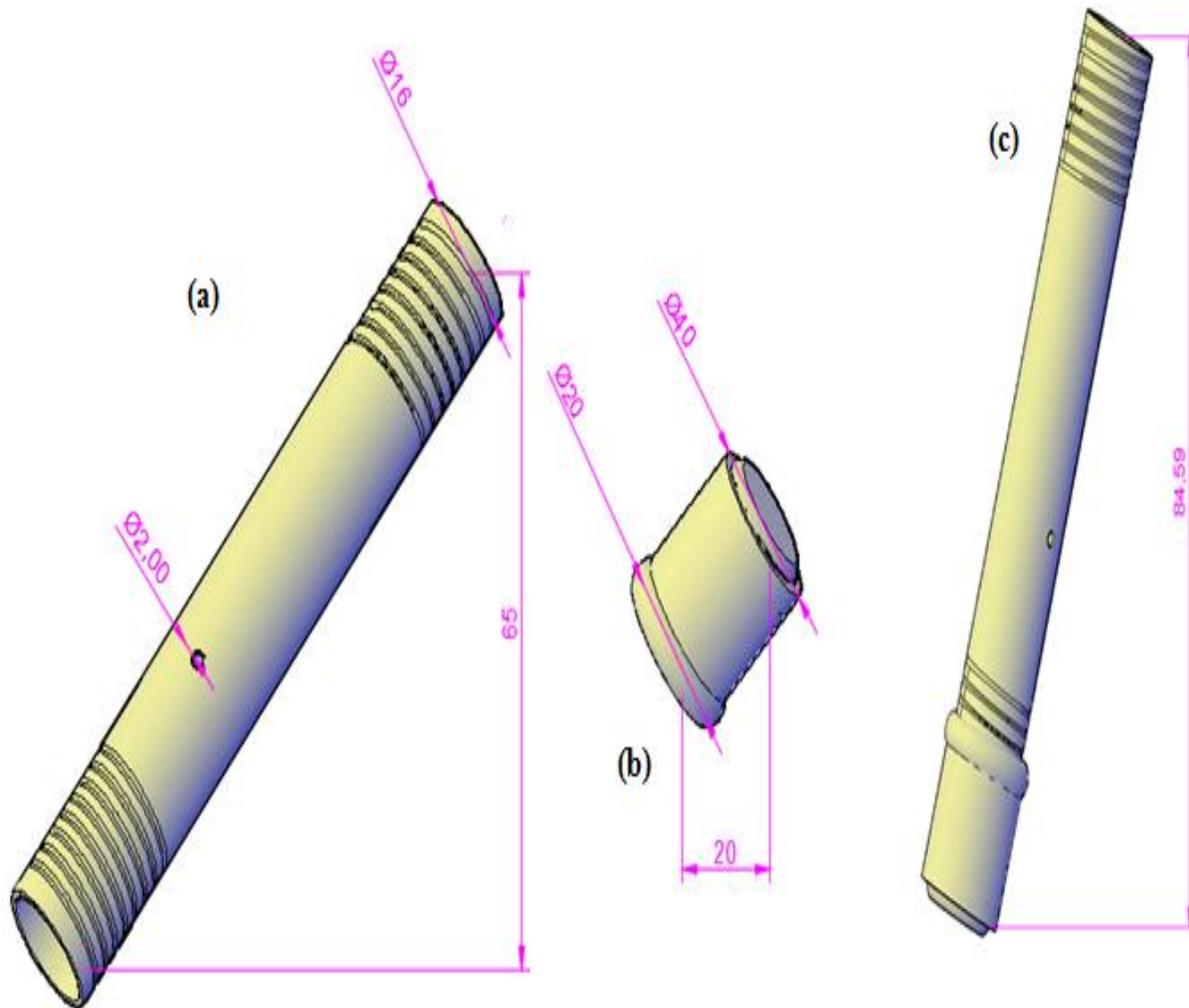
$k$  = constante de velocidad.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Piezas del reactor electroquímico dibujadas por medio del programa AUTOCAD.

#### 6.1.1 Electrodo Ánodo

El ánodo es un cilindro hueco para introducir el electrodo cátodo. Tiene una longitud de 65 mm con un diámetro de 16 mm. En el inferior del tubo tiene una perforación de 2 mm para la salida del gas oxígeno. Tanto el tapón como el cilindro serán del mismo material (cubiertas de níquel). El tapón se enrosca en la parte baja para evitar que el sulfato de sodio salga. Las medidas del tapón son las siguientes: longitud es de 20 mm, diámetro inferior es de 20 mm y superior es de 40 mm. En el lado superior del ánodo se pone el tapón de hule que contiene, la manguera de 3 mm, el alambre aislante del grafito (cátodo) y la varilla de vidrio hueca. El electrodo ánodo se coloca dentro del reactor.

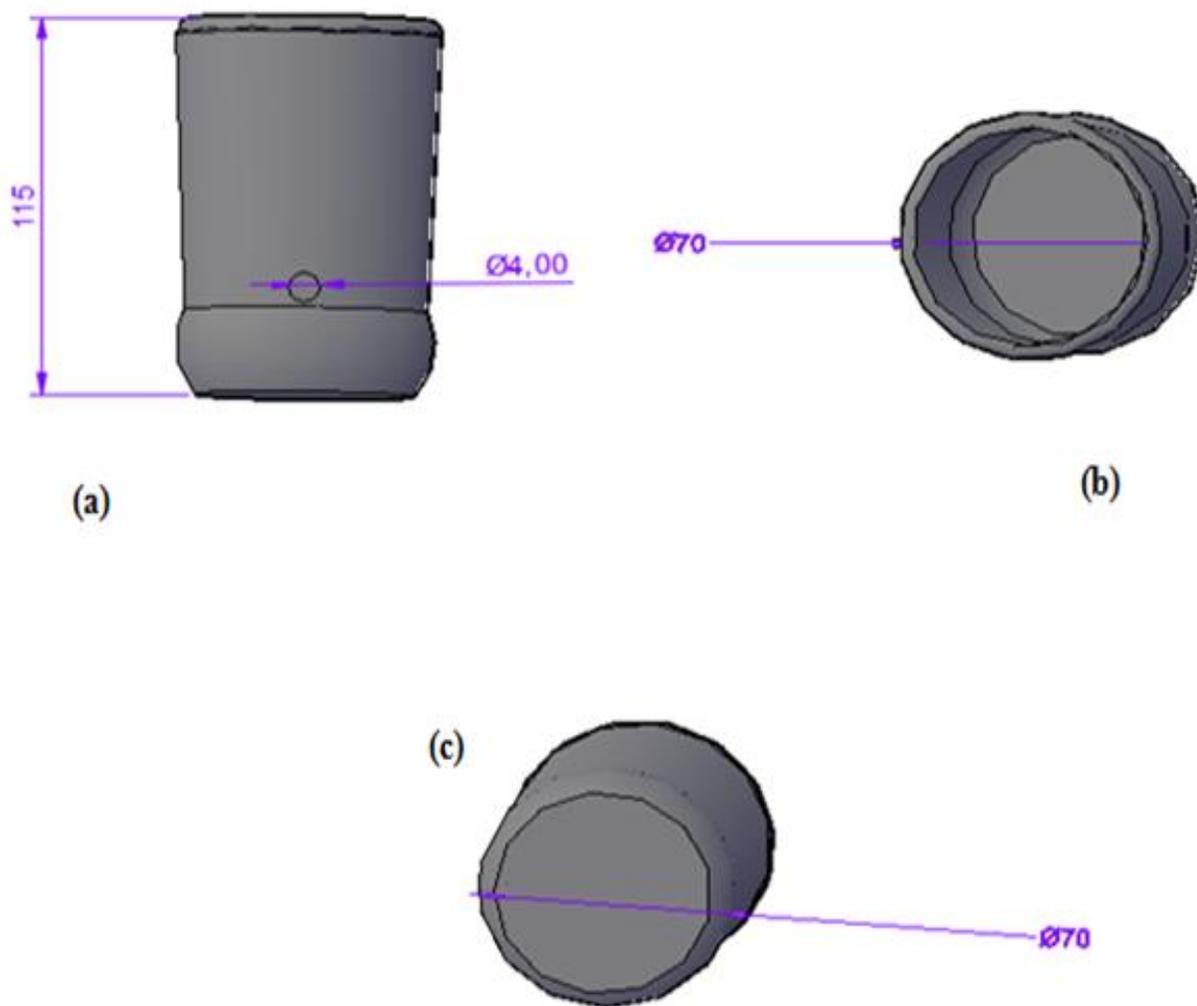


**Figura 11:** Esquema de un electrodo ánodo. (a) Tubo hueco de niple galvanizado; (b) tapón de niple galvanizado. (c) Pieza completa del electrodo ánodo.

### 6.1.2 Reactor

El reactor es cilíndrico heterogéneo, de estado estacionario. En donde se hace circular la fase acuosa que es el electrolito (sulfato de sodio al 3%) por medio de una bomba peristáltica. El reactor tiene una perforación en la parte inferior de 4 milímetros de diámetro, el cual, se coloca una manguera para el paso del electrolito (sulfato de sodio al 3%) hacia el filtro. Posee una altura de 115 mm y 70 mm de diámetro. En él se deposita 100 mL de aceite mineral y

posteriormente se le añade 100 mL de sulfato de sodio al 3%. El material del reactor es de policloruro de vinilo (PVC)  $(C_2H_3Cl)_n$ .

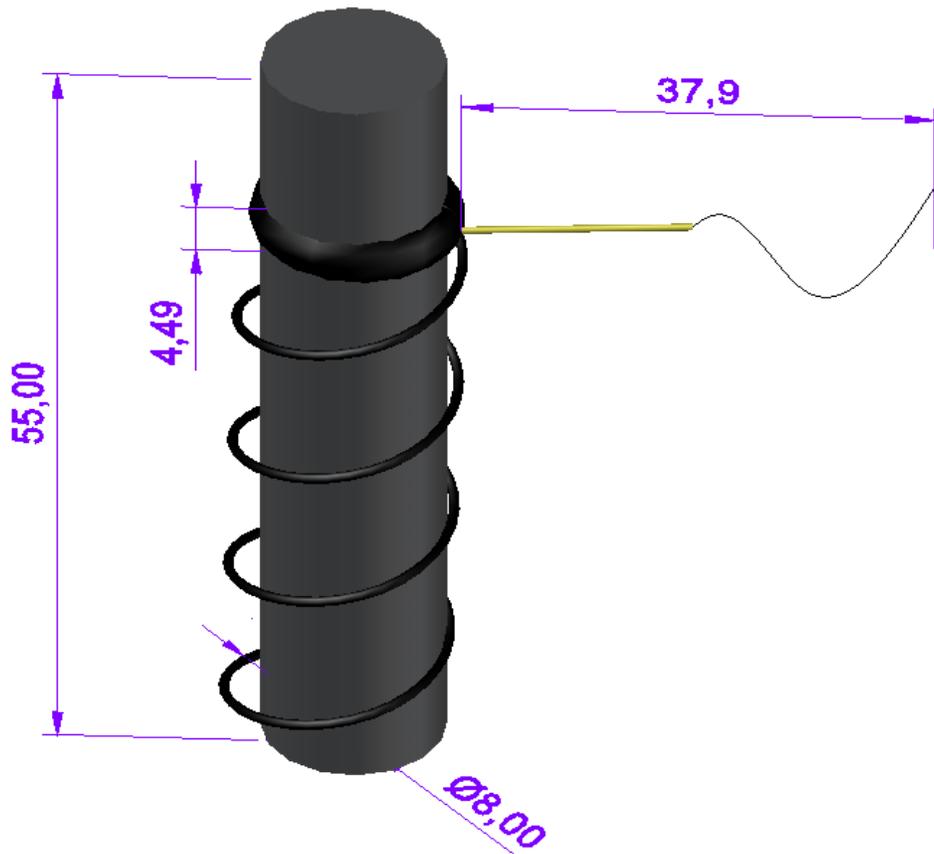


**Figura 12:** Esquema del recipiente de reacción del reactor. (a) Parte frontal del reactor; (b) Visita del interior del reactor; (c) Base del reactor con un diametro de 70 mm.

#### 6.1.4 Electrodo cátodo

El cátodo es una barra cilíndrica de grafito que mide 55 milímetros de largo y un diámetro de 8 mm. Está envuelta por un alambre aislante para evitar el contacto con el electrodo ánodo. En la parte de arriba se encuentra también un alambre aislante de 37.9 mm de largo y funciona

para conectarlo a la fuente reguladora. Ambos alambres están unidos por un pegamento de PVC con 4.49 mm de ancho.

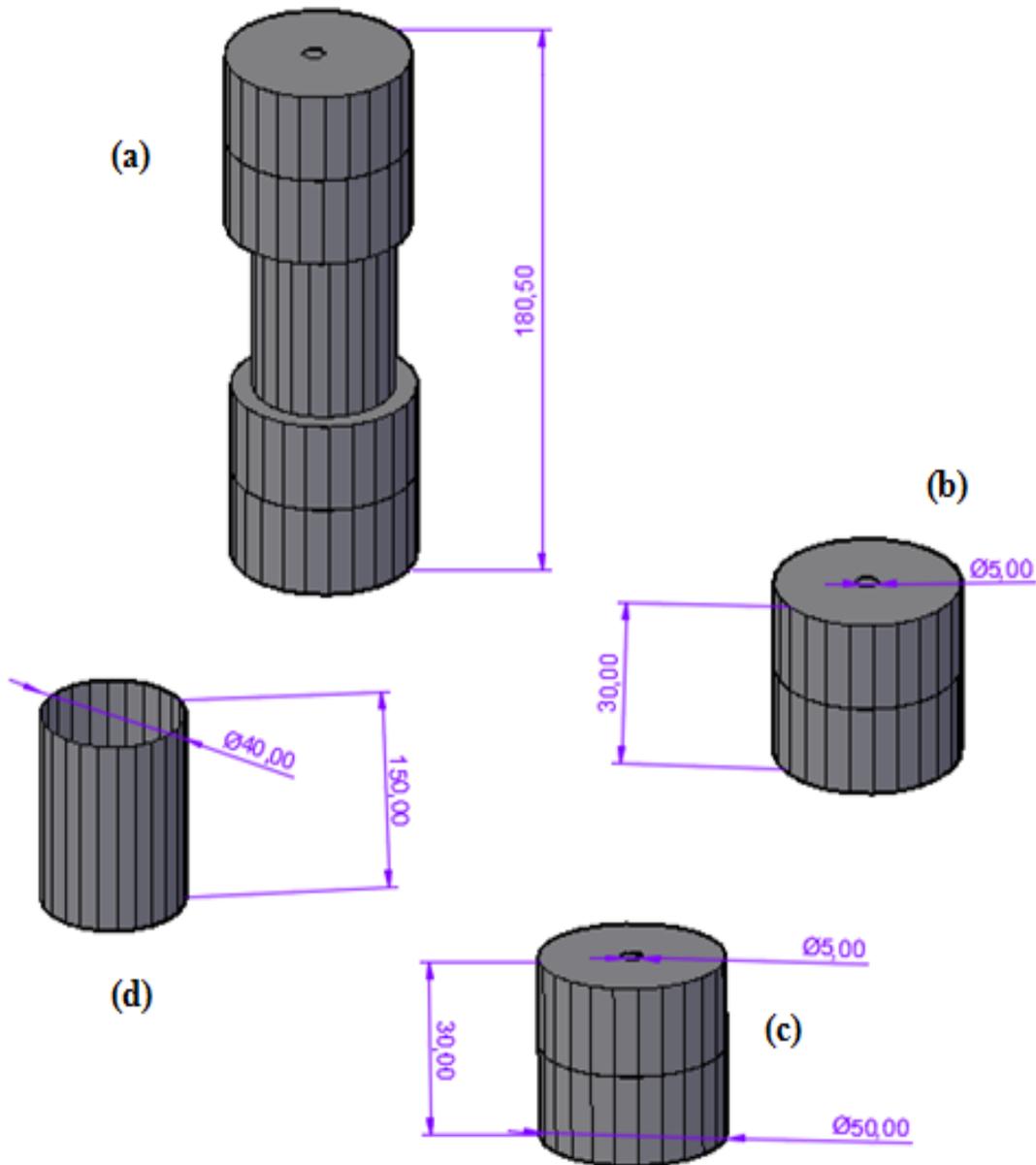


**Figura 13:** Esquema de un electrodo cátodo compuesto de grafito

### 6.1.9 Partes del filtro

El filtro está compuesto por dos tapones perforados de 5 mm cada uno, los tapones tienen las mismas dimensiones, es decir, que ambos tienen igual longitud y diámetro (30 mm y 50 mm) como se muestra en la figura. La geometría del cilindro hueco es de 150 mm de largo y 40 mm de diámetro, cuando se unen las piezas alcanza una altura de 180.50 mm. En la parte superior se coloca una manguera de 3 mm para la entrada del flujo con sedimentos, en el interior del

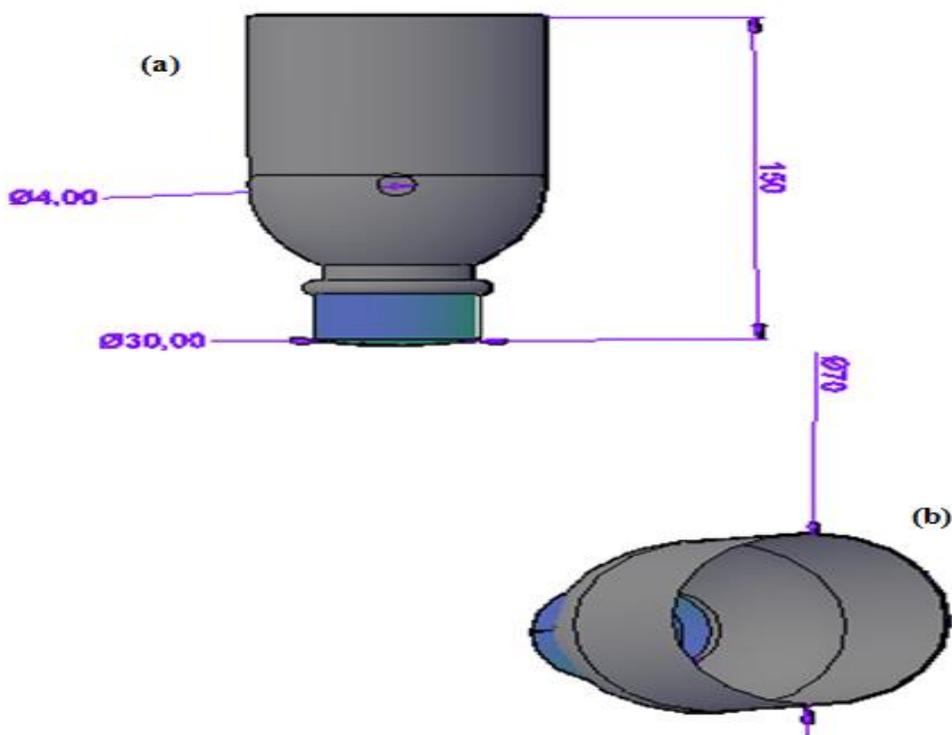
recipiente se coloca papel filtro para atrapar los residuos y en la parte de abajo se coloca otra manguera de 3 mm para la salida del flujo sin sedimentos hacia el tanque.



**Figura 14:** Esquema de las partes del filtro. (a) Pieza completa del filtro; (b) Tapón en la parte superior del filtro con una perforación de 5mm; (c) Tapón en la parte inferior del filtro con una perforación de 5mm; (d) Parte intermedia del filtro.

### 6.1.10 Tanque

La función del tanque es suministrar a todo el equipo de la solución de sulfato de sodio al 3% ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y el material es de PVC. Tiene una altura de 150 milímetros y los diámetros son de 70 mm en la parte superior y en la parte inferior es de 30 mm. Posee una perforación de 4 mm que esta conectada a una manguera para la salida de la solución hacia el reactor.

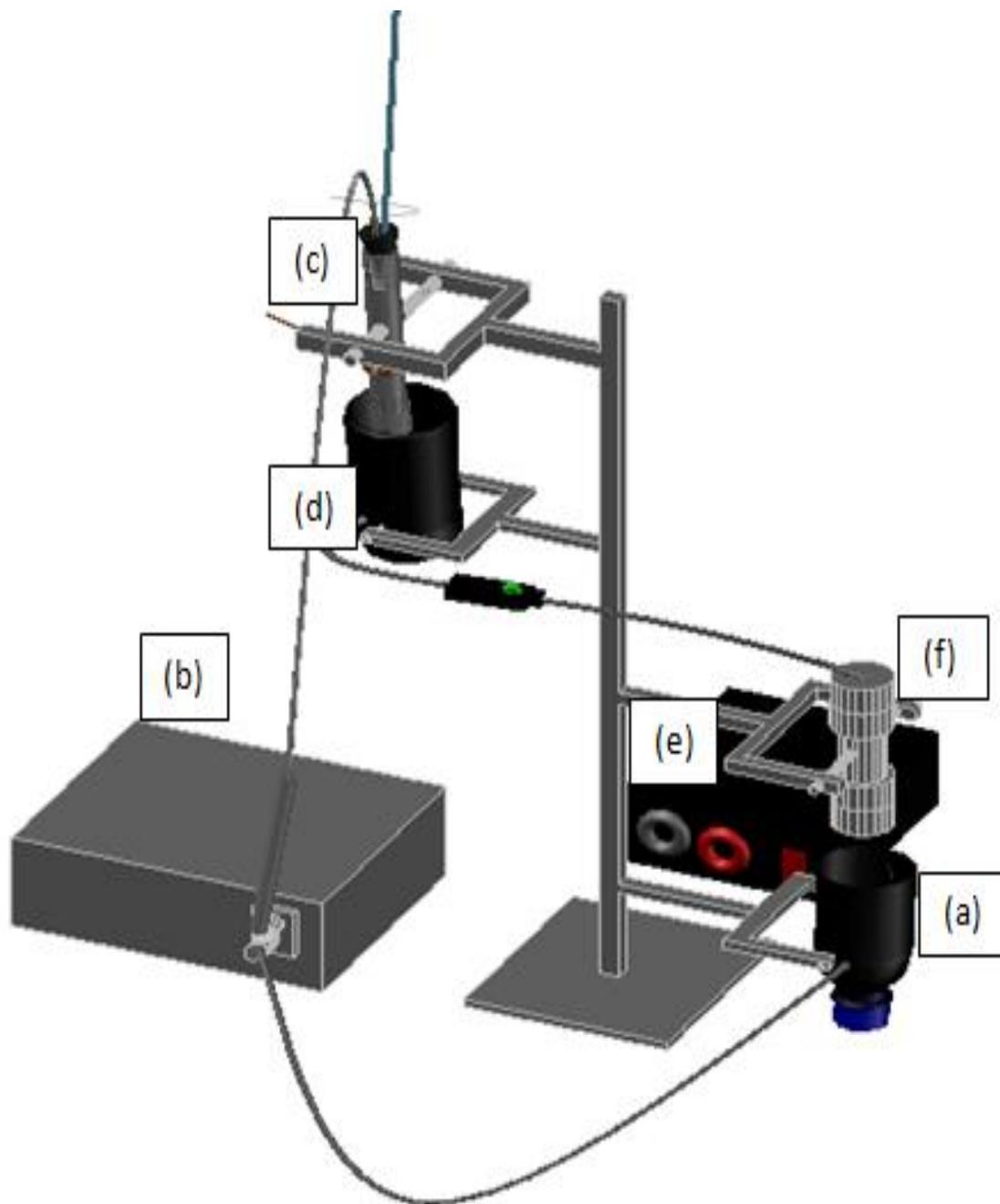


**Figura 15:** Esquema del tanque. (a) Parte frontal del tanque; (b) Fondo del tanque con un diámetro de 70mm.

### 6.1.14 Planta del reactor electroquímico

En la figura 16 se muestra la planta del reactor electroquímico, en donde el funcionamiento del reactor electroquímico consiste en añadir electrolito (sulfato de sodio al 3%) al tanque de alimentación como se muestra en la figura. (a). En la parte (b) se encuentra la bomba peristáltica que bombea el flujo del electrolito hacia los electrodos, en donde el electrodo ánodo es un tubo de niple galvanizado de ½ pulgadas y el electrodo cátodo es una barra de grafito que se encuentra en el interior del ánodo como se muestra en la figura (c). El reactor está en la parte (d) que contiene la muestra (aceite mineral), el electrolito y los electrodos. (e)

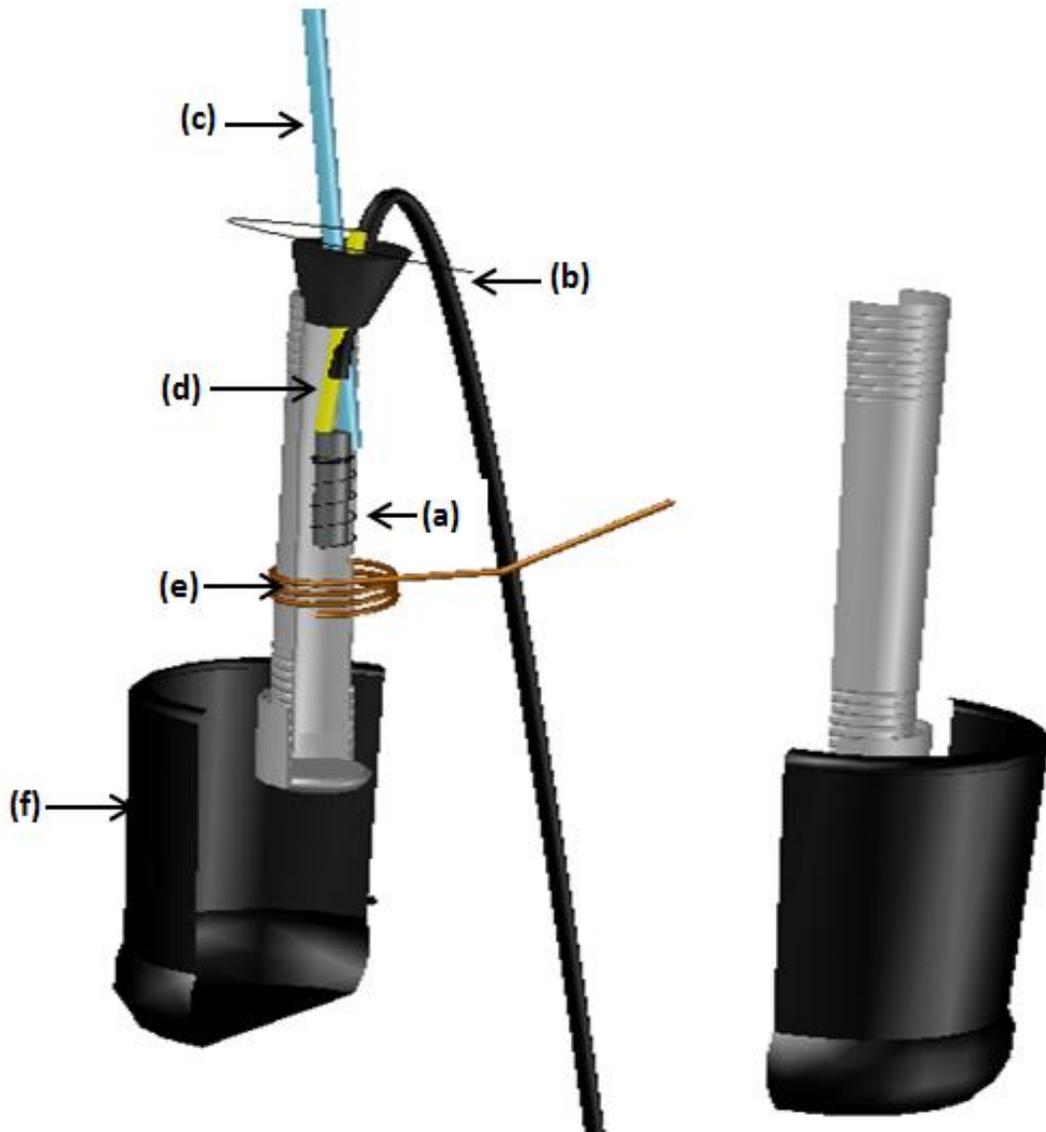
Fuente reguladora de 5 amperios y un voltaje de 13.8 voltios que conecta a los electrodos, teniendo en cuenta que el ánodo se conecta al polo positivo y el electrodo cátodo se conecta al polo negativo. (f) Filtro para la eliminación de sedimentos de grafito el cual, está conectada con el reactor por medio de una manguera y que a su vez, contiene una pinza reguladora para controlar el flujo que sale de éste.



**Figura 16:** Esquema del reactor electroquímico. (a) Tanque; (b) Bomba peristáltica; (c) Ánodo; (d) Reactor; (e) Fuente reguladora; (f) Filtro.

### 6.1.15 El interior del electrodo ánodo.

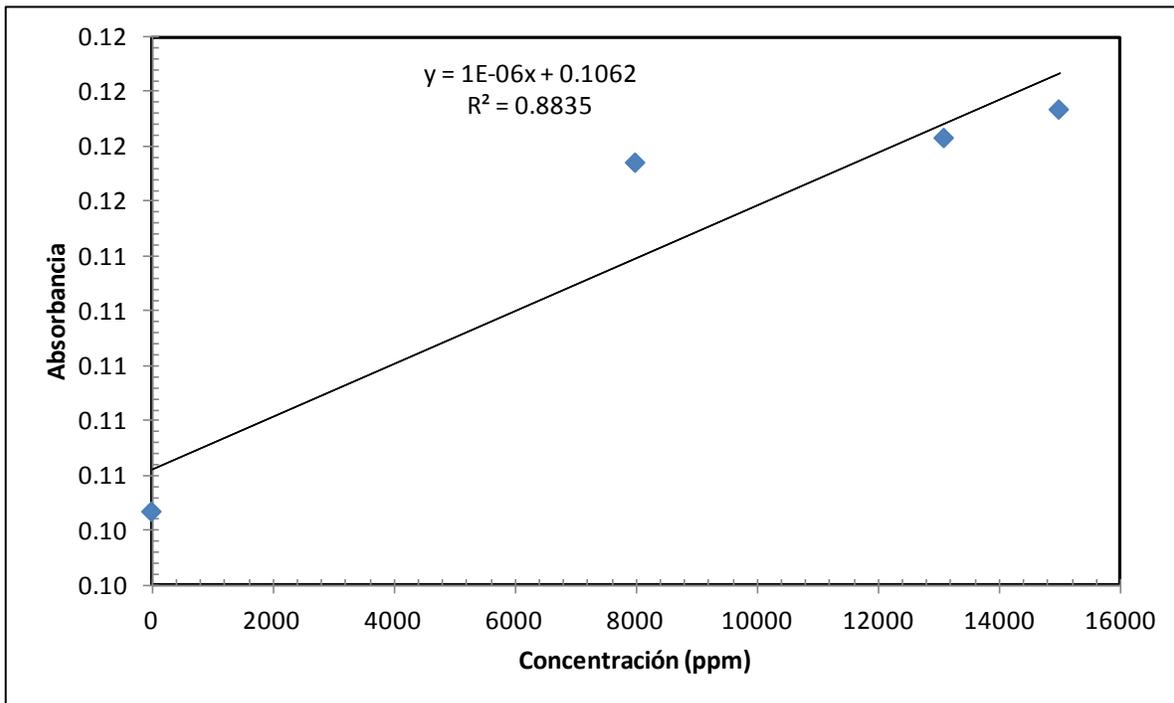
En el interior del ánodo se encuentran: En la parte (a) la barra de grafito sujeta por un alambre aislante para conectarla a la fuente reguladora, (b) una manguera para el paso del electrolito y (c) el tubo de vidrio hueco. (d) En la parte inferior del ánodo se coloca el reactor como se puede observar en la figura 17.



**Figura 17:** Esquema del interior del ánodo.(a) Cátodo; (b) Manguera; (c) Varilla de vidrio hueca; (d) alambre aislante; (e) alambre de cobre; (f) reactor.

## 6.2. Curva de calibración del aceite mineral (aceite de motor).

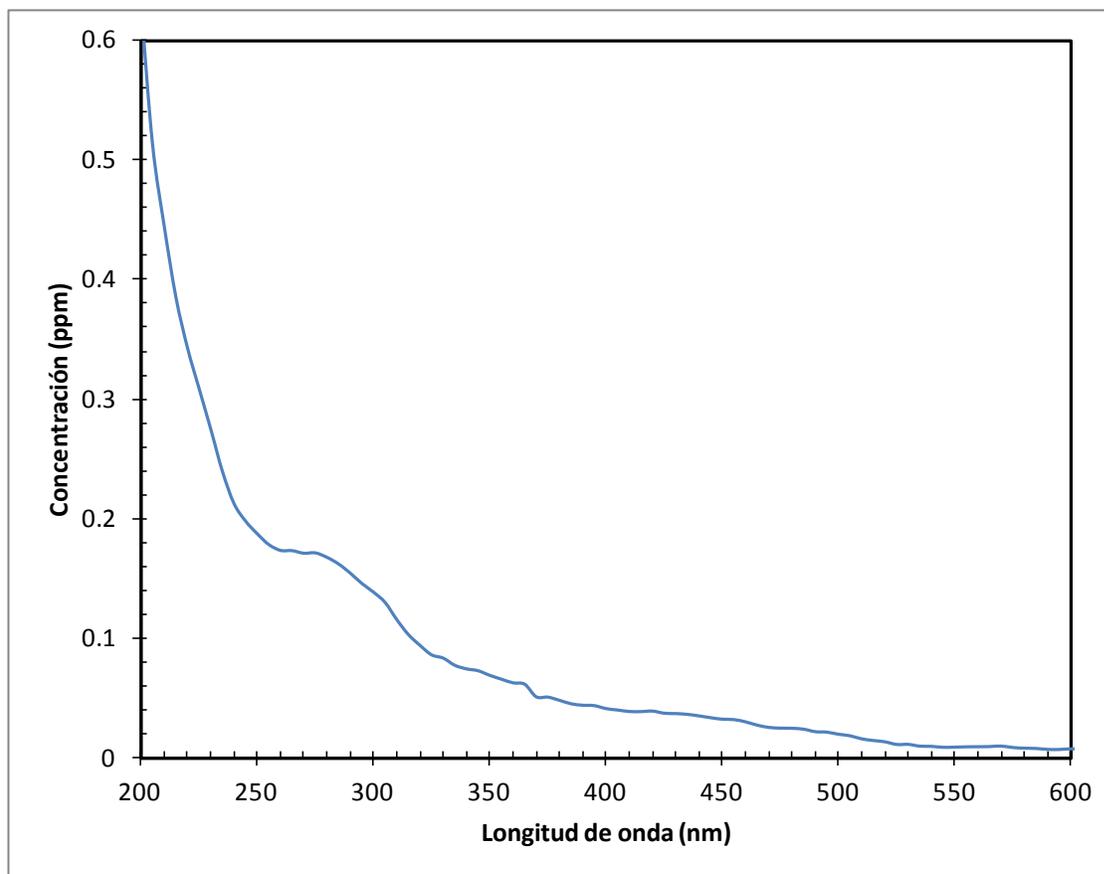
En la figura 18 se observa la curva de calibración del aceite mineral, se prepararon por disolución cuatro soluciones estándar del aceite mineral en medio acuoso partiendo de concentraciones de 15000 ppm, 13100 ppm, 8000 ppm, y 9 ppm el tomando 1 mL de aceite mineral al 50% en agua, después se añadió 5 mL de éter etílico, se toma una gota del extracto etéreo y se diluyó a 100 mL con agua destilada (el volumen del aceite mineral para cada concentración se determinó tomando en cuenta su densidad  $0.8 \text{ g/cm}^3$ ). Luego se tomaron los espectros UV-Vis en el espectrofotómetro Cary 50 procediendo para elaborar la curva de calibración para encontrar las concentraciones en la que se encuentra las muestras tomadas. Se graficó la absorbancia en el eje “y” versus la concentración en el eje “x” y se obtuvo la línea de tendencia y la ecuación del gráfico  $y = 1\text{E-}06x + 0.1062$ . Mediante la absorptividad ( $\epsilon$ ) y la absorbancia se calcularon las concentraciones en que se encuentra el aceite mineral según el tiempo de residencia; utilizando la Ley de Lambert-Beer  $A = \epsilon lC$  de la cual se despejó la concentración ( $C = \frac{A}{\epsilon l}$ ) donde “A” es la absorbancia, “l” es el ancho de la celda.



**Figura 18:** Curva de calibración para el aceite mineral. En la gráfica se encuentra la absorbancia en el eje “y” versus la concentración en el eje “x” La ecuación de la recta  $y = 1\text{E-}06x + 0.1062$  con una correlación de  $R^2 = 0.8835$  se obtuvo que  $\epsilon = 1\text{E-}06$  medido a una longitud de onda de 275 nm en la región UV-Vis.

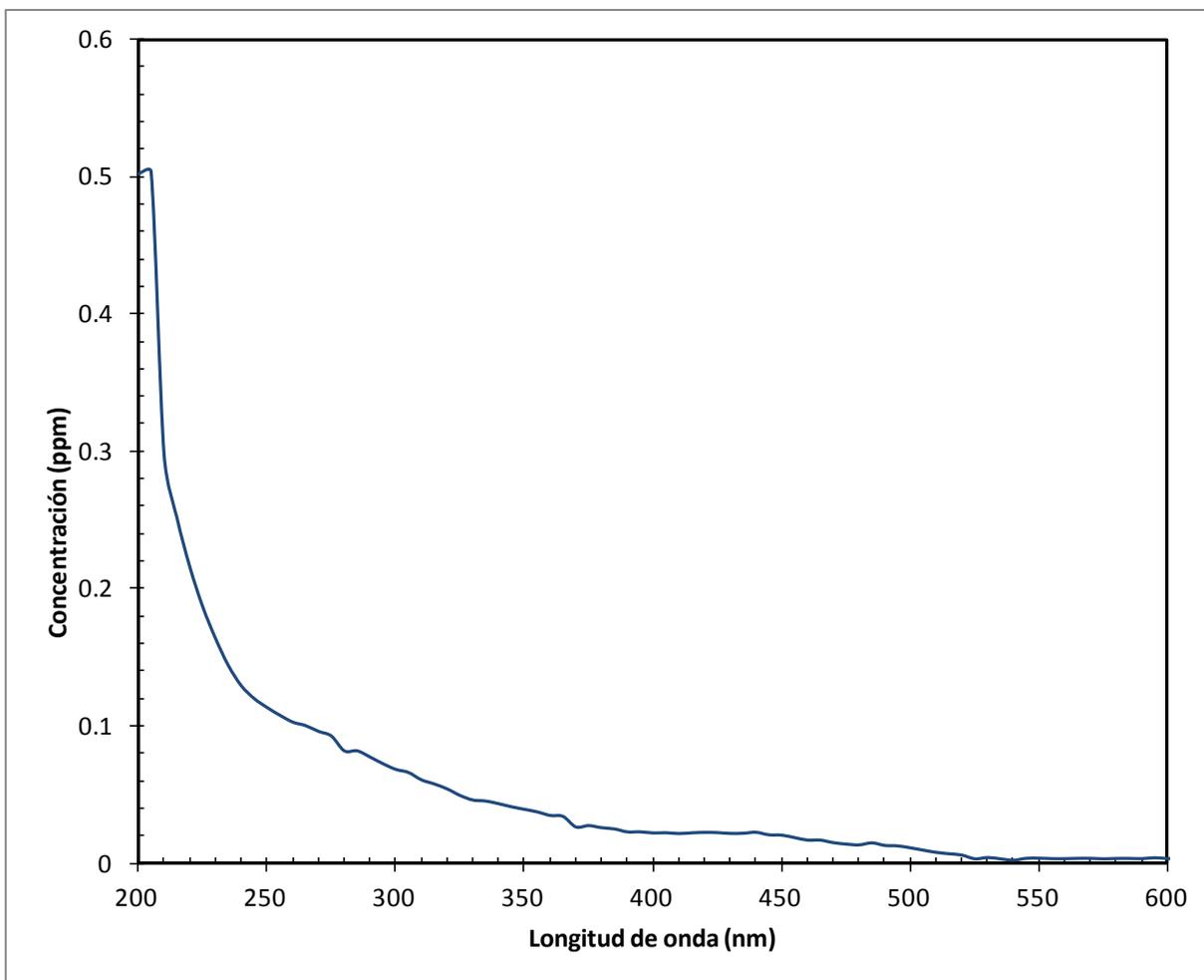
### 6.3. Estudio cinético de los espectros en el UV-Vis.

El aceite mineral presenta un espectro UV-Vis con una banda de absorción característica cuyo máximo se sitúa aproximadamente a 275 nm de longitud de onda. Las energías de excitación en las transiciones electrónicas de los orbitales sigma enlazantes a sigma antienlazantes  $\sigma \rightarrow \sigma^*$  son medianamente altas, característicos en hidrocarburos saturados.<sup>14</sup>



**Figura 19:** Espectro de absorción UV-Vis del aceite mineral sin tratar. Se utilizó éter etílico como solvente para tomar el espectro a una longitud de onda 275 nm a una concentración de 13100 ppm.

Como se muestra en la figura 20, el aceite mineral tratado con el reactor electroquímico presenta un espectro de UV-Vis donde se muestra una disminución de la banda de absorción de longitud de onda de 275 nm después de transcurridas 20 horas.

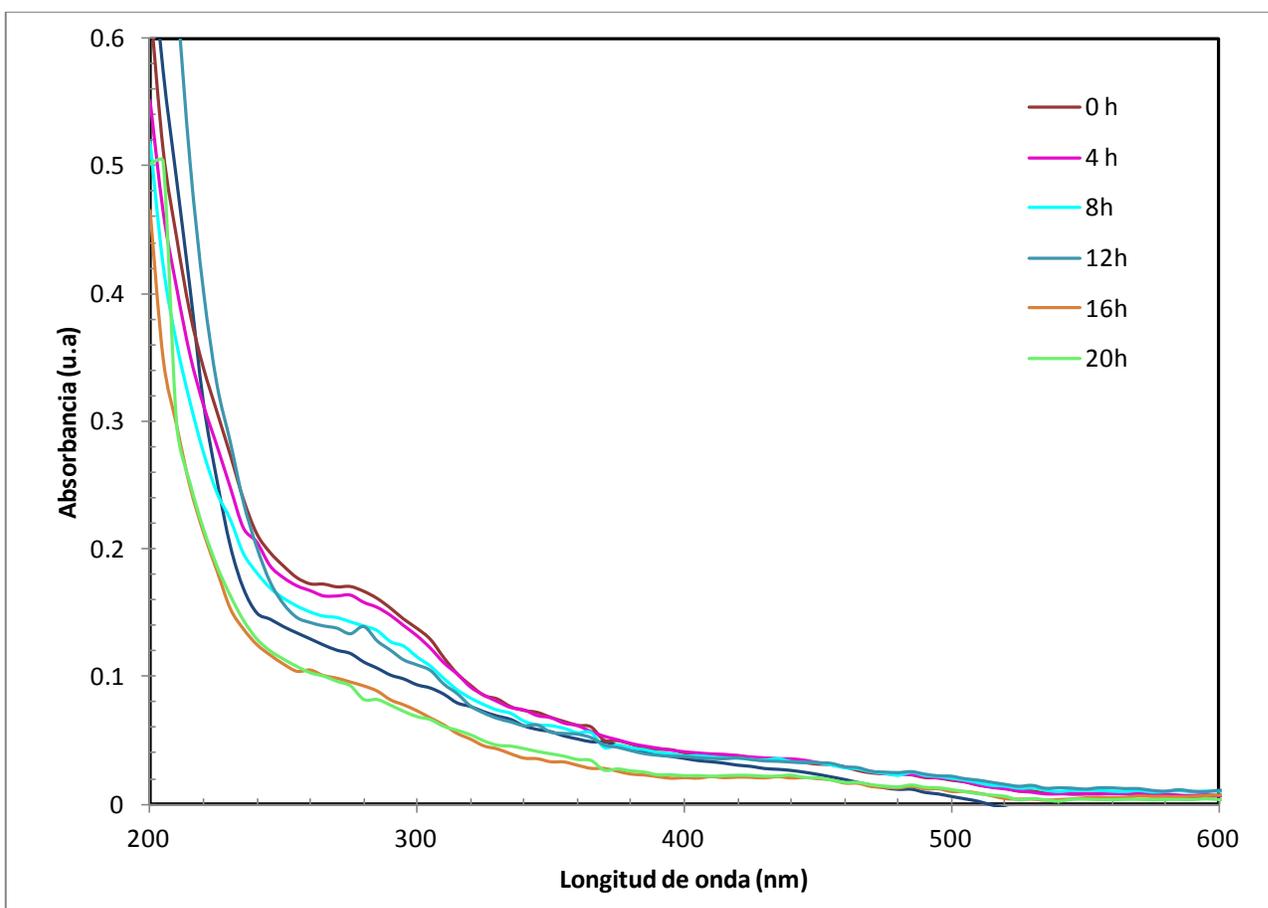


**Figura 20:** *Espectro de absorción UV-Vis del aceite mineral tomado después de ser tratado en el reactor electroquímico. Se utilizó éter etílico como solvente para tomar el espectro a una longitud de onda de 275 nm a las 20 horas.*

### 6.3.1 Análisis de los espectros de absorción UV-Vis del aceite mineral durante la reacción de electrodegradación.

En la figura 21 se muestra el espectro UV-Vis tomado con el espectrofotómetro Cary 50 en función del tiempo de electrodegradación del aceite mineral de la mezcla de reacción (aceite mineral al 50 % en agua). Se observa una disminución en la banda de absorción con el aumento en el tiempo de degradación a una longitud de onda de 275 nm. Éste resultado demuestra que el aceite mineral, se está degradando con el tiempo de electrodegradación durante la reacción de oxidación que se dio en el reactor electroquímico. El tiempo de residencia del aceite mineral fue de 197.29 horas, calculado mediante la concentración del

aceite tratado y la cantidad permissible a cuerpos receptores según la norma salvadoreña NSO 13.49.01:09. Ministerio de Salud, El Salvador.<sup>15</sup>

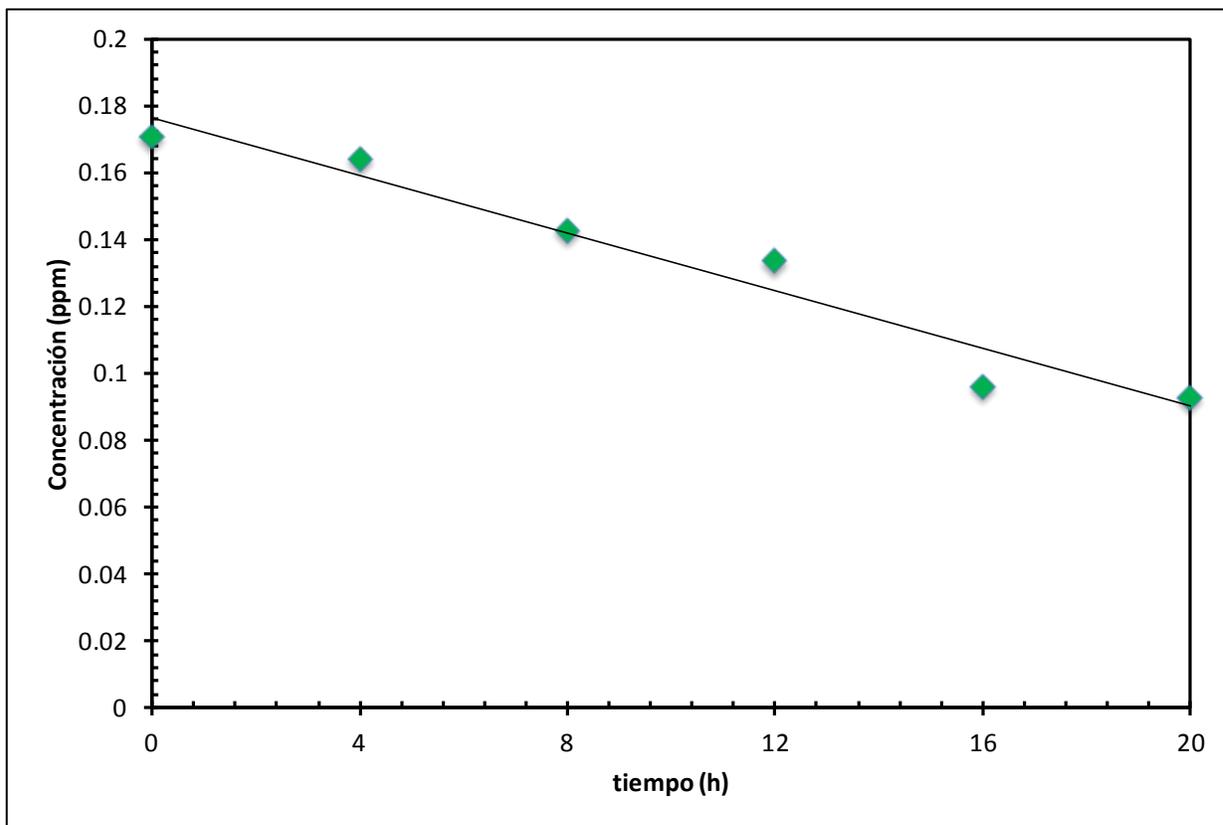


**Figura 21:** Espectros de Absorción UV-Vis del aceite mineral de la mezcla en éter etílico a una longitud de onda de 275 nm. Se tomaron diferentes tiempos de degradación iniciando con el tiempo 0 hasta 20 horas. Partiendo de una concentración de 13100 ppm.

### 6.3.2 Análisis cinético por UV-Vis del aceite mineral de la mezcla mediante el reactor electroquímico.

En la figura 22 presenta la cinética de degradación del aceite mineral tratado con el reactor electroquímico. Se utilizó el éter etílico como solvente orgánico para la toma de los espectros de absorción y después se graficó la concentración ppm (mg/L) en el eje “y” versus el tiempo (en horas) en el eje “x” como se observa en la figura. Se obtuvo la ecuación del gráfico, la

línea de tendencia y su correlación. La correlación es de  $R^2 = 0.9267$  y una ecuación exponencial que representa la velocidad de reacción  $y = 0.1817e^{-0.034}$  donde se observa una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales, lo cual es correspondiente con el modelo cinético de primer orden.

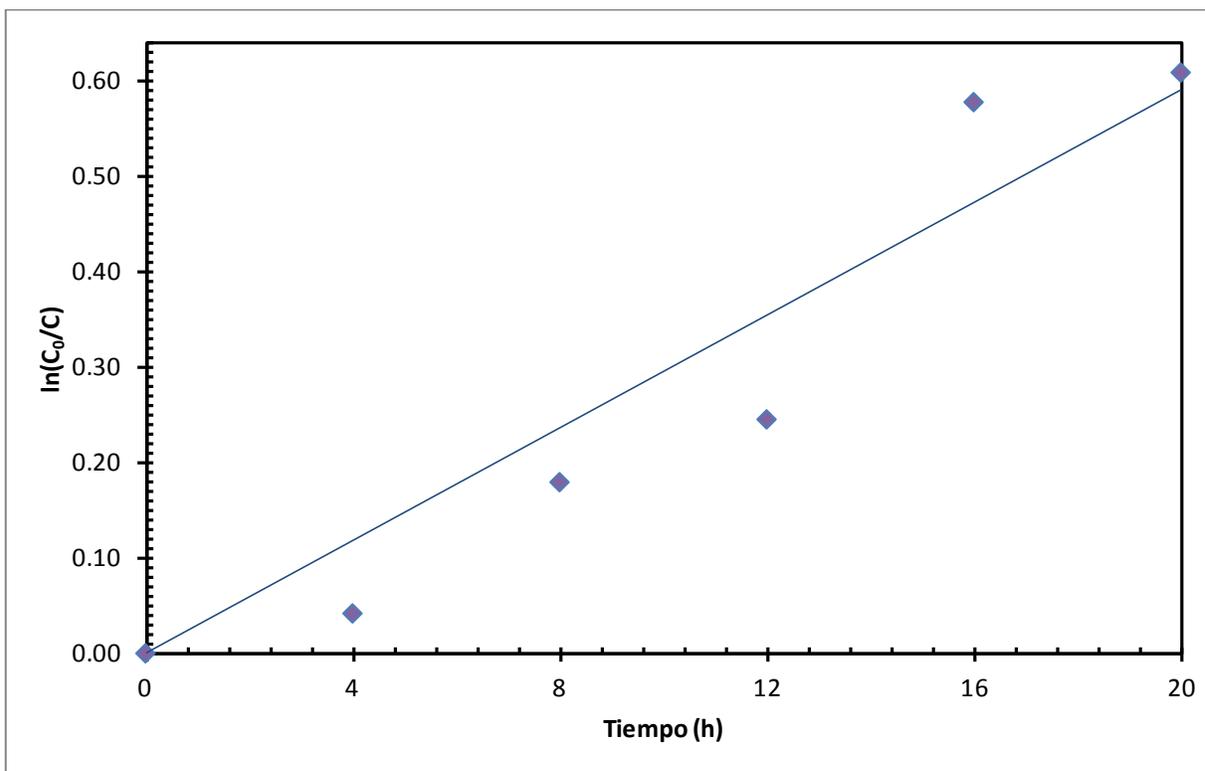


**Figura 22:** Cinética de degradación del aceite mineral tratado en el reactor electroquímico. Se graficó la concentración en ppm en el eje “y” versus el tiempo en horas (h) en el eje “x”. Se obtuvo una correlación  $R^2 = 0.9267$  y la ecuación del tipo exponencial que representa la velocidad de degradación,  $y = 0.1817e^{-0.034}$  con una concentración de 13100 ppm.

### 6.3.3. Linealidad de la cinética de la degradación del aceite mineral.

En la Figura 23 se presenta la linealidad de la cinética de degradación del aceite mineral con el uso del reactor electroquímico, se graficó el tiempo en el eje “x” versus el logaritmo natural del cociente de la concentración inicial ( $C_0$ ) con la concentración ( $C$ ) en los diferentes tiempos de electrodegradación en el eje “y”. Se obtuvo la ecuación del gráfico, la línea de tendencia o

regresión y el  $R^2$ . La correlación fue de  $R^2 = 0.9267$  donde se observa una ecuación lineal con el modelo cinético de primer orden.



**Figura 23:** Linealidad de la cinética de degradación del aceite mineral a 13100 ppm con el uso del reactor electroquímico en la cual se observa la correlación y la ecuación de tendencia lineal  $y = 0.034x + 0.0615$ , con una correlación de  $R^2 = 0.9267$ .

#### 6.3.4. Tiempo de residencia media del aceite mineral.

Fórmula para determinar el tiempo de residencia necesario para degradar el aceite mineral.

$$kt = \ln\left(\frac{C_0}{C-20\% \text{ de } C}\right) \quad (11)$$

Despejando t:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C-20\% \text{ de } C}\right)}{k}$$

Donde:

$t$  = tiempo de residencia media para degradar el aceite mineral.

$C_0$  = concentración inicial (ppm)

$C$  = concentración final (ppm)

$k$  = constante de velocidad ( $h^{-1}$ )

$$20 \% \text{ de } C = C \left( \frac{20}{100} \right)$$

Sustituyendo:

$$t = \frac{\text{Ln} \left( \frac{C_0}{C - 20\% \text{ de } C} \right)}{k}$$

$$t = \frac{\text{Ln} \left( \frac{13100 \text{ ppm}}{20 \text{ ppm} - 4 \text{ ppm}} \right)}{0.034 \text{ h}^{-1}}$$

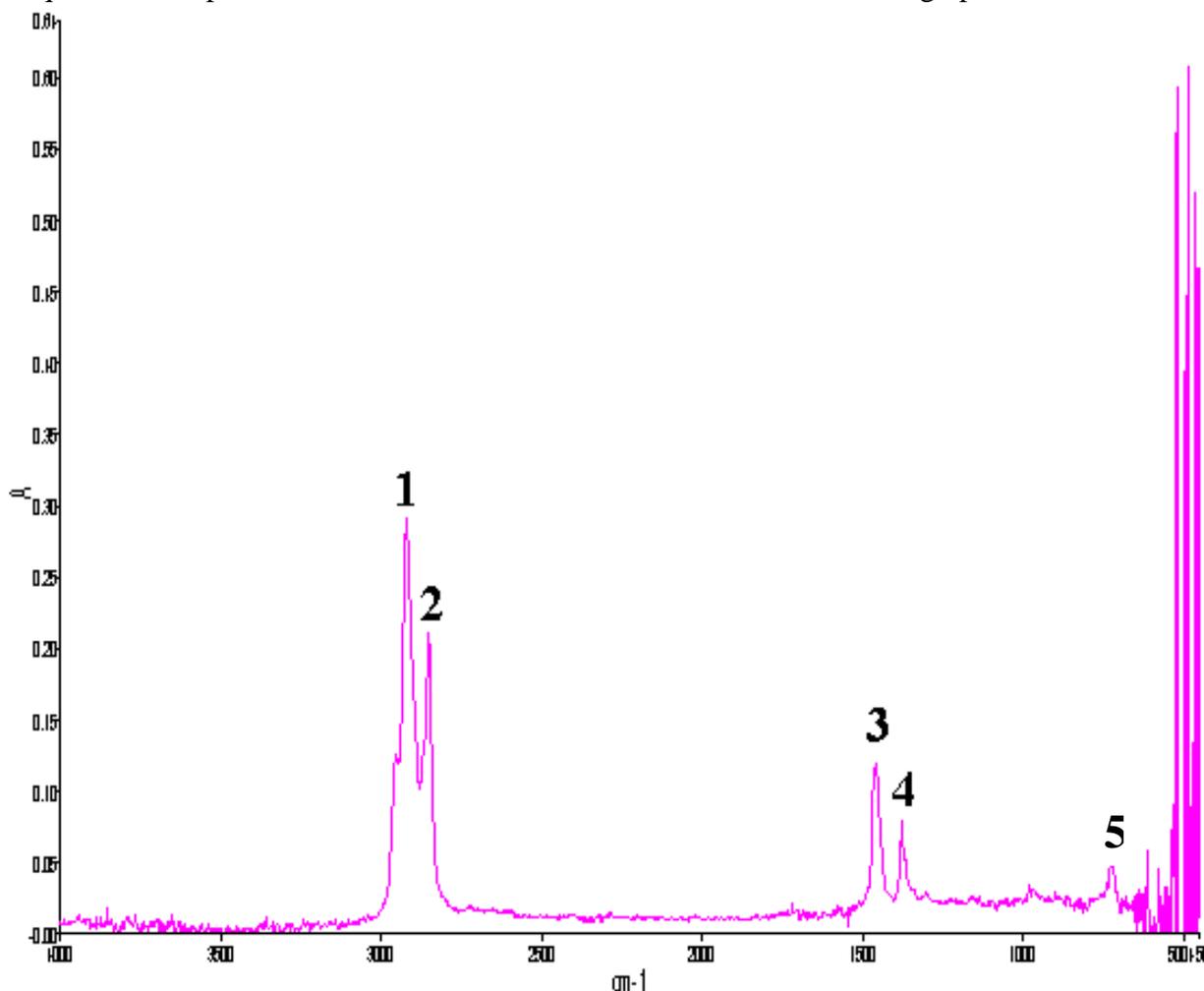
$$t = 197.29 \text{ horas}$$

Dando como resultado un aproximado de 197.29 horas el tiempo necesario para degradar el aceite mineral hasta el límite máximo permisible por la norma especial de aguas vertidas a cuerpos receptores de El Salvador.

#### **6.4. Análisis de los espectros Infrarrojo (IR) del aceite mineral antes del tratamiento electroquímico.**

Las cinco bandas que se observan en el espectro IR de la figura 24 son características de grupos funcionales del aceite mineral. La primera banda más intensa que se encuentra en  $2921 \text{ cm}^{-1}$ , la segunda banda que se observa en el espectro se ubica en  $2800 \text{ cm}^{-1}$ , la tercera banda se encuentra en  $1480 \text{ cm}^{-1}$ , la cuarta banda en  $1380 \text{ cm}^{-1}$  y la última banda se localiza a los  $722 \text{ cm}^{-1}$ . Mostrando en la primera y en la segunda banda una vibración de tensión **C-H**

característico de los grupos funcionales de los alcanos. La tercera banda presenta vibración de flexión simétrica  $C-H_2$  a diferencia de la cuarta banda que presenta de flexión asimétrica  $C-H_2$ . La quinta banda posee una vibración de balanceo  $C-H_2$  característico del grupo metileno.<sup>16</sup>

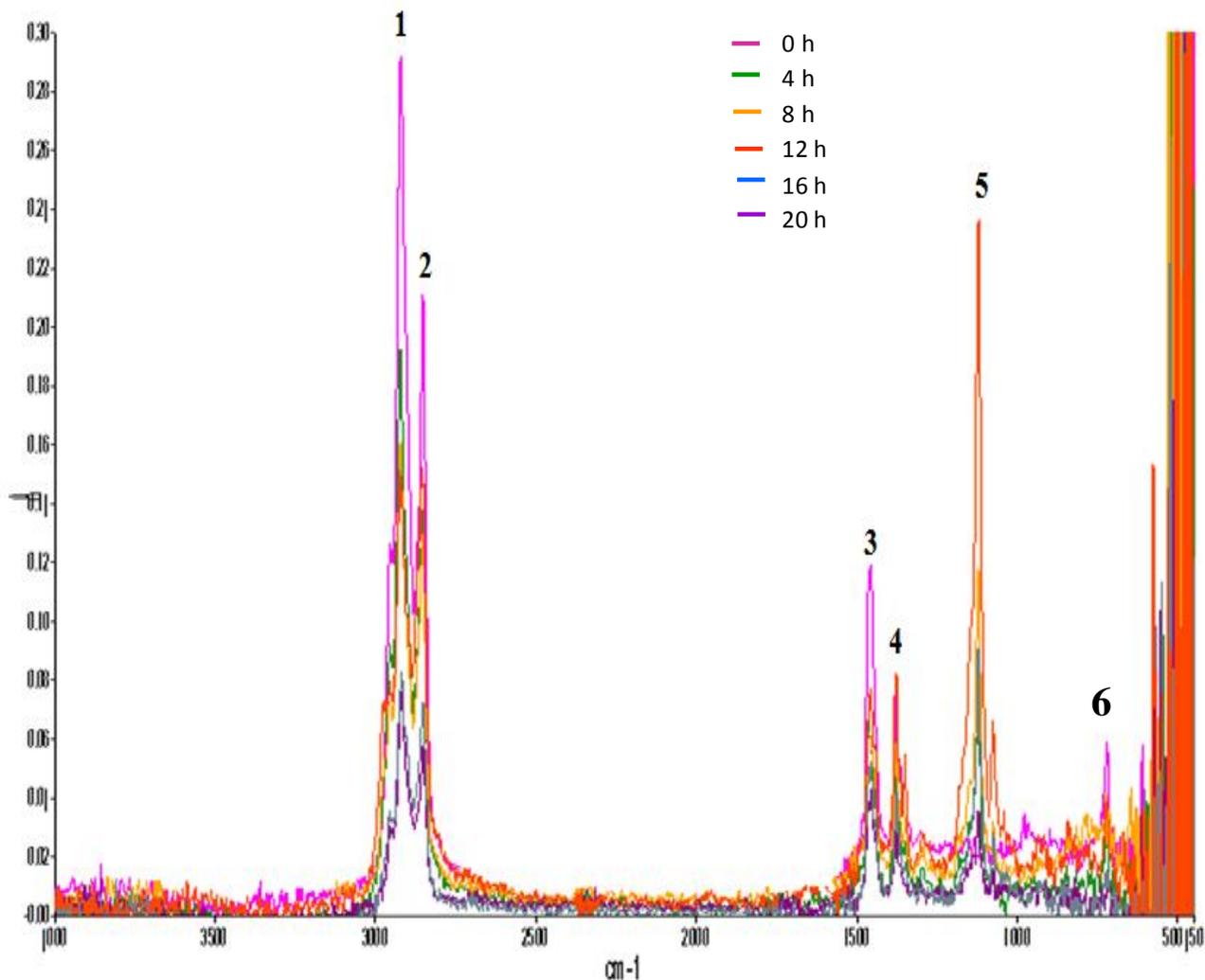


**Figura 24:** Espectro en el espectrofotómetro del infrarrojo del aceite mineral sin tratamiento electroquímico, con una absorbancia en el eje “y” de 0.290170 y un número de onda en el eje “x” de  $2921\text{cm}^{-1}$  de la primera banda en el tiempo de 0 horas.

#### 6.4.1 Análisis de las muestras del aceite mineral de la mezcla después del tratamiento electroquímico con sus respectivos tiempos.

En la figura 25 se observa una banda a los  $2921\text{ cm}^{-1}$ , es la banda más intensa que se observa. Además, se observa una segunda banda de absorción menos intensa que la anterior a los  $2800\text{ cm}^{-1}$ , también se observan cuatro bandas más a  $1480\text{ cm}^{-1}$ ,  $1380\text{ cm}^{-1}$ ,  $1200\text{ cm}^{-1}$  y  $722\text{ cm}^{-1}$ . Mostrando en la primera y en la segunda banda una vibración de tensión  $C-H$  característico de los grupos funcionales de los alcanos. La tercera banda presenta vibración de flexión simétrica

$C-H_2$  a diferencia de la cuarta banda que presenta de flexión asimétrica  $C-H_2$ . En la quinta banda se forma un estiramiento característico de los ésteres. En la sexta banda posee una vibración de balanceo  $C-H_2$  característico del grupo metileno, que solo aparece en el espectro del aceite mineral sin tratar.<sup>16</sup>

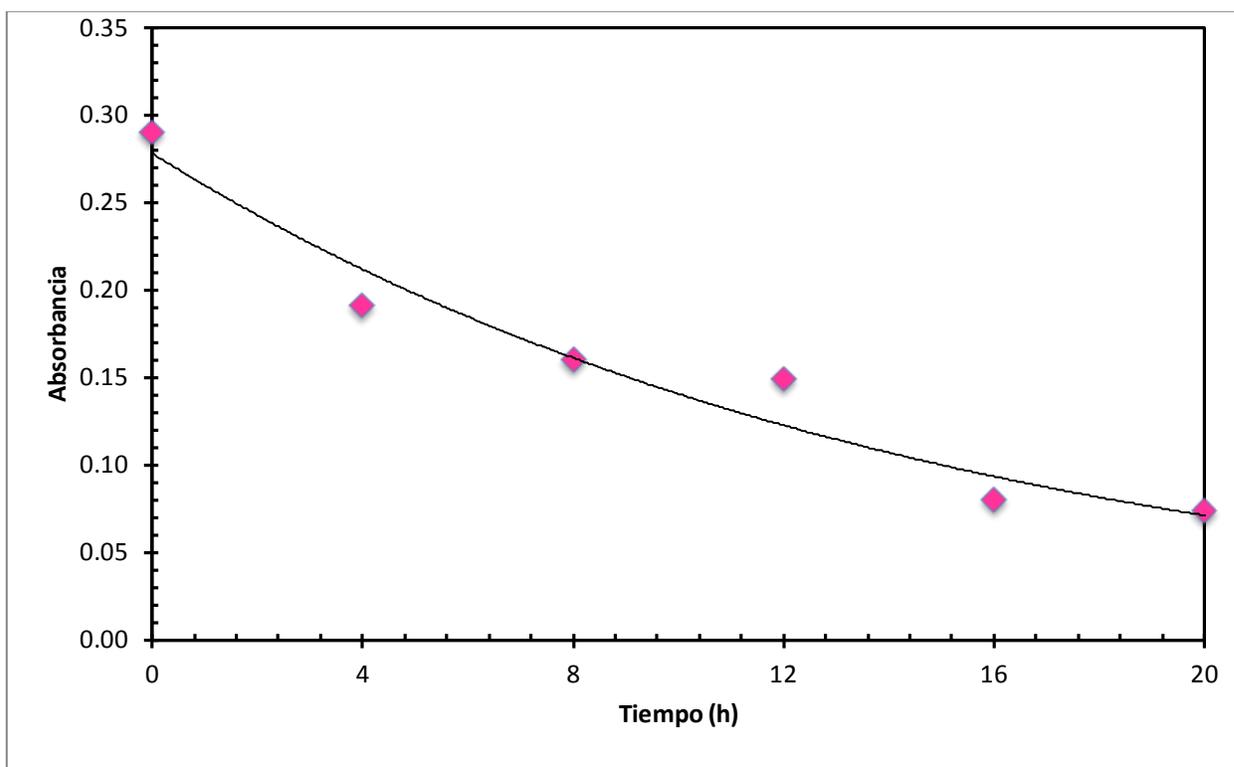


**Figura 25:** Espectros infrarrojos del aceite mineral de la mezcla antes y después del tratamiento electroquímico. Absorbancia en el eje “y” y número de onda en el eje “x” para las seis muestras.

#### 6.4.2. Estudio cinético por el infrarrojo del aceite mineral de la mezcla mediante el reactor electroquímico.

En la Figura 26 se presenta la cinética del aceite mineral de la mezcla con el reactor electroquímico utilizando el éter etílico como solvente orgánico diluido con agua destilada para la toma de los espectros de absorción a temperatura ambiente aproximadamente a 25 °C y

a presión constante (1 atm) por medio del reactor electroquímico, para determinar el orden de la reacción, se graficó la absorbancia en el eje “y” versus el tiempo (en horas) en el eje “x” como se muestra en la figura. Se encontró la ecuación del gráfico, la línea de regresión y  $R^2$  de correlación. La correlación fue de  $R^2 = 0.9465$ , y la ecuación exponencial que representa la velocidad de reacción  $y = 0.2783e^{-0.068x}$  en donde la pendiente es de  $0.068 \text{ h}^{-1}$  conociendo así la constante de velocidad (k) y se observa una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales.



**Figura 26:** Cinética de degradación del aceite mineral tratado con el uso del reactor electroquímico en el IR. Se graficó la absorbancia en el eje “y” versus el tiempo (h) en el eje “x”. Se obtuvo una correlación  $R^2 = 0.9465$  y la ecuación del tipo exponencial que representa la velocidad de degradación,  $y = 0.2783e^{-0.068x}$ .

### 6.5. Comparación del aceite mineral antes y después del tratamiento con el reactor electroquímico.

En las siguientes figuras 27 y 28 existen diferencias significativas entre la muestra del aceite mineral durante el tratamiento con el reactor electroquímico iniciada su reacción a los 5

minutos aproximadamente y después del tratamiento de dicho reactor a las 20 horas. El aceite mineral durante el experimento tenía un color amarillo oscuro. Después del experimento con el reactor el color cambio a café oscuro. La comparación de la muestra del antes y después del tratamiento electroquímico demuestra que el aceite mineral fue degradada.



**Figura 27:** *Iniciando el tratamiento con el reactor electroquímico a los 5 minutos aproximadamente.*



**Figura 28:** *Después del tratamiento del reactor a las 20 horas.*

## VII. CONCLUSIONES

- En los resultados experimentales se puede observar que existen cambios en la estructura del aceite mineral.
- El análisis cinético matemático permitió determinar el tiempo de residencia de la degradación del aceite mineral dando como resultado **197.29 horas**.
- El diseño del reactor electroquímico es un medio que puede tratar el aceite mineral para reducir los contaminantes que se producen cuando no es manejado

adecuadamente de tal manera que pueda reducir significativamente el impacto ambiental.

- Los parámetros obtenidos en los estudios cinéticos utilizando la banda de absorción UV-Vis fueron los siguientes: El orden de la reacción fue de 1, puesto que los datos ajustaron con una correlación,  $R^2 = 0.9267$ , mayor con el modelo cinético de primer orden. La constante de velocidad, (k), fue de  $0.034 h^{-1}$ .
- Los parámetros obtenidos en los estudios cinéticos utilizando la banda de absorción IR fueron los siguientes: El orden de la reacción fue de 1, puesto que los datos ajustaron con una correlación,  $R^2 = 0.9465$ , mayor con el modelo cinético de primer orden. La constante de velocidad, (k), fue  $0.068 h^{-1}$ .
- Según el espectro del infrarrojo del aceite electrodegradado en la figura 25 se localiza una banda de absorción a los  $1200 cm^{-1}$  indicando la formación de un producto nuevo característico de los ésteres.

## VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso del programa AUTOCAD para cuando se desee diseñar algún tipo de reactor.
- Realizar investigaciones mediante reactor electroquímico para tratar otras sustancias orgánicas.
- Realizar un análisis más profundo a ésta investigación para determinar los productos formados.
- Diseñar un reactor electroquímico a escala industrial para tratar los desechos de aceite mineral.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Juan Padiá. “Curioseando”. [Sede Web] <https://curiosoando.com/que-es-un-aceite-mineral>. (Accesado el 1 de abril de 2017).

2. Anna Hedelin. "*Mineral oil-Origin, production and composition*". September 2013.
3. Jesús Sánchez Caba. "*Purificación de parafinas de petróleo por hidrogenación catalítica*". Tesis, Madrid 2003.
4. Javier Ávila, Joan Genescá. "*Más allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión*". [Sede Web] [www.http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/masalla2.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/masalla2.htm).
5. Gunnar Nordberg. "*Metales: propiedades químicas y toxicidad. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*".
6. [Sede Web] [www. Baterías de grafenopara.com/grafito-propiedades-aplicaciones/](http://www.bateriasdegrafenopara.com/grafito-propiedades-aplicaciones/). (Accesado el 31 de marzo de 2017).
7. Mónica González. "*Electrólisis del agua*". [Sede Web] Publicado el 8 de Octubre de 2010. Disponible en: <http://quimica.laguia2000.com/enlaces-quimicos/electrolisis-del-agua>.
8. Andy Alán Melo López. "*Estudios electroquímicos preliminares en un reactor tipo prensa para la recuperación de Ag proveniente de los efluentes de la industria fotográfica y radiográfica*". Tesis, México 2006.

9. Frank Walsh. *“Un primer curso de ingeniería electroquímica”*. Editorial Club Universitario, 1999.
  
10. Henry Reyes Pineda, Valentín Pérez Herranz, Diego Fernando Arias M. *“Comportamiento hidrodinámico de un reactor electroquímico”*. Revista, Colombia 2013.
  
11. Ángel Frías-Ferrer, José González-García, Verónica Sáez, Eduardo Expósito, Carlos M. Sánchez Sánchez, J.M. Juárez-Galán, Vicente Montiel y Antonio Aldaz. *“Reactores electroquímicos filtro prensa a escala laboratorio. Escalado y efecto entrada/salida”*. Artículo, España 2004.
  
12. Luis Adrián Echeverri Holguín y Henry Reyes Pineda. *“Comportamiento hidrodinámico de un reactor electroquímico para recuperar residuos en la fabricación de películas semiconductoras”*. Revista Facultad de Ingeniería, Vol. 22, No. 34. Colombia 2013.
  
13. Ángel José Frías Ferrer. *“Optimización de la hidrodinámica de reactores electroquímicos: Empleo de métodos experimentales y numéricos”*. Tesis, España 2004.
  
14. Yolanda Ríos. *“Espectroscopia UV-Visible”*. [Sede Web] <https://www.yolandarios.net> UV Teoría. (Accesado el 1 de junio de 2017).
  
15. Norma salvadoreña NSO 13.49.01:09 *“Norma de aguas residuales de descarga a cuerpos receptores”*. Ministerio de Salud, El Salvador. Octubre 1996.

16. Bassler and Morrill Silverstein. *"Spectrometric identification of organic compounds"*. Cuarta edición.

## X. ANEXOS



Foto 1: Bomba peristáltica para el flujo del electrolito ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al 3%).



**Foto 2:** *Muestras de aceite mineral de la reacción.*



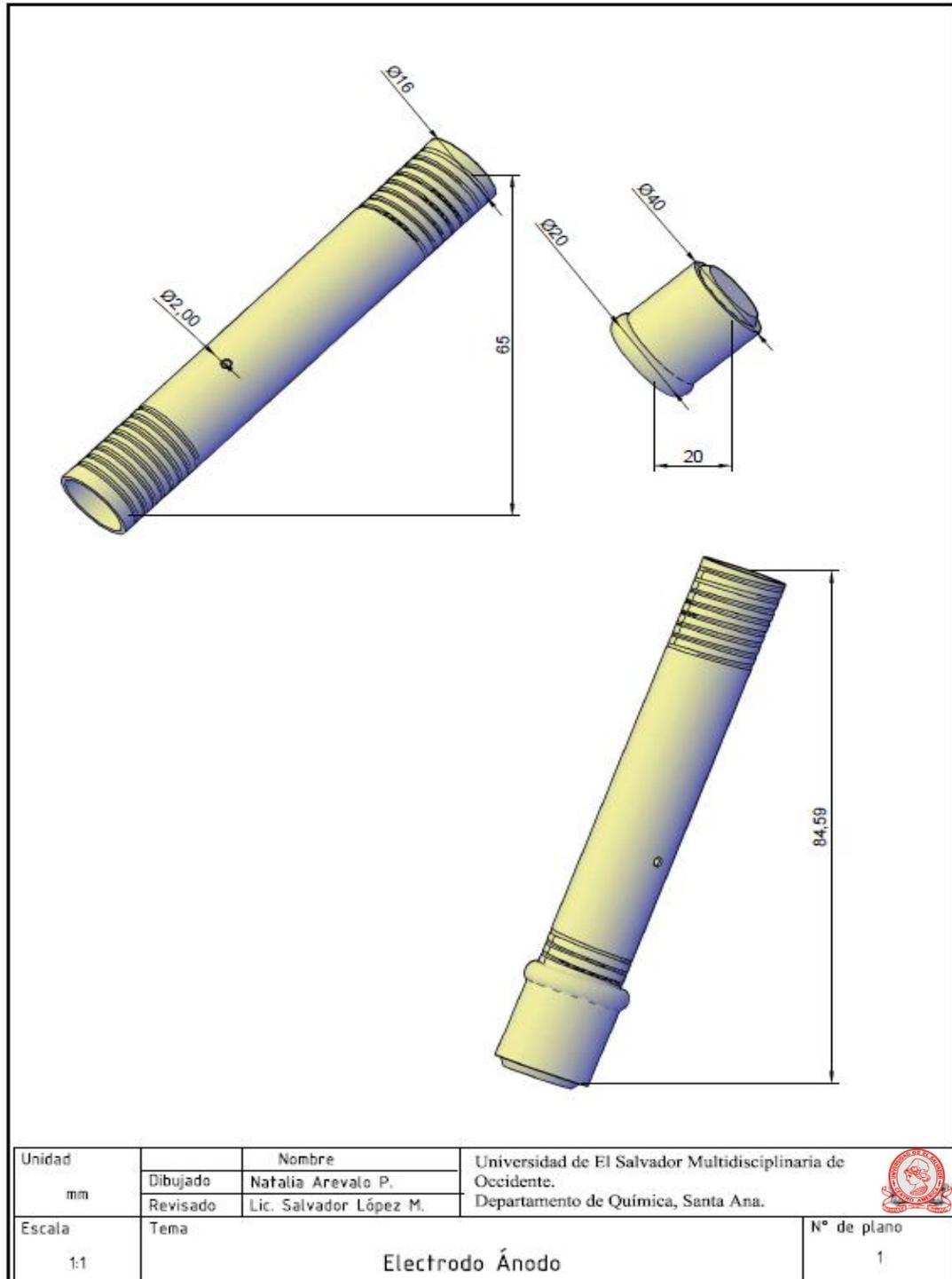
**Foto 3:** *Electrodo ánodo con el aceite mineral.*

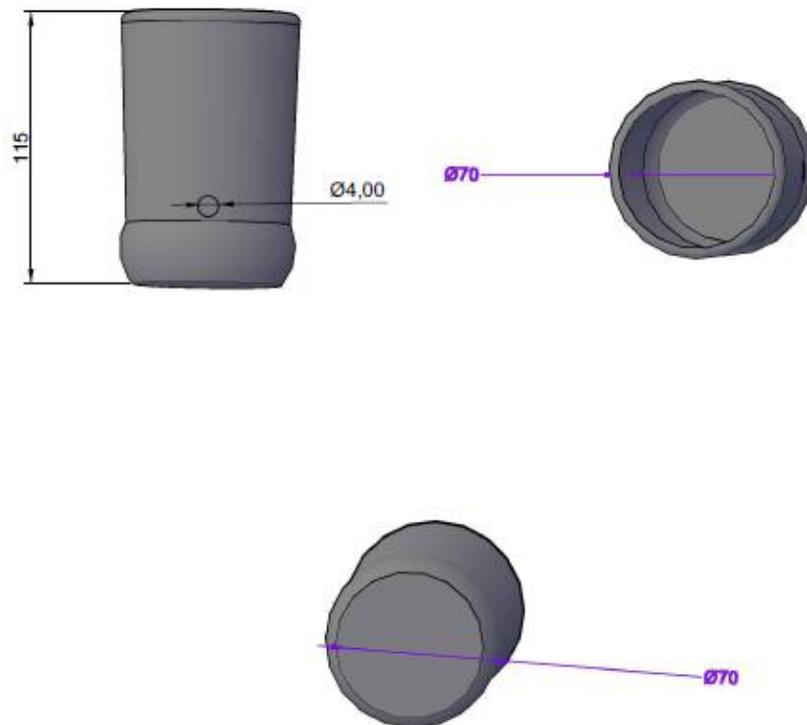


**Foto 4:** Reactor electroquímico con el aceite mineral.

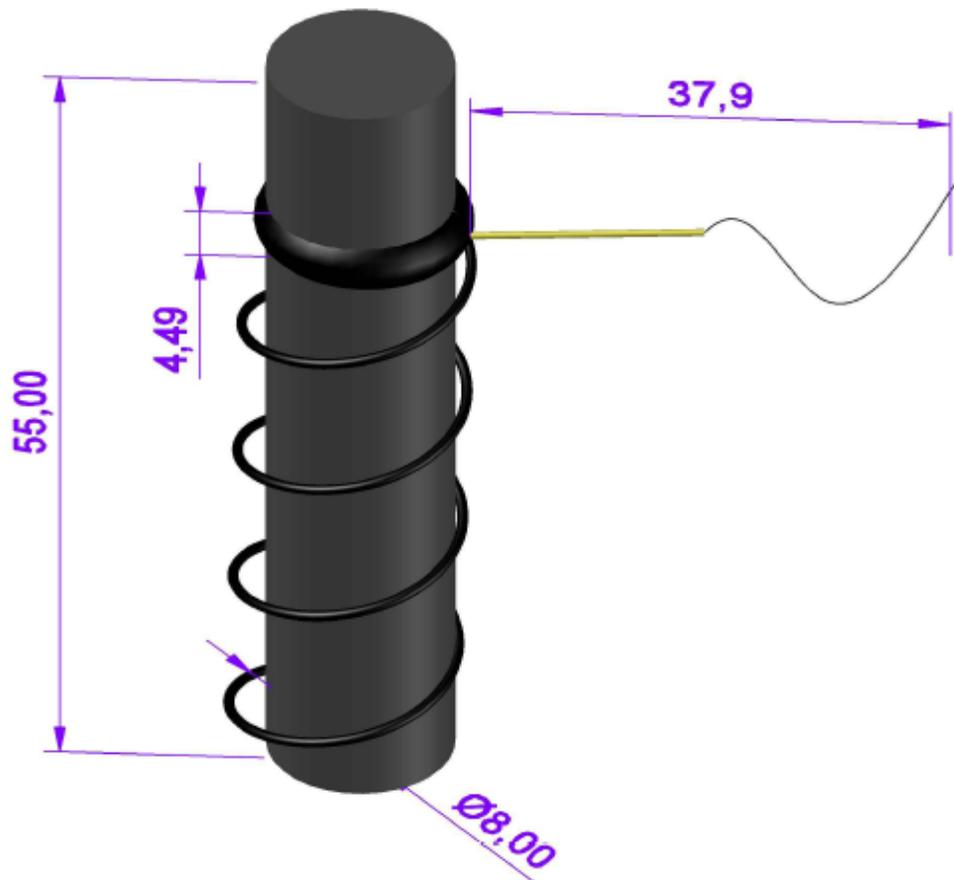
## Anexo 2

Plantillas en AUTOCAD

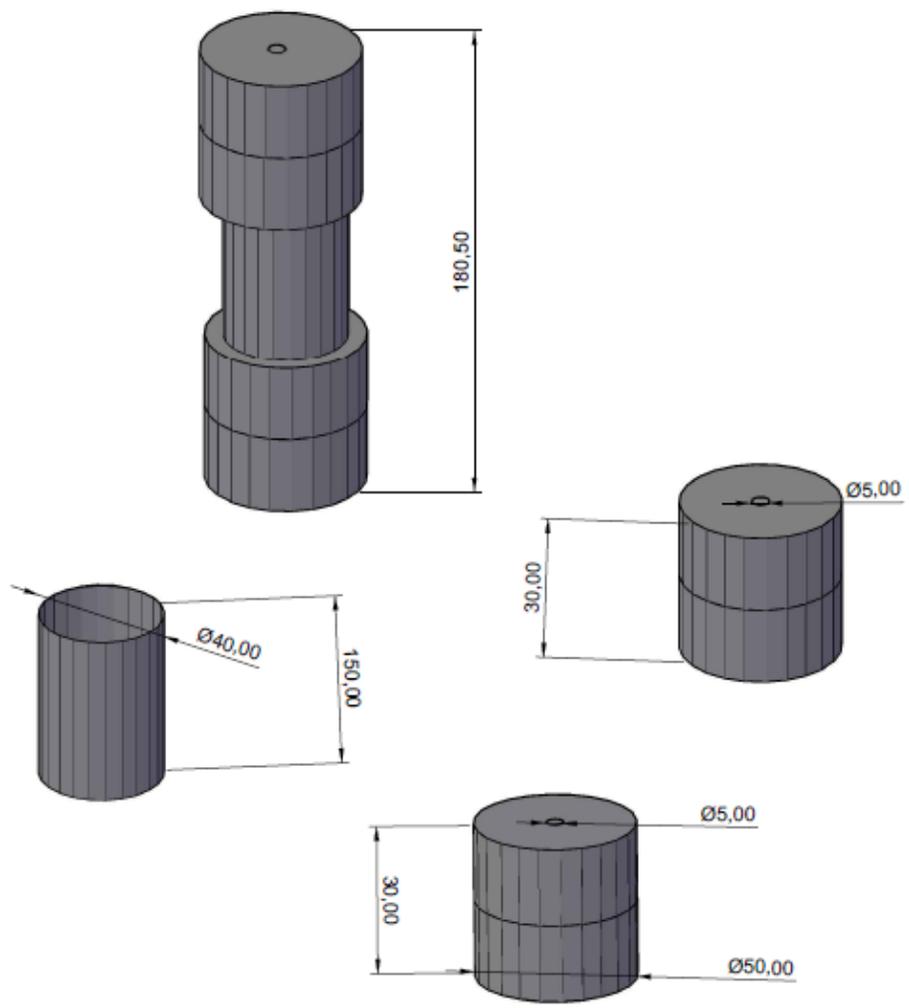




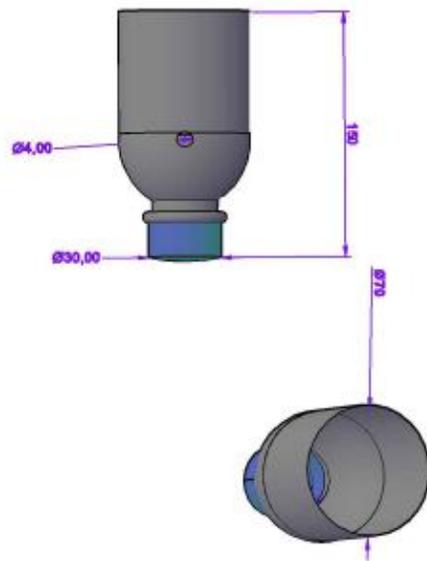
Unidad mm	Nombre		Universidad de El Salvador Multidisciplinaria de Occidente. Departamento de Química, Santa Ana.	
	Dibujado	Natalia Arévalo. P		
	Revisado	Lic. Salvador López M.		
Escala 1:1	Tema Reactor			N° de plano 2



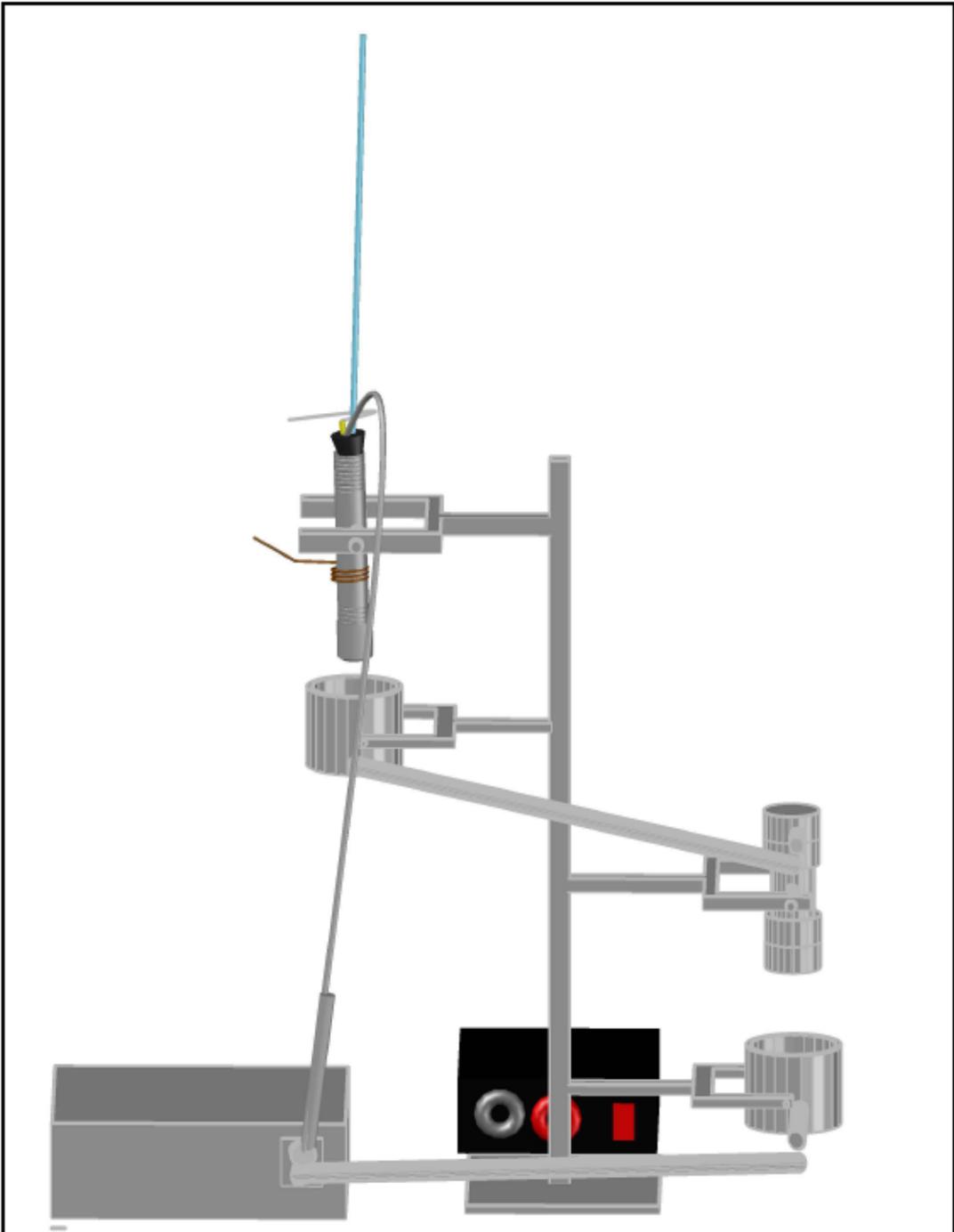
Unidad mm	Nombre		Universidad de El Salvador Multidisciplinaria de Occidente. Departamento de Química, Santa Ana.	
	Dibujado	Natalia Arevalo P.		
	Revisado	Lic. Salvador López M.		
Escala 1:1	Tema Electrodo cátodo			N° de plano 3



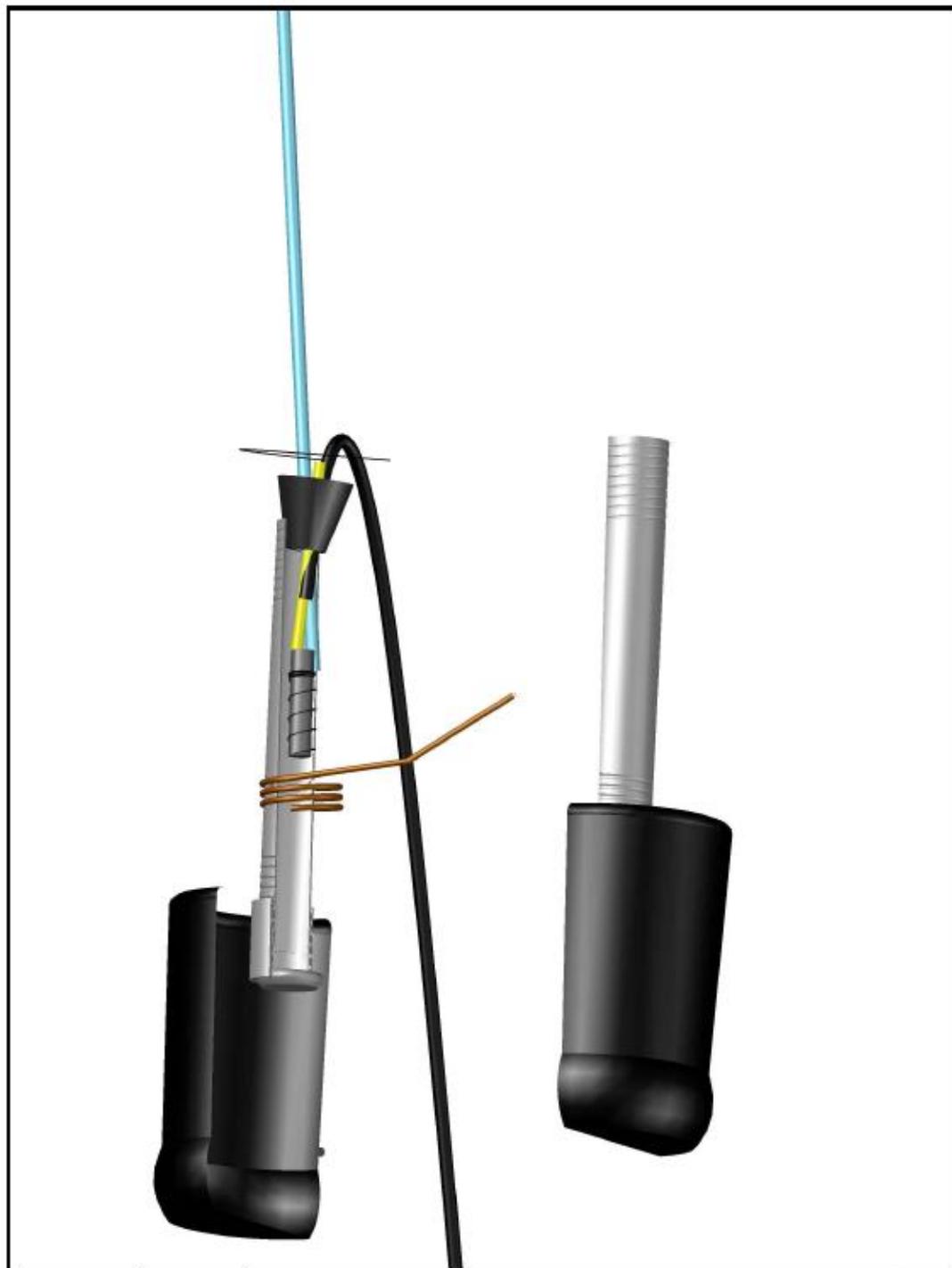
Unidad mm	Dibujado	Nombre	Universidad de El Salvador Multidisciplinaria de Occidente. Departamento de Química, Santa Ana.	
	Revisado	Natalia Arevalo P. Lic. Salvador López M.		
Escala 1:1	Tema Partes del filtro			Nº de plano 4



Unidad mm	Nombre		Universidad de El Salvador Multidisciplinaria de Occidente. Departamento de Química, Santa Ana.	
	Dibujado	Natalia Arévalo. P		
	Revisado	Lic. Salvador López M.		
Escala 1:1	Tema Tanque			Nº de plano 5



Unidad mm	Dibujado	Nombre	Universidad de El Salvador Multidisciplinaria de Occidente. Departamento de Química, Santa Ana.	
	Revisado	N. Arevalo P. Lic. Salvador López M.		
Escala 1:1	Tema	Planta del reactor electroquímico		N° de plano 6



Unidad mm		Nombre	Universidad de El Salvador Multidisciplinaria de Occidente. Departamento de Química, Santa Ana.	
	Dibujado	N. Arevalo P.		
	Revisado	Lic. Salvador López M.		
Escala 1:1	Tema	interior del electrodo ánodo y reactor		N° de plano 7