

**VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA PRODUCCIÓN DEL ION FERRATO (VI) POR VÍA  
ELECTROQUÍMICA, A PARTIR DE VIRUTA DE ACERO AL CARBÓN GENERADA  
EN ACTIVIDADES DE TORNEADO DE LA EMPRESA AGUA EQUIPOS Y  
PROCESOS S.A.S.**

**MARITZA ESTEFANÍA PÉREZ CÁRDENAS**

Proyecto integral de grado para optar al título de  
**INGENIERO QUÍMICO**

Orientador

Gustavo E. Noratto Gutiérrez  
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2021

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre  
Firma del Director

---

Nombre  
Firma del Presidente Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

Bogotá D.C. Agosto de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García Peña.

Consejero Institucional.

Dr. Luis Jaime Posada García Peña.

Vicerrectora Académica y de investigaciones.

Dra. Alexandra Mejía Guzmán.

Vicerrector Administrativo y Financiero.

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro.

Secretario General.

Dr. José Luis Macías Rodríguez.

Decano de la Facultad.

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi.

Directora de Programa.

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>16</b>
1.1. Problemática	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo General	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.3. Justificación	17
1.4. Alcance	18
<b>2. ASPECTOS TEÓRICOS</b>	<b>20</b>
2.1 Viruta Metálica	20
2.1.1 Definición.	20
2.1.2 <i>Procesos metalmecánicos.</i>	20
2.1.3. <i>Tipos de viruta.</i>	20
2.1.4. <i>Acero al carbón</i>	23
2.2 Ferrato VI.	25
2.2.1 <i>Estados de oxidación del hierro.</i>	25
2.2.2. <i>Estado de oxidación +6.</i>	26
2.3. Electroquímica	38
2.3.1. <i>Definición</i>	38
2.3.2 <i>Proceso electroquímico</i>	38
2.3.3. <i>Celda electroquímica</i>	39
2.4. Espectrofotometría	40
2.4.1. <i>Definición</i>	40
2.4.2 <i>Principio espectrofotométrico de absorción molecular UV-visible.</i>	40
2.5 Diseño de Experimentos	43
<b>3. EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>48</b>
3.1 Procedimiento para el desarrollo del proceso electroquímico.	48
3.1.1 <i>Electrolito</i>	51
3.1.2 <i>Cubeta</i>	52

3.1.3 <i>Ánodo</i>	53
3.1.4 <i>Cátodo</i>	59
3.2 Producción de ferrato VI	63
3.3 Cuantificación de ferrato VI.	68
3.4 Costo directo de producción de ferrato VI.	68
3.4.1 <i>Materiales para fabricación de electrodos.</i>	69
3.4.2 <i>Insumos para los decapados.</i>	70
3.4.3 <i>Insumos para la preparación del electrolito.</i>	71
3.4.4 <i>Consumo de energía.</i>	72
3.5 Diseño de experimentos.	73
3.5.1 <i>Superficie de respuesta.</i>	74
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>75</b>
4.1 Ferrato VI producido	75
4.2 Costo directo de producción de ferrato VI.	88
4.3 Diseño factorial 3x2.	90
4.3.1 <i>Superficie de respuesta.</i>	92
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>94</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>102</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Viruta continua.</i>	22
<b>Figura 2.</b> <i>Viruta discontinua.</i>	23
<b>Figura 3.</b> <i>Viruta con borde acumulado.</i>	24
<b>Figura 4.</b> <i>Estructura tetraédrica del ferrato (VI).</i>	28
<b>Figura 5.</b> <i>Especies del ferrato VI en función del pH.</i>	29
<b>Figura 6.</b> <i>Esquema de una celda electroquímica.</i>	32
<b>Figura 7.</b> <i>Curvas de voltamperometría cíclica para el ferrato de potasio (VI).</i>	34
<b>Figura 8.</b> <i>Curvas de titulación potenciométrica.</i>	35
<b>Figura 9.</b> <i>Espectro de absorción del ferrato (VI).</i>	36
<b>Figura 10.</b> <i>Celdas electroquímicas.</i>	40
<b>Figura 11.</b> <i>Luz incidente y transmitida en un analito.</i>	42
<b>Figura 12.</b> <i>Esquema de la ley de Lambert y Beer.</i>	43
<b>Figura 13.</b> <i>Clasificación de los diseños de experimentos.</i>	45
<b>Figura 14.</b> <i>Superficies de respuesta.</i>	48
<b>Figura 15.</b> <i>Volumen de solución.</i>	53
<b>Figura 16.</b> <i>Secciones de lámina de vidrio comercial y resina epóxica.</i>	54
<b>Figura 17.</b> <i>Viruta recolectada.</i>	56
<b>Figura 18.</b> <i>Molde de compactación y ánodos elaborados.</i>	57
<b>Figura 19.</b> <i>Probetas de viruta.</i>	58
<b>Figura 20.</b> <i>Cátodos elaborados.</i>	62
<b>Figura 21.</b> <i>Ubicación de los electrodos en la celda electroquímica.</i>	63
<b>Figura 22.</b> <i>Montaje de la celda electroquímica.</i>	66
<b>Figura 23.</b> <i>Medición de pH.</i>	67
<b>Figura 24.</b> <i>Medición de absorbancia.</i>	67
<b>Figura 25.</b> <i>Datos de los ensayos a 20% solubilidad y 2 Amperios.</i>	78
<b>Figura 26.</b> <i>Datos de los ensayos a 20% de solubilidad y 4 Amperios.</i>	80
<b>Figura 27.</b> <i>Datos de los ensayos a 40% de solubilidad y 2 Amperios.</i>	81
<b>Figura 28.</b> <i>Datos de los ensayos a 40% de solubilidad y 4 amperios.</i>	82

<b>Figura 29.</b> <i>Datos de los ensayos a 60% de solubilidad y 2 Amperios.</i>	83
<b>Figura 30.</b> <i>Datos de los ensayos a 60% solubilidad y 4 amperios.</i>	84
<b>Figura 31.</b> <i>Producción de ferrato n veces el ensayo a mínimas condiciones.</i>	85
<b>Figura 32.</b> <i>Tiempo de reacción vs. porcentaje de ferrato producido.</i>	86
<b>Figura 33.</b> <i>Ferrato producido por consumo energético vs. tiempo de reacción.</i>	87
<b>Figura 34.</b> <i>Costo energético vs. producción de ferrato obtenida en cada ensayo.</i>	88
<b>Figura 35.</b> <i>Costo por gramo de ferrato producido.</i>	90
<b>Figura 36.</b> <i>Superficie de Producción vs. Densidad de corriente y Concentración.</i>	94



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 2.</b> <i>Estados de oxidación del hierro.</i>	27
<b>Tabla 2.</b> <i>Composición de materia prima reportada en la bibliografía. .</i>	55
<b>Tabla 3.</b> <i>Especificaciones de la materia prima (viruta).</i>	60
<b>Tabla 4.</b> <i>Propiedades de los aceros inoxidables 304 y 310.</i>	61
<b>Tabla 5.</b> <i>Condiciones de diseño de la celda electroquímica.</i>	64
<b>Tabla 6.</b> <i>Calibres de cables eléctricos.</i>	65
<b>Tabla 7.</b> <i>Costo de los materiales de los electrodos.</i>	71
<b>Tabla 8.</b> <i>Insumos para los decapados.</i>	72
<b>Tabla 9.</b> <i>Costo del electrolito.</i>	73
<b>Tabla 10.</b> <i>Consumo energético.</i>	74
<b>Tabla 11.</b> <i>Costo por ensayo.</i>	74
<b>Tabla 12.</b> <i>Costos reportados en la bibliografía.</i>	91
<b>Tabla 13.</b> <i>Resultados del diseño factorial 3x2.</i>	92

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>a</b>	Arista
<b>A</b>	Amperios
<b>Abs</b>	Absorbancia
<b>ABTS</b>	2,2-azino-bis (3 etilbenzotiazolina-6- sulfonato)
<b>ANOVA</b>	Análisis de varianza
<b>As</b>	Área superficial
<b>ASTM</b>	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
<b>AWG</b>	Calibre de alambre estadounidense
<b>BUE</b>	Borde construido
<b>b</b>	Camino óptico
<b>c</b>	Concentración
<b>C</b>	Carbono
<b>CCL</b>	Lista de candidatos contaminantes
<b>cm</b>	Centímetros
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetros cuadrados
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Cu</b>	Cobre
<b>CuSO<sub>4</sub></b>	Sulfato de cobre (II)
<b>CV</b>	Voltamperometría cíclica
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>DBPs</b>	Subproductos de desinfección
<b>DTPA</b>	Dietilentriaminopentacetato
<b>EDTA</b>	etilendiaminotetraacetato
<b>ε</b>	Coefficiente de extinción molar
<b>E. Coli</b>	Escherichia Coli
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental
<b>etc.</b>	Etcétera
<b>E°</b>	Potencial eléctrico
<b>e<sup>-</sup></b>	Electrón
<b>F</b>	Estadístico de prueba
<b>Fe</b>	Hierro
<b>FeO</b>	Óxido Ferroso
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido Férrico
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	Óxido Ferrosférico
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. H<sub>2</sub>O</b>	Óxido Férrico Monohidratado
<b>FeOOH</b>	Oxihidróxido férrico
<b>FeO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	Ferrato (VI)
<b>Fe (OH)<sub>3</sub></b>	Hidróxido de hierro (III)
<b>f.e.m.</b>	Fuerza electromotriz
<b>g</b>	Gramos
<b>h</b>	Hora
<b>H<sup>+</sup></b>	Hidrógeno
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	Peróxido de hidrógeno

<b>HCl</b>	Ácido Clorhídrico
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ácido sulfúrico
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Ácido nítrico
<b><i>j</i></b>	Densidad de corriente
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>KOH</b>	Hidróxido de potasio
<b>Ksi</b>	kilolibras de fuerza por pulgada cuadrada
<b>KFeO<sub>2</sub></b>	Ferrita de potasio
<b>K<sub>3</sub>FeO<sub>4</sub></b>	Ferrato de potasio (V)
<b>K<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub></b>	Ferrato de potasio (VI)
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>kWh</b>	Kilovatio hora
<b>L</b>	Litros
<b>m</b>	Metros
<b>M</b>	Molaridad
<b>mA</b>	miliamperios
<b>mM</b>	milimolar
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>Mo</b>	Molibdeno
<b>mol</b>	Moles
<b>μmol</b>	Micromol
<b>m<sup>2</sup></b>	Metros cuadrados
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>NaCl</b>	Cloruro de sodio
<b>Ni</b>	Níquel
<b>NTA</b>	Nitriloacetato
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>Pt</b>	Platino
<b>Po</b>	Potencia inicial
<b>P</b>	Potencia final
<b>(R)</b>	Réplica
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio
<b>NOM</b>	Materia orgánica natural
<b>Na<sub>2</sub>FeO<sub>2</sub></b>	Hipoferrita de sodio
<b>NaFeO<sub>2</sub></b>	Ferrita de sodio
<b>Na<sub>2</sub>FeO<sub>3</sub></b>	Ferrito de sodio (IV)
<b>Na<sub>4</sub>FeO<sub>4</sub></b>	Ferrato de sodio (V)
<b>Na<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub></b>	Ferrato de sodio (VI)
<b>Na<sub>2</sub>FeO<sub>5</sub></b>	Ferrato de sodio (VIII)
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno molecular
<b>OH<sup>-</sup></b>	Grupo hidroxilo
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>p. ej.</b>	Por ejemplo
<b>S</b>	Azufre
<b>SAE</b>	Sociedad de Ingenieros de Automoción
<b>S.A.S</b>	Sociedad por acciones simplificada.

<b>Si</b>	Silicio
<b>T</b>	Transmitancia
<b>THM</b>	Trihalometanos
<b>UV</b>	Ultravioleta
<b>V</b>	Voltios
<b>w</b>	Peso
<b>(VI)</b>	Número 6 romano
<b>°</b>	Grados
<b>\$</b>	Pesos
<b>%</b>	Porciento
<b>”</b>	Pulgada

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue demostrar la viabilidad técnica de la producción de ferrato (VI) mediante reacción electroquímica a partir de viruta de acero al carbón. El ferrato (VI) es un reactivo obtenido mediante la oxidación de hierro y ha demostrado efectividad como agente desinfectante de agua [1]. Por vía electroquímica presenta las siguientes ventajas: No requiere múltiples etapas y se puede llevar a cabo a condiciones ambiente. Este método requiere un electrodo con alto contenido de hierro y debido a que la viruta de acero al carbón cumple con esta característica, además de ser un residuo abundante con mínimo aprovechamiento, se elige como materia prima para la producción de ferrato (VI). Se evaluaron diferentes concentraciones de electrolito, las cuales se determinaron a partir de la solubilidad del hidróxido de sodio en agua, 20, 40 y 60% de solubilidad, que correspondieron respectivamente a 5,45, 10,9 y 16,35M. De igual manera se plantearon dos densidades de corriente, 60,98 y 121,95 A/m<sup>2</sup>, que se establecieron a partir de la corriente suministrada, 2 y 4 amperios. Se estableció una celda electroquímica para llevar a cabo la producción.

Mediante la experimentación se demostró que es viable técnicamente producir ferrato (VI) por vía electroquímica a partir de viruta de acero al carbón. El ensayo realizado a 60% de solubilidad y 4 amperios se posicionó, como el que mejor relación costo-producción presenta, en el cual se obtuvo 2,45 gramos en dos litros, causando un costo por gramo de \$25.439 pesos.

**PALABRAS CLAVE:** Ferrato (VI), viruta, acero al carbón, producción electroquímica, espectroscopia UV-visible.

## INTRODUCCIÓN

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, se encuentra principalmente en sus estados de oxidación 0(elemental), +2 (ion ferroso), +3(ion férrico) [1]. Bajo condiciones de oxidación fuerte se obtiene su estado de oxidación +6, denominado ion ferrato. La obtención de este compuesto se remonta al año 1702, donde el químico Alemán *Georg Ernst Stahl* observó una coloración purpura al detonar una mezcla de nitrato de potasio con limaduras de hierro y disolver el residuo fundido en agua. Esta solución coloreada se identificó posteriormente como ferrato (VI) de potasio ( $K_2FeO_4$ ) [2]. En 1840, se planteó la hipótesis, por el químico francés *Edmond Frémy*, de qué este color, era una especie de hierro con alta valencia. Pero, debido a su inestabilidad y a lo engorroso de su síntesis, no se utilizó ni estudió más a fondo. Su interés renació en los años 70 cuando se utilizó para llevaron a cabo varias investigaciones en la degradación de diversos contaminantes orgánicos, la preparación de nuevos tipos de acumuladores de energía eficientes, el tratamiento del agua potable y el tratamiento de las aguas residuales [3].

Hoy en día, se conocen múltiples aplicaciones del ferrato (VI), debido a su alta capacidad oxidativa y comportamiento como agente químico verde al no generar subproductos tóxicos después de su aplicación [1]. Aplicaciones como, remoción de tintes sintéticos [4][5], eliminación de metales pesados [6][7], descomposición de contaminantes orgánicos (herbicida 2,4 Diclorofenoxiacético) [8], entre otras.

Este trabajo se fundamentó en la producción de ferrato (VI) mediante el uso de una materia prima, accesible, de bajo costo y alta disponibilidad (viruta de acero al carbón), con la finalidad de dar uso a un residuo sin aprovechamiento que se genera continuamente en la empresa donde se desarrolló la investigación, (AGUA, EQUIPOS Y PROCESOS), además de obtener un bajo costo de producción. Se eligió el método electroquímico para llevar a cabo la producción, después de un análisis comparativo entre los diferentes métodos de producción, en el análisis se contempló la manipulación de compuestos tóxicos, la disponibilidad de equipos y las altas temperaturas a las que se deben llevar las diferentes síntesis. Además, la bibliografía reporta que el método electroquímico es más prometedor con ventajas como la pureza del producto, la baja demanda de disolventes, la facilidad en la ejecución y bajos costos en reactivos químicos [9] [10]. Para llevar a cabo la producción, se utilizó una celda electroquímica, construida a partir de vidrio comercial. El ánodo, se elaboró a partir de la viruta de acero al carbón, obtenida en el torno de la empresa

donde se llevó a cabo la investigación; la conformación de dicho electrodo, dada la dispersión de la viruta, se logró por compactación. El cátodo se fabricó a partir de lámina de acero inoxidable. Para el electrolito, se utilizaron disoluciones de soda caustica (Hidróxido de sodio) en agua desionizada, a diferentes concentraciones, determinadas a partir de la solubilidad de la soda en el agua. Se utilizó energía eléctrica suministrada en una fuente de corriente continua con amperaje graduable de 0 a 5 amperios para el proceso electroquímico. El procedimiento se ejecutó durante tres horas y se registró información cada media hora. La información recolectada fue: Temperatura, pH y concentración de ferrato. La temperatura se midió haciendo uso de un termómetro de mercurio, el pH con en el equipo pH meter700 – APERA instruments y la concentración de ferrato, fue determinada por método indirecto, mediante lecturas de absorbancia en un espectrofotómetro GENESYS 30.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Problemática

El proyecto de investigación fue desarrollado en la empresa AGUA EQUIPOS Y PROCESOS S.A.S, esta empresa se dedica a la fabricación, mantenimiento y optimización de unidades de procesamiento, que se requieren para el tratamiento de aguas residuales, potables e industriales. Entre los diferentes procesos que se desarrollan en la empresa, está el de desinfección de aguas tanto potables como residuales, que tiene como objeto eliminar microorganismos patógenos (causantes de enfermedades). Entre la gran variedad de patógenos se encuentran, por ejemplo, bacterias del grupo salmonella, la E. coli, virus como el de la hepatitis A, hongos, protozoos, etc. Por disponibilidad comercial, facilidad en la aplicación y menor costo, son los compuestos de cloro los comúnmente utilizados en los procesos de desinfección. Si bien, los compuestos en base a cloro son ampliamente utilizados y permitidos desde el punto de vista legal, también es cierto que “favorece la generación de subproductos de desinfección (DBPs) al reaccionar con la materia orgánica disuelta que se encuentra en todas las aguas” [6]. Sustancias como organoclorados, (p. ej. ácidos haloacéticos) y trihalometanos, subproductos tóxicos que pueden causar genotoxicidad [6].

El efecto desinfectante se produce como consecuencia de reacciones de oxidación fuerte, y en razón a esto existen agentes oxidantes diferentes al cloro que cumplen el mismo efecto, como es el caso del ion ferrato (VI), que, al utilizarse, no se descompone en subproductos tóxicos [5].

Si bien es cierto, que la utilización como desinfectante del ion ferrato (VI) está comprobada [11], también es cierto que su disponibilidad comercial en comparación al cloro es baja o casi nula. El ion ferrato (VI) se puede producir a partir de diferentes materias primas siempre y cuando tengan alto contenido de hierro [12]. Una materia prima opciónada es el acero al carbón de uso industrial, material que, para efectos de la empresa mencionada, es de frecuente uso en la fabricación de diferentes dispositivos y transformado en operaciones metalmecánicas tales como torneado, fresado, pulido, entre otras. La transformación del acero en los productos de fabricación genera un residuo industrial que no tiene aprovechamiento (viruta).



En consecuencia, de lo mencionado, se propuso utilizar dicha viruta para la producción de ion ferrato (VI).

La producción del ion ferrato (VI) es posible por métodos químicos y electroquímicos. Los procesos químicos pueden ser térmicos o en solución, donde se requiere una gran cantidad de energía, múltiples etapas de proceso, insumos cuyo manejo es tóxico y/o peligroso, debido a la detonación de las mezclas y alta temperaturas que se requieren ( $> 370\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [13]. En contraste el método electroquímico, generalmente se desarrolla a temperaturas por debajo de los  $60^{\circ}\text{C}$  y no requiere el uso de reactivos nocivos [1] [10].

Con los condicionamientos señalados, se propuso utilizar el método electroquímico para la obtención de ferrato (VI), a partir de viruta de acero.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo General***

Determinar la viabilidad técnica de la producción por vía electroquímica del ion ferrato (VI) utilizando viruta de acero al carbón en su estado de residuo sólido.

### ***1.2.2. Objetivos Específicos***

- ✓ Determinar las especificaciones de la materia prima (viruta) requeridas para el proceso de producción.
- ✓ Diseñar la celda electroquímica para la síntesis del ferrato (VI).
- ✓ Cuantificar por el método fotométrico la producción de ferrato (VI) obtenida.
- ✓ Establecer el costo directo de producción del ferrato (VI).

## **1.3. Justificación**

Se analizó la posibilidad de producción del ion ferrato (VI) a partir de viruta de acero al carbón, generada en los procesos de torneado llevados a cabo por la empresa AGUA EQUIPOS Y PROCESOS S.A.S, considerando que estas virutas son un residuo que actualmente es entregado a empresas especializadas, en el tratamiento de estos metales con una retribución monetaria simbólica (aproximadamente  $\$500$  /kg); por tanto, se busca dar un nuevo manejo reutilizándola como insumo potencial de bajo costo y disponibilidad en grandes volúmenes, para la producción

de ferrato VI.

De esta manera se aprovecha un material que hoy es un desecho, para producir un compuesto cuya utilización podría ser incorporada en los procesos de tratamiento de aguas desarrollados por la empresa. Por otro lado, el desarrollo de este proceso podrá fomentar el aumento de la oferta y/o comercialización en el mercado actual del ferrato VI.

El ferrato VI es reconocido como agente químico verde, en especial si se compara con el uso del cloro para los procesos de desinfección del agua [13]. Mientras que en la cloración se desata una formación espontánea de compuestos trihalometanos (THM), algunos de ellos como el cloroformo (asociado a enfermedades como el cáncer) [14], el uso del ferrato VI genera subproductos no tóxicos, dado que, la reducción forma oligómeros de hidróxido en forma de ion férrico (Hidróxido férrico) [15], por tanto, se puede hablar de un proceso limpio que no genera compuestos cancerígenos, en la desinfección del agua.

Ahora bien, un factor decisivo en la selección del compuesto desinfectante para el agua es el costo y disponibilidad, motivo por el cual se tiene preferencia por el cloro antes que por el ferrato. El disminuir los costos de producción del ferrato facilitará que se extienda su uso en una sociedad que día tras día busca migrar hacia procesos ambientalmente sostenibles.

#### **1.4. Alcance**

El proyecto de investigación se centró en evaluar la posibilidad de producir ferrato (VI) por el método electroquímico a partir de viruta de acero al carbón generada como subproducto en los procesos de torneado de la empresa AGUA EQUIPOS Y PROCESOS S.A.S.

La investigación se realizó a escala laboratorio, en primera instancia, utilizando la infraestructura de la empresa en todo lo permitiente a la obtención, manejo, preparación de la materia prima (Viruta de acero) y fabricación del prototipo propuesto. En lo referente a los tratamientos previos de la materia prima, donde fue necesario utilizar reactivos restringidos comercialmente (Ácido Clorhídrico), así como también la cuantificación de ferrato VI producido, donde se requirieron instrumentos específicos, se hizo uso de los laboratorios de la Fundación Universidad de América.

La viruta de acero al carbón generada en los procesos de torneado que se realizan en el taller de

la empresa mencionada sólo tuvo transformación por compactación para lograr la geometría necesaria del electrodo a trabajar, sin cambiar ninguna característica referente a su composición química, relacionada en la ficha técnica del acero original.

La producción de ferrato (VI) se realizó por síntesis electroquímica por medio de electrodos de acero y una disolución electrolítica de hidróxido de sodio. Para la cuantificación del ferrato (VI) se contemplaron los métodos volumétricos, potenciométricos y espectrofotométricos, después de un análisis de disponibilidad de equipos y reactivos se optó por el método espectrofotométrico, el cual fue desarrollado con instrumentos específicos pertenecientes a los laboratorios de la Universidad de América.

Cumpliendo con el alcance proyectado, la decisión de ejecutar prueba industrial, del proceso de producción de ion ferrato (VI) quedó bajo el criterio de la empresa.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1 Viruta Metálica

#### 2.1.1 Definición

Es el fragmento resultante de los procesos utilizados para dar forma y dimensiones específicas a una pieza de metal, mediante el uso de brocas, cuchillas de torno, fresas etc. Presenta forma de lámina curvada o espiral [16].

#### 2.1.2 Procesos metalmecánicos

Mediante los procesos metalmecánicos se transforman los metales ferrosos y no ferrosos en piezas individuales, ensambles o estructuras a gran escala; se realiza por medio de procesos mecánicos cambiando su forma geométrica, para posteriormente realizar un acabado de la superficie. Los procesos incluyen: separar, cortar, torneado, taladrar, fresas, cepillar, esmerilar, entre otras [17].

2.1.2.a. Torneado. El proceso consiste en el mecanizado de una pieza que mediante el arranque de material en forma de viruta o rebaba permite obtener una forma deseada, un ajuste geométrico o un acabado superficial. Se debe considerar la herramienta y el ángulo de corte con el que se realizará el maquinado ya que de estos dependerá el tipo y tamaño de viruta que se producirá [18].

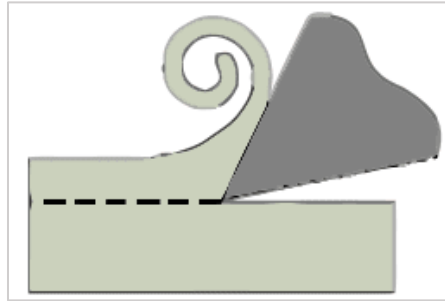
#### 2.1.3 Tipos de viruta

La viruta que se genera depende del material, de la velocidad, avance y profundidad de corte, de la geometría de la herramienta, entre otros [19].

2.1.3.a. Continua. Se obtiene al trabajar material dúctil como el aluminio y acero al carbón, las virutas se generan sin fracturarse en forma de cuerda larga o dobladas en un rollo apretado. Se forma con piezas de trabajo dúctiles, alta velocidad en la pieza, velocidad de avance baja, poca profundidad de corte, ángulo de inclinación alto y cuando se genera menos fricción entre la cara de la herramienta y la viruta [19]. La figura 1 representa de forma gráfica el tipo de viruta continua.

## Figura 1.

*Viruta continua.*

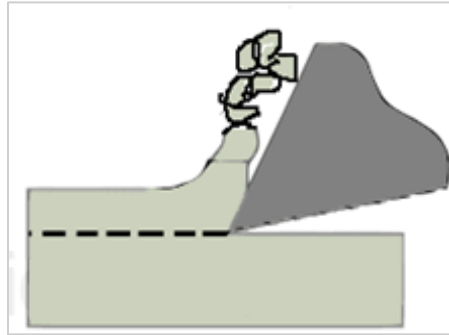


**Nota.** Se representa la forma que adquiere la viruta continua. Tomado de: Mecholic. (2016). Types of Chip Formation. [En línea]. Disponible: <https://www.mecholic.com/2016/02/types-of-chip-formation.html>

2.1.3.b. Discontinua. Se producen cuando se cortan metales frágiles como el hierro fundido y el bronce duro o cuando se cortan algunos metales dúctiles en malas condiciones de corte; con materiales de trabajo duro y quebradizo o cuando la pieza de trabajo tiene una inclusión dura e impurezas; bajo condiciones de baja velocidad de la pieza, alta velocidad de avance, gran profundidad de corte, ángulo de inclinación bajo. Cuando la pieza sufre deformación plástica genera acumulación sobre la herramienta de corte por viruta que se ha adherido entre sí o que está completamente separada [19]. En la figura 2 se esquematiza de forma gráfica este tipo de viruta.

## Figura 2.

*Viruta discontinua.*



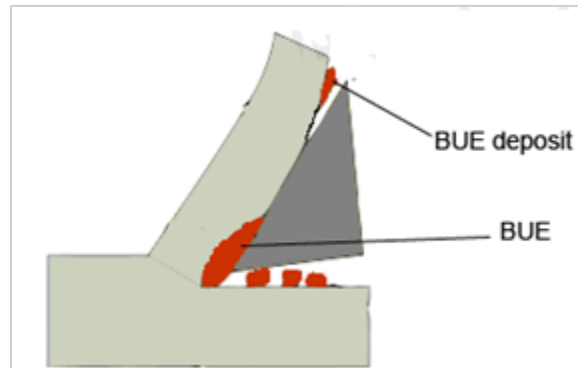
*Nota.* La imagen representa la forma del tipo de viruta generada (discontinua). Tomado de: Mecholic. (2016). Types of Chip Formation. [En línea]. Disponible: <https://www.mecholic.com/2016/02/types-of-chip-formation.html>

2.1.3.c. Con borde acumulado. Se generan por una tensión que no es uniforme sobre el material, su aspecto se asemeja a una sierra debido a las zonas de alta y baja deformación por cizallamiento. Se producen por baja velocidad de la pieza y porque la disipación de calor en el filo también es baja. Debido a que se presenta alta temperatura y presión la viruta se adhiere o se suelda al filo y a la cara de la herramienta, el exceso generado se denomina *borde construido* o Built-up Edge (BUE) [19].

Se producen con aceros inoxidables, aleaciones de níquel, titanio, cobre, aluminio y otros materiales blandos “gomosos”; bajo condiciones de alta fricción en la cara de la herramienta, ángulo de ataque bajo, baja velocidad en la pieza, alta velocidad de avance, gran profundidad de corte [19]. La figura 3 representa gráficamente este tipo de viruta.

### Figura 3.

*Viruta con borde acumulado.*



**Nota.** La imagen representa la forma de la viruta generada con el borde de acumulación. Tomado de: Mecholic. (2016). Types of Chip Formation. [En línea]. Disponible: <https://www.mecholic.com/2016/02/types-of-chip-formation.html>

#### **2.1.4 Acero al carbón**

2.1.4.a. Definición. Son aquellos que contienen un porcentaje de carbono que permite definir sus propiedades mecánicas, además del hierro y el carbono que generalmente no supera el 1%, hay otros elementos en la aleación que se requieren para su producción, como el manganeso y el silicio, y otros compuestos que se consideran como impurezas debido a la dificultad de excluirlos totalmente como el fósforo, níquel, cromo, azufre, entre otros. El 90% de los aceros son aceros al carbono [20].

Aumentar la cantidad de carbono en el acero ocasiona, por un lado, aumentos en la dureza y resistencia del material y por otro lado disminución en la ductilidad, soldabilidad y elongación.

2.1.4.b Clasificación del acero al carbón.

2.1.4.b.i. Bajo contenido de carbono. Son llamados aceros dulces o fierros. Poseen porcentajes de carbono menores a 0.25%. Son dúctiles, maleables, altamente maquinables y soldables. Se emplea en la fabricación de perfiles estructurales, alambres, clavos, tornillos, barras, varillas, entre otros [20].

2.1.4.b.ii. Mediano contenido de carbono. El contenido de carbono puede variar entre el 0.25 y 0.55%. Presenta mayor dureza y resistencia. Se emplean para la fabricación de ejes para vehículos y maquinas, resortes, engranajes, herramientas de agricultura, entre otros [20].

2.1.4.b.iii. Alto contenido de carbono. Contiene porcentajes de carbono mayores a 0.55%. Se usan en aplicaciones en las que es necesario incrementar la resistencia al desgaste y conseguir altos niveles de dureza. Prácticamente todas las piezas con acero de este tipo son tratadas térmicamente antes de usar [21].

2.1.4.c. Normativa.

2.1.4.c.i. Norma SAE. La norma Society of Automotive Engineers (SAE) clasifica los aceros en distintos grupos: Aceros al carbono, Aceros de media aleación, Aceros aleados, Aceros inoxidables, Aceros de alta resistencia y Aceros de herramienta.

La denominación que emplea la normativa SAE para los aceros al carbono es según el siguiente esquema: SAE 10XX, donde XX indica el contenido de Carbono (C).

Por ejemplo: SAE 1005 a 1015 → Grupo con un contenido de carbono entre 0,05 - 0,15 %C [21].

2.1.4.c.ii. Norma ASTM. La norma American Society for Testing and Materials (ASTM) no especifica la composición directamente, sino que determina la aplicación o su ámbito de empleo.

La numeración de los aceros tiene el siguiente esquema general: ASTM YXX, donde Y indica el grupo de aplicación según la siguiente lista [21]:

**A:** si se trata de especificaciones para aceros.

**B:** especificaciones para no ferrosos.

**C:** especificaciones para hormigón, estructuras civiles.

Y las XX se asocian al siguiente listado.



**A36:** especificación para aceros estructurales al carbono.

**A285:** especificación para aceros al carbono de baja e intermedia resistencia para uso en planchas de recipientes a presión.

**A325:** especificación para pernos estructurales de acero con tratamiento térmico y una resistencia a la tracción mínima de 120/105 ksi.

**A514:** especificación para planchas aleadas de acero templadas y revenidas con alta resistencia a la tracción, adecuadas para soldar.

## **2.2 Ferrato VI**

### ***2.2.1 Estados de oxidación del hierro***

El hierro es uno de los elementos más importantes de la naturaleza, además de los tres estados estables en los que puede encontrarse (0, +2 y +3); debido a la fuerte oxidación del elemento, se pueden encontrar estados con mayor número de oxidación +4, +5+, +6 y +8 [1], como se observa en la tabla 1. Estos estados son denominados ferratos. Cuentan con diversas aplicaciones como catalizadores, fluidos magnéticos y para la producción de pigmentos magnéticos, entre otras aplicaciones [10].

Entre los ferratos, el estado +6 es relativamente estable y fácil de sintetizar [1], características que han despertado el interés durante las últimas dos décadas donde se han realizado varios estudios de investigación utilizando el estado +6 del hierro.

**Tabla 1.***Estados de oxidación del hierro.*

Nombre	Fórmula	Mineral - Sal
Óxido Ferroso	FeO	wuestita
Óxido Férrico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hematita
Óxido Ferrosférrico	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetita
Óxido Férrico Monohidratado	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	Goethita
Oxihidróxido férrico	FeOOH	Akagameita
Hipoferrita	FeO <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	Na <sub>2</sub> FeO <sub>2</sub>
Ferrita	FeO <sup>2-</sup>	NaFeO <sub>2</sub> , KFeO <sub>2</sub>
Ferrato (IV)	FeO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Na <sub>2</sub> FeO <sub>3</sub>
Ferrato (IV)	FeO <sub>4</sub> <sup>4-</sup>	Na <sub>4</sub> FeO <sub>4</sub>
Ferrato (V)	FeO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	K <sub>3</sub> FeO <sub>4</sub>
Ferrato (VI)	FeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sub>2</sub> FeO <sub>4</sub> , K <sub>2</sub> FeO <sub>4</sub>
Ferrato (VIII)	FeO <sub>5</sub> <sup>2-</sup>	Na <sub>2</sub> FeO <sub>5</sub>

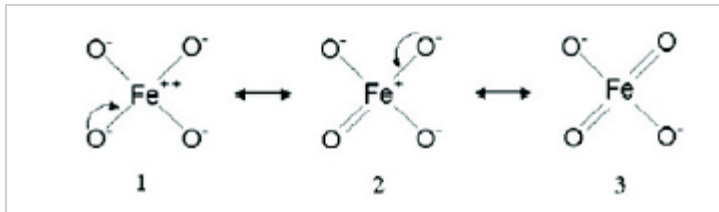
**Nota.** La tabla presenta los diferentes estados de oxidación que se obtienen del hierro, el nombre, la fórmula y el respectivo mineral o sal que lo contiene. Tomado de: F.S. García Einschlag. (2011). Wastewater – Treatment and Reutilization. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/jbGbh4q>

### 2.2.2. Estado de oxidación +6

En este estado de oxidación se genera un compuesto denominado ferrato (VI) con fórmula molecular FeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, cuenta con una estructura tetraédrica, donde los átomos de oxígeno (O<sub>2</sub>) se unen mediante enlaces covalentes al átomo central de Fe [4], como se muestra en la Figura 4. En solución presenta un color púrpura intenso y cuando se disuelve en agua desionizada, se produce una efervescencia al evolucionar el oxígeno, además de un salto de pH al formarse el ion hidróxido [2].

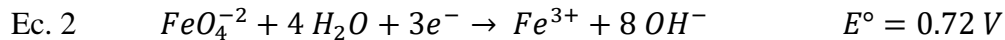
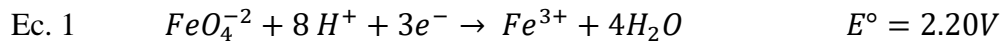
**Figura 4.**

*Estructura tetraédrica del ferrato (VI).*



*Nota.* La figura representa tres estructuras resonantes del ion ferrato (VI) en solución acuosa. Tomado de: F.S. García Einschlag. (2011). Wastewater – Treatment and Reutilization. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/jbGbh4q>

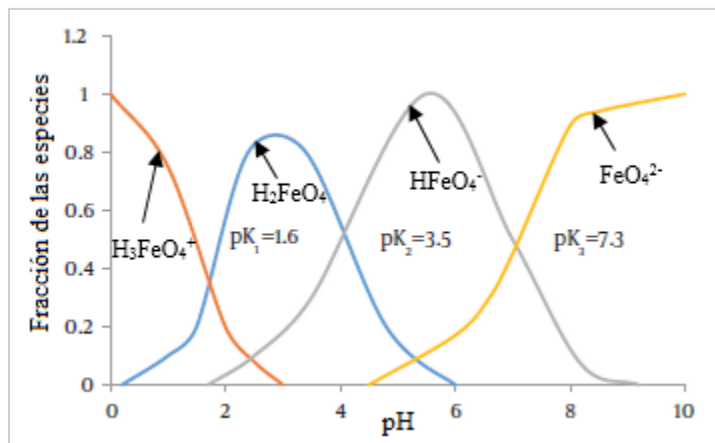
Las especies de ferrato tienen unos potenciales de reducción de 2,20 V en condiciones ácidas y de 0,72 V en condiciones alcalinas (ecuación 1 y 2, respectivamente), tomadas de la bibliografía[22].



La estabilidad del ion ferrato depende en gran medida de la concentración del ferrato y del pH de la solución [2]. Investigaciones detalladas utilizando espectroscopia, determinaron cuatro especies de ferrato VI, en medio acuoso [5], la prevalencia de las especies se relacionó directamente con el valor del pH, como se muestra en la Figura 5.

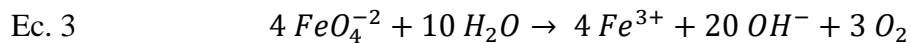
**Figura 5.**

*Especies del ferrato VI en función del pH.*



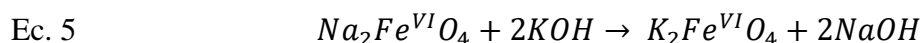
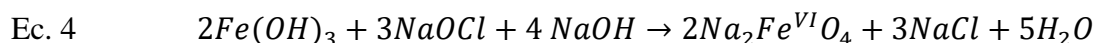
**Nota.** En la figura se observa la distribución del ferrato (VI) en soluciones acuosas con diferentes pH. Tomado de: A. Talaiekhosani, M.Bagheri, M. Reza Talaei, and N. Jaafarzadeh. “An Overview on Production and Applications of Ferrate (VI)”, *Jundishapur Journal of Health Sciences*, pp. 9, Mar, 2016. [En Línea]. Disponible: [http://jjhsci.portal.tools/?page=article&article\\_id=34904](http://jjhsci.portal.tools/?page=article&article_id=34904)

Una vez conformado el  $FeO_4^{2-}$  su mayor utilidad es como oxidante fuerte, por ejemplo, en tratamiento de aguas. Durante la oxidación de los contaminantes, el ferrato (VI) proporciona un mecanismo adecuado para la autoeliminación de este en solución; este reaccionará con el agua dejando como producto final el ion férrico y oxígeno molecular de acuerdo con la ecuación 3, tomada de la bibliografía [22].



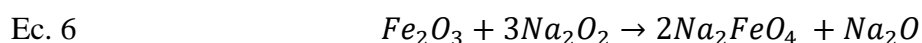
2.2.2.a. Métodos de producción. Se conocen tres métodos para la producción del ferrato (VI), la síntesis química (Oxidación húmeda del hierro III), térmica (Oxidación en seco del hierro a alta temperatura) y electroquímica.

2.2.2.a.i. Químico. Este método consiste en la oxidación del ion férrico en una solución de hipoclorito de sodio con concentraciones mayores al 12% en presencia de hidróxido de sodio, lo que puede dar lugar al ferrato de sodio (VI), seguido de la recristalización con hidróxido de potasio, que produce el ferrato (VI) de potasio [1]. Las reacciones que intervienen en el proceso son las ecuaciones 4 y 5, tomadas de la bibliografía [1].

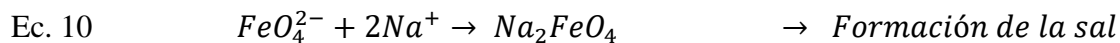
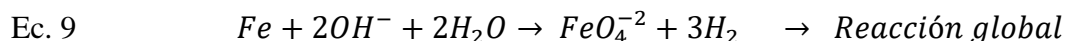
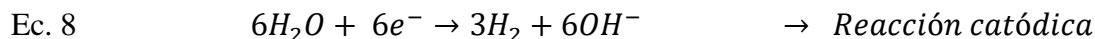
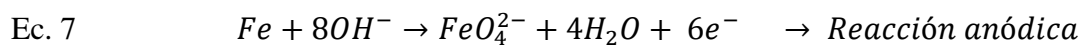


Este procedimiento produce un 10-15% de rendimiento de ferrato (VI) de potasio y se requieren muchos pasos de separación con varios pasos de recristalización, incluyendo el lavado con metanol seco, para obtener más del 90% de pureza del producto [1].

2.2.2.a.ii. Térmico. El ferrato (VI) se obtiene calentando limaduras de hierro con nitratos o con óxidos de hierro con álcalis y nitratos a temperaturas por encima de los 500 °C, las mezclas finales incluyen las sales de ferrato (VI), los subproductos y los reactivos restantes [1]. Para la producción de ferrato de sodio (VI) todo el proceso debe realizarse en una caja de guantes seca y en presencia de difosforopentaóxido (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), utilizando óxido de hierro de alta pureza (99,9 mol %) [1]. Este se calienta antes de su uso en oxígeno seco a 150-200 °C para eliminar el agua absorbida. Este óxido de hierro seco se mezcla con peróxidos de metales alcalinos y se coloca en un crisol de plata para su posterior tratamiento térmico. Del mismo modo, se prepara Fe (VI) utilizando los residuos de la galvanización, ya que los residuos se mezclan con óxido férrico en un horno de mufla a 800 °C durante un tiempo, la muestra se enfría, luego se agita con peróxido de sodio sólido y se calienta gradualmente durante unos minutos [1]. Las mezclas se fundieron y luego se enfriaron dando lugar a la formación de ferrato de sodio (VI), la reacción se muestra en la ecuación 6, tomada de la bibliografía [1].



2.2.2.a.iii.Electroquímico. La síntesis de ferrato VI por este método, consiste en un ánodo de sacrificio de hierro en una celda de electrólisis la cual contiene una solución fuertemente alcalina de NaOH o KOH, se proporciona corriente eléctrica que sirve para oxidar el hierro disuelto a Fe (VI). El esquema de la celda electroquímica se muestra en la figura 6. Las reacciones que ocurren en el proceso se representan en las ecuaciones 7, 8, 9 y 10, tomadas de la bibliografía [1].



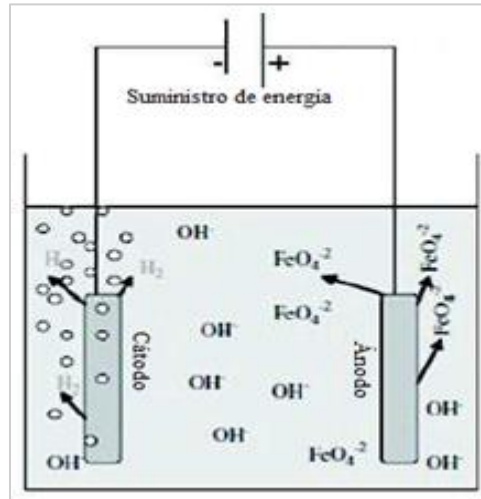
El mecanismo de formación se ha propuesto como:

- ✓ La formación de especies intermedias.
- ✓ La formación de ferrato y la pasivación del electrodo.
- ✓ La formación de la capa de pasivación que impide la posterior generación de ferrato [1].

Estudios mencionan mayores eficiencias utilizando electrodos que contienen carbono [3], la comparación entre el tipo de electrolito (NaOH y KOH) ha demostrado mejores resultados utilizando hidróxido de sodio [12] Otros casos de estudio han demostrado la mayor eficiencia a altas concentraciones, valores de hasta 20M de NaOH [13].

**Figura 6.**

*Esquema de una celda electroquímica.*

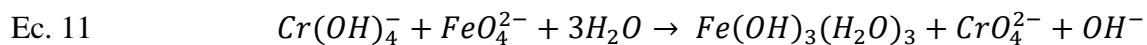


**Nota.** Interacción de especies en una celda electroquímica. Tomado de: F.S. García Einschlag. (2011). Wastewater – Treatment and Reutilization. [En línea].

Disponible: <https://cutt.ly/jbGbh4q>

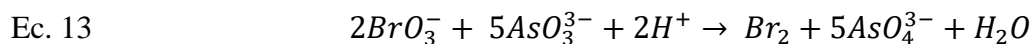
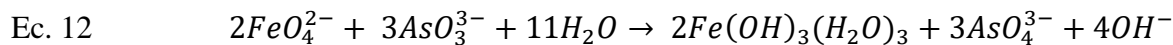
2.2.2.b. Métodos de cuantificación. La cuantificación de ferrato VI se puede realizar por tres métodos: Volumétricos, electroquímicos y espectrofotométricos.

2.2.2.b.i. Volumétricos. En este método, el Fe (VI) oxida la sal de cromita y el cromato oxidado se valora con la solución estándar de sal ferrosa en medio ácido, utilizando difenil sulfonato de sodio como indicador [23]. La reacción que se lleva a cabo se muestra en la ecuación 11, tomada de la bibliografía [23].



Otro método desarrollado se basa en la oxidación del arsenito alcalino a arseniato utilizando el ferrato (VI) en solución acuosa. En este método analítico se añade una cantidad conocida de ferrato (VI) a una solución alcalina estándar, en la cual, la cantidad de arsenito es mayor que la requerida

para la reducción de los iones de ferrato (VI) y el exceso de arsenito se valorar con una solución estándar de bromato. Luego, se calcula el equivalente de bromato consumido y, posteriormente, se estima el equivalente de ferrato [1]. Las reacciones químicas que tienen lugar se representan en las ecuaciones 12 y 13, tomadas de la bibliografía [1].



Ambos métodos pueden ser utilizados para determinar concentraciones de ferrato (VI) que se encuentren entre concentraciones inferiores o superiores a las molares. La gran desventaja en ambos casos es la generación de residuos que contienen residuos de cromo y arsénico que requerirán disposición final especial [24].

#### 2.2.2.b.ii. Electroquímicos.

##### ✓ Voltamperometría cíclica (CV).

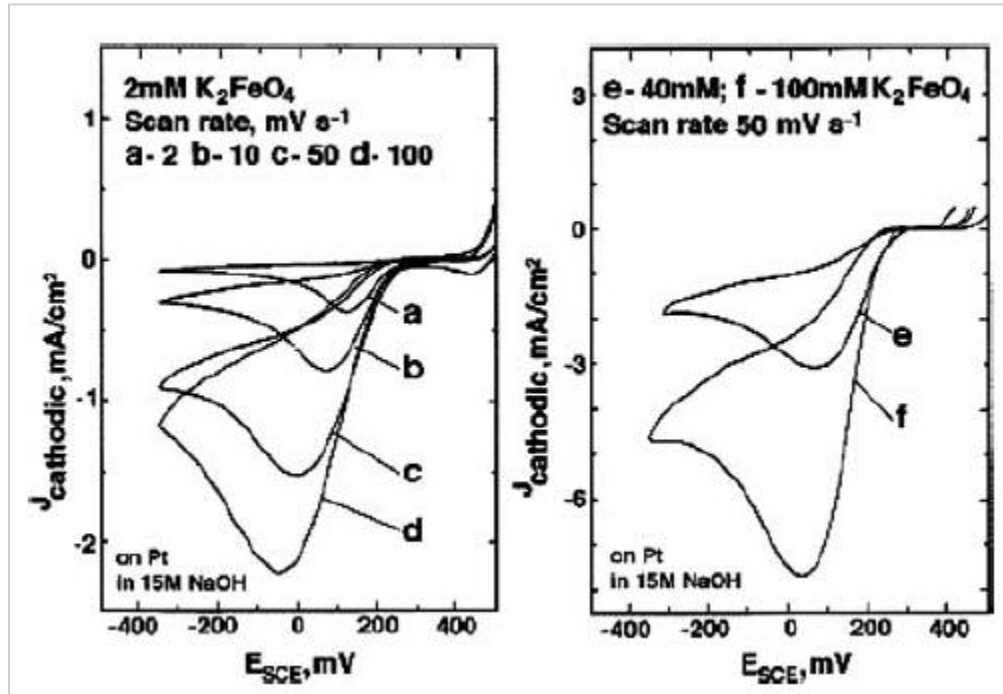
Por medio de esta técnica se obtienen curvas de voltamperometría cíclica donde el potencial del electrodo a trabajar incrementa linealmente a diferentes concentraciones. También permite estudiar más cerca la síntesis electroquímica del Fe (VI) en soluciones acuosas e incluso fundidas.

A continuación, se muestra un ejemplo de las curvas de CV (figura 7) de una solución de hidróxido de sodio a 15M con un electrodo Pt para la reducción de  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ . Se encontró una relación lineal positiva entre la densidad de corriente de pico catódica (J) y la raíz cuadrada de velocidad de barrido. La corriente de pico catódica resulta ser proporcional a la concentración de ferrato (VI). La técnica puede detectar concentraciones de ferrato (VI) milimolares [13].



**Figura 7.**

Curvas de voltamperometría cíclica para el ferrato de potasio (VI).



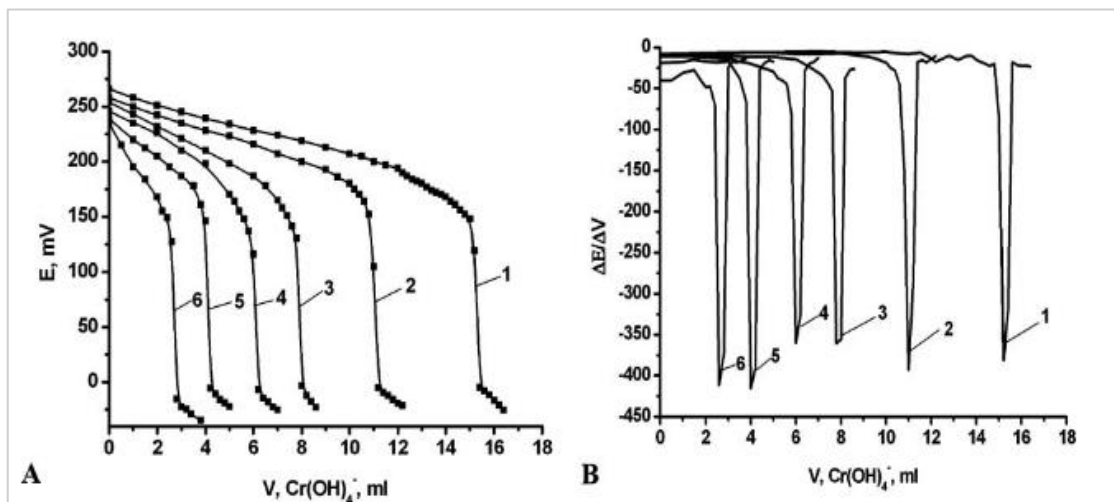
*Nota.* La figura del lado izquierdo esquematiza la variación de la densidad de corriente y la velocidad de barrido. La de la derecha, muestra la relación entre la corriente catódica y la concentración de ferrato. Tomado de: J. M. Quino Favero. “*Diseño de una unidad de tratamiento de agua basada en electrosíntesis de iones ferrato para la remoción de arsénico inorgánico*”. Lima, Perú. 2020 [PDF]. Disponible: <https://cutt.ly/0nrHCyH>

✓ Potenciometría.

Este método se basa en la titulación con una mezcla de una solución madre de cloruro de cromo con hidróxido de sodio, la solución madre se prepara mediante la disolución de cristales sólidos de cloruro de cromo, la solución es estandarizada con  $\text{H}_2\text{O}_2$  y posteriormente se titula con una solución estándar de sulfato ferroso de amonio. La solución preparada se suministra a una celda electroquímica, donde se utiliza un hilo de Pt como electrodo indicador para determinar el ferrato (VI), la medición de la fuerza electromotriz (f.e.m.) se realiza con un pH metro. Finalmente se aplica un programa de ordenador para determinar los puntos de equivalencia de las titulaciones [25]. Las curvas de titulación potenciométrica se muestran en la figura 8.

**Figura 8.**

*Curvas de titulación potenciométrica.*



**Nota.** La imagen muestra las curvas de titulación potenciométrica a diferentes concentraciones de ion ferrato (VI) usando hidróxido de cromo  $[\text{Cr(OH)}_4^-]$  a  $1 \times 10^{-3} \text{M}$ , con NaOH a 12.5M y temperatura de 20 °C. La gráfica A muestra las curvas integrales y la gráfica B las curvas diferenciales, siendo cada curva **1)**  $1,52 \times 10^{-3} \text{M}$ ; **2)**  $1,10 \times 10^{-3} \text{M}$ ; **3)**  $7,81 \times 10^{-4} \text{M}$ ; **4)**  $6,01 \times 10^{-4} \text{M}$ ; **5)**  $4,01 \times 10^{-4} \text{M}$ ; **6)**  $2,61 \times 10^{-4} \text{M}$ . Tomado de: D. Golovko, V. Sharma. “A Simple Potentiometric Titration Method to Determine Concentration of Ferrate (VI) in Strong Alkaline Solutions”. Jun, 2011. DOI: 10.1080/00032719.2010.511748. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/5nrJcUJ>

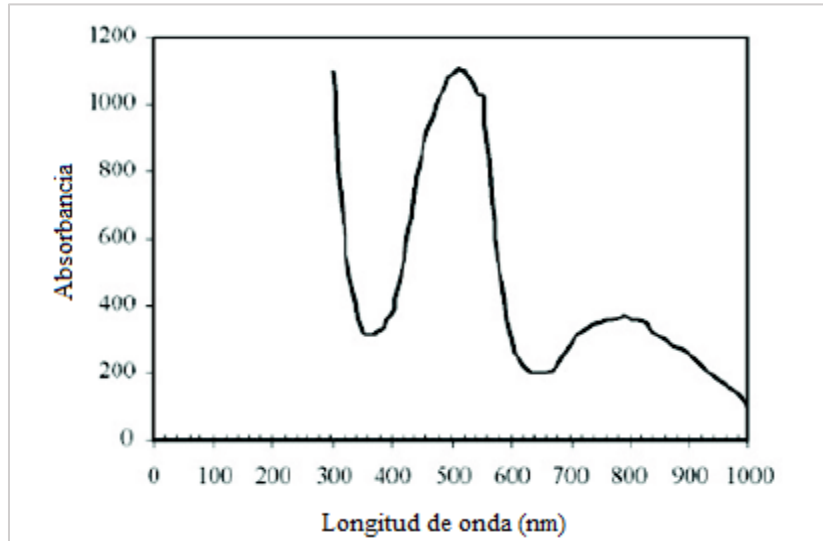
### 2.2.2.b.iii. Espectrofotométricos.

#### ✓ Espectroscopia UV-Visible.

Este es el método más útil y robusto para la cuantificación del ferrato (VI) [1]. En este método, la solución acuosa de ferrato, que es de color rojo-violeta y da unos máximos de absorción característicos en torno a 500 y 800 nm, puede utilizarse para su estimación cualitativa y cuantitativa. La figura 9 muestra los picos de absorción a diferentes longitudes de onda. Las mediciones espectrales del  $\text{FeO}_4^{2-}$  mostraron que el espectro de absorción tiene un pico a  $\approx 510 \text{nm}$ . El coeficiente de extinción molar para el  $\text{FeO}_4^{2-}$  es de  $1150 \text{ M}^{-1} \text{cm}^{-1}$  [1][15][26][27].

### Figura 9.

*Espectro de absorción del ferrato (VI).*



**Nota.** La imagen representa el pico de absorción del ferrato (VI) con el coeficiente de extinción. Tomado de: F.S. García Einschlag. (2011). Wastewater – Treatment and Reutilization. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/jbGbh4q>

#### ✓ Colorimetría ABTS.

Este método utiliza el ABTS (2,2-azino-bis (3 etilbenzotiazolina-6- sulfonato)), el ABTS incoloro reacciona con el Fe (VI) para formar un catión radical verde, ABTS<sup>+</sup>, que presenta un pico de absorción a 415 nm. El aumento de la absorbancia a 415 nm para el radical ABTS<sup>+</sup> es lineal con la concentración de Fe (VI) en el rango de 0.03  $\mu\text{mol/L}$  hasta 35  $\mu\text{mol/L}$  [13].

#### ✓ Fluorescencia.

Esta técnica utiliza la escopoletina (7-hidroxi-6-metoxi-cumarina), un agente químico de fluorescencia. La reacción del ferrato (VI) con la escopoletina mostraron que el máximo de absorción variaba con el pH mientras que el máximo de emisión era independiente del pH. Las longitudes de onda de excitación y emisión se fijaron en 335 nm y 460 nm, respectivamente, y se construyeron curvas de calibración en función del pH para demostrar una disminución lineal de la fluorescencia de la escopoletina con concentraciones crecientes de ferrato (VI) en el agua desionizada [24].

2.2.2.c. Usos. En todas las reacciones de oxidación del ferrato (VI), el producto de hierro final es el óxido férrico, no tóxico, típicamente conocido como herrumbre, por tanto, el ferrato tiene la distinción de ser un oxidante “ambientalmente seguro” [22]. La aplicabilidad de ferrato (VI) en tratamiento de residuos involucra no solo sus capacidades oxidativas sino también la formación de agentes floculantes, coagulantes y sus propiedades desinfectantes. En concordancia, el ferrato (VI) es uno de los productos químicos más eficiente, multifuncional y respetuoso con el medio ambiente para el tratamiento del agua potable y las aguas residuales [22].

El ferrato reacciona con compuestos orgánicos o inorgánicos y entidades biológicas que debido a su precipitación como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  u otras sales de  $\text{Fe}(\text{III})$  se puede filtrar fácilmente dejando productos inocuos que contienen agua libre de hierro. Una propiedad importante del ferrato como agente para tratamiento de agua es su acción biocida debido a que tiene la capacidad de inactivar microorganismos patógenos en concentraciones moderadamente bajas; algunos de ellos son *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Shigella* y *Sphaerotilus* [22][28]. Inclusive ha sido considerado un desinfectante efectivo en contra de virus, tales como el bacteriófago f2. El ferrato ha sido estudiado también por sus actividades antivirales y se ha encontrado que es efectivo en la inactivación de virus [11].

Debido a las propiedades oxidantes-coagulantes, se ha considerado por compañías químicas y farmacéuticas para el tratamiento de agua contaminada usada o producida en sus procesos. Los residuos producidos por estas compañías pueden ser oxidados en subproductos relativamente menos dañinos con el ferrato, dejando el agua en condiciones de ser liberada a los sistemas de alcantarillado municipales y ser tratada sin ningún cuidado especial [22]. Además, se ha descrito la destrucción de nitrosaminas por oxidación de ferrato, las cuales son potentes cancerígenos, en aguas residuales [29].

Los Poliaminocarboxilatos como el dietilentriaminopentacetato (DTPA), el etilendiaminotetraacetato (EDTA) y el nitriloacetato (NTA) son ligandos sintéticos que forman complejos estables con la mayoría de los metales y se usan en una variedad de aplicaciones industriales, tales como producción de papel y teñido de textiles. El ferrato puede aplicarse para degradar poliaminocarboxilatos en productos simples [22].

Los colorantes o tinturas presentes en aguas residuales originadas por la industria textil son de particular preocupación ambiental puesto que producen colores indeseables en las aguas. Son generalmente compuestos dañinos y pueden originar subproductos tóxicos a través de hidrólisis u oxidación que tienen lugar en la fase residual. La decoloración y degradación de las diferentes clases de colorantes de la industria textil puede lograrse usando ferrato. [4], [5] y [30].

Los suministros o abastecimientos de agua que contienen compuestos de arsénico son una preocupación de salud Mundial. Las etapas que involucran oxidación, adsorción y precipitación pueden llevarse a cabo con ferrato al eliminar arsénico del agua [6], [13].

La presencia de materia orgánica natural (NOM) en abastecimientos de agua subterránea y superficial genera alerta por la formación de subproductos de desinfección (DPB) que resultan del tratamiento de estas aguas mediante procedimientos de cloración. La oxidación de NOM por cloración produce hidrocarburos clorados, muchos de los cuales se sabe que son cancerígenos. El ferrato tiene un excelente potencial como tratamiento respetuoso con el medio ambiente para reducir los niveles de DPB en agua potable. Este proceso no formaría sustancias orgánicas cloradas tóxicas y puede también mineralizar efectivamente NOM en dióxido de carbono, eliminando potencialmente la producción de DPB por completo [22].

Las propiedades mencionadas del ferrato pueden ser explotadas en plantas de tratamiento de agua municipales o industriales. En vista de que el ferrato es un desinfectante eficiente, tiene potencial para ser usado en lugar de la cloración extensiva de agua potable.

Además, se ha mencionado que de la lista de candidatos contaminantes del agua (CCL) de la EPA, como el diazion, disulfoton, fonofos, terbufos, cianazina, prometon, 1,2-difenilhidracina, nitrobenzeno, acetoclor, 2,4,6-triclorofenol, y 2,4-diclorofenol, pueden oxidarse con ferrato [22].

## **2.3. Electroquímica**

### **2.3.1. Definición**

La electroquímica es el área que interrelaciona los procesos químicos con los procesos eléctricos. Utiliza sistemas químicos para producir electricidad o sistemas eléctricos para generar cambios químicos; es decir, estudia la conversión entre la energía eléctrica y química.

Los procesos electroquímicos son reacciones tipo redox, en los cuales la energía eléctrica se utiliza para generar una reacción química que no es espontánea, o bien el proceso que aprovecha la energía liberada en una reacción química espontánea para generar electricidad. Algunos ejemplos en los que intervienen ambos fenómenos (eléctrico y químico) en un mismo proceso son: La corrosión de metales y la construcción de baterías [31].

### **2.3.2 Proceso electroquímico**

Consiste en la transferencia de carga, esta se puede conducir mediante metales o soluciones iónica denominadas electrolitos. La conducción por metales ocurre cuando se aplica un diferencial de potencia al metal, este flujo de electrones no ocasiona cambios en el metal. La conducción iónica se produce con el movimiento de iones mediante la solución electrolítica, donde los iones positivos migran hacia el electrodo negativo y los negativos hacia el electrodo positivo. En las celdas electroquímicas ocurren los dos tipos de conducción [31].

La solución electrolítica contiene iones que conducen la corriente eléctrica. Está formada por un soluto, el cual debe ser un electrolito y un solvente, que generalmente es agua.

El electrolito es la sustancia que puede descomponerse en iones, hay de ácidos (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>), bases (NaOH, KOH) y sales (CuSO<sub>4</sub>, NaCl), entre otras. Además, se puede clasificar en fuertes y débiles. Un electrolito fuerte es aquel que se disocia completamente y el débil aquel que lo hace parcialmente [31].

Para que los iones se disocien no es necesario el paso de corriente eléctrica, pero cuando se suministra bien sea por baterías o fuente de corriente continua los iones se dirigen a sus respectivos electrodos, actuando como bombas de electrones que los empujan al interior del electrodo negativo (cátodo) y los extraen del electrodo positivo (ánodo) [31].

Para que en la celda electrolítica exista una electroneutralidad, se deben consumir los electrones en el cátodo y liberarse en el ánodo. Este proceso se denomina reacción redox, donde en el electrodo

negativo ocurre la reacción catódica y en el positivo la reacción anódica; éstas consisten en la reducción del ion (aceptación de electrones, disminuyendo su número de oxidación) y en la oxidación el ion (liberación de electrones, aumentado su número de oxidación), respectivamente.

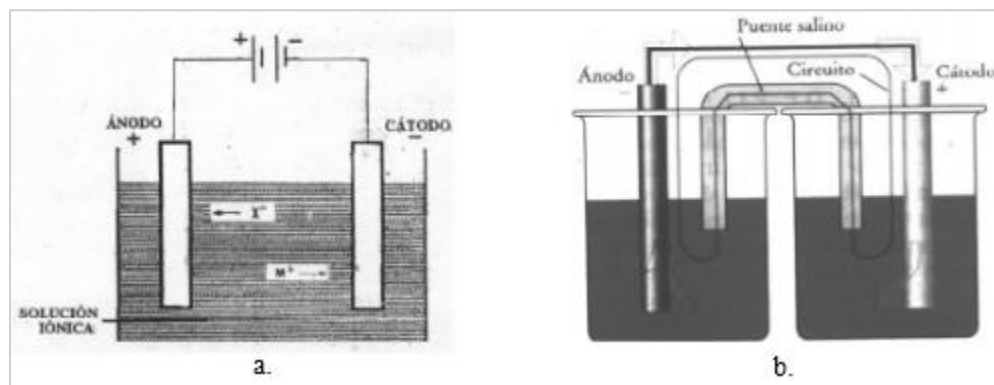
La reacción global de la celda es la suma de las dos semi-reacciones de los electrodos. Mientras se produce esta reacción, hay un flujo de iones positivos o cationes hacia el cátodo y de iones negativos o aniones hacia el ánodo [31].

### 2.3.3. Celda electroquímica

Una celda electroquímica es el conjunto de contenedor, electrodos, electrolito y fuente de energía eléctrica donde suceden los fenómenos electroquímicos. Existen de dos tipos, una donde la reacción es de forma espontánea (celdas galvánicas) y otras donde no es espontánea (celdas electrolíticas).

En la figura 10, se muestran las partes básicas de los dos sistemas, estos contienen dos metales diferentes sumergidos en una solución acuosa unidos por un cable.

**Figura 10.**  
*Celdas electroquímicas.*



**Nota.** La imagen a. esquematiza el sistema de una celda electrolítica y la imagen b. representa el sistema de una celda galvánica. Tomado de: Universidad Nacional del Nordeste. “Química General Unidad N° 10: Electroquímica”, [En línea]. Disponible: [http://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas\\_parciales/unidad\\_10\\_Electroquimica2007.pdf](http://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas_parciales/unidad_10_Electroquimica2007.pdf)

En las celdas electrolíticas la energía eléctrica procedente de una fuente externa hace que tenga lugar una reacción química no espontánea. En las celdas galvánicas o denominadas también celdas voltaicas, la energía que se libera en una reacción redox espontánea se puede usar, para realizar un trabajo eléctrico [31].

## **2.4. Espectrofotometría**

### **2.4.1. Definición**

La espectrofotometría es la medida de la cantidad relativa de luz absorbida por una muestra que está en función de la longitud de onda. Cada muestra tiene un patrón de absorción específico. “Comparando la longitud de onda y la intensidad del máximo de absorción de luz de una muestra versus soluciones standard, es posible determinar la identidad y la concentración de componentes disueltos en la muestra (solución incógnita)” [32].

La espectrofotometría cuenta con ventajas frente a otros métodos analíticos debido a que es una técnica rápida, precisa, fácil de usar y eficiente en costo.

Además, cuenta con diferentes aplicaciones como: análisis cuantitativos y cualitativos de soluciones desconocidas, estandarización de colores en materiales como plásticos y pinturas, detección de niveles de contaminación en agua y aire, determinación de impurezas en alimentos y reactivos, entre otras [32].

La medida se realiza mediante un espectrofotómetro el cual tiene cuatro componentes básicos: una fuente de radiación que tiene intensidad constante en el rango de longitud de onda que trabaja, usualmente es lámpara de tungsteno para luz visible, y deuterio para ultravioleta; un compartimiento para la muestra; un monocromador que separa la banda de longitud de onda deseada del resto del espectro y la dispersa al compartimiento de la muestra; y un fotodetector, que mide cuantitativamente la radiación que pasa por la muestra [32].

### **2.4.2 Principio espectrofotométrico de absorción molecular UV-visible.**

Consiste en medir la absorbancia de una solución por medio de un equipo denominado espectrofotómetro UV-visible; para lograr medir la concentración del analito, se hace necesario que este o un producto de su reacción, absorban la radiación electromagnética (luz) en la región del espectro visible, es decir que cuando un haz de luz incida sobre éste, debe absorber la energía



y pasar de su estado fundamental (nivel bajo de energía) a un estado excitado (de mayor energía) [33].

Cuando un haz de luz monocromática, es decir a una determinada longitud de onda, se hace incidir sobre una solución con una especie absorbente, la intensidad de la radiación disminuye como consecuencia de la absorción de energía [33]. En la figura 11 se representa la incidencia de un haz de luz monocromática en una solución que lo absorbe.

**Figura 11.**

*Luz incidente y transmitida en un analito.*



**Nota.** Se representa la potencia ( $P_0$ ) de un haz de luz que incide sobre una muestra que lo absorbe y la potencia final ( $P$ ) de la luz transmitida. Tomado de: Universidad Nacional de la plata. “Métodos espectrofotométricos- Teoría y Práctica”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/Pnxf1AF>

De donde se define transmitancia como la fracción de luz que deja pasar la solución. Por ende, la ecuación para el término sería:  $T=P/P_0$

A partir de la ecuación de transmitancia se define la absorbancia como:  $Abs=-\log T$

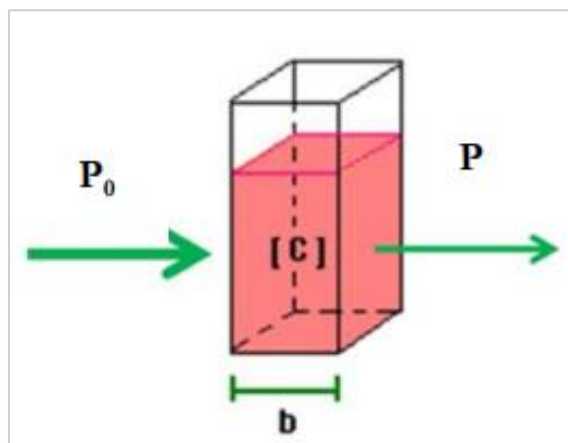
De las expresiones mencionadas se deduce que cuanto mayor es la absorbancia menor será la transmitancia, es decir que, si una solución absorbe mucho, transmitirá poco. Además, de que ambas propiedades son adimensionales debido a que se definen de un cociente con igual magnitud ( $P/P_0$ ) [33].

2.4.2.a. Ley de Lambert y Beer. Cuando un haz de luz monocromática, es decir de determinada longitud de onda, incide sobre una solución, la absorbancia es directamente proporcional a la distancia recorrida por la luz y a la concentración del analito en la solución.

La distancia que recorre la luz en el medio se denomina camino óptico, generalmente se mide en centímetros. La figura 12 es el esquema que representa el fenómeno que describe la ley de Lambert y Beer.

**Figura 12.**

*Esquema de la ley de Lambert y Beer.*



**Nota.** Se observa la incidencia del haz de luz ( $P_0$ ) en un analito, el camino óptico ( $b$ ) y la potencia de la luz ( $P$ ) luego de atravesar la solución de concentración ( $C$ ). Tomado de: Universidad Nacional de la plata. “Métodos espectrofotométricos- Teoría y Práctica”, [En línea]. Disponible:

<https://cutt.ly/Pnxf1AF>

Debido a que la absorbancia y el coeficiente de extinción molar dependen de la longitud de onda de la luz incidente, muchas veces se expresa la ecuación de Lambert y Beer como una función de la longitud de onda [33]. La absorbancia se define en la ecuación 14, tomada de la bibliografía [33].

Ec. 14 
$$Abs(\lambda) = -\log \frac{P}{P_0} = \varepsilon(\lambda) * c * b$$

=>

Abs: Absorbancia, adimensional.

$\epsilon$ : Coeficiente de extinción molar o absorptividad molar, es una constante definida que depende de la solución y la longitud de onda, en general su unidad es la inversa de la molaridad y la longitud del medio (camino óptico), es decir  $(M \times cm)^{-1}$  o  $L/mol \times cm$ .

b: Camino óptico, generalmente en cm.

c: Concentración del analito expresada en molaridad (M).

## **2.5 Diseño de Experimentos**

### **2.5.1 Definición.**

Un diseño de experimentos permite determinar cómo hacer pruebas, ensayos y/o experimentos, cuáles se deben realizar y de qué manera, con el fin de obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, permitan responder a las interrogantes planteadas, y de esa manera aclarar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras [34]. Algunos de los problemas que se pueden resolver mediante el uso de un diseño y análisis de experimentos son:

- ✓ Comparar a dos o más materiales con el fin de elegir el que mejor cumple los requerimientos.
- ✓ Comparar varios instrumentos de medición para verificar si trabajan con la misma precisión y exactitud.
- ✓ Determinar los factores (las x vitales) de un proceso que tienen impacto sobre una o más características del producto final.
- ✓ Encontrar las condiciones de operación (temperatura, velocidad, humedad, por ejemplo) donde se reduzcan los defectos o se logre un mejor desempeño del proceso.
- ✓ Reducir el tiempo de ciclo de un proceso.
- ✓ Hacer el proceso insensible o robusto a oscilaciones de variables ambientales.
- ✓ Apoyar el diseño o rediseño de nuevos productos o procesos.
- ✓ Ayudar a conocer y caracterizar nuevos materiales.

### **2.5.2. Clasificación de los diseños de experimentos**

Debido a la diversidad de situaciones y problemas que ocurren en la práctica, existen diferentes tipos de diseños, por lo que se hace necesario conocer: El objetivo del experimento, el número de

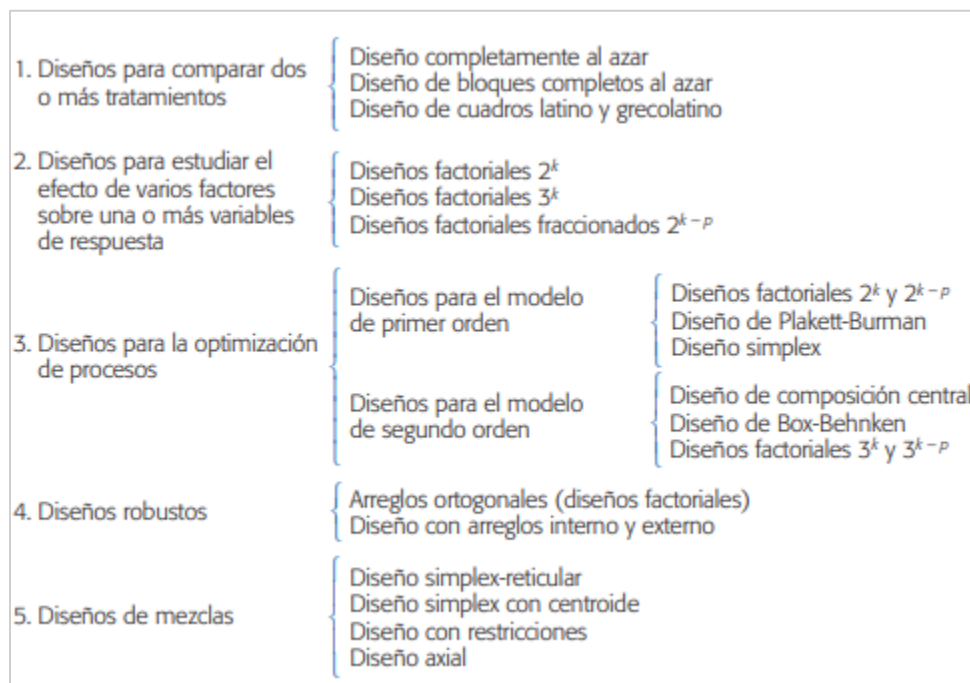
factores a estudiar, el número de niveles que se prueban en cada factor, los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta), el costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Estos puntos no son independientes entre sí, pero es importante señalarlos de manera separada, debido a que al cambiar uno de estos, generalmente cambia el diseño experimental.

El objetivo del experimento se utiliza como un criterio general de clasificación, mientras que los otros cuatro puntos son útiles para subclasificarlos. En la figura 13 se muestra la clasificación de los diseños experimentales.

**Figura 13.**

*Clasificación de los diseños de experimentos.*



**Nota.** Se observa los diferentes tipos de diseños de experimentos, clasificados a partir del objetivo del experimento. Tomado de: H. Gutiérrez Pulido, R. de la Vara Salazar. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. (segunda edición), [En línea]. Disponible: [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)

2.5.2.a Diseño factorial. El objetivo de realizar un diseño factorial es entender el efecto de varios factores sobre una o varias variables de respuesta. Los factores pueden ser de tipo cualitativo (máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa, entre

otros.) o de tipo cuantitativo (temperatura, humedad, velocidad, presión, concentración, entre otros.). Para entender la manera que influye cada factor sobre la variable de respuesta se requiere al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos [34].

Así, el diseño factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. Por ejemplo, con  $k = 2$  factores, ambos con dos niveles, se forma el diseño factorial  $2 \times 2 = 2^2$ , que consiste en cuatro combinaciones o puntos experimentales. Ahora, si uno tiene tres niveles y el otro dos, se pueden construir  $3 \times 2$  combinaciones que dan lugar al diseño factorial  $3 \times 2$ . Es decir, el nombre del diseño factorial va implícito en el número de tratamientos que lo componen. Para obtener el número de corridas experimentales se multiplica el número de tratamientos por el número de réplicas [34].

“Los valores absolutos (sin importar el signo) de los efectos principales y del efecto de interacción son una medida de importancia de su efecto sobre la variable de respuesta. Sin embargo, como se tienen estimaciones muestrales, para saber si los efectos son estadísticamente significativos (diferentes de cero) se requiere el análisis de varianza (ANOVA)” [34].

Las ventajas que se tienen al utilizar un diseño factorial son:

1. Permiten estudiar el efecto individual y de interacción de los distintos factores.
2. Son diseños que se pueden aumentar para formar diseños compuestos en caso de que se requiera una exploración más completa.
3. Se pueden correr fracciones de diseños factoriales, las cuales son de gran utilidad en las primeras etapas de una investigación que involucra a muchos factores, cuando interesa descartar de manera económica los que no son importantes, antes de hacer un estudio más detallado con los factores que sí son importantes.
4. La interpretación y el cálculo de los efectos en los experimentos factoriales se puede hacer con aritmética elemental, en particular cuando cada factor se prueba en dos niveles.

2.5.2.a.i. Diseño factorial con dos factores. En este diseño factorial se consideran los factores A y B con niveles de prueba a y b respectivamente. Algunos de los casos que se pueden establecer son: el factorial  $2^2$ , el factorial  $3^2$  y el factorial  $3 \times 2$ .

Se denomina réplica a cada experimentación completa del arreglo factorial. “Los diseños factoriales que involucran menos de cuatro factores por lo regular se corren replicados para tener la potencia necesaria en las pruebas estadísticas sobre los efectos de interés” [34]. Cuando se realizan  $n$  réplicas, el número total de corridas experimentales es  $n(a \times b)$ .

Para el diseño de experimentos se debe establecer el número de hipótesis dependiendo la cantidad de variables a modificar y la interacción entre ellas. Se plantean dos tipos de hipótesis la nula y la alternativa; la nula plantea que, la variable  $x$  no genera impacto sobre la variable respuesta, es decir que, independiente los valores que tome dicha variable, la respuesta sobre la variable final no presenta modificación y, por el contrario, la hipótesis alternativa establece que cambiar el valor de la variable genera un comportamiento diferente sobre la variable respuesta.

Los datos del diseño de experimentos pueden ser obtenidos mediante largas y complejas ecuaciones o por medio de programas que desarrollan los mismos cálculos en segundos, algunos de ellos son Excel, Minitab, JM entre otros.

La tabla resumen del diseño factorial arroja un estadístico de prueba ( $F$ ) y un valor crítico para  $F$ ; para lo cual se establece que, si el valor crítico de  $F$  es menor al estadístico de prueba  $F$ , se rechaza la hipótesis nula y se concluye que esta variable influye en la variable respuesta [34].

### ***2.5.3. Metodología de superficie de respuesta***

Luego de aplicar el diseño experimental al sistema planteado, se recurre a técnicas de optimización que encuentren las condiciones óptimas del proceso, para ello se puede encontrar el valor óptimo bien sea desplazando la región experimental (moverse de lugar) o bien explorando en forma más detallada la región experimental inicial [34]. Una técnica de optimización es la *metodología de superficie de respuesta* (MSR).

“La MRS es la estrategia experimental y de análisis que permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado (valores óptimos) de una o varias características de calidad del producto” [34].

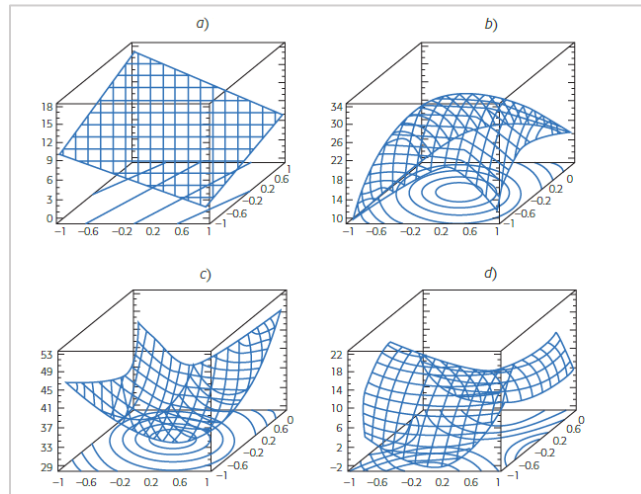
La superficie de respuesta ajusta un modelo a los datos experimentales, estos pueden ser de primer orden, los cuales implementan diseños  $2k$  o fraccionado con puntos al centro y de segundo orden, donde se utilizan el diseño de Box-Behnken y el diseño central compuesto o de composición

central. Los modelos de primero orden son aplicados a diseños factoriales  $2k$ , a diseños factoriales fraccionados  $2k - p$ , entre otros [34].

La figura 14 muestra los modelos en donde se consideran dos variables de proceso  $x_1$  y  $x_2$ , así como la variable respuesta en el eje Z. La gráfica *a* representa un modelo de primer orden y se observa que la superficie es un plano, las gráficas *b*, *c* y *d*, representan varios modelos de segundo orden.

**Figura 14.**

*Superficies de respuesta.*



**Nota.** Se muestran los diferentes tipos de superficies de respuesta que se pueden obtener, la gráfica *a*) corresponde a una superficie plana, *b*) a una superficie de máximo (montaña), *c*) a una superficie con mínimo (valle) y *d*) una superficie con punto de silla (minimax). Tomado de: H. Gutiérrez Pulido, R. de la Vara Salazar. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. (segunda edición), [En línea]. Disponible:[https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)

### 3. EXPERIMENTACIÓN

#### 3.1 Procedimiento para el desarrollo del proceso electroquímico

La producción de ferrato (VI) se realizó por vía electroquímica. Para esta producción se definió el volumen de solución en 2 litros, volumen que permitió realizar diluciones de hidróxido de sodio de forma menos dispendiosa, con cantidades manejables de soluto, fácil observación visual de los fenómenos ocurridos y una manipulación simple durante el ensayo. Definido el volumen del electrolito, se dimensionó una celda cúbica en vidrio comercial, con la capacidad suficiente para contener el electrolito y a la vez disponer de un borde libre que evitará posibles desbordamientos. El ánodo fue configurado a partir de viruta de acero al carbón y el cátodo a partir de una placa de acero inoxidable 304.

Se utilizó energía eléctrica de corriente alterna a 110 voltios para alimentar una fuente de corriente continua, con rango de operación graduable entre 0 y 5 amperios, que mediante el adecuado conexionado, suministró la corriente requerida a los electrodos.

La temperatura trabajada durante los ensayos se estableció mediante la temperatura ambiente; investigaciones anteriores [23][35][36], mencionan el efecto que tiene ésta sobre la producción de ferrato (VI); estos investigadores comentan que, temperaturas por encima de la ambiente, favorece la producción de ferrato (VI), debido a que un aumento en esta variable, genera una despasivación de la superficie del electrodo, permitiendo mayor interacción química de la capa óxido-hidróxido logrando mayores producciones de ferrato [36]; pero a la conclusión que llegan es que, debido a que hay formación de ferrato, este se comienza a reducir y genera hidróxido férrico, este compuesto también es favorecido por el aumento de la temperatura, lo cual genera una aceleración en la descomposición de ferrato (VI) [23], por ende, aumentar la temperatura hará que la producción de ferrato se dé, pero de igual forma, hará que se descomponga. Debido a las consecuencias de incrementar la temperatura y a que esta investigación busca implementar los métodos que menor costo conlleven, evitando incurrir en sobrecostos por calentamiento, se decidió trabajar a temperatura ambiente.

Tomando como referencia la experimentación realizada por *Wang* se estableció 3 horas para el suministro de energía a los electrodos, valor encontrado como el óptimo según la investigación realizada por *Wang* [23]; se eligió el tiempo de esta bibliografía, debido a la similitud de la concentración de hierro, al material utilizado en el ánodo (concentración mayor al 99%), así como,



similitud en las condiciones de temperatura a trabajar, 13°C reportados por *Wang* y temperatura ambiente para la presente investigación (17-20°C), haciendo énfasis, en que, de la bibliografía consultada, este autor reporta el valor más cercano a las condiciones disponibles, ya que los demás estudios mencionaban temperaturas superiores a los 30°C [9] [35]. Adicionalmente, este autor implementó el mismo procedimiento y reactivos para el decapado de los electrodos a trabajar, sin embargo cabe mencionar que el material que utilizó en el cátodo fue platino en vez de acero inoxidable, esto no influyó debido a que entre los electrodos, solamente el ánodo afecta la producción [13], en cuanto al cátodo, no se ha reportado información acerca del material óptimo puesto que este electrodo cierra el circuito de transferencia de energía pero no sufre desgaste.

La separación de electrodos se definió con respecto a lo sugerido por *Alsheyab* y *Jiang*, bibliografía [37] de este documento. Estos autores demostraron que aumentar la distancia entre los electrodos, favorece la producción de ferrato; en su investigación, evaluaron 1 y 1,5 cm, reportaron que a una distancia de 1 cm se obtuvo una eficiencia menor al 33% y utilizando una distancia de 1,5 cm se obtuvo una eficiencia mayor al 42%, esto lo explican, por la formación de hidrogeno que se da en la superficie del cátodo, el cual impide el flujo de corriente hacia el electrodo, es decir que a menor distancia menor espacio tendrá el gas para ser liberado, quedando sobre la superficie del electrodo y evitando el paso de corriente. Otro investigador, *Quino* menciona que la producción puede mejorar reduciendo el distanciamiento, ya que se reduce el área transversal de flujo de electrones, pero finalmente concluyó el mismo argumento de *Alsheyab* y *Jiang*, pero en función del oxígeno que se libera en la superficie del ánodo, *Quino* argumenta que las burbujas se adhieren a la superficie del electrodo y reducen la producción del ferrato (VI) al interrumpir el flujo de corriente [13]. A partir de lo mencionado por *Alsheyab* y *Jiang* se determinó que la distancia debería ser mayor a la planteada por estos, para hacer la elección de la distancia, se eligió una variable que fuera fija para ambos ensayos; dado que la concentración y densidad de corriente en el presente proyecto fueron variables, se decidió comparar con el tiempo de producción. El tiempo reportado por los investigadores fue de 45 minutos y el del presente proyecto fue 3 horas (180 minutos), comparando los tiempos se obtuvo un factor de relación de 4, por ende, se decidió aplicar, este factor, a la mejor distancia reportada por los investigadores mencionados (1,5 cm), esta distancia por el factor obtenido permitió definir una distancia de 6 cm. Como efecto adicional, se encontró que esta distancia facilitaría la visualización del fenómeno electrolítico durante el tiempo de reacción y favorecería la percepción de simetría con las otras dimensiones de la celda.

Se establecieron ensayos a diferentes concentraciones de electrolito y densidad de corriente. Tomando como base la solubilidad del hidróxido de sodio en agua, se establecieron tres valores 20, 40 y 60% de solubilidad, los cuales corresponden a una concentración de 5,45, 10,9 y 16,35M, respectivamente; estos valores se han documentado en estudios que han evaluado rangos de 5M hasta 20M [35]. Además, la selección de dichos valores se fundamentó en evitar alto riesgo por las condiciones exotérmicas de la disolución, al igual que precipitaciones y dificultad en la manipulación por alta viscosidad; reflejándose todas estas condiciones en la disminución del costo directo y acercándose al objetivo principal, de establecer viabilidad técnica del procedimiento electrolítico.

A partir de la corriente suministrada, por la fuente disponible en los laboratorios de la Universidad de América, cuyo máximo fue de 5 amperios, se estableció el amperaje suministrado a los electrodos, se determinaron 2 y 4 amperios para los ensayos, teniendo como premisa trabajar con amperajes, una unidad por arriba y una por debajo, de la media de la capacidad del equipo; abarcando ampliamente el rango disponible sin someter dicha fuente a condiciones límites. Adicionalmente la bibliografía disponible menciona amperajes de 6 y 8,4 Amperios [2][23], con densidades de corriente desde 14,7 hasta 145 A/m<sup>2</sup> [3][35], datos teóricos cuyo rango cubre los valores trabajados en esta investigación (60,98 y 121,95 A/m<sup>2</sup>).

La toma de datos se realizó cada media hora, para cada ensayo; se registró la temperatura, el pH y la absorbancia de cada muestra. Las buenas prácticas de laboratorio se realizaron acorde al manual de “Orientaciones para la construcción en los establecimientos educativos del manual de normas de seguridad en el laboratorio de química y de física” elaborado por el ministerio de educación colombiano, en el cual se establecen las buenas prácticas de laboratorio, las normas para el almacenamiento de sustancias y reactivos químicos, la gestión del riesgo y la normatividad vigente en la manipulación de sustancias y productos químicos, entre otras [38] . Se cumplieron las buenas prácticas específicas como el uso de los implementos de seguridad (bata, guantes, gafas, etc.), se evitó el uso de accesorios, de prendas que dificultaran la movilidad, entre otras. De igual manera se dio cumplimiento a las normas específicas, en la manipulación de reactivos químicos y disposición final de estos, incluyendo evitar inhalar los reactivos químicos manipulados y el contacto directo con estos, entre otros.

La celda electroquímica se definió a partir del electrolito, la cubeta, el ánodo y el cátodo.

### **3.1.1 Electrolito**

Para la preparación del electrolito la bibliografía menciona como posibles solutos, el hidróxido de potasio y el hidróxido de sodio, de los cuales seleccionan el NaOH debido a que este representa una mayor producción de ferrato (VI), esto se encuentra documentado por *Santana y de Luca* quienes en su investigación, que corresponde a la referencia [12] de este documento, muestran que si se utiliza KOH a 10 mol/L se obtiene 1 mM de ferrato, mientras que bajo las mismas condiciones de ensayo, utilizando la misma concentración de NaOH se obtiene 100mM, ellos mencionan que se debe posiblemente a que el catión  $\text{Na}^+$  facilita la disolución del hierro a través de la película formada en el ánodo.

La preparación de las soluciones se hizo a partir de la solubilidad del hidróxido de sodio en agua, que corresponde a 1,09 g/ml; se establecieron valores de 20, 40 y 60% de solubilidad, utilizando respectivamente 436, 872 y 1308 gramos de hidróxido; se disolvió, en todos los casos, la masa obtenida en 2 litros de agua desionizada. La pureza del hidróxido de sodio fue del 99%, la cual fue certificada por el proveedor, *Químicos Campota* en la ficha técnica del NaOH, ver ANEXO 1. La disolución del hidróxido de sodio en agua es una reacción altamente exotérmica, razón por la cual después de preparadas las soluciones, se dejaron en reposo hasta alcanzar temperatura ambiente. En la figura 15 se muestra el volumen de electrolito preparado.

La preparación de las soluciones se hizo bajo los procedimientos establecidos en la norma ASTM E200 - 16 en la cual se menciona la preparación de disoluciones de hidróxido de sodio; el procedimiento consta en pesar la cantidad de NaOH requerida, el pesaje debe realizarse de manera que se limite el error al 0,1% o menos, se debe utilizar agua destilada, el reactivo debe tener una pureza suficientemente alta (>99%) para permitir su uso sin disminuir la precisión de la determinación [39]. Dada la característica exotérmica de la reacción, del agua con el NaOH, se debe enfriar hasta los 25°C y para volúmenes inferiores de 1 a 2 litros no se presentan problemas para el mezclado, pudiéndose hacer uso de agitadores metálicos o de vidrio [39].

### Figura 15.

*Volumen de solución.*



*Nota:* La imagen ilustra el volumen de solución de 2000 ml, utilizado para la síntesis electroquímica.

#### 3.1.2 Cubeta

Las características requeridas en la fabricación de la cubeta fueron: En primera instancia, una cubeta que permitiera la contención del volumen del electrolito ( $2L = 0,002 \text{ m}^3$ ), una geometría cubica de caras planas, para hacer fácil, cómodo el transporte de la cubeta y evitar el riesgo de caída, las dimensiones requeridas se determinaron mediante la ecuación 15.

$$\text{Ec. 15} \quad a = \sqrt[3]{0,002 \text{ m}^3} \approx 0,126\text{m} = 12,6 \text{ cm}$$

Para facilidad de los cortes del material y fabricación de la celda, se ampliaron las dimensiones de largo y ancho a 14cm; de esta manera se cumplió con la altura mínima requerida por el electrolito (10,2 cm) y se permitió una altura de borde libre de 3,8cm para evitar rebosamientos. Las dimensiones internas de la celda quedaron de 14cm x 14cm x 14cm.

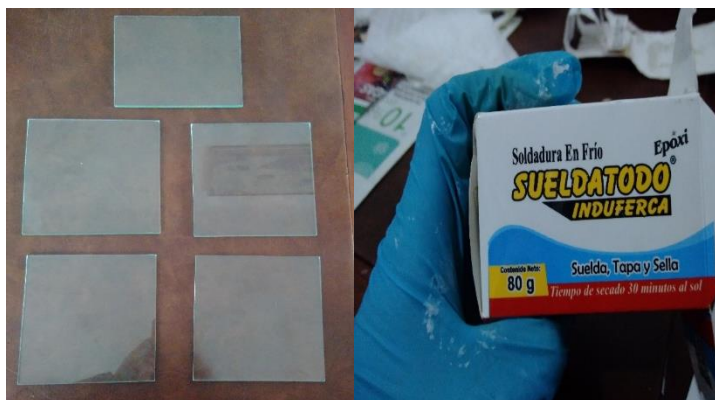
En segunda instancia, debido al requerimiento de visualización y fácil observación desde todos los ángulos, se hizo necesario utilizar material transparente; teniendo en cuenta que la temperatura

prevista de operación fue ambiente (18 a 22 °C), se seleccionó el vidrio comercial como material para fabricar la celda electroquímica.

En la fabricación de la celda se utilizaron secciones de lámina de vidrio comercial con las dimensiones internas calculadas, unidas en sus aristas con resina epóxica resistente a soluciones alcalinas, cabe destacar que la unión entre las diferentes caras de la cubeta requirió una previa preparación de la superficie para lograr adherencia y estanqueidad en la cubeta. La figura 16 ilustra los materiales requeridos para la fabricación de la cubeta de la celda electrolítica.

**Figura 16.**

*Secciones de lámina de vidrio comercial y resina epóxica.*



**Nota:** En la imagen se observa los materiales utilizados para la fabricación de la cubeta de la celda electrolítica.

Con el objeto de mejorar la observación y visualizar con mejor contraste, los cambios dentro de la cubeta, se cubrió la superficie externa de la base y la cara posterior de la celda, con pintura blanca; adicionalmente se instaló una reglilla aforada en litros para verificar el volumen de electrolito al comienzo del ensayo y observar posibles cambios de volumen durante la experimentación.

### **3.1.3 Ánodo**

La fabricación del ánodo se hizo a partir de viruta de acero al carbón; la viruta al tener alto contenido de hierro se clasifica como una posible materia prima para la producción de ferrato (VI). Como *Talaiekhosani* menciona, en un proceso de producción electroquímico de ferrato (VI), el ánodo se establece a partir de hierro o sus aleaciones [9]. Se ha reportado que la presencia de carbono genera una mayor eficiencia en la producción de ferrato (VI) [9][12][35]; *Wang* explica que se debe a que el carbono favorece la disolución del hierro, a través de la disolución transpasiva,

la cual permite la generación del ion ferrato en solución [23]. Además, el carbono es el componente típico de los materiales de hierro comúnmente disponibles [35], esto genera una combinación beneficiosa entre disponibilidad y efectividad en la producción.

La disponibilidad de dicha viruta en la empresa donde se desarrolló la investigación es abundante, como residuo de procesos metalmecánicos de corte por torneado de piezas de acero al carbón. Por esta razón y debido al enfoque de esta investigación, que es dar uso a un residuo actual, se establece la viruta del acero al carbón utilizado con frecuencia por la empresa (acero ASTM A36) como materia prima para la elaboración del ánodo.

Las especificaciones de la viruta se establecieron mediante la composición del acero trabajado, el tipo de viruta generada y la selección de esta.

#### ✓ Composición del acero al carbón

La composición del acero ASTM A36 fue certificada mediante la ficha técnica proporcionada por el fabricante, en ella se establece una composición de: 99,77% Fe, 0,09% C y 0,1435% de otros (0,01% Si, 0,094% Mn 0,0025% P 0,004% S 0,01% Cu 0,01% Ni 0,01% Cr 0,002% Mo 0,001% V) VER ANEXO 2. Estudios anteriores han demostrado que composiciones similares y de menor contenido de hierro (99,195% Fe), han logrado la producción de ferrato (VI), se registraron 2 mM con las composiciones representada en la tabla 2 [36].

#### **Tabla 2.**

*Composición de materia prima reportada en la bibliografía.*

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	V
Composición (%)	0,07	0,59	0,01	0,01	0,005	0,03	0,04	0,01	0,03	0,003	0,004

**Nota.** Se muestra la composición de la materia prima utilizada para la producción de ferrato (VI) en una de las fuentes bibliográficas. Tomado de: Barisci,S. *et al*, (2014)."Electrosynthesis of Ferrate (VI) ion Using High Purity Iron Electrodes: Optimization of Influencing Parameters on the Process and Investigating Its Stability." [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/GQtcjgR>

✓ Tipo y selección de viruta.

La viruta producto de la actividad de corte por torneado del acero al carbón, es de tipo continua, en forma de espiral con espesores, longitudes y frecuencias de enrollamiento diversos; inicialmente se tomó un conjunto de virutas y se agruparon hasta formar una sección estable físicamente; se seleccionaron diferentes tamaños con ancho cerca de 0,6 mm evitando rupturas en el mismo por menor ancho o, por el contrario, dificultad en el doblamiento, por mayor ancho. En la figura 17 se observa la variedad de viruta y la agrupación estable de esta.

**Figura 17.**

*Viruta recolectada.*



**Nota.** En la imagen se observa la viruta seleccionada y su agrupación.

En cuanto al electrodo se establecieron los siguientes criterios:

✓ Geometría y estabilidad del electrodo.

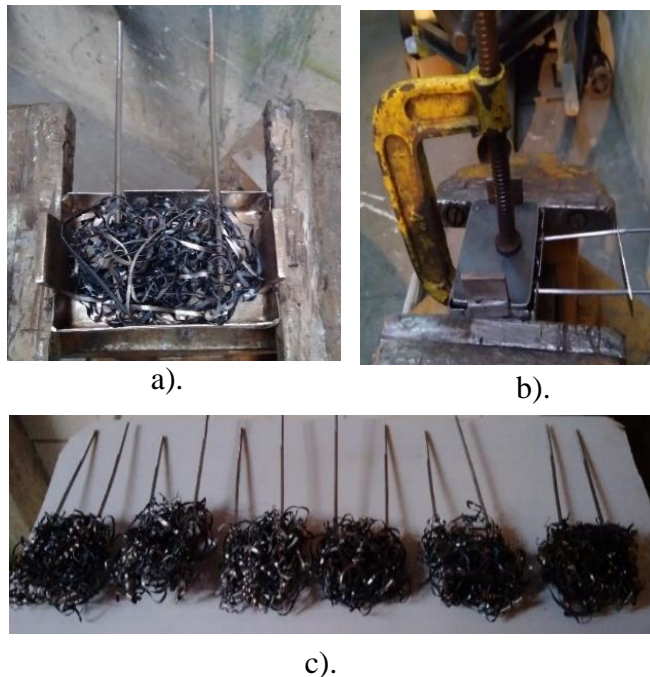
Seleccionada la viruta y como resultado de la manipulación de esta para formar el electrodo, se hizo evidente la necesidad de compactarla para darle al electrodo una conformación estable físicamente y reproducible para todos los ensayos. Para lograr la compactación, se fabricó un molde, en acero al carbón acorde al tamaño de la celda electroquímica, buscando simetría y total

sumergencia del electrodo, definiendo finalmente para el molde una geometría rectangular con dimensiones internas de 7cm x 8cm, con altura de 2,5 cm.

Se procedió al entrecruzamiento de la viruta, introduciendo una cantidad inicial en el molde y por medio de una prensa manual, se intentó compactar. La estructura del ánodo se mostró inestable físicamente, es decir la viruta se desmoronó o derrumbó sin lograr su entrecruzamiento, lo cual no permitió la fabricación del electrodo, por lo que se requirió el uso de más viruta, hasta que se logró la estabilidad física, llegándose a 30 gramos de viruta por electrodo. Definido el molde y la cantidad de viruta, se estableció el soporte que permitiera graduar la profundidad del electrodo en la solución electrolítica y a su vez el conexionado eléctrico para el paso de la corriente, desde la fuente hasta el electrodo. Se eligió sostener el electrodo de viruta con dos barras idénticas de acero al carbón de 1/8” de diámetro y 17,5 cm de largo con un gancho en la parte inferior para anclaje de la viruta, la figura 18 muestra el procedimiento de compactación y los ánodos finales obtenidos.

**Figura 18.**

*Molde de compactación y ánodos elaborados.*



**Nota:** En la fotografía a). se observa el molde de compactación, en la b). la forma de compactación y en la c). los electrodos terminados.



✓ Área del electrodo.

El área superficial del electrodo se determinó definiendo una relación entre el área superficial de 10 probetas de viruta (figura 19) y el peso de estas, se midió el ancho, largo y espesor para obtener el área de cada probeta, obteniéndose un coeficiente de  $10,96 \text{ cm}^2/\text{g}$  que permitió establecer el área del ánodo a partir del peso de la viruta utilizada, la relación se muestra en la ecuación 16 y la determinación del área superficial en la ecuación 17.

$$\text{Ec. 16} \quad \frac{A_s}{w} = 10,96 \text{ cm}^2/\text{g}$$

=>

$A_s$ : Es el área superficial en  $\text{cm}^2$ .

$w$ : Es el peso en gramos.

$$\text{Ec. 17} \quad A_s = 10,96 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} * 30 \text{ g} = 328,80 \text{ cm}^2$$

Obteniéndose finalmente un área superficial para el ánodo de  $328,80 \text{ cm}^2$ .

### Figura 19.

*Probetas de viruta.*



**Nota:** En la imagen se observa las probetas utilizadas para la relación área-peso.

Debido a que la viruta se considera una materia prima novedosa para la producción de ferrato, no se encontró un comparativo para la cantidad de viruta a utilizar, sin embargo, se realizó la comparación con un ánodo de hierro con pureza del 99,195% y un área superficial de 106 cm<sup>2</sup> [35]; haciendo la relación del área con la cantidad de hierro, se obtuvo que, de esta área, 105,15 cm<sup>2</sup> contienen hierro. La relación se hizo a partir de la ecuación 18 y la solución se muestra en la ecuación 19.

$$\text{Ec. 18} \quad A_{S_{\text{ánodo}}} * X_{Fe}$$

=>

$A_{S_{\text{ánodo}}}$ : Área superficial del electrodo,

$X_{Fe}$ : Fracción de hierro

$$\text{Ec. 19} \quad 106 \text{ cm}^2 * 0,99195 = 105,15 \text{ cm}^2$$

Realizando el mismo cálculo para los valores que se trabajaron en esta investigación, se obtuvo que, del área total, 327,25 cm<sup>2</sup> contienen hierro, se pudo observar que la cantidad de hierro es aproximadamente 3 veces más, pero la cual fue necesaria para poder obtener un electrodo estable físicamente y que pudiera ser reproducible en cada ensayo. En la sección de conclusiones se realizó la comparación de la producción de ferrato obtenida a partir del hierro utilizado.

✓ Densidad de corriente.

La densidad de corriente se estableció con el fin de establecer una relación entre la cantidad de corriente suministrada y el área de específica del ánodo, la densidad de corriente se definió a partir de la ecuación 20.

$$\text{Ec. 20} \quad j = \frac{\text{Corriente (A)}}{\text{Área (m}^2\text{)}}$$

El cálculo de la densidad de corriente para los ensayos a 2 Amperios se muestra en la ecuación 21.

$$\text{Ec. 21} \quad j = \frac{2 \text{ A}}{0,0328 \text{ m}^2} = 60,976 \text{ A/m}^2$$

El cálculo de la densidad de corriente para los ensayos a 4 Amperios se muestra en la ecuación 22.

Ec. 22

$$j = \frac{4 A}{0,0328 m^2} = 121,951 A/m^2$$

Por último, en la tabla 3 se presenta el resumen de las especificaciones de la materia prima (viruta).

**Tabla 3.**

*Especificaciones de la materia prima (viruta).*

VARIABLE	ESPECIFICACIÓN	RESUMEN DEL PRETRATAMIENTO NECESARIO
Composición	Contenido >99% de Hierro	Utilizar materiales que mediante fichas técnicas corroboren la cantidad de hierro contenido.
Tipo	Continua	Utilizar acero al carbón, baja velocidad de avance en la herramienta de corte del torno(0,01m/min), alta velocidad de la pieza (800 rpm), poca profundidad de corte (< 0,8 mm) y ángulo de inclinación alto (> 60°).
Selección	Con frecuencia de enrollamiento entre 0,5 cm y ancho aproximado de 6 mm.	Realizar cortes con velocidad constante (Carro transversal del torno en automático).

*Nota.* Se muestran las especificaciones de la viruta requeridas para el proceso de producción electrolítico. A los términos alto, bajo y poco se les dio valores, a partir del conocimiento, de operarios del torno, de la empresa donde se desarrolló la investigación,

### 3.1.4 Cátodo

Para la fabricación del cátodo se establecieron los siguientes requerimientos:

✓ Material y disponibilidad.

El material del cátodo se estableció con base a lo mencionado por *Santana y De Luca*, bibliografía 12 de este documento, donde se trabajó acero inoxidable para este electrodo; además de que es un material de frecuente uso en la empresa donde se desarrolló la investigación. Por ende, por recomendación de su uso en estudios anteriores y disponibilidad se eligió el acero inoxidable como material para la fabricación del cátodo.

*Santana y De Luca* recomiendan el uso del acero inoxidable 310, pero bajo el criterio de que el cátodo simplemente permite cerrar el circuito eléctrico y no interfiere en la formación de ferrato (VI), en esta investigación se decidió utilizar el acero inoxidable 304. Sin embargo, se realizó la comparación de composición entre estos dos aceros. Principalmente ambos son denominados aceros austeníticos debido a la composición de Cromo y Níquel que contienen [40], entre las composiciones de los dos aceros se obtuvo una diferencia inferior al 1% excepto en el contenido de níquel y cromo, pero aun así son catalogados en el mismo grupo con respecto a estos compuestos, las composiciones se muestran en la tabla 4, de igual forma se observó que la variación de las propiedades físicas fue menor al 0,03%.

**Tabla 4.**

*Propiedades de los aceros inoxidables 304 y 310.*

COMPOSICIÓN QUÍMICA (% en peso)	304	310
Carbono	0,08	0,25
Cromo	18-20	24-26
Níquel	8-11	19-22
Manganeso	2	2
Silicio	1	1,5
Fósforo	0,04	0,045
Azufre	0,03	0,03
PROPIEDADES FÍSICAS	-	-
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	8,027	8,03
Punto de fusión (°C)	1400-1450	1400-1455
Estructura	Austenítico	Austenítico
Calor específico (Calorías/ g °C) [ 0/100 °C]	0,12	0,12

*Nota.* Se muestra la comparación entre los aceros inoxidables 304 y 310 respecto a su composición y propiedades físicas. Tomado de: La paloma compañía de metales. (s.f), “Acero inoxidable (AISI 303, 304, 310, 316, 416, 430)”, [En línea]. Disponible: <https://www.lapaloma.com.mx/lapaloma/metales/aceroinoxidable.html>

✓ Geometría y dimensionamiento.

La geometría y dimensiones del cátodo se establecieron en correspondencia con las dimensiones del ánodo en largo y altura (7cm de altura y 8cm de largo), el espesor fue definido a partir del material disponible (lámina de 0,9 mm). De igual manera se eligieron dos barras de 1/8" de diámetro y 11,5 cm de largo de acero inoxidable, para graduar la altura del cátodo en la celda electrolítica. La figura 20 ilustra los cátodos terminados.

**Figura 20.**

*Cátodos elaborados.*



**Nota:** Se observa los cátodos construidos.

Por último, se hizo necesario la fabricación de una estructura que sujetara los electrodos desde los soportes. Se determinó que el material para esta estructura debía ser no conductor, tener resistencia química al electrolito y ser estable a temperatura ambiente, razón por la cual se eligió el nylon 6,6. Se construyeron dos barras rectangulares de 16,5 cm de largo, 1,7 cm de ancho y 1,2cm de alto, que se soportaron en los bordes de las paredes de la celda y se perforaron para dar paso a la barra soporte de 1/8". A la barra soporte se le realizó un roscado en la parte superior para graduar mediante una tuerca la altura del electrodo en la solución. En la figura 21 se observa el conjunto celda, electrodos y estructura soporte.

**Figura 21.**

*Ubicación de los electrodos en la celda electroquímica.*



**Nota:** Se observa el conjunto de: electrodos, cubeta y estructura soporte.

A continuación, la tabla 5, muestra el resumen de las condiciones de diseño de la celda electroquímica.

**Tabla 5.**

*Condiciones de diseño de la celda electroquímica.*

ELEMENTO	VARIABLE	ESPECIFICACIÓN	CONDICIÓN DE DISEÑO
Electrolito	Concentración	A 5,45M, 10,9M y 16,35M	Utilizar 436g, 872g y 1308g de NaOH, respectivamente.
Cubeta	Material	Vidrio	Transporte.
	Volumen	2744 cm <sup>3</sup>	Para contención de 2 Litros de solución.
	Geometría	Cúbica	Aristas de 14 cm.
Ánodo	Material	Acero al carbón	Utilizar 30g de viruta.
	Geometría	Rectangular	Aproximadamente 8 cm de ancho x 7 cm de alto y 2,5 cm de espesor.
	Área superficial	328,8 cm <sup>2</sup>	Entrecruzar la viruta y compactar mediante una prensa manual, haciendo uso del molde de compactación.
	Densidad de corriente	A 60,98 y 121,95 A/cm <sup>2</sup>	Utilizar 2 y 4 amperios respectivamente.
Cátodo	Material	Acero inoxidable	Placa rectangular.
	Geometría	Rectangular	8 cm de ancho x 7 cm de alto y 0,9 mm de espesor.

*Nota.* Se muestra el resumen de las condiciones de diseño para la celda electroquímica.

### 3.2 Producción de ferrato VI

Una vez establecida la celda, se procedió al uso de los laboratorios de la Universidad de América. El proceso inició con la limpieza de los electrodos mediante un procedimiento de decapado, con el fin de retirar impurezas. El procedimiento consistió en el sumergimiento de los electrodos en tres soluciones en secuencia: la primera, una mezcla 1:3 de desengrasante agua, para eliminar las grasas y aceites, la segunda fue una solución de ácido clorhídrico al 10% para eliminar posibles óxidos en la superficie y por último una solución de hidróxido de sodio al 10% para neutralizar; con una duración de 20 minutos por inmersión. Después del decapado, se realizó el enjuague del

electrodo con agua desionizada. Con todos los componentes requeridos listos, se procedió a ensamblar la celda electroquímica en su conjunto. El primer paso requirió la ubicación de los electrodos en sus respectivos soportes, luego el ensamble de los soportes sobre la cubeta, verificando el distanciamiento entre electrodos utilizando un espaciador calibrado (galga), el termómetro se ubicó dentro de la cubeta mediante un soporte externo; asegurados los electrodos se procedió al conexionado eléctrico utilizando conductores de cobre con el calibre adecuado, el cable se seleccionó de acuerdo al amperaje requerido, para ello se utilizó la información mostrada en la tabla 6, por lo cual el cable seleccionado fue de 18 AWG, luego, se realizó el conexionado entre los electrodos y la fuente, teniendo la precaución de verificar la polaridad correcta. El segundo paso fue el vertido de la solución previamente preparada en la cubeta, en la figura 22 se observa el montaje de la celda electroquímica.

**Tabla 6.**

*Calibres de cables eléctricos.*

INTENSIDAD DE CORRIENTE ADMISIBLE PARA CONDUCTORES DE COBRE				
SECCIÓN	SECCIÓN	TEMPERATURA		
Nominal (mm) <sup>2</sup>	AWG	60°C (amperaje soportado)	75°C (amperaje soportado)	90°C (amperaje soportado)
0,32	22	3	3	-
0,51	20	4	5	-
0,82	18	7,5	7,5	-
1,31	16	10	10	-
2,08	14	15	15	25
3,31	12	20	20	30
5,26	10	30	30	40
8,36	8	40	45	50

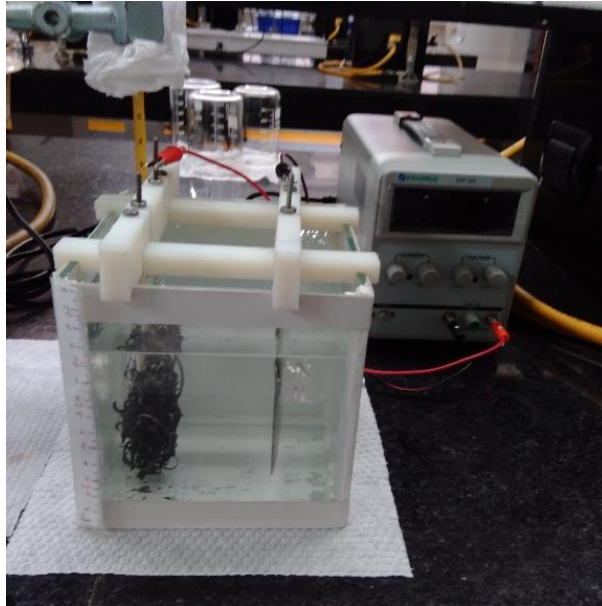
**Nota.** Se muestran algunos de los calibres de cables eléctricos y la cantidad de corriente, en amperios, que soportan. Tomado de: Conductores eléctricos, 1ª ed. PRIEN, Santiago, Chile, 2001.

[En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/in8EsLS>



**Figura 22.**

*Montaje de la celda electroquímica.*



*Nota:* Se muestra el montaje de la celda electroquímica con la conexión eléctrica requerida.

El tercer paso, previamente revisados los pasos anteriores, fue activar la fuente de corriente continua para dar inicio al proceso electrolítico; la duración establecida para el suministro de energía fue 3 horas para todos los ensayos, haciendo lecturas de pH, temperatura y absorbancia cada media hora. En la figura 23 y 24 se ilustran la toma de alícuotas y medición en los equipos para la toma de datos.

**Figura 23.**

*Medición de pH.*



**Nota:** Se observa la metodología para el registro de pH, la imagen de la izquierda muestra la toma de la muestra y la imagen derecha el equipo donde se realizó la medición.

**Figura 24.**

*Medición de absorbancia.*



**Nota:** Se muestra la metodología para el registro de la absorbancia, en la imagen de la izquierda se observa la muestra tomada y en la imagen de la derecha el equipo donde se realizó la medición.

La temperatura fue medida directamente de un termómetro de mercurio, sumergido en la celda, el termómetro se sujetó de un soporte universal para tener la misma posición en cada ensayo, además

permitió graduar la profundidad dentro del electrolito. El registro de la temperatura se llevó a cabo bajo el procedimiento expuesto en la norma ASTM E1-14. Esta norma establece la correcta medición de los termómetros de vidrio, menciona que, para obtener precisión total del termómetro, la profundidad de inmersión debe ser las mismas en todas las mediciones, el bulbo debe ser cubierto en su totalidad y se debe utilizar en posición vertical, asimismo el bulbo puede contener además de mercurio, aleación eutéctica de mercurio, talio, tolueno u otro líquido adecuado, coloreado con un tinte rojo permanente [41].

El pH fue medido con el equipo *APERA instruments- pH meter700*, en alícuotas de 40 ml, las cuales fueron devueltas a la celda una vez realizada la lectura, con el fin de evitar pérdidas en el volumen de reacción. El registro del pH se llevó a cabo bajo el procedimiento expuesto en la norma ASTM E70 – 19, en la cual se especifica el procedimiento de medición de pH en soluciones acuosas con electrodos de vidrio, inicialmente se establece que el equipo debe estar calibrado haciendo uso mínimo de dos soluciones de pH estándar (buffer), luego se debe realizar el enjuague del electrodo con agua desionizada, se debe tomar una alícuota de muestra suficiente para sumergir los electrodos y obtener el valor correcto de pH [42].

La concentración de ferrato fue determinada por método indirecto, mediante lecturas de absorbancia con longitud de onda de 510nm en el espectrofotómetro GENESYS 30; utilizando alícuotas de 4,5ml, siguiendo el procedimiento de regresar dicho volumen a la celda electrolítica una vez realizada la lectura, el instrumento fue calibrado antes de cada ensayo, utilizando como blanco agua desionizada. La absorbancia fue tomada bajo el procedimiento mencionado en la norma ASTM E169 – 16, esta norma establece las técnicas de análisis cuantitativo ultravioleta visible, el procedimiento descrito inicia con la limpieza de la celda del espectrofotómetro, parte extraíble en cuarzo con 1cm de ancho (dimensión comercial), esta debe limpiarse sumergiéndolas en agua o un detergente sulfónico suave. Deben evitarse las soluciones alcalinas, los detergentes que contengan “blanqueadores ópticos”, polvos abrasivos, fluoruros y materiales que puedan dañar las ventanas ópticas [43]. Luego de la limpieza se debe establecer la longitud de onda requerida, se debe llenar la celda de comparación o en blanco, con agua destilada, hacer lectura de la absorbancia, después se debe llenar la celda de absorción con la solución, la solución debe ser visiblemente clara y libre de materia particulada. Por último, registrar las lecturas de absorbancia en la longitud de onda especificada [43].

### 3.3 Cuantificación de ferrato VI

Mediante espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-V), se cuantificó la cantidad de ferrato utilizando la ecuación de Lambert y Beer, ecuación 23, tomada de la bibliografía [33].

La longitud de la celda del espectrofotómetro fue de 1 cm, el coeficiente de extinción molar 1150  $M^{-1} cm^{-1}$  y la absorbancia se obtuvo en el espectrofotómetro.

$$\text{Ec. 23} \quad [Ferrato VI] = \frac{A}{\epsilon * l}$$

=>

A: Absorbancia medida a 510nm.

l: Longitud de la celda del espectrofotómetro en cm.

$\epsilon$ : Coeficiente de extinción en  $M^{-1} cm^{-1}$ .

Para soluciones cuya lectura del espectrofotómetro fue absorbancia 3, valor límite de lectura del instrumento, fue necesario aplicar técnicas de dilución en relación 1:3, tomándose 10 ml de muestra concentrada y 30 ml de solución de NaOH (preparada bajo la concentración de NaOH utilizada en el ensayo que requirió esta dilución) permitiendo lectura de valores dentro del espectro del instrumento. El valor de la concentración de ferrato se obtuvo con la lectura en el instrumento y el factor de dilución aplicado, la fórmula se representa en la ecuación 24.

$$\text{Ec. 24} \quad [Ferrato VI] = \frac{A * v_{solución NaOH para dilución}}{\epsilon * l * v_{muestra concentrada}}$$

### 3.4 Costo directo de producción de ferrato VI.

El costo directo de producción de ferrato (VI) agrupó los costos de:

- ✓ Materiales para elaboración de electrodos.
- ✓ Insumos para los decapados.
- ✓ Solutos y solventes del electrolito.
- ✓ Consumo de energía.

A continuación, se muestra los costos asociados para cada ensayo realizado. Los precios mostrados son referentes a pesos colombianos.

### ***3.4.1. Materiales para fabricación de electrodos.***

Los electrodos fueron fabricados bajo las mismas características para cada ensayo, por ende, se estableció que el costo de materiales fue igual en cada ensayo. En la tabla 7 se observa el material utilizado, la cantidad requerida del mismo y el costo correspondiente. Los precios presentados corresponden al valor comercial, incluido el valor IVA. Los precios se muestran en los anexos de la C a la F, el ANEXO 3 corresponde al valor de la viruta, el ANEXO 4 al de las varillas de acero al carbón, las cuales fueron obtenidas a partir de una barra de soldadura de acero al carbón de 1/8” (a la barra se le retiró el aporte y se realizó la conversión del costo por kg a metro), el ANEXO 5 a la lámina de acero inoxidable, el precio de esta lámina mostró un incremento del 7% con respecto al día que se cotizó (inicio del año 2021) y el día que se solicitó el soporte por escrito (mes de Julio del año 2021) y el ANEXO 6 a las varillas de acero inoxidable, las cuales fueron obtenidas a partir de una barra de soldadura de acero inoxidable de 1/8” (a la barra se le retiró el aporte y se realizó la conversión del costo por kg a metro).

El costo parcial presentado en la tabla se obtuvo mediante el cálculo aplicado en la ecuación 25.

$$\text{Ec. 25} \quad \text{Cantidad utilizada} * \text{costo comercial} = \text{costo parcial}$$

La ecuación 26 representa el ejemplo para el cálculo de los costos parciales, los cuales posteriormente se suman para obtener el costo total de los electrodos.

$$\text{Ec. 26} \quad 0,03 \text{ kg} * 500 \frac{\$}{\text{kg}} = \$ 15$$

**Tabla 7.***Costo de los materiales de los electrodos.*

	Material	Cantidad	Costo Comercial	Costo parcial
Ánodo	Viruta	0,03 kg	500 \$/kg	\$ 15
	Varillas de conexión de acero al carbón de 1/8" x 17,5 cm	0,35 m	5.714 \$/m	\$ 1.900,90
Cátodo	Lámina de acero inoxidable espesor 0,9 mm	0,0056 m <sup>2</sup>	95.486 \$/m <sup>2</sup>	\$ 534,72
	Varillas de conexión de acero inoxidable de 1/8" x 11,5 cm	0,23 m	7.429 \$/m	\$ 1.708,67
Costo Electrodo por ensayo				\$ 4.159,29

*Nota.* Se observa la cantidad de material requerido para la elaboración de los electrodos y los costos correspondientes.

### 3.4.2 Insumos para los decapados.

El procedimiento consistió en la inmersión simultánea de los electrodos en tres soluciones diferentes, enjuagando al final de cada inmersión. La primera fue una limpieza inicial utilizando desengrasante industrial a base de ácido dodecibenceno sulfónico, hidróxido de sodio, urea, carboximetilcelulosa sódica y agua, según ficha técnica comercial. La segunda fue en solución de ácido clorhídrico al 10%. La tercera solución fue de hidróxido de sodio al 10%. Todos los enjuagues se realizaron con agua desionizada, requiriendo mayor cantidad de agua para los enjuagues del ánodo debido a su estructura entrecruzada. La tabla 8 resume los insumos, cantidades y costos correspondientes a la actividad de decapado. El ANEXO 7 muestra el valor comercial del agua desionizada, el ANEXO 8 el valor del ácido clorhídrico y el ANEXO 9 el valor del hidróxido de sodio. De igual forma el costo parcial se calculó con la ecuación 25.

**Tabla 8.***Insumos para los decapados.*

			Ánodo	Cátodo	Costo comercial	Costo parcial
Limpieza inicial	Preparación de la solución	Agua desionizada	0,6 L		2.500 \$/L	\$ 1.500
		Desengrasante	0,03 L		5811,80 \$/L	\$ 174,35
	Enjuague	Agua desionizada	0,6 L	0,3 L	2.500 \$/L	\$ 2.250
Limpieza con ácido	Preparación de la solución	Agua Desionizada	0,6 L		2.500 \$/L	\$ 1.500
		HCl	0,06 L		46.410 \$/L	\$ 2.784,60
	Enjuague	Agua Desionizada	0,6 L	0,3 L	2.500 \$/L	\$ 2.250
Neutralización	Preparación de la solución	Agua desionizada	0,6 L		2.500 \$/L	\$ 1.500
		NaOH	0,06 kg		5.700 \$/kg	\$ 342
	Enjuague	Agua desionizada	0,6 L	0,3 L	2.500 \$/L	\$ 2.250
<b>Costo Decapado por ensayo</b>						<b>\$ 14.550,95</b>

**Nota.** Se muestra la cantidad de insumo requerido, el costo de este y el costo del decapado por ensayo.

### **3.4.3 Insumos para la preparación del electrolito.**

La preparación del electrolito fue dependiente de cada ensayo. El soluto utilizado fue hidróxido de sodio y el solvente agua desionizada. Se establecieron ensayos a 20, 40 y 60% de solubilidad del NaOH en agua. En la tabla 9 se muestra el costo del soluto y solvente para cada ensayo realizado. El costo del electrolito se calculó aplicando la ecuación 25.

**Tabla 9.***Costo del electrolito.*

	Compuesto	Valor comercial	Cantidad para ensayos a		
			20% solubilidad	40% solubilidad	60% Solubilidad
Soluto	Hidróxido de sodio	5.700 \$/kg	0,436 kg	0,872 kg	1,308 kg
Solvente	Agua Desionizada	2.500 \$/L	2 L	2 L	2 L
Costo Electrolito por ensayo			\$ 7.485,20	\$ 9.970,40	\$ 12.455,60

*Nota.* La tabla relaciona la cantidad de soluto y solvente con el valor comercial de estos obteniéndose el costo de electrolito por ensayo.

#### **3.4.4 Consumo de energía.**

La cantidad de energía consumida fue dependiente de cada ensayo. Se establecieron ensayos a 2 y 4 Amperios, aplicados a diferentes concentraciones de electrolito, relacionados con porcentajes de solubilidad a 20, 40 y 60%. El valor del costo actual de la energía se tomó correspondiente al facturado en las instalaciones de la empresa donde se desarrolló el proyecto. En la tabla 10 se muestran los costos de energía consumida por ensayo. En el ANEXO 10 se muestra el costo facturado de la energía en la empresa AGUA, EQUIPOS Y PROCESOS S.A.S.



**Tabla 10.***Consumo energético.*

	Corriente (A)	Voltaje 1 <sup>er</sup> Ensayo (V)	Voltaje Replica (V)	Voltaje prom.	Potencia (kW)	Duración de los ensayos (h)	Energía consumida (kWh)	Costo comercial (\$ /kWh)	Costo Total por ensayo
20% Solubilidad	2	2,55	2,5	2,525	0,00505	3	0,0152	\$ 569,93	\$8,63
	4	3,5	3,35	3,425	0,0137	3	0,0411	\$ 569,93	\$23,42
40% Solubilidad	2	2,75	2,8	2,775	0,00555	3	0,0167	\$ 569,93	\$9,49
	4	3,5	3,55	3,53	0,0141	3	0,0423	\$ 569,93	\$24,11
60% Solubilidad	2	3,4	3,45	3,425	0,00685	3	0,0206	\$ 569,93	\$11,71
	4	3,85	3,8	3,825	0,0153	3	0,0459	\$ 569,93	\$26,16

*Nota.* Se observa el costo de energía consumida por ensayo realizado.

Finalmente, en la tabla 11 se consolidan los costos por ensayo realizado.

**Tabla 11.***Costo por ensayo.*

	Corriente (Amperios)	Materiales para electrodos	Insumos para el decapado	Insumos para el electrolito	Costo energético	Costo Total del ensayo
20% Solubilidad	2 A	\$ 4.159,29	\$ 14.550,95	\$ 7.485,20	\$ 8,63	\$ 26.204,08
	4 A	\$ 4.159,29	\$ 14.550,95	\$ 7.485,20	\$ 23,42	\$ 26.218,87
40% Solubilidad	2 A	\$ 4.159,29	\$ 14.550,95	\$ 9.970,40	\$ 9,49	\$ 28.690,13
	4 A	\$ 4.159,29	\$ 14.550,95	\$ 9.970,40	\$ 24,11	\$ 28.704,75
60% Solubilidad	2 A	\$ 4.159,29	\$ 14.550,95	\$ 12.455,60	\$ 11,71	\$ 31.177,56
	4 A	\$ 4.159,29	\$ 14.550,95	\$ 12.455,60	\$ 26,16	\$ 31.192

*Nota.* Se observa la consolidación de los costos para cada ensayo.

### 3.5 Diseño de experimentos.

El objetivo del diseño de experimentos para el presente trabajo fue conocer la influencia de las variables del sistema sobre la variable respuesta, para ello, se implementó un diseño factorial 3x2. Se plantearon las hipótesis nulas y alternativas. La primera hipótesis nula se planteó estableciendo que, realizar los ensayos a diferente concentración del electrolito (5,45, 10,9 y 10,35M) no genera variación en la cantidad de ferrato producido; la segunda se estableció bajo el supuesto de que

suministrar 2 y 4 amperios no modifica la producción final de ferrato obtenida; como tercera y última hipótesis establecida, se considera que la interacción entre las variables, concentración de electrolito y corriente suministrada no ocasiona diferencias en la producción de ferrato (VI), es decir independiente la concentración y corriente utilizada, la producción de ferrato no se ve afectada de forma estadísticamente significativa.

El diseño factorial se planteó en una hoja de Excel, en la cual se sintetizó la cantidad de ferrato producido en el ensayo inicial y la réplica bajo las condiciones de: Concentración a 20, 40 y 60% de solubilidad del electrolito y suministro de corriente en 2 y 4 amperios. Mediante la herramienta de análisis de datos se realizó el análisis de varianza de dos factores, el cual entregó los resultados de la interacción entre las variables modificadas y la variable respuesta.

### ***3.5.1. Superficie de respuesta.***

Mediante el uso del software Minitab, se estableció la superficie de respuesta que gráfico la tendencia de las variables y arrojó el punto óptimo de la experimentación. Se ingresaron los datos de la producción obtenida respecto a cada variable (concentración de electrolito y densidad de corriente), luego se utilizó la herramienta de análisis de superficie de respuesta la cual mediante cálculos internos generó el modelo y con la herramienta de optimizador de respuesta se obtuvo la gráfica de superficie.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizó la cantidad de ferrato (VI) producida bajo las condiciones de cada ensayo, se determinó el comportamiento de las variables pH y temperatura. Se establecieron relaciones de producción en función del ensayo de menor producción, del consumo energético, del tiempo de reacción y costo del ensayo, con el fin de establecer el ensayo de mejor relación costo-producción y a partir de éste se estableció el costo directo de producción del ferrato (VI).

### 4.1 Ferrato VI producido

#### 4.1.1 Ensayos a 20% solubilidad

En el ensayo a **2 amperios**, se registró un voltaje de 2,6 voltios al comenzar el ensayo y transcurrido no más de media hora el voltaje descendió a 2,5 voltios, generando un voltaje promedio para el ensayo inicial de 2,55 voltios, la réplica presentó un único voltaje durante toda la práctica de 2,5 voltios; la disminución del voltaje se debió posiblemente a que el sistema se ajustó a todas las variables externas que intervinieron dentro de la celda, variables como: temperatura, presión, humedad relativa, entre otras. La distancia y el tipo de electrodos se mantuvo constante para cada ensayo, la concentración de electrolito y amperaje aplicado fue dependiente del ensayo; sin embargo, tanto para la réplica como para el ensayo inicial, todas las variables mencionadas se mantuvieron iguales, la concentración del electrolito para estos ensayos correspondió a 5,45 M y la densidad de corriente aplicada fue de 60,976 A/cm<sup>2</sup>.

Del ensayo se pudo evidenciar que a medida que transcurrió el tiempo de reacción, la concentración de ferrato (VI) fue aumentando, por lo que se analiza que, en el transcurso de 3 horas, la producción de ferrato tiene una tendencia creciente. La concentración de ferrato se determinó mediante la ecuación 23, mencionada anteriormente.

Reemplazando los valores obtenidos, de este ensayo, en la ecuación 23, se obtuvo la concentración en moles por litro de este ensayo, el valor obtenido se calculó a partir de la ecuación 27.

$$\text{Ec. 23} \quad [Ferrato VI] = \frac{A}{\epsilon * l}$$

$$\text{Ec. 27} \quad [Ferrato VI] = \frac{0,123}{1150 M^{-1}cm^{-1} * 1 cm} = 0,00011 M$$

En la réplica se obtuvo 0,00001 M más del obtenido en el ensayo inicial, debido posiblemente a los cambios atmosféricos entre el día que se realizó la réplica y el día del ensayo inicial, ya que las variables bajo el control del experimento fueron exactamente iguales. No se puede decir con claridad que variables implicaron los cambios, en que magnitud y con qué frecuencia, se expone solamente las variables que cambian el momento atmosférico e influyen en el ambiente, siendo esto posiblemente lo que altera el comportamiento entre ensayos; considerando que dependiendo si el día estuvo lluvioso o soleado, la temperatura, la humedad relativa, entre otras, son característica del día que generan ligeros cambios en los resultados y más cuando la duración de cada ensayo y disponibilidad del laboratorio exigieron trabajar en horarios muy diversos, algunos ensayos en las mañanas, otros en las tardes, con días nublados, días soleados y días lluviosos.

La concentración en gramos de ferrato producido se calculó a partir de:

1. Concentración obtenida en Moles = 0,00011 M

2. Peso molecular de la sal de ferrato  $\text{Na}_2\text{FeO}_4 = 166 \text{ g/mol}$

La ecuación 28 representa los gramos por litro obtenidos en el ensayo inicial.

$$\text{Ec. 28} \quad 0,00011 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 166 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,018 \text{ g/L}$$

La concentración de la réplica se determinó con la misma ecuación 28, se obtuvo 0,020 g/L, por ende, la producción promedio para el ensayo fue 0,019g/L. Debido a que el volumen de solución fue 2 litros, la producción total del ensayo fue 0,038 g/2L. Los cálculos mencionados se muestran en la ecuación 29.

$$\text{Ec. 29} \quad \frac{0,018 \frac{\text{g}}{\text{L}} + 0,020 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{2} = 0,019 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 2\text{L} = 0,038 \text{ g}$$

Este cálculo se efectuó para cada uno de los ensayos realizados.

La temperatura registrada, correspondió a la temperatura del electrolito, debido a que la disolución de la soda caustica en agua es una reacción exotérmica, el aumento de la temperatura fue inevitable, es por ello por lo que la solución electrolítica se dejó en reposo hasta que alcanzó la temperatura ambiente, esta dependió de la temperatura ambiente del día que se realizó el ensayo. Durante el ensayo se observó un ligero aumento de la temperatura, el cual fue menor a dos grados centígrados, el comportamiento se mostró en todos los ensayos realizados, incluso en las réplicas. Además, se

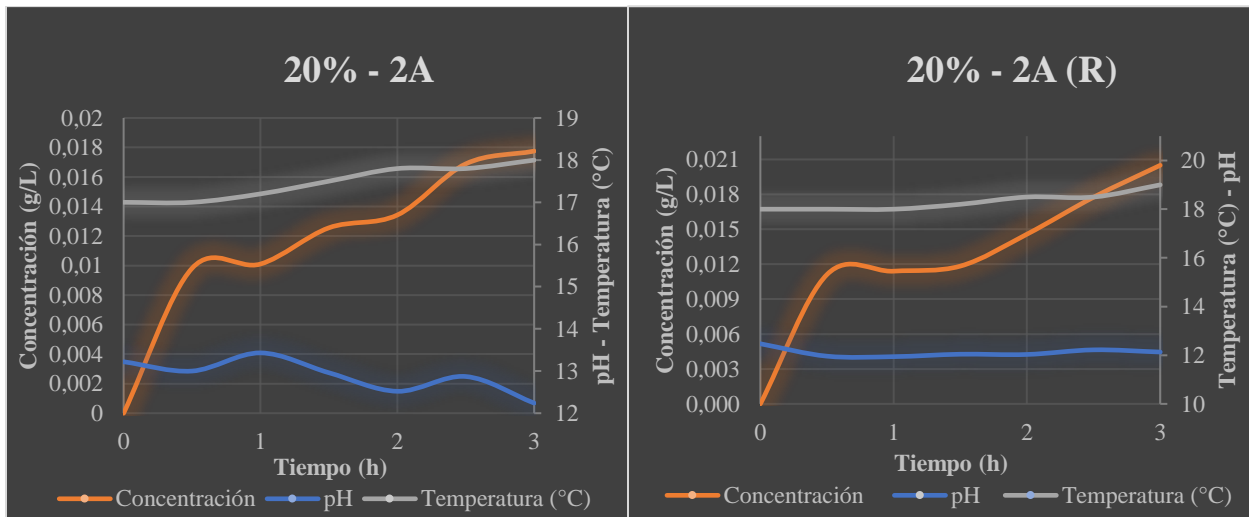
analizó que, en los ensayos a 2 amperios, la temperatura tuvo un incremento promedio de 1,15°C mientras que en los ensayos realizado a 4 amperios el incremento promedio fue de 1,43°C. Este aumento de la temperatura también fue registrado por *Quino* quien menciona haber tenido el aumento de 1°C cuando trabajó densidades de corriente de 40 y 60 A/m<sup>2</sup> y un aumento de 2°C cuando trabajó densidades de corriente a 80 A/m<sup>2</sup> [13]. *Wang* en su experimentación coincide con este comportamiento, argumentando que, a mayor densidad, se genera un ligero incrementó en la temperatura del electrolito [23].

El pH fue medido en alícuotas de 40 ml, se observó que el pH de la solución disminuyó con el paso del tiempo de reacción, esto por efecto de la formación de ion ferrato, cuyo pH (reportado por la bibliografía en 9,5 [6]) incidió en la disminución del pH del medio inicial, altamente alcalino. Sin embargo, la interacción del ferrato formado, con la alta alcalinidad de la solución, generó una oscilación tenue menor a una unidad de pH.

Los datos obtenidos se muestran en la gráfica 25; en la imagen de la izquierda se representan los datos del ensayo inicial y la imagen de la derecha los de la réplica.

**Figura 25.**

*Datos de los ensayos a 20% solubilidad y 2 Amperios.*



a).

b).

**Nota.** Se muestra el pH, la temperatura y concentración de ferrato (VI) obtenido en el ensayo a 20% de solubilidad y 2 Amperios. La imagen a). representa el ensayo inicial y la imagen b). los datos de la réplica del ensayo.

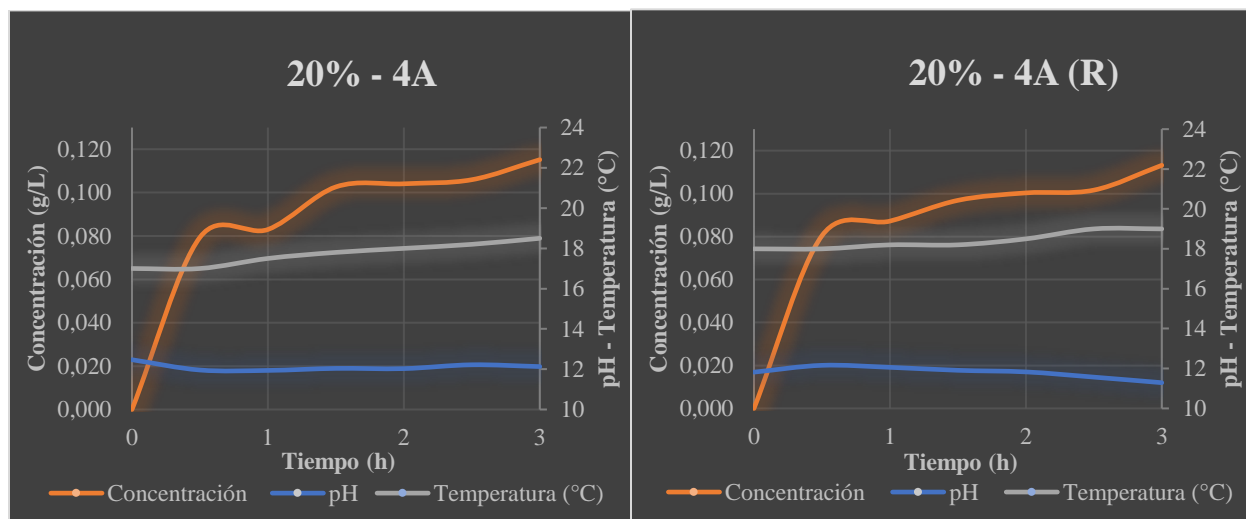
Del comportamiento de este ensayo, se puede observar que, la producción de ferrato durante las 3 horas mostró tendencia al aumento; registrándose la mayor velocidad de formación de ferrato, en el primer intervalo de media hora, en los siguientes intervalos, la velocidad de formación varió, disminuyendo y volviendo a subir, pero siempre mostrando valores inferiores a los logrados en el primer intervalo; fenómeno que según la bibliografía puede deberse a la formación de gas, cuyas microburbujas se localizan en la superficie del electrodo, aislándolo parcialmente y disminuyendo la velocidad de formación de ferrato [35]; estas microburbujas colisionan entre ellas, aumentan de volumen, flotan y abandonan el electrodo, permitiendo nuevamente aumento en la velocidad de formación de ferrato, dicho fenómeno se repite con mayor o menor intensidad en los diferentes ensayos realizados. Cabe destacar que el electrodo a través del tiempo pierde capacidad de producción debido a pasivación, o en otras palabras a la formación de óxido en la superficie del material [23].

El siguiente ensayo de la misma concentración se realizó a **4 amperios**, que comparativamente con el ensayo a 2 amperios registró un incremento del voltaje ocasionando un consumo de energía 2,71 kWh veces mayor. El dato registrado para el ensayo inicial fue de 3,5 voltios y para la réplica 3,35 voltios, con promedio en el ensayo de 3,425 voltios.

En cuanto a la producción de ferrato (VI) se observó que el obtenido a 4 amperios produjo 5,97 veces más, que lo obtenido a 2 amperios para la misma concentración; obteniéndose 0,228 g/2L. Los datos graficados se observan en la figura 26.

**Figura 26.**

*Datos de los ensayos a 20% de solubilidad y 4 Amperios.*



a).

b).

**Nota.** Se observa el pH, la temperatura y la concentración de ferrato (VI) en el ensayo a 20% de solubilidad y 4 amperios. La imagen a) representa los datos del ensayo inicial y la gráfica b) los datos de la réplica.

El comparativo entre el ensayo a 2 y 4 amperios permitió analizar que a medida que se aumenta la corriente, la producción de ferrato también aumenta; es decir a medida que se aumenta la densidad de corriente en la celda, la producción de ferrato aumenta. Este comportamiento fue corroborado por *Barisci* quien en la gráfica 2 de su investigación muestra esta tendencia[35].

La planilla de campo de los ensayos a 20 % de solubilidad se presenta en el ANEXO 11.

#### **4.1.2. Ensayos a 40% solubilidad**

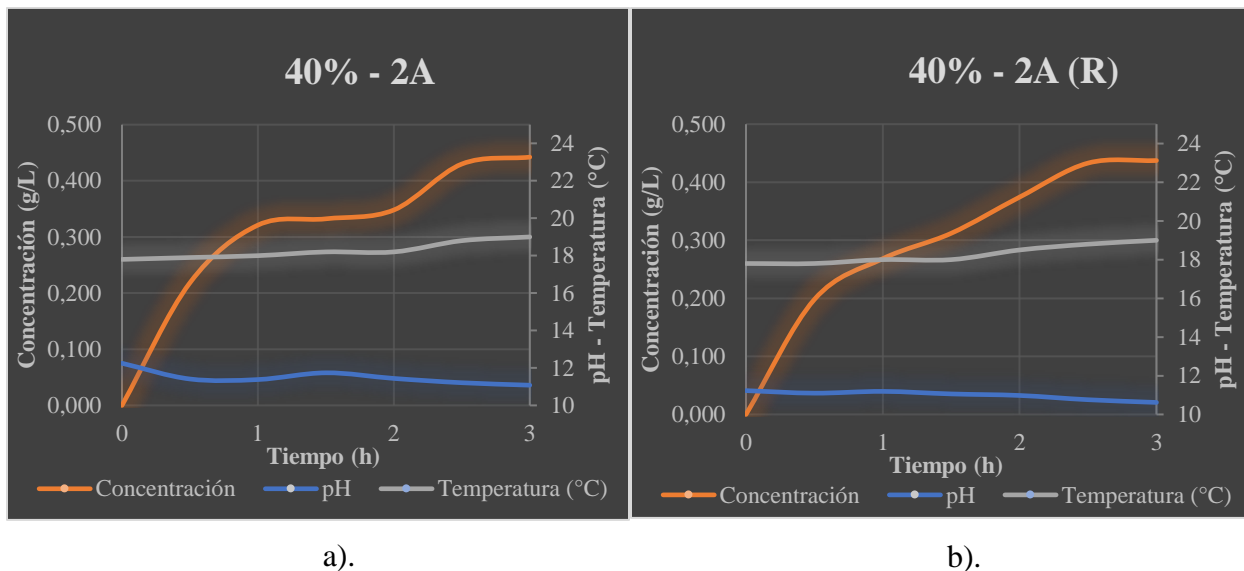
Los ensayos a 40% solubilidad correspondieron a una concentración de 10,9 M. Para el ensayo a **2 amperios** se obtuvo un voltaje promedio de 2,75 voltios. Al compararlo con los ensayos a 20% de solubilidad, se observa que, al aumentar la concentración de electrolito, aumenta el requerimiento del voltaje; entendiéndose este aumento, como la respuesta al aumento de la resistencia, para el desplazamiento de los electrones generada por el aumento en la concentración del electrolito.

La producción de ferrato (VI) promedio entre el ensayo inicial y la réplica fue de 0,880 g/2L.

La figura 27 muestra el comportamiento de los datos para este ensayo.

**Figura 27.**

*Datos de los ensayos a 40% de solubilidad y 2 Amperios.*



**Nota.** Se muestra la concentración de ferrato (VI) en gramos por litro, el pH y la temperatura para el sistema a 40% de solubilidad y 2 amperios. La imagen a) muestra los datos del ensayo inicial y la imagen b) los datos de la réplica.

Se observa que, al incrementar la concentración del electrolito de 5,45 a 10,9 M, se obtuvo una mayor producción de ferrato (VI). En comparación al ensayo de 20% y 2 amperios, se obtuvo 23 veces más producción.

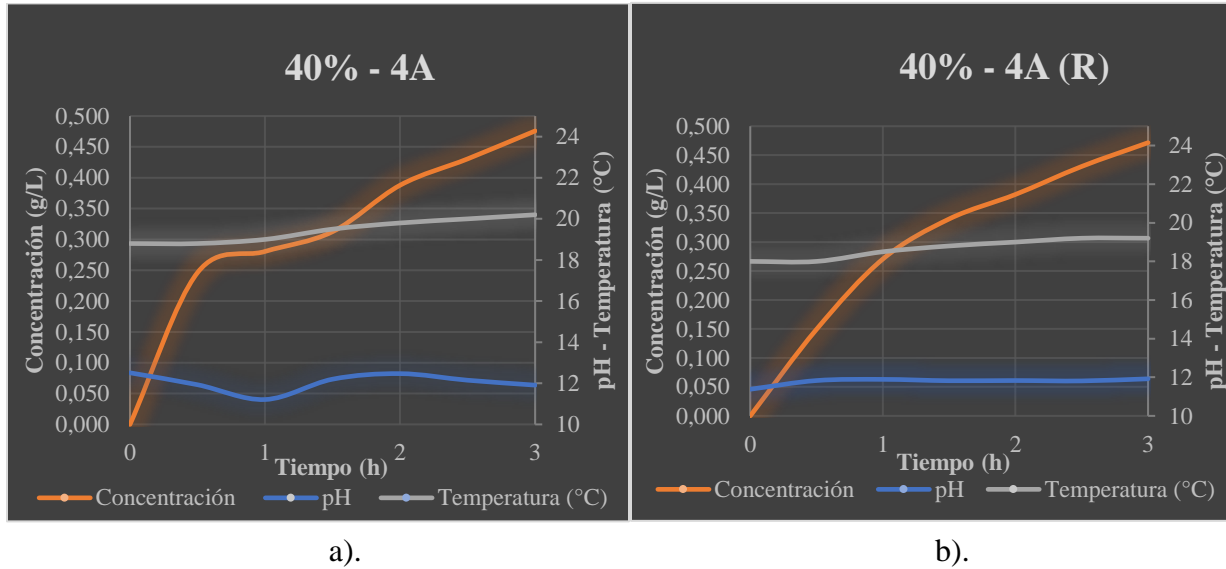
Para el ensayo a **4 amperios** se registró un voltaje promedio de 3,525 voltios. La cantidad de ferrato obtenida fue de 0,947 g/2L, siendo 1,1 veces mayor que el obtenido en el ensayo de 40% y 2 amperios; pero 24,8 veces mayor con respecto al ensayo de 20 % y 2 amperios. Del dato obtenido se puede analizar, que, en la producción de ferrato, hay mayor influencia de la concentración del electrolito que de la corriente suministrada.

La figura 28 muestra los datos graficados del ensayo a 40% de solubilidad y 4 amperios.



**Figura 28.**

*Datos de los ensayos a 40% de solubilidad y 4 amperios.*



**Nota.** Se representan los datos de pH, concentración de ferrato (VI) y temperatura para el ensayo a 40% de solubilidad y 4 amperios. La imagen a) muestra los datos del ensayo inicial y la imagen b) los datos de la réplica.

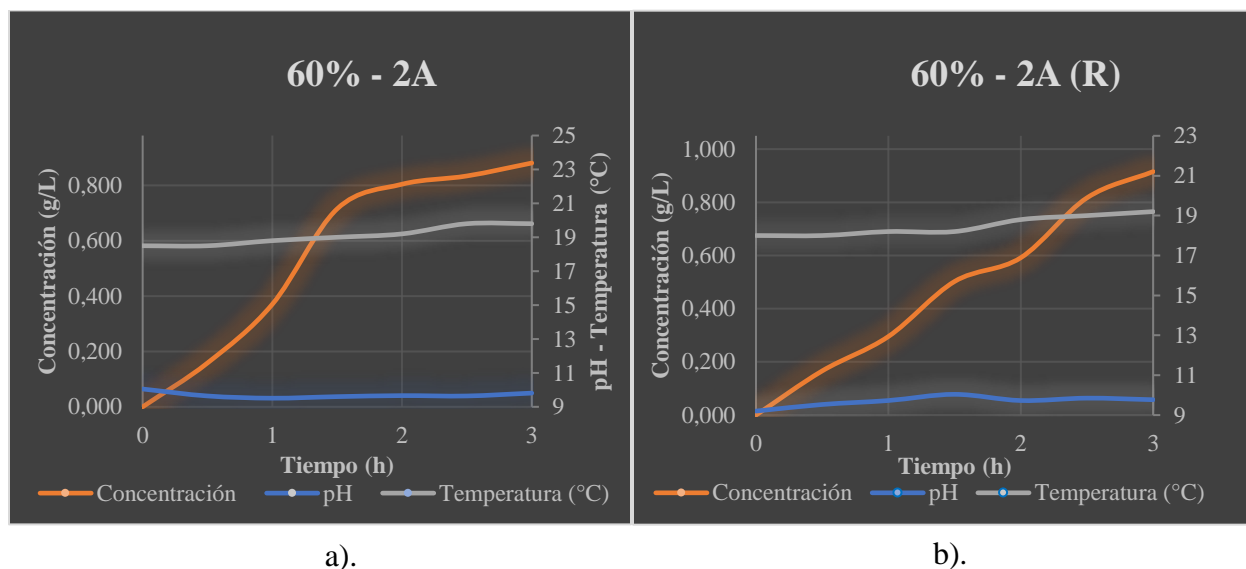
La planilla de campo de los ensayos a 40% de solubilidad se presenta en el ANEXO 12.

#### **4.1.3. Ensayos a 60% solubilidad**

Los ensayos a 60% de solubilidad evidenciaron una mayor producción de ferrato (VI), respecto a los ensayos anteriores. Para el ensayo a **2 amperios** se obtuvo una concentración promedio de 1,796 g/2L de ferrato (VI), siendo 2,04 veces mayor al ensayo de 40% con 2 amperios y 47 veces más, respecto al ensayo a 20% y 2 amperios. Se registró un voltaje promedio de 3,425 voltios, siendo este el dato con mayor valor entre los ensayos a 2 amperios. Los datos obtenidos se muestran en las gráficas de la figura 29.

**Figura 29.**

*Datos de los ensayos a 60% de solubilidad y 2 Amperios.*



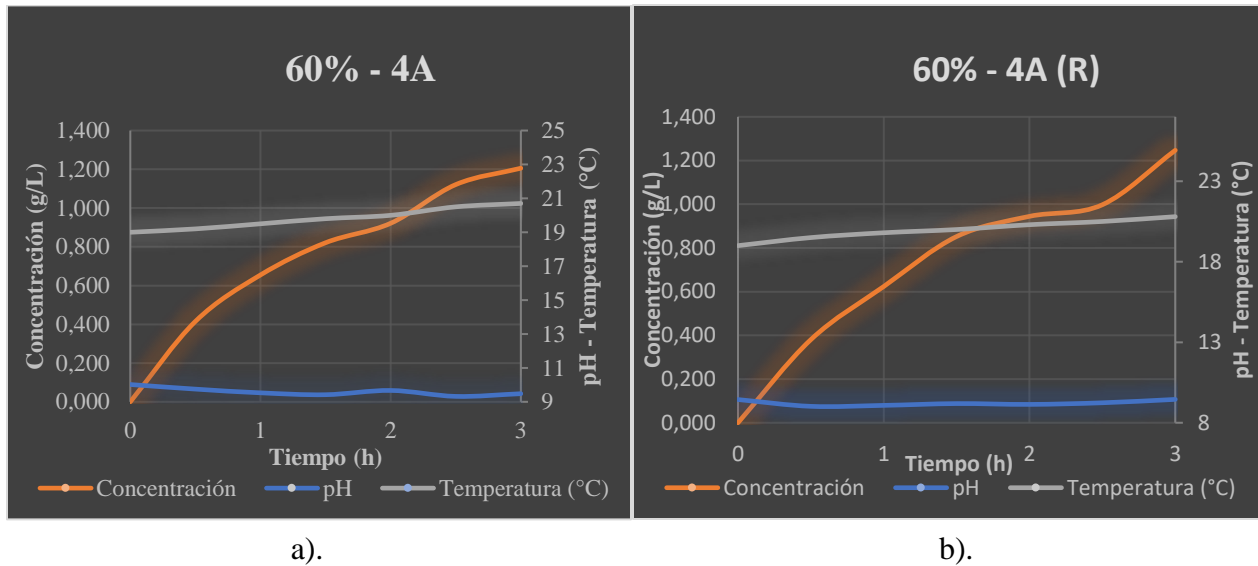
**Nota.** Se representa la concentración de ferrato (VI), el pH y la temperatura para el ensayo a 60% solubilidad y 2 amperios. En la imagen a) se representan los datos del ensayo inicial y la imagen b) los datos de la réplica.

Para el ensayo a **4 amperios** se registró la mayor concentración de ferrato (VI), 2,452 g/2L, siendo 2,6 veces mayor respecto al ensayo a 40% y 4 amperios, 10,74 veces mayor al ensayo de 20% y 4 amperios, y 64,1 veces mayor al ensayo con el cual se han realizado todas la comparaciones, el ensayo de mínimas condiciones (20% de solubilidad y 2 amperios); permitiendo analizar de forma definitiva que, aumentar la concentración del electrolito y la densidad de corriente permiten obtener una mayor generación de ferrato (VI). Estos comportamientos se evidenciaron de igual manera en la bibliografía [12] y [13]; en la investigación realizada en la bibliografía 12, se muestra una mayor producción de ferrato, al terminar el tiempo de reacción, a medida que se aumenta la concentración del electrolito (figura 3); en la bibliografía 13 se muestra la gráfica 26, donde se observa el aumento de la concentración de ferrato, a medida que se aumenta la densidad de corriente.

Los datos obtenidos para el ensayo se representan en la figura 30.

**Figura 30.**

*Datos de los ensayos a 60% solubilidad y 4 amperios.*



**Nota.** Se representa la concentración de ferrato (VI), el pH y la temperatura para el ensayo a 60% solubilidad y 4 amperios. En la imagen a) se representan los datos del ensayo primario y la imagen b) los datos de la réplica.

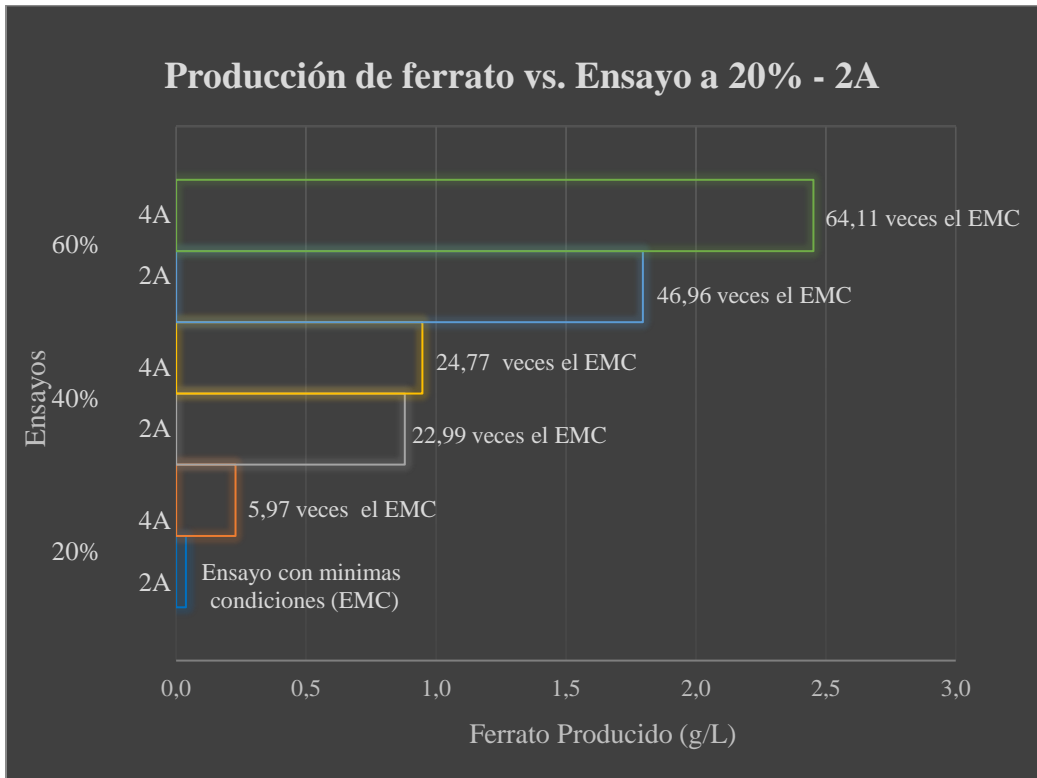
La tendencia de la temperatura tuvo el mismo comportamiento que los ensayos anteriores, un ligero crecimiento; se observó que el aumento fue de 1,8°C, mostrándose de manera clara el comportamiento mencionado anteriormente, de que un voltaje mayor genera un incremento mayor de la temperatura.

La planilla de campo de los ensayos a 60% de solubilidad se presenta en el ANEXO 13.

Para resumir todas las comparaciones realizadas anteriormente, se presenta la figura 31, que muestra la comparación entre la producción de los diferentes ensayos y el ensayo de mínimas condiciones (20% solubilidad – 2 Amperios).

**Figura 31.**

*Producción de ferrato n veces el ensayo a mínimas condiciones.*



**Nota.** Se muestra el incremento en la producción de ferrato respecto al primer ensayo que tuvo las condiciones mínimas de concentración y corriente (20% solubilidad y 2 Amperios).

Al comparar los ensayos, se observa en primera instancia, que la mayor producción de ferrato se obtuvo en el porcentaje de solubilidad más alto (60%) y la mayor corriente suministrada, es decir 4 amperios, que corresponde a una densidad de corriente de  $121,951 \text{ A/m}^2$ ; por lo que se determina que la producción de ferrato es directamente proporcional a la concentración del electrolito y a la densidad de corriente.

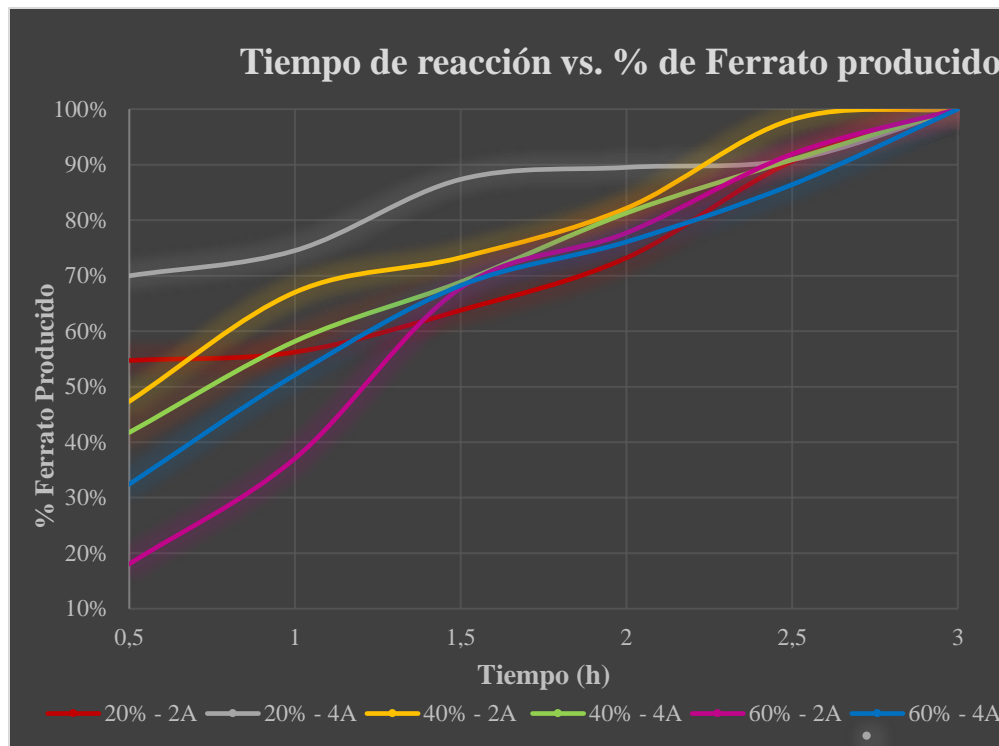
El comportamiento del pH en los diferentes ensayos se observó estable con la misma tendencia a la disminución, con diferencias mínimas y sin generar resultados representativos respecto a la producción de ferrato, solamente se observa que a medida que hay mayor producción menor es el valor de pH, como se mencionó anteriormente, el pH disminuye a medida que el ferrato se va produciendo. A partir de los datos arrojados por esta variable se analiza que el pH, no es una variable que afecta la producción de ferrato (VI).

Respecto a la temperatura de la solución electrolítica, se observó un incremento inferior a los 2° centígrados durante las tres horas del ensayo, este comportamiento se pudo evidenciar en todos los ensayos. Cabe destacar que la temperatura inicial dependió del momento atmosférico del día que se realizó cada ensayo.

El tiempo total de reacción, establecido para todos los ensayos, fue de 3 horas, sin embargo, la producción en cada ensayo varió durante este lapso. En la primera hora se registró una producción mayor al 52% del total producido, para 5 de los 6 ensayos realizados, el ensayo que presentó una producción menor, a este valor, fue el realizado a 60% y 2 amperios, el cual alcanzó solamente el 37%. En la figura 32, se observa el porcentaje producido respecto a la producción máxima de cada ensayo en función del tiempo.

**Figura 32.**

*Tiempo de reacción vs. porcentaje de ferrato producido.*



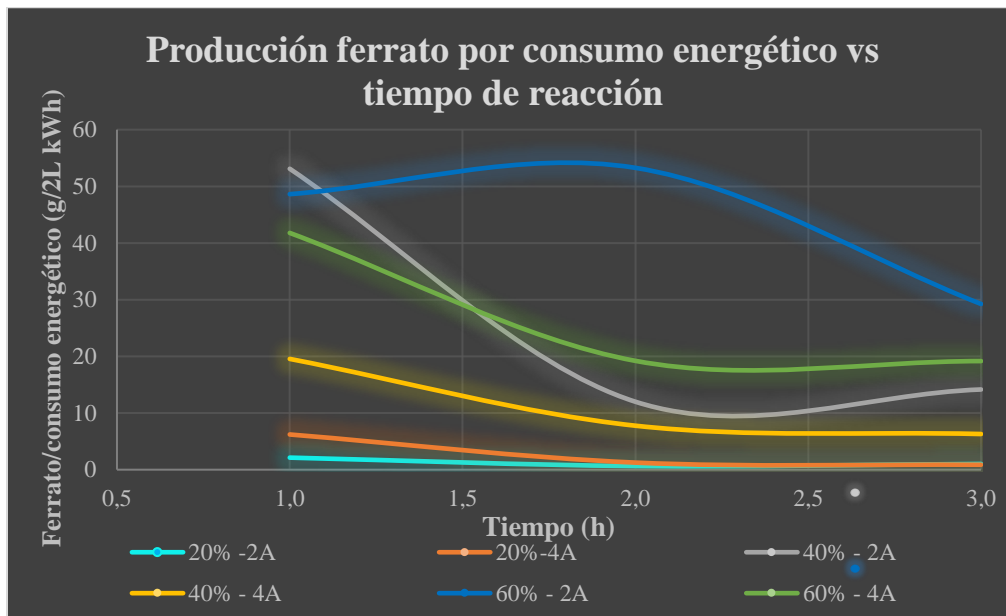
**Nota.** Se muestra el porcentaje de ferrato producido respecto al máximo producido en 3 horas para cada ensayo.

Para determinar la productividad de cada ensayo se estableció la relación, producción de ferrato (g/L) y consumo energético (kWh); la relación se graficó, considerando que el consumo energético

es continuo y estable durante las tres horas de reacción, por lo que se estableció que la energía para una hora es 1/3 de la energía total y segundo se consideró la producción de cada hora sin tener en cuenta el acumulado en gramos de ferrato. Esta relación se graficó con respecto al tiempo y se encontró que, en la primera hora se gasta 1/3 de la energía total, produciendo el 58% del ferrato total, en consideración al ensayo de menor producción y 52% para el de mayor producción, este resultado indica que las dos horas restantes son menos productivas, dado que se requiere 2/3 más de energía, para producir el 42% o el 48% faltante según el ensayo de menor y mejor producción, respectivamente. Se analiza que en lugar de utilizar las 2 horas y los 2/3 de energía restantes, se pueden emplear dos lotes, de una hora cada uno, los cuales entregarán de forma independiente un 58% o un 52% producido, para el ensayo de menor y mayor producción, respectivamente. Después de analizar el tiempo de reacción, se decidió graficar la relación de gramos de ferrato producido por kWh consumido vs. horas de reacción para conocer la productividad del ensayo en cada hora de reacción. La figura 33 muestra el gráfico obtenido de la relación.

**Figura 33.**

*Ferrato producido por consumo energético vs. tiempo de reacción.*



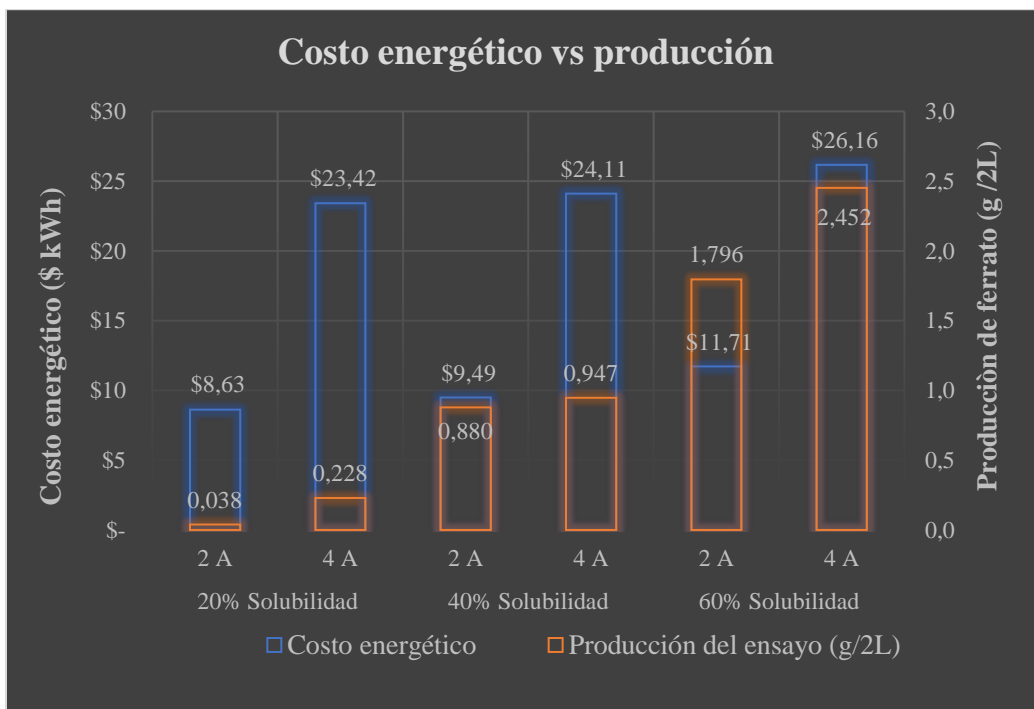
**Nota.** Se muestra la relación entre la cantidad de ferrato producido y el consumo energético respecto al tiempo empleado en la reacción.

En resumen, la gráfica 31 define la producción de ferrato en los diferentes ensayos, siendo los de mayor concentración, los más productivos; destacándose el realizado a 60% de solubilidad y 4 amperios, seguido del ensayo a 60% y 2 amperios con una producción del 27% menor con respecto al ensayo de 60% y 4 amperios. Por otra parte, la figura 33 presenta la relación entre el ferrato producido por unidad de energía consumida y el tiempo transcurrido, interpretándose que el ensayo a 60% de solubilidad y 2 amperios es el que menor consumo energético unitario presenta.

En la figura 34 se esquematiza, para cada ensayo, los gramos de ferrato producido y el costo de energía consumida. El comportamiento de la gráfica permite establecer que el ensayo a 60% y 2 amperios presenta la mejor relación entre la cantidad de ferrato producido en 2 litros y el costo de la energía, es decir se obtiene mayor cantidad de ferrato con menor energía consumida, en comparación con los demás ensayos.

**Figura 34.**

*Costo energético vs. producción de ferrato obtenida en cada ensayo.*



**Nota.** Se muestra el costo energético y la producción en gramos por dos litros (g/2L), generados en cada ensayo.

En consecuencia con el alcance del presente proyecto, se demuestra que, técnicamente la producción de ferrato VI a partir de viruta de acero al carbón, es viable para todos los ensayos

realizados. Desde luego, se presentan diferencias entre las cantidades producidas según la condición de cada ensayo, y a partir del comparativo entre los diferentes resultados, se selecciona, en función de la mayor producción los 2 ensayos más destacados de los 6 realizados. Estos dos resultados se caracterizan, uno por producir la mayor cantidad de ferrato en gramos por litro y el otro por la mayor relación entre ferrato producido y energía consumida. El ensayo a 60% de solubilidad y 4 amperios fue el que mayor cantidad de ferrato produjo y el realizado a 60% y 2 amperios presentó la mayor relación entre la producción y la energía consumida.

#### **4.2 Costo directo de producción de ferrato VI**

Para conocer el costo directo de ferrato producido, se realizó una comparación del costo del ensayo y la cantidad de ferrato producido en cada ensayo. Los costos se establecieron como fijos y variables. Los costos fijos, fueron aquellos que tuvieron el mismo valor para todos los ensayos, como lo fueron: los costos de los materiales para los electrodos y los insumos para el decapado. Los costos variables, asociaron los costos dependientes de la característica del ensayo, siendo los insumos para el electrolito y el consumo energético los agrupados en este tipo de costo.

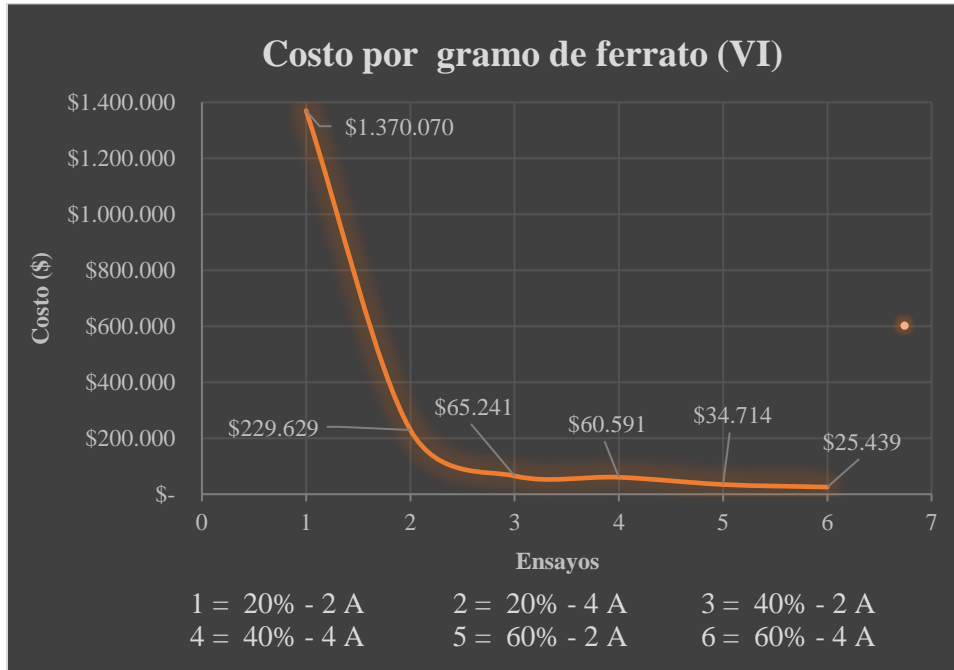
Al determinar el costo del ensayo se obtuvo una relación directamente proporcional, entre las condiciones del ensayo y el costo, donde se observa que, a mayor concentración y corriente suministrada, mayor es el costo presentado.

Mediante la relación entre el costo causado y la producción obtenida en los ensayos realizados, se obtiene el costo por gramo de ferrato producido; el cual, muestra que la mejor relación costo-producción se obtiene en el ensayo a 60% de solubilidad y 4 amperios. La figura 35 muestra el costo por gramo de ferrato producido bajo las condiciones de cada ensayo.



**Figura 35.**

*Costo por gramo de ferrato producido.*



**Nota.** Se muestra el costo causado por gramo de ferrato producido, en cada ensayo.

Este comportamiento fue mencionado por *Quino* quien después de relacionar los costos con la producción obtenida, graficó en su investigación la figura 27 y mostró que a medida que se aumenta la concentración del electrolito y la densidad de corriente, mayor es la producción obtenida y menor el costo presentado [13].

Evaluando los resultados encontrados en los diferentes análisis realizados, se obtiene que el ensayo con mayor producción y mejor relación costo-producción presenta es el realizado a 60% de solubilidad y 4 amperios, condiciones bajo las cuales se producen 2,452 gramos de ferrato en 2 litros de solución, con un consumo de energía de 0,0459 kWh y un costo directo asociado de \$25.439 pesos colombianos por gramo de ferrato (VI).

Se realizó la comparación entre el costo por gramo de ferrato producido y el costo reportado por *Quino*, este investigador definió el costo por gramo, a partir solamente del costo del kWh, del NaOH y el acero de bajo carbono; para hacer la comparación lo más cercana posible, se compararon los costos entre los ensayos con concentración de electrolito y densidad de corriente más cercanos; para el ensayo realizado por *Quino* se eligió el ensayo a 10M con 60 A/m<sup>2</sup> y

respecto a los ensayos realizados en la presente investigación, se eligió el ensayo a 10,9M con 60,976 A/m<sup>2</sup>. La tabla 12 muestra la comparación de precios entre los datos reportados en la bibliografía [13] y los obtenidos en la presente investigación, además se observa el costo por gramo de ferrato obtenido.

**Tabla 12.**

*Costos reportados en la bibliografía.*

FACTOR DE COSTO	INVESTIGACIÓN	
	Bibliografía [13]	Presente trabajo
Energía (\$/kWh)	\$ 303,9	\$ 569,9
NaOH (\$/kg)	\$ 2.287,1	\$ 5.700
Acero de bajo carbono (\$/kg)	\$ 4.264,1	\$ 500
Costo por gramo de ferrato (\$/g)	\$ 387,7	\$ 15.394,8

**Nota.** Se muestra la información reportada en la bibliografía y la presentada en el presente trabajo.

Se observa que el costo, para el ensayo seleccionado en esta investigación es 39,71 veces más que el reportado por *Quino*, de lo cual se analiza que el costo de la energía es 1,87 veces mayor que el reportado en la presente investigación, de igual manera la soda caustica fue 2,49 mayor; por el contrario se observa la disminución significativa en el costo de la materia prima del ánodo, siendo 8,53 veces menor el insumo utilizado en la presente investigación, demostrando que la viruta aporta una disminución considerable en la producción.

#### 4.3 Diseño factorial 3x2

Al aplicar el diseño factorial 3x2 se obtuvo la tabla 13 donde se observa que el estadístico de prueba (F) fue mayor al valor crítico de F, en los resultados de la concentración evaluada, en el de la corriente suministrada y en los arrojados entre la interacción de estos. Por ende, se rechaza la hipótesis nula (ver numeral 2.5.2.a.i) que se generó respecto a la concentración, por lo cual se estableció que utilizar una concentración diferente para cada ensayo, determina una producción de ferrato con diferencia estadística significativa. De igual manera se rechaza la hipótesis nula establecida para la corriente, por ende, se estima que, dependiendo de la corriente suministrada, la producción de ferrato presentará cantidades diferentes. En cuanto a la interacción de estas dos variables se genera la aceptación de la hipótesis alternativa, en la cual se manifiesta que variar las

condiciones de concentración del electrolito y corriente entregada, tiene una afectación directa en la concentración de ferrato obtenido.

**Tabla 13.**

*Resultados del diseño factorial 3x2.*

ANÁLISIS DE VARIANZA							
<i>Variable</i>	<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
<b><i>Corriente</i></b>	Muestra	0,279	1	0,279	283,700	2,798E-06	5,987
<b><i>Concentración</i></b>	Columnas	8,052	2	4,026	4100,125	3,909E-10	5,143
<b><i>Interacción</i></b>	Interacción	0,193	2	0,096	98,087	2,614E-05	5,143
	Dentro del grupo	0,006	6	0,001			
Total	Total	8,529	11				

**Nota.** Se muestra la tabla resumen del diseño factorial 3x2 aplicado.

En cuanto a los demás valores obtenidos en la tabla, estos se pueden interpretar de la siguiente forma. *La suma de los cuadrados* es la variación que se le atribuye a la variable, es decir que tanta variabilidad aporta en el resultado final, esta variable [44]. Se puede observar que de los valores obtenidos la concentración es quien más variabilidad entrega a la producción de ferrato (VI).

*Los grados de libertad* se definen como el número total de observaciones menos 1, es decir, las variaciones posibles menos 1 (N-1) [45]. Para este diseño se establece que los grados de libertad totales son  $6 - 1 = 5$ , de los cuales 1 grado de libertad se encuentra en la variable densidad de corriente, debido a que esta variable tiene 2 valores, solo se puede establecer 1 variación (de 2 a 4 amperios). En la variable concentración se cuenta con 2 grados de libertad debido a que esta variable cuenta con 3 valores, es decir hay 2 posibilidades de variar. Por último, la variable interacción refleja los grados de libertad restantes.

*El promedio de los cuadrados* se obtiene dividiendo la suma de los cuadrados en los grados de libertad, esto permite comparar las relaciones y determinar si hay diferencia significativa, de lo cual se interpreta que entre mayor sea la relación, más afectará esta variable el resultado[44]. Como se puede observar, la concentración es la variable que más afecta la producción de ferrato (VI).

El *estadístico de prueba* es un número calculado a partir de los datos registrados, cuya magnitud permite discernir si se rechaza o no la hipótesis nula [34].

La *probabilidad* permite determinar qué tan común o poco común es el valor  $F$ , bajo el supuesto de que la hipótesis nula es verdadera, por lo cual se interpreta que a medida que el valor sea bajo, menos razonable es que la hipótesis nula sea verdadera. Si la probabilidad está por debajo del nivel de significancia ( $\sigma$ ), que, por defecto, se establece en 0,05, se considera significativa la diferencia estadística [46]. Dado que los 3 valores de probabilidad fueron menores al nivel de significancia, se establece que el rechazo de la hipótesis nula es correcto y que se cuenta con diferencia estadística significativa para esa afirmación.

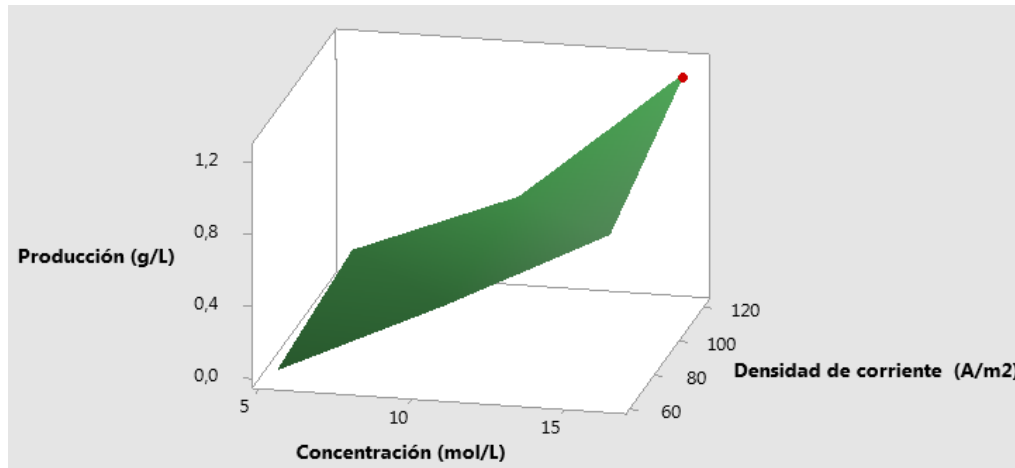
Por último, *el valor crítico de  $F$*  es una prueba estadística que determina la distribución de los datos en base a un valor predeterminado, siendo los datos estructurados bajo la hipótesis de los estándares corrientes [47]. Es decir que este valor es el punto teórico, que define los valores que apoyan la hipótesis nula, generando el límite en la distribución de  $F$ . Mediante el comparativo entre el límite de la distribución y el estadístico de prueba, se pudo determinar que la interacción entre la concentración del electrolito y la densidad de corriente afectan la obtención de ferrato (VI).

#### ***4.3.1 Superficie de respuesta***

La superficie de respuesta se muestra en la figura 36. El modelo obtenido, muestra una superficie de respuesta plana, en la cual se observa las regiones que favorecen la mayor producción de ferrato, la inclinación de la superficie muestra que el punto óptimo se encuentra en el vértice de mayor concentración y mayor densidad de corriente, por lo cual se establece que la variable de respuesta de interés es del tipo: “mientras más grande es mejor”, es decir que tiene un escalamiento ascendente [34]. Este resultado es bajo criterios estadísticos los cuales no consideran los diversos efectos que generan un aumento en la concentración del electrolito (mayor costo y manipulación peligrosa) y en la densidad de corriente (más costo energético). Sin embargo, la gráfica permite obtener mayor claridad del punto óptimo, la inclinación y tendencia hacia este punto.

**Figura 36.**

*Superficie de Producción vs. Densidad de corriente y Concentración.*



*Nota.* La gráfica muestra la interacción entre la densidad de corriente en ( $A/m^2$ ) y la concentración molar del electrolito, permitiendo establecer el punto óptimo, el cual fue señalado por el punto rojo dentro de la gráfica.

## 5. CONCLUSIONES

Luego de obtener producción de ferrato (VI) en cada uno de los ensayos realizados, se concluye que, utilizar la viruta residual de procesos de torneado, es viable técnicamente para la producción de ferrato (VI) por vía electroquímica.

Una de las especificaciones que debe cumplir la materia prima (viruta), es que debe seleccionarse en forma de espiral, tipo continua, para que se logre el entrecruzamiento y se pueda construir el electrodo. Además, la compactación se debe realizar con la precaución de no fracturarla ya que esto hará que la viruta se desmorone y no se alcance la construcción del ánodo. Otra especificación es la composición de hierro presente, la bibliografía menciona que un área de 105,15 m<sup>2</sup> de hierro, produce 2,03 mM de ferrato[35], en la presente investigación se utilizó aproximadamente 3 veces este valor (327, 50 m<sup>2</sup> de hierro) y se obtuvo una cantidad 3,58 veces más (7,26 mM), por lo cual se concluye que la cantidad de hierro en la materia prima es la especificación con mayor relevancia, debido a que, a medida que se aumenta la cantidad de hierro se produce más ferrato, ya que el hierro es elemento promotor de la formación de ferrato (VI); cabe destacar que, la investigación con el cual se hizo la comparación [35], utilizó acero al carbón con 0,07% C (menor cantidad que la presente en el acero al carbón de la viruta), además, trabajó menor densidad de corriente (45,5 A/m<sup>2</sup>) que la utilizada en el presente trabajo y utilizó mayor concentración de electrolito (20M), deduciéndose que la cantidad de hierro en el ánodo genera impacto sobre la producción y se corrobora la información de la bibliografía [12], que mayor cantidad de carbono, produce más cantidad de ferrato (VI).

La conclusión del segundo objetivo específico es que la celda electroquímica establecida para la experimentación cumplió en todos requerimientos. Aquellos como: material resistente a las características químicas del electrolito y transparencia necesaria para visualizar los fenómenos ocurridos; su capacidad permitió la sumergencia total de los electrodos y un borde libre suficiente que garantizó el alojamiento adecuado de la cantidad de electrolito. Por la forma de la viruta se obtuvo mayor área de contacto en comparación al área de una superficie plana de un electrodo convencional. La configuración de los electrodos exigió para el ánodo una cantidad mínima de viruta para garantizar el entrecruzamiento y aportar estabilidad física por simple compactación. La implementación de soportes garantizó la localización estable de los electrodos durante y para todos

los ensayos. El conexionado eléctrico y la capacidad de la fuente garantizaron el sentido correcto de la reacción electroquímica y el funcionamiento de los electrodos.

Respecto a tercer objetivo específico, fue posible la cuantificación del ferrato producido en todos los ensayos realizados. El ensayo realizado a 4 amperios y 60% de solubilidad, se posicionó como el ensayo de mejor relación costo-producción, llegando a producir 2,452 gramos en 2 litros de solución, con 0,0459 kWh y generando un costo de \$25.439 pesos Colombianos. Además, se concluye que el ensayo realizado a 2 amperios con 20% de solubilidad, no se justifica implementarlo para la producción de ferrato (VI), debido a que presenta la menor producción (0,038 g/2L) y el mayor costo, 53,84 veces más, que el ensayo de mejor relación costo-producción. Los demás ensayos realizados (4 amperios con 20% de solubilidad, 2 y 4 amperios con 40% de solubilidad y 2 amperios con 60% de solubilidad) presentaron concentraciones mayores a 0,228 g/2L, con costos inferiores a \$230.000, siendo ensayos de posible aplicación, pero debido a que se busca obtener la relación de menor costo con mayor producción, se concluye que la mejor opción, en caso de implementación, es ensayo a 4 amperios y 60% de solubilidad.

El costo directo de producción de ferrato (\$25.439), se estableció a partir del ensayo que entregó la mejor relación costo-producción, el realizado a 60% de solubilidad y 4 amperios, es decir el ensayo que presentó menor costo por gramo de ferrato producido. En el trabajo desarrollado por el investigador *Quino*, se reportó el costo por gramo de ferrato (VI), el cual fue considerado únicamente a partir de los costos del NaOH, de la energía en kWh y de la materia prima para el ánodo[13]; para observar el comportamiento de los costos entre la bibliografía y la presente investigación, se utilizó el costo respecto a los mismos parámetros planteados por *Quino* (costo energético, costo de NaOH y materia prima para el electrodo) y se utilizó el ensayo realizado a 10,9 M y 60,98 A/m<sup>2</sup> (40% y 2 A) para tener la mayor cantidad de variables parecidas. Se pudo observar que el costo en la presente investigación fue 15.007 pesos más, que el reportado por *Quino*; cabe destacar que la diferencia mencionada se debe probablemente porque la bibliografía mencionada, implementó una membrana de intercambio iónico, la cual no se consideró en la presente investigación porque no se contaba con el recurso para adquirirla y para evitar incurrir en sobre costos de producción.

El estadístico de prueba fue menor al valor crítico de F, en todas las variables e interacciones planteadas, por lo cual se aceptó todas las hipótesis alternativas planteadas; hipótesis que

mencionaban que sí había una diferencia entre: utilizar una u otra concentración de electrolito, aplicar diferente corriente y entre la interacción de estas; concluyéndose finalmente que la *concentración* es la variable que mayor impacto genera en la producción de ferrato (VI) según el diseño de experimentos planteado.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Tiwari and S. Lee. (2011). *Ferrate(VI) in the Treatment of Wastewaters: A New Generation Green Chemical*. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/jbGbh4q>
- [2] Lorengo, J. M., .1999."ferrate iron (Fe<sup>6+</sup>) as an alternative method for the detoxification of cyanide and cyanide species in gold cyanidation leach tails." escuela de minas de colorado. [en línea]. Disponible:[https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/79399/lorengo\\_mines\\_0052n\\_10141.pdf?sequence=1](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/79399/lorengo_mines_0052n_10141.pdf?sequence=1)
- [3] Jiang, J., C. Stanford and M. Alsheyab, (2009). "The online generation and application of ferrate(VI) for sewage treatment—A pilot scale trial." *Separation and Purification Technology*. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.05.007. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2009.05.007>.
- [4] E. Vasquez, h. Pastor, y p. Perez, "oxidación electroquímica de tintes sintéticos orgánicos mediante ion ferrato (vi), usando electrodos de lana de acero comercial." (2018). [en línea]. Disponible: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=s251844312018000100002&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=s251844312018000100002&script=sci_abstract).
- [5] M. G. Chilingua Carvajal, .2018. "*Estudio De La Remoción Electroquímica De Anilina Azul Br En Aguas Residuales Industriales Mediante La Generación in Situ De Ion Ferrato .*" Escuela Politécnica Nacional. [En línea]. Disponible: <https://1library.co/document/y96855jy-estudio-remocion-electroquimica-residuales-industriales-mediante-generacion-ferrato.html>
- [6] P. M. Prieto Veramendi, .2019. "*Estudio De La Remoción De Arsénico En Aguas Para Riego Mediante La Adición De Iones Ferrato(Vi)*." Universidad de Lima. [En línea]. Disponible:[https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/9583/Prieto\\_Veramendi\\_Patricia\\_Mahela.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/9583/Prieto_Veramendi_Patricia_Mahela.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [7] Dong, S., Y. Mu and X. Sun, (Oct2019). "Removal of toxic metals using ferrate(VI): a review." *Water Science and Technology*. DOI: 10.2166/wst.2019.376. [En línea]. Disponible: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31850873>.
- [8] M. Villanueva Rodríguez, .2011."generación in situ del ion ferrato [Fe(VI)] vía fotocatalítica y electroquímica para la degradación del ácido 2,4- diclorofenoxiacético." universidad autónoma de nuevo león.[en línea]. Disponible:<https://1library.co/document/zl9d73oz-generacion-situ-ferrato-fotocatalitica-electroquimica-degradacion-acido-diclorofenoxiacetico.html>
- [9] Talaiekhosani, A. *Et al*, (mar 22,2016). "an overview on production and applications of ferrate(vi)." *jundishapur journal of health sciences*. Doi: 10.17795/jjhs-34904.[en línea]. Disponible: <https://explore.openaire.eu/search/publication?articleid=&#61;doajarticles::37f3aa1f2552d295fccc67a624b796e4>.

- [10] Alsheyab, m., j. Jiang and c. Stanford, (2010). "electrochemical generation of ferrate (vi): determination of optimum conditions." doi: 10.1016/j.desal.2009.11.035. [en línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.035>.
- [11] Futaba kazama, (1995). "viral inactivation by potassium ferrate." *water science and technology*. Doi: 10.1016/0273-1223(95)00259-p. [en línea]. Disponible: <https://search.proquest.com/docview/1943170992>.
- [12] M. A. De luca, s. J. De luca and m. A. Santana, (junio2003). "síntese eletroquímica do ion ferrato(vi)." doi: 10.1590/s0100-40422003000300021: [en línea]. Disponible: <https://www.scielo.br/j/qn/a/knysljdf7pjk7vztvfbqlm/?lang=pt>.
- [13] J. M. Quino favero, (2020). "diseño de una unidad de tratamiento de agua basada en electrosíntesis de iones ferrato para la remoción de arsénico inorgánico." universidad nacional agraria la molina. [en línea]. Disponible: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/unalm/4469/quino-faverojaviermartin.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- [14] C. Baird and m. Cann, *química ambiental*. (4th ed.) 2011. [en línea]. Disponible: <http://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788577808519>.
- [15] Lee, y., j. Yoon and u. Von gunten, (2005). "spectrophotometric determination of ferrate (fe(vi)) in water by abts." *water research (oxford)*. Doi: 10.1016/j.watres.2005.03.005. [en línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.005>.
- [16] Ecured. (s.f) "viruta". [en línea]. Disponible: <https://www.ecured.cu/viruta>.
- [17] Ambiente bogotá. "oportunidades de producción más limpia en el sector de metalmecánica,". Bogotá, colombia, 2004. Pdf. [en línea]. Disponible: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3988003/oportunidades+de+producci%C3%B3n+mas+limpia+en+el+sector+de+metalmecanica.pdf>
- [18] Catarina.udlap.mx. "antecedentes del proceso de torneado." *universidad de las américas puebla*. [en línea]. Disponible: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/avila\\_h\\_re/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/avila_h_re/capitulo2.pdf).
- [19] Destiny tool. (2001). "chip formation". [en línea]. Disponible: <https://www.destinytool.Com/chip-formation.html>
- [20] Escuela universitaria de oficios-universidad nacional de la plata, (s.f). "tipos de acero según su composición de carbono - clase 8 soldadura,". [en línea]. Disponible: <https://unlp.edu.ar/frontend/media/73/27873/03be3424af308bf57bee6ac2aa169171.pdf>
- [21] Ingemecánica. (s.f). "clasificación de los aceros" [en línea]. Disponible: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>

- [22] Procedimientos de síntesis de un oxidante y aplicaciones de los mismos. (2008, mayo 16). Us 218409p. [en línea]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/es2298245t3/es>
- [23] H. Wang *et al*, "electrochemical science electrochemical synthesis of ferrate (vi) by regular anodic replacement," *int. J. Electrochem. Sci*, vol. 10, pp. 7966, 2015. [en línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/284887735\\_electrochemical\\_synthesis\\_of\\_ferrate\\_vi\\_by\\_regular\\_anodic\\_replacement](https://www.researchgate.net/publication/284887735_electrochemical_synthesis_of_ferrate_vi_by_regular_anodic_replacement)
- [24] Luo,z. *Et al*, (mar 31,2011)."methodologies for the analytical determination of ferrate(vi): a review." *journal of environmental science and health. Part a, toxic/hazardous substances & environmental engineering*. Doi: 10.1080/10934529.2011.551723. [en línea]. Disponible: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10934529.2011.551723>.
- [25] Golovko,d. A. *Et al*, (may 01,2011)."a simple potentiometric titration method to determine concentration of ferrate(vi) in strong alkaline solutions." *analytical letters*. Doi: 10.1080/00032719.2010.511748. [en línea].disponible: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00032719.2010.511748>.
- [26] Sharma,v. K., c. R. Burnett and f. J. Millero, (2001). "dissociation constants of the monoprotic ferrate(vi) ion in nacl media." *phys. Chem. Chem. Phys*. Doi: 10.1039/b101432n. [en línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1039/b101432n>.
- [27] Lee,y. *Et al*, (2004)."chemistry of ferrate (fe(vi)) in aqueous solution and its applications as a green chemical." *journal of industrial and engineering chemistry*. [en línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/279581031\\_chemistry\\_of\\_ferrate\\_fevi\\_in\\_aqueous\\_solution\\_and\\_its\\_applications\\_as\\_a\\_green\\_chemical](https://www.researchgate.net/publication/279581031_chemistry_of_ferrate_fevi_in_aqueous_solution_and_its_applications_as_a_green_chemical)
- [28] Kazama,f., (1989)."respiratory inhibition of sphaerotilus by potassium ferrate." *j. Ferment. Bioeng*. Doi: 10.1016/0922-338x(89)90042-1. [en línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0922338x89900421>.
- [29] Williams,d. H. And j. T. Riley, (1974)."preparation and alcohol oxidation studies of the ferrate(vi) ion, feo4<sup>2-</sup>." *inorg. Chim. Acta*. Doi: 10.1016/s0020-1693(00)92612-4. [en línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/s0020169300926124>.
- [30] Castañeda Juárez,m. *Et al*, (aug 01,2020)."electrosynthesis of sodium and potassium ferrate for the treatment of indigo blue aqueous solutions and denim wastewater." *revista internacional de contaminación ambiental*. Doi: 10.20937/rica.53381. [en línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/343345014\\_electrosynthesis\\_of\\_sodium\\_and\\_potassium\\_ferrate\\_for\\_the\\_treatment\\_of\\_indigo\\_blue\\_aqueous\\_solutions\\_and\\_denim\\_wastewater](https://www.researchgate.net/publication/343345014_electrosynthesis_of_sodium_and_potassium_ferrate_for_the_treatment_of_indigo_blue_aqueous_solutions_and_denim_wastewater)

- [31] Lic. M. I. Vera, "química general unidad n° 10: electroquímica," 2007. Universidad nacional del nordeste. [en línea]. Disponible: [http://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temasparciales/unidad\\_10\\_electroquimica2007.pdf](http://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temasparciales/unidad_10_electroquimica2007.pdf)
- [32] Universidad tecnológica nacional "espectrofotometría", [en línea]. Disponible: <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qcasis/mostracion2.html> [acceso: jun. 03, 2021]
- [33] Universidad nacional de la plata. "métodos espectrofotométricos- teoría y práctica", [en línea]. Disponible: [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/43546/mod\\_resource/content/3/espectrofotometr%c3%ada%202019%20versi%c3%b3n%20final.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/43546/mod_resource/content/3/espectrofotometr%c3%ada%202019%20versi%c3%b3n%20final.pdf) [acceso: jun. 03, 2021]
- [34] H. Gutiérrez pulido, r. De la vara salazar. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. (segunda edición), [en línea]. Disponible: [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)
- [35] Barisci, s. *Et al*, (2014). "electrosynthesis of ferrate (vi) ion using high purity iron electrodes: optimization of influencing parameters on the process and investigating its stability." *international journal of electrochemical science*. [en línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/223452189\\_research\\_progress\\_in\\_the\\_electrochemical\\_synthesis\\_of\\_ferratevi](https://www.researchgate.net/publication/223452189_research_progress_in_the_electrochemical_synthesis_of_ferratevi)
- [36] Jiang, j., (2007). "research progress in the use of ferrate(vi) for the environmental remediation." *j. Hazard. Mater.* Doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.075. [en línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/6305144\\_research\\_progress\\_in\\_the\\_use\\_of\\_ferratevi\\_for\\_the\\_environmental\\_remediation](https://www.researchgate.net/publication/6305144_research_progress_in_the_use_of_ferratevi_for_the_environmental_remediation)
- [37] Alsheyab, mohammad ; jiang, jiaqian ; stanford, cécile. Engineering aspects of electrochemical generation of ferrate: a step towards its full scale application for water and wastewater treatment. In: water, air, and soil pollution. 2010 ; vol. 210, no. 1-4. Pp. 203-210. [en línea]. Disponible: <https://researchonline.gcu.ac.uk/en/publications/engineering-aspects-of-electrochemical-generation-of-ferrate-a-st>
- [38] Orientaciones para la construcción en los establecimientos educativos del manual de normas de seguridad en el laboratorio de química y de física. Ministerio de educación, colombia, 2015. [en línea]. Disponible: [https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-355749\\_recurso\\_normatividad.pdf](https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-355749_recurso_normatividad.pdf)
- [39] Astm e200-16, standard practice for preparation, standardization, and storage of standard and reagent solutions for chemical analysis, astm international, west conshohocken, pa, 2016 [en línea]. Disponible: <https://www.astm.org/standards/e200.htm>

- [40] La paloma compañía de metales. (s.f), “acero inoxidable (aisi 303, 304, 310, 316, 416, 430)”, [en línea]. Disponible: <https://www.lapaloma.com.mx/lapaloma/metales/aceroinoxidable.html>
- [41] Astm e1-14(2020), standard specification for astm liquid-in-glass thermometers, astm international, west conshohocken, pa, 2020. [en línea]. Disponible: <https://www.astm.org/standards/e1.htm>
- [42] Astm e70-19, standard test method for ph of aqueous solutions with the glass electrode, astm international, west conshohocken, pa, 2019. [en línea]. Disponible: <https://www.astm.org/standards/e70.htm>
- [43] Astm e169-16, standard practices for general techniques of ultraviolet-visible quantitative analysis, astm international, west conshohocken, pa, 2016. [en línea]. Disponible: <https://www.astm.org/standards/e169.htm>
- [44] Soporte de minitab. (2019), “explicación de las sumas de los cuadrados”, [en línea]. Disponible: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/anova-statistics/understanding-sums-of-squares/>
- [45] Minitab blog editor. (18, abril,2019), “¿qué son los grados de libertad en estadística?”, [en línea]. Disponible: <https://cutt.ly/uqg8okx>
- [46] Minitab blog editor. (18, abril,2019), “comprensión del análisis de varianza (anova) y la prueba f”, [en línea]. Disponible: <https://blog.minitab.com/es/comprension-del-analisis-de-varianza-anova-y-la-prueba-f>
- [47] Techlandia. (30, sep, 2019), “cómo calcular el valor crítico de f”, [en línea]. Disponible: <https://techlandia.com/13074361/como-calcular-el-valor-critico-de-f>
- [48] Alchetron. (15, agos, 2018), “ferrate (vi)”, [en línea]. Disponible: [https://alchetron.com/ferrate\(vi\)](https://alchetron.com/ferrate(vi))
- [49] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

## **ANEXOS**



# ANEXO 1

## CERTIFICADO DE ANÁLISIS DEL NaOH



**Biesterfeld**

Biesterfeld International GmbH

QUIMICOS CAMPOTA & CIA LTDA

NIT: 8300655033

Biesterfeld International GmbH, Fernstraße 41 • 20095 Hamburg

BOGOTA, D.C.  
COLOMBIA

ORIGINAL  
CERTIFICATE OF ANALYSIS  
102721910  
12<sup>th</sup> September, 2018

INVOICE NO. 9110095043, 102721910

**GOODS:** Caustic Soda Pearls 98% MIN

Quantity: 1.000 bags

Name of Commodity	Caustic soda flakes			Producing Date:	AUG 6, 2018	
Type	98.0%			Inspecting Date	AUG 6, 2018	
Inspection Standard	GB 209-20061S- IT			EXPIRY DATE	AUG 5,2020	
Inspection Items (Quota)	Quota				Inspection Result:	Judgment:
		High-class	First-class	Up-to standard		
NAOH % ._-	99.0	98.5	98.0	98.1	Up-to standard	
NA2CO3 %	0.5	0.8	1.0	0.3	High-class	
NACL % -..	0.03	0.05	0.08	0.002	High-class	
FE203 % --	0.005	0.008	0.01	0.004	High-class	
Result: up-to standard Accord with national Standard: GB 209-20061S- IT LOT NO:TW201808A QTY:25MT						

The above particulars do not release the customer from the obligation to carry out an inspection of goods received. (Data as per Supplier)

Biesterfeld International GmbH

Postfach 10 07 44  
20005 Hamburg  
Germany  
Telefon: 040 / 3 20 08 - 0  
Telefax: 040 / 3 20 08 - 440  
www.biesterfeld-international.com

Sitz Hamburg  
AG Hamburg HRB 73209  
USt-IdNr. DE 812 846 057  
Steuer-Nr. 27 / 225 / 00361

Geschäftsführung:  
Sergej Lazovic  
Frank Diercks

Bankverbindung:  
EUR / USD: Deutsche Bank AG  
Kto.-Nr. 465 635 100  
BIC: DEUTDEHH  
IBAN: DE8220070000465635100

ANEXO 2  
FICHA TÉCNICA DEL ACERO ASTM A36.

**検査証明書**  
INSPECTION CERTIFICATE

証書番号: HM0232  
注文番号: 0E09946-007  
注文書: 0E09946-007

SHIPPED TO: MARUBENI-ITTOCHU STEEL INC.  
CUSTOMER: J.A. CAMPANA, SERVICIOS DE ACERO S.A.  
COMMODITY: HOT ROLLED STEEL SHEET IN COIL AND UNCOILED  
SPECIFICATION: ASTM-A36-MODIFIED

検査項目: 引張試験, 夏積試験, 質量試験, 数量検査, 寸法検査, 製品番号, 巻取番号, 包装番号, 熱番号, 品名, 規格

検査結果: 合格

**JFE**  
JFE Steel Corporation  
WEST JAPANESE DIVISION

日付: APRIL 22, 2020  
検査員: (5609) A148151

- LOT  
HB7843-

品名 HEAT NO	製品番号 COIL NO. & PACKAGE	寸法 SIZE mm	数量 QTY	質量 MASS kg	夏積試験 TEMPERATURE TEST	引張試験 TENSILE TEST	夏積試験 TEMPERATURE TEST	化学成分 CHEMICAL COMPOSITION	
								C	Mn
2-375971750-492	6	3.00K1200X0	1	696024001	323	438	96	0	1
6-267062584601	1		1	768028101	313	431	40	0	1
2584602	2		1	773028101	321	436	42	0	1
2584603	3		1	780028101				0	1
TOTAL				4	31470				
G-TOTAL				4	31470				

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORILY TESTED IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATION.

Mitsubishi  
Manager of Quality Assurance Section  
West Japan Works (Karasubiki Plant)



### ANEXO 3

#### COSTO COMERCIAL DE LA VIRUTA.



<p>ASOCIACIÓN DE RECICLAJE JUNTOS POR LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL ARSA NIT: 900.889.486-6 TEL: 310 374 01 40 arsa@ecoalianzaderecicladores.com</p> 			
REFERENCIA	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO
Viruta	kg	1	\$500
TOTAL			\$500


Firma de constancia.

**ANEXO 4**

**COSTO COMERCIAL DE LA VARILLA DE ACERO AL CARBÓN DE 1/8”.**

		<b>INVERWILLCAR SAS</b> NIT : 900,088,140 - 6 CL 17 28 A 31 BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA 2489771 2010936 info@iwsoldaduras.com Responsables de iva - No somos autorretenedores Actividad Económica 4663 Tarifa 11.04																												
<table border="1"> <tr> <td><b>Cliente</b></td> <td colspan="3">AGUA EQUIPOS Y PROCESOS SAS</td> </tr> <tr> <td><b>NIT</b></td> <td>900,841,160 - 3</td> <td>/ld. Extranjero :</td> <td><b>Teléfono</b></td> <td>2682427</td> </tr> <tr> <td><b>Dirección</b></td> <td colspan="2">CLL 22A 19A-40 SAMPER MENDOZA</td> <td><b>Vendedor</b></td> <td>VENDEDOR PRINCIPAL</td> </tr> <tr> <td><b>Ciudad</b></td> <td colspan="2">BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA</td> <td><b>Centro Costo</b></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>Correo</b></td> <td colspan="3">aguaep@hotmail.com</td> </tr> <tr> <td><b>Order Reference Prefijo</b></td> <td colspan="3"><b>Numero</b></td> </tr> </table>				<b>Cliente</b>	AGUA EQUIPOS Y PROCESOS SAS			<b>NIT</b>	900,841,160 - 3	/ld. Extranjero :	<b>Teléfono</b>	2682427	<b>Dirección</b>	CLL 22A 19A-40 SAMPER MENDOZA		<b>Vendedor</b>	VENDEDOR PRINCIPAL	<b>Ciudad</b>	BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA		<b>Centro Costo</b>	1	<b>Correo</b>	aguaep@hotmail.com			<b>Order Reference Prefijo</b>	<b>Numero</b>		
<b>Cliente</b>	AGUA EQUIPOS Y PROCESOS SAS																													
<b>NIT</b>	900,841,160 - 3	/ld. Extranjero :	<b>Teléfono</b>	2682427																										
<b>Dirección</b>	CLL 22A 19A-40 SAMPER MENDOZA		<b>Vendedor</b>	VENDEDOR PRINCIPAL																										
<b>Ciudad</b>	BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA		<b>Centro Costo</b>	1																										
<b>Correo</b>	aguaep@hotmail.com																													
<b>Order Reference Prefijo</b>	<b>Numero</b>																													
<table border="1"> <tr> <td align="center" colspan="2"><b>Código</b></td> <td align="center" colspan="2"><b>Descripción</b></td> <td align="center"><b>Unid</b></td> <td align="center"><b>Cant</b></td> <td align="center"><b>V. Unit</b></td> <td align="center"><b>Valor Total</b></td> </tr> <tr> <td align="center" colspan="2">0010001105002</td> <td align="center" colspan="2">ZIP 10T 3.2*350 1/8 x (KL)</td> <td align="center">KG</td> <td align="center">2.00</td> <td align="center">18,487.39</td> <td align="center">36,974.79</td> </tr> </table>				<b>Código</b>		<b>Descripción</b>		<b>Unid</b>	<b>Cant</b>	<b>V. Unit</b>	<b>Valor Total</b>	0010001105002		ZIP 10T 3.2*350 1/8 x (KL)		KG	2.00	18,487.39	36,974.79											
<b>Código</b>		<b>Descripción</b>		<b>Unid</b>	<b>Cant</b>	<b>V. Unit</b>	<b>Valor Total</b>																							
0010001105002		ZIP 10T 3.2*350 1/8 x (KL)		KG	2.00	18,487.39	36,974.79																							
<table border="1"> <tr> <td><b>Total Bruto</b></td> <td align="right">36,974.79</td> </tr> <tr> <td><b>IVA</b></td> <td align="right">7,025.21</td> </tr> <tr> <td><b>Total a Pagar</b></td> <td align="right"><b>\$ 44,000.00</b></td> </tr> </table>				<b>Total Bruto</b>	36,974.79	<b>IVA</b>	7,025.21	<b>Total a Pagar</b>	<b>\$ 44,000.00</b>																					
<b>Total Bruto</b>	36,974.79																													
<b>IVA</b>	7,025.21																													
<b>Total a Pagar</b>	<b>\$ 44,000.00</b>																													
<p><b>CONDICION DE PAGO</b></p> <p>Contado Efectivo                      Efectivo                      44,000.00                      Cuota 1 Vence el 2021-06-25</p> <p><b>VALOR EN LETRAS</b></p> <p align="center">Cuarenta Y Cuatro Mil Pesos M/Cte</p> <p><b>OBSERVACIONES</b></p>																														
_____ Firma Elaborado por : NATALY CARO		_____ Firma Recibido																												
<p>A esta factura de venta aplican las normas relativas a la letra de cambio (artículo 5 Ley 1231 de 2008). Con esta el Comprador declara haber recibido real y materialmente las mercancías o prestación de servicios descritos en este título - Valor. <b>Resolución y/o Autorización de facturación No. 18764001241934 aprobado en 2020-07-27 vigente , prefijo VME desde el número 101 al 10000</b></p>																														
CUFE :376f5005dbb3d2d319a1b78e44dffe6270f3597ea95d417bc52a07a93e55287ab10f90a3bf31011085e95450b2b55570																														
<b>ORIGINAL</b>																														
Pagina : 1 de 1																														

ANEXO 5

COSTO COMERCIAL DE LA LÁMINA DE ACERO INOXIDABLE 304.



NIT: 900.101.343-1  
CARRERA 55 59-84 Medellin-Antioquia  
PBX: 44 88 304 -3217802373  
www.acerosluisesco.com

**COTIZACION**  
00000560  
Fecha: 31/07/2021  
Vence: 08/08/2021

**Cliente:** AGUA EQUIPOS Y PROCESOS SAS      **NIT:** 900841160  
**Dirección:** CL 22 A 19 A 40 BRR SAMPER MENDOZA ZONA: BOGOTA  
**Telefono:** 2682427

**Vendedor:** GLORIA PALACIO      info@acerosluisesco.com      **Celular:** 3217802373

Código	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
LI304205X10	T.2009.62.32 LAMINA ACERO INOX C.20 5x10 REF 304-2B	1,00	560.000,0	560.000,01
LI304204X8	T.842.41.24 LAMINA ACERO INOX C.20 4X8 REF 304-2B	1	358.000,0	358.000,00



Flete:	0,00		Total Neto:	771.428,58
Descuento:	0,00	0,00 %	I.V.A.:	146.571,43
Otro Descuento:	0,00	0,00 %	Total Operación:	918.000,01

Son:NOVECIENTOS DIECIOCHO MIL CON 01/100

Operador:MARIA

## ANEXO 6

### COSTO COMERCIAL DE LA VARILLA DE ACERO INOXIDABLE DE 1/8".

	<b>INVERWILLCAR SAS</b> NIT : 900,088,140 - 6 CL 17 28 A 31 BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA 2489771 2010936 info@iwsoldaduras.com Responsables de iva - No somos autorretenedores Actividad Económica 4663 Tarifa 11.04																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;"><b>Cliente</b></td> <td colspan="3">AGUA EQUIPOS Y PROCESOS SAS</td> </tr> <tr> <td><b>NIT</b></td> <td>900,841,160 - 3</td> <td>/ld. Extranjero :</td> <td><b>Teléfono</b></td> <td>2682427</td> </tr> <tr> <td><b>Dirección</b></td> <td colspan="2">CLL 22A 19A-40 SAMPER MENDOZA</td> <td><b>Vendedor</b></td> <td>VENDEDOR PRINCIPAL</td> </tr> <tr> <td><b>Ciudad</b></td> <td colspan="2">BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA</td> <td><b>Centro Costo</b></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td><b>Correo</b></td> <td colspan="4">aguaep@hotmail.com</td> </tr> <tr> <td><b>Order Reference Prefijo</b></td> <td colspan="2"></td> <td><b>Numero</b></td> <td></td> </tr> </table>		<b>Cliente</b>	AGUA EQUIPOS Y PROCESOS SAS			<b>NIT</b>	900,841,160 - 3	/ld. Extranjero :	<b>Teléfono</b>	2682427	<b>Dirección</b>	CLL 22A 19A-40 SAMPER MENDOZA		<b>Vendedor</b>	VENDEDOR PRINCIPAL	<b>Ciudad</b>	BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA		<b>Centro Costo</b>	1	<b>Correo</b>	aguaep@hotmail.com				<b>Order Reference Prefijo</b>			<b>Numero</b>		<b>FACTURACION ELECTRONICA DE VENTA VME 4406</b>  Fecha y Hora de Factura <b>Generación</b> 2021-04-26 14:17:57 <b>Expedición</b> 2021-04-26 14:18:18 <b>Vencimiento</b> 2021-04-26				
<b>Cliente</b>	AGUA EQUIPOS Y PROCESOS SAS																																		
<b>NIT</b>	900,841,160 - 3	/ld. Extranjero :	<b>Teléfono</b>	2682427																															
<b>Dirección</b>	CLL 22A 19A-40 SAMPER MENDOZA		<b>Vendedor</b>	VENDEDOR PRINCIPAL																															
<b>Ciudad</b>	BOGOTA D.C.-BOGOTA - COLOMBIA		<b>Centro Costo</b>	1																															
<b>Correo</b>	aguaep@hotmail.com																																		
<b>Order Reference Prefijo</b>			<b>Numero</b>																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Código</th> <th style="width: 40%;">Descripción</th> <th style="width: 5%;">Unid</th> <th style="width: 5%;">Cant</th> <th style="width: 15%;">V. Unit</th> <th style="width: 20%;">Valor Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0010001102012</td> <td>WEST INOX 308L 3.2MM 1/8 x (KL)</td> <td>KG</td> <td style="text-align: center;">1.00</td> <td style="text-align: right;">54,621.85</td> <td style="text-align: right;">54,621.85</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: right;"><b>Total Bruto</b></td> <td style="text-align: right;">54,621.85</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: right;"><b>IVA</b></td> <td style="text-align: right;">10,378.15</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: right;"><b>Total a Pagar</b></td> <td style="text-align: right;"><b>\$ 65,000.00</b></td> </tr> </tbody> </table>						Código	Descripción	Unid	Cant	V. Unit	Valor Total	0010001102012	WEST INOX 308L 3.2MM 1/8 x (KL)	KG	1.00	54,621.85	54,621.85	<b>Total Bruto</b>					54,621.85	<b>IVA</b>					10,378.15	<b>Total a Pagar</b>					<b>\$ 65,000.00</b>
Código	Descripción	Unid	Cant	V. Unit	Valor Total																														
0010001102012	WEST INOX 308L 3.2MM 1/8 x (KL)	KG	1.00	54,621.85	54,621.85																														
<b>Total Bruto</b>					54,621.85																														
<b>IVA</b>					10,378.15																														
<b>Total a Pagar</b>					<b>\$ 65,000.00</b>																														
<b>CONDICION DE PAGO</b> Contado Efectivo Efectivo 65,000.00 Cuota 1 Vence el 2021-04-26																																			
<b>VALOR EN LETRAS</b> Sesenta Y Cinco Mil Pesos M/Cte																																			
<b>OBSERVACIONES</b>																																			
_____ Firma Elaborado por : NATALY CARO			_____ Firma Recibido																																
A esta factura de venta aplican las normas relativas a la letra de cambio (artículo 5 Ley 1231 de 2008). Con esta el Comprador declara haber recibido real y materialmente las mercancías o prestación de servicios descritos en este título - Valor. <b>Resolución y/o Autorización de facturación No. 18764001241934 aprobado en 2020-07-27 vigente , prefijo VME desde el número 101 al 10000</b>																																			
CUFE :c95582b65bfd4b450c78006b4483125b95d5981749cd7ba042d9ce784496d6d4e126d05f74ed405879735f5da25eb79c <b>ORIGINAL</b>																																			
Pagina : 1 de 1																																			

## ANEXO 7

### COSTO COMERCIAL DEL AGUA DESIONIZADA.



Agua Destilada O Desionizada 20 Litros - L a \$2500 

**MÁS VENDIDO** 2° en Farmacia

**\$ 50.000**  
en 36x \$ 1.389  
[Ver los medios de pago](#)

 **Llega entre mañana y el jueves**  
[Ver más formas de entrega](#)

Stock disponible


Cantidad: **1 unidad** ▾ (43 disponibles)

[Comprar ahora](#)

[Agregar al carrito](#)

ANEXO 8

COSTO COMERCIAL DEL ÁCIDO CLORHÍDRICO

 <b>Blamis</b> Dotaciones Laboratorio		Cotización <b>FV03-V5 No. 57019</b>							
Oferta de Equipos y suministros para Laboratorio									
Señores: FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA Dirección: C.C o NIT: 00000000 Telefono: E-Mail:		Fecha: 14/08/2017 Atención: YENNY HERNÁNDEZ PRIETO Validez: 14/08/2017 Forma Pago: CONTADO CLIENTES Asesor: Andrea Velasco							
Item	Ref.	Producto	Marca	Presentación	Cant.	Entrega	Vr.Unitario	Vr.Total	IVA Vigente
1	1009972500	1-PROPANOL PARA ANALISIS EMSURE® ACS, REAG. PH EUR (2,5L)	MERCK	2,5L	1	17/08/2017	\$478.800	\$478.800	\$90.972,00
2	1046990500	ACEITE DE INMERSION PARA MICROSCOPIA (500ML)	MERCK	500ML	1	14/06/2017	\$154.200	\$154.200	\$29.298,00
3	1062681000	SODIO ACETATO ANHIDRO P.A. EMSURE® ACS, REAG. PH EUR (1KG)	MERCK	1KG	1	17/08/2017	\$415.800	\$415.800	\$79.002,00
4	1000142500	*MDJ-5*ACETONA PARA ANALISIS EMSURE ACS,ISO,REAG. PH EUR 2,5 L (ACETONA)	MERCK	2,5L	1	16/06/2017	\$99.820	\$99.820	\$18.965,80
5	1000631000	ACIDO ACETICO (GLACIAL) 100% ANHIDRO P.A. EMSURE® ACS,ISO,REAG. PH EUR (1L)	MERCK	1L	1	14/06/2017	\$90.600	\$90.600	\$17.214,00
6	1000632500	ACIDO ACETICO (GLACIAL) 100% ANHIDRO P.A. EMSURE® ACS,ISO,REAG. PH EUR (2,5L)	MERCK	2,5L	1	14/06/2017	\$129.600	\$129.600	\$24.624,00
7	1001661000	ACIDO BORICO P.A. EMSURE® ACS,ISO,REAG. PH EUR (1KG)	MERCK	1KG	1	16/06/2017	\$177.600	\$177.600	\$33.744,00
8	1003172500	*MDJ-9*ACIDO CLORHIDRICO FUMANTE 37% P.A. EMSURE ACS,ISO,REAG. PH EUR 2,5 L (ACIDO CLORHIDRICO)	MERCK	2,5L	1	14/06/2017	\$98.820	\$98.820	\$18.775,80
Observaciones: * Fecha de entrega de productos sujeta a venta previa (ver fechas en cotización). Productos de importación no tienen cambio									
Blamis Dotaciones Laboratorio S.A.S Nit. 800.154.351-3							SUBTOTAL	\$12.495.100	
							IVA	\$2.368.825	
							TOTAL	\$14.863.925	
OFICINAS Y ALMACEN AL PUBLICO: BOGOTA: CARRERA 47 No. 94 A - 06 - LA CASTELLANA PBX: 611 18 51 - TEL: 636 05 93 - FAX: 636 05 94 MEDELLIN - PBX: 2307982 - 4485720 CALI - PBX: 3315328 - 3733314 Website: <a href="http://www.blamis.com.co">www.blamis.com.co</a> E-mail: <a href="mailto:blamis@blamis.com.co">blamis@blamis.com.co</a>									

## ANEXO 9

### COSTO COMERCIAL DEL HIDRÓXIDO DE SODIO.

 <p><b>QUIMICOS CAMPOTA</b></p>	<b>IMPORTADORES Y DISTRIBUIDORES MAYORISTAS DE MATERIAS PRIMAS INDUSTRIALES</b>						
	<b>RBX12834315</b>	CALLE 13 No. 13 - 27 TELS: 282 4146 zona.calle13@quimicoscompota.com	CALLE 12 No. 30-92 TELS: 371 0698 zona.industrial@quimicoscompota.com	CALLE 69 No. 14-15 TELS: 212 6705 zona.chapinero@quimicoscompota.com	CALLE 97 No 10-28 of. 602 TELS: 611 5617 a.generat@quimicoscompota.com		
QUIMICOS CAMPOTA Y CIA. LTDA. NIT. 830.065.503-3		Bogotá, D.C - Colombia IVA REGIMEN COMÚN www.quimicoscompota.com • campota@quimicoscompota.com					
<b>CLIENTE</b> NOMBRE: PEREZ CARDENAS MARITZA ESTEFANIA DIRECCION: CL 65 SUR 6 R11 CIUDAD: BOGOTA		NIT: 1.033.801.036- TEL: 03124258015	<b>FECHA Y FORMA DE PAGO</b> -FECHA- 27/04/2021 VENCIMIENTO 27/04/2021		<b>DOCUMENTO</b> FACTURA DE VENTA No. 2 9193		
CANTIDAD	REFERENCIA	DESCRIPCION	CODIGO	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL		
4	S000104KL	SODA CAUSTICA EXTRANA / China / KILO	0011	4,790.00000	19,160.00		
SUBTOTAL 19,160		IVA 3,640.00	FLETES 0.00	RETENIDA 0.00	IMPONCONSUMO 0.00	RETENIDA 0.00	TOTAL 22,800.00
ESTA FACTURA SE ASIMILA EN TODOS SUS EFECTOS LEGALES A LA LETRA DE CAMBIO (ART. 774 Y 779 C. DE C.) ACTIVIDAD ICA 204 TARIFA 11.04 X 1000-CIUV 5153 TODO CHEQUE DEVUELTO Y NO PAGADO CAUSA SANCION DE LEY (ART. 731 C. DE C.) RES. DIAN No. 18763001555983 DESDE 1 HASTA 334949 VIGENCIA 24 Meses ESTIMADO CLIENTE ANTES DE SALIR REVISE SU PEDIDO. NO SE ACEPTAN RECLAMOS NI DEVOLUCIONES POSTERIORMENTE.							



# ANEXO 10


## COSTO COMERCIAL DEL kWh.

**¿DES AYUDARNOS DE NUESTROS S.**

Por mordeduras de perros son nuestros técnicos. Ayúdanos a todo a tu mascota bajo control, nuestros técnicos están trabajando en su seguridad.

En realizar su trabajo de manera segura sin accidentes.

**R FUTURE.**



Para pagos y consultas tu número de cliente es:

0342488-1

CODENSA S.A. ESP  
NIT: 830.037.248-0  
Cr. 13A No. 93-68

earth pact  
PAPEL ECOLÓGICO

FACTURA DE SERVICIOS PÚBLICOS No. 641924114-4


---

**CLIENTE**

GUSTAVO E NORATTO GUTIERREZ

CL 22 A NO 19 A - 40

BOGOTÁ, D.C.  
SANTA FE

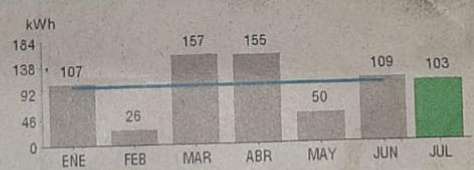


¿Quieres tu factura virtual? Escanea el código

---

**COMPORTAMIENTO CONSUMO DE ENERGÍA**

kWh



Mes	Consumo (kWh)
ENE	107
FEB	26
MAR	157
ABR	155
MAY	50
JUN	109
JUL	103

VALOR kWh APLICADO: \$576.79

CONSUMO DIARIO: 3.1 kWh

VALOR DIARIO: \$2,160


CONSUMO, PROMEDIO ULTIMOS 6 MESES: 102 kWh

PERÍODO FACTURADO: 03 JUN/2021 A 06 JUL/2021


DIAS FACTURADOS: 33

CONSUMO MES: 103 kWh

---



Este mes tuvimos acceso a la LECTURA DE TU MEDIDOR y tu CONSUMO de energía se encuentra dentro de lo habitual!



---

**INFORMACIÓN DE LA CUENTA**

CLASE DE SERVICIO: Industrial

ESTRATO: 0

CARGA kW: 2

FACTOR: 1

RUTA REPARTO: 3000 4 07 403 1174


RUTA LECTURA: 3000 4 07 407 0198

MANZANA DE LECTURA: MS00610357

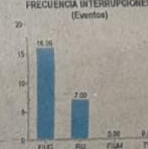
MEDIDOR NO: 26951749

**CALIDAD DEL SERVICIO**

DURACIÓN INTERRUPCIONES (Horas)



FRECUENCIA INTERRUPCIONES (Eventos)



CD: 0221TR1 GRUPO: 11 HC: 0.00 VC: 0 CEC: 0.00  
PERÍODO: Mayo/2021 DE: 175.14 CF: 50 MC: 0 MF: 1 %: 10  
Para mayor detalle consultar las resoluciones CREO 015 de 2018 y 036 de 2019

---

USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

Configura la pantalla de tu televisor y computador en modo ahorro de energía, así puedes disminuir tu consumo cuando los estás usando.

**Denunciar** 5 894 894

**Defensor del Cliente** https://www.enel.com.co/defensor-del-cliente

**Medios Virtuales de Pago**

**Billeteo Virtual**

**Red Distrital** **Centros de Servicio** **Código QR**

**Almacenes de Cadena**

**Red CADE** CEP / CAES

**enel** codensa

**QR Code**



## ANEXO 11

### PLANILLAS DE CAMPO DE LOS ENSAYO A 20% DE SOLUBILIDAD

✓ Ensayo a 20% - 2 A.

VARIABLES	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Hora de inicio			
	5,45	2	2,6	9:50 am			
	20% Sol			26-marzo/21			

VARIABLE MUESTRA	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	10:20 ✓	10:50 ✓	11:20 ✓	11:50 ✓	12:20 ✓	12:50 ✓
Absorbancia	—	10:21 0,068	10:51 0,070	11:21 0,087	11:51 0,093	12:21 0,117	12:51 0,123
pH	13,22	10:25 13	10:55 13,43	11:25 12,96	11:55 12,52	12:25 12,87	12:55 12,24
Temperatura	17°C	10:30 17°C	11:09 17,2°C	11:30 17,5°C	12:00 17,8°C	12:30 17,8°C	13:00 18°C

Gramos NaOH	436
Peso Ánodo	51,674
Peso Cátodo	67,199

Fundación Universidad de América  
Coordinación Laboratorios y Talleres

✓ Réplica a 20% - 2 A.

REPLICA

VARIABLES	Solubilidad (%)	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Fecha			
	20%	5,45	2	2,5	09-mayo/21			
					Hora de inicio			
					9:38 am			

VARIABLE MUESTRA	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	10:08 ✓	10:38 ✓	11:08 ✓	11:38 ✓	12:08 ✓	12:38 ✓
Absorbancia	—	10:09 0,077	10:39 0,079	11:09 0,082	11:39 0,101	12:09 0,123	12:39 0,142
pH	12,47	10:15 11,96	10:45 11,94	11:15 12,04	11:45 12,03	12:15 12,22	12:45 12,15
Temperatura	18°C	10:20 18°C	10:50 18°C	11:20 18,2°C	11:50 18,5°C	12:20 18,5°C	12:50 19°C

Gramos NaOH	436g
Peso Ánodo	51,674
Peso Ánodo Final	50,436
Peso Cátodo	67,1995

Fundación Universidad de América  
Coordinación Laboratorios y Talleres

✓ Ensayo a 20% - 4 A.

VARIABLES	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Hora de inicio	
	5,45	4	3,5	12:36 pm	
	20% Sol			25-marzo/21	

VARIABLE MUESTRA	1 t=00:00	2 t=00:30	3 t=01:00	4 t=01:30	5 t=02:00	6 t=02:30	7 t=03:00
Foto	✓	1:06 ✓	1:36 ✓	2:06 ✓	2:36 ✓	3:06 ✓	3:36 ✓
Absorbancia	-	1:07 0,550	1:37 0,575	2:07 0,711	2:37 0,721	3:07 0,734	3:37 0,798
pH	13,87	1:15 13,21	1:40 12,97	2:10 12,76	2:40 12,89	3:15 12,52	3:40 12,24
Temperatura	17°C	1:20 17°C	1:45 17,5°C	2:15 17,8°C	2:45 18°C	3:20 18,2°C	3:45 18,5°C

Gramos NaOH	436 g
Peso Ánodo	51,593
Peso Cátodo	65,368

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

✓ Réplica a 20% - 4 A.

REPLICA

VARIABLES	Solubilidad (%)	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Votaje (V)	Fecha	
	20	5,45	4	3,4	03-05/21	
					Hora de inicio	
					1:42 pm	

VARIABLE MUESTRA	1 t=00:00	2 t=00:30	3 t=01:00	4 t=01:30	5 t=02:00	6 t=02:30	7 t=03:00
Foto	✓	2:12 ✓	2:42 ✓	3:12 ✓	3:42 ✓	4:12 ✓	4:42 ✓
Absorbancia	-	2:13 0,557	2:43 0,604	3:13 0,671	3:43 0,695	4:13 0,704	4:43 0,784
pH	11,82	2:15 12,16	2:45 12,06	3:15 11,91	3:45 11,83	4:15 11,57	4:45 11,29
Temperatura	18°C	2:20 18°C	2:50 18,2°C	3:20 18,2°C	3:50 18,5°C	4:20 19°C	4:50 19°C

Gramos NaOH	436 g
Peso Ánodo	51,6823
Peso Ánodo Final	50,6 g
Peso Cátodo	65,0981

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

## ANEXO 12

### PLANILLAS DE CAMPO DE LOS ENSAYO A 40% DE SOLUBILIDAD

✓ Ensayo a 40% - 2 A.

VARIABLES	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltage (v)	Hora de inicio			
	10,9	2	2,8	24-marzo / 21			
	40% Sol						

VARIABLE MUESTRA	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	10:18 ✓	10:48 ✓	11:18 ✓	11:48 ✓	12:18 ✓	12:48 ✓
Absorbancia	-	10:19 1,515	10:49 2,224	11:19 2,302	11:49 2,411	12:19 2,978	12:49 1,021
pH	12,25	10:25 11,41	10:55 11,58	11:25 11,79	11:55 11,49	12:25 11,21	12:55 11,08
Temperatura	17,8°C	10:30 17,9°C	11:00 18°C	11:30 18,2°C	12:00 18,2°C	12:30 18,8°C	1:00 19°C

Gramos NaOH	872g
Peso Ánodo	51,5546g
Peso Cátodo	64,8192g

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

✓ Réplica a 40% - 2 A.

REPLICA

VARIABLES	Solubilidad (%)	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltage (V)	Fecha		
	40%	10,9	2	2,8	03/05/21		

								Dilución *
VARIABLE MUESTRA	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00 *	
Foto	✓	11:01 ✓	11:31 ✓	12:01 ✓	12:31 ✓	1:01 ✓	1:31 ✓	
Absorbancia	-	11:02 1,372	11:32 1,859	12:02 2,162	12:32 2,594	1:02 3	1:32 1,010	
pH	11,23	11:05 11,10	11:35 11,19	12:05 11,06	12:35 10,98	1:05 10,77	1:35 10,62	
Temperatura	17,8°C	11:10 17,8°C	11:40 18°C	12:10 18°C	12:40 18,5°C	1:10 18,8°C	1:40 19°C	

Gramos NaOH	872g
Peso Ánodo	51,703
Peso Ánodo Final	50,6974
Peso Cátodo	66,8917g

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres



✓ Ensayo a 40% - 4 A.

VARIABLES	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Hora de inicio	
	10,9 M	4	3,5	8:35 am	
	40% sol			23-marzo/21	

VARIABLE	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	9:05 ✓	9:35 ✓	10:05 ✓	10:35 ✓	11:05 ✓	11:35 ✓
Absorbancia	-	9:06 1,705	9:36 1,943	10:06 2,165	10:36 2,687	11:06 2,983	11:36 1,099
pH	12,51	9:10 11,93	9:40 11,21	10:10 12,2	10:40 12,47	11:10 12,15	11:40 11,91
Temperatura	18,8°C	9:15 18,8°C	9:45 19°C	10:15 19,5°C	10:45 19,8°C	11:15 20°C	11:45 20,2°C

Gramos NaOH	872
Peso Ánodo	51,7232
Peso Cátodo	64,9361

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

✓ Réplica a 40% - 4 A.

REPLICA

VARIABLES	Solubilidad (%)	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Votaje (V)	Fecha	
	40 %	10,9	4	3,6	07-marzo/21	
					Hora de inicio	
					10:34 am	

VARIABLE	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	11:04 ✓	11:34 ✓	12:04 ✓	12:34 ✓	1:04 ✓	1:34 ✓
Absorbancia	-	11:05 1,036	11:35 1,876	12:05 2,355	12:35 2,648	1:05 2,983	1:35 1,089
pH	11,38	11:10 11,83	11:40 11,89	12:10 11,82	12:40 11,83	1:10 11,81	1:40 11,92
Temperatura	18°C	11:15 18°C	11:45 18,5°C	12:15 11,8°C	12:45 19	1:15 19,2°C	1:45 19,2°C

Gramos NaOH	872g
Peso Ánodo	51,6079
Peso Ánodo Final	50,7175g
Peso Cátodo	66,7243g

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

## ANEXO 13

### PLANILLAS DE CAMPO DE LOS ENSAYO A 60% DE SOLUBILIDAD

✓ Ensayo a 60% - 2 A.

VARIABLES	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Hora de inicio			
	16,35	2	3,4	9:11 am			
	60% Sol			27 - Marzo / 21			

VARIABLE	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	9:41 ✓	10:11 ✓	10:41 ✓	11:11 ✓	11:41 ✓	12:11 ✓
Absorbancia	-	7:42 1,008	10:12 2,568	10:42 1,652	11:12 1,857	11:42 1,926	12:12 2,034
pH	10,05	9:45 9,64	10:15 9,51	10:45 9,6	11:15 9,66	11:45 9,64	12:15 9,51
Temperatura	18,5°C	9:50 18,5°C	10:20 18,8°C	10:50 19°C	11:20 19,2°C	11:50 19,8°C	12:20 19,8°C

Gramos NaOH	1308g
Peso Ánodo	51,655g
Peso Cátodo	65,4668g

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

✓ Réplica a 60% - 2 A.

REPLICA

VARIABLES	Solubilidad (%)	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Fecha			
	60%	16,35	2	3,5	06/05/21			

		→ Dilución *					
VARIABLE	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	10:51 ✓	11:21 ✓	11:51 ✓	12:21 ✓	12:51 ✓	1:21 ✓
Absorbancia	-	10:55 1,150	11:22 2,046	11:52 1,160	12:22 1,366	12:52 1,886	1:22 2,114
pH	9,20	11:00 9,53	11:25 9,73	11:55 10,04	12:25 9,73	12:55 9,85	1:25 9,77
Temperatura	18°C	11:05 18°C	11:30 18,2°C	12:00 18,2°C	12:30 18,8°C	1:00 19°C	1:30 19,2°C

Gramos NaOH	1308g
Peso Ánodo	51,6306
Peso Cátodo	66,7236g

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

✓ Ensayo a 60% - 4 A.

VARIABLES	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Hora de inicio	
	16,35	4	3,9	2:08 pm	
	60% Sol			26-marzo/21	

VARIABLE MUESTRA	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	2:38 ✓	3:08 ✓	3:38 ✓	4:08 ✓	4:38 ✓	5:08 ✓
Absorbancia	-	2:39 2,875	3:09 1,512	3:39 1,896	4:09 2,128	4:39 2,589	5:09 2,784
pH	10,02	2:45 9,75	3:15 9,53	3:45 9,42	4:15 9,69	4:45 9,32	5:15 9,48
Temperatura	19°C	2:50 19,2°C	3:20 19,5°C	3:50 19,8°C	4:20 20°C	4:50 20,5°C	5:20 20,7°C

Gramos NaOH	1308
Peso Ánodo	51,6735g
Peso Cátodo	67,1995g

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres

✓ Réplica a 60% - 4 A.

REPLICA

VARIABLES	Solubilidad (%)	Concentración electrolito (M)	Corriente (A)	Votaje (V)	Fecha		
	60 %	16,35	4	3,8	04/mayo/21		
				Hora de inicio		1:07 pm	

VARIABLE MUESTRA	1 t= 00:00	2 t= 00:30	3 t= 01:00	4 t= 01:30	5 t= 02:00	6 t= 02:30	7 t= 03:00
Foto	✓	1:37 pm ✓	2:07 ✓	2:37 ✓	3:07 ✓	3:37 ✓	4:07 ✓
Absorbancia	-	1:38 2,636	2:08 1,440	2:38 1,968	3:08 2,181	3:38 2,304	4:08 2,877
pH	9,44	1:45 9,02	2:15 9,08	2:45 9,19	3:15 9,14	3:40 9,24	4:15 9,45
Temperatura	19°C	1:50 19,5°C	2:20 19,8°C	2:50 20°C	3:20 20,3°C	3:45 20,5°C	4:20 20,8°C

Gramos NaOH	1308 g
Peso Ánodo	51,6838g
Peso Cátodo	67,6267 g

Fundación Universidad de América  
Coordinación  
Laboratorios y Talleres



## ANEXO 14

### RECOMENDACIONES

Para utilizar comercialmente el ferrato (VI) obtenido en la experimentación, se recomienda una etapa de investigación posterior que defina, los procedimientos que conviertan el reactivo obtenido en producto comercial, o bien, la fabricación de equipos que permitan la producción in situ de ferrato (VI) a partir de viruta de acero al carbón. Algunos de los procedimientos que se pueden llevar a cabo para obtener el ferrato de la solución, son la remoción del ferrato del electrolito, mediante una separación solido-liquido, no magnética [13], posiblemente una técnica de cristalización de la solución; además el ferrato (VI) al ser un compuesto paramagnético [48] se podría recoger y concentrar mediante separación magnética [2], mediante atracción con un campo magnético.

Implementar otros materiales para el diseño de la celda; se recomienda utilizar el mismo electrolito (NaOH- Agua), con la concentración máxima expuesta (16,35M), ya que se logra producción de ferrato y no se incurre en cantidades dispendiosas de manejar. Para la cubeta, hacer uso de materiales transparentes, evaluar la posibilidad de trabajar con plástico. Para el ánodo se recomienda la viruta de acero al carbón como materia prima. Para el cátodo se puede implementar diferentes metales conductores, evaluar la posibilidad de láminas de Pt, Cu, Zn, Al entre otros.

Considerar el diseño de una celda electroquímica a escala piloto, o bien, un sistema a escala laboratorio que permitan la producción in situ, implementado la viruta como materia prima para la fabricación del ánodo.

Realizar ensayos utilizando los reactivos del decapado, con electrodos sucesivos hasta agotar la reactividad de estos, para reducir directamente el costo directo de producción. Implementar electrodos de mayor tamaño (máximo el volumen disponible en la celda) probablemente para la obtención de mayor ferrato. Disminuir el tiempo de reacción a 1 hora para reducir el costo energético. Evaluar temperaturas mayores y menores a la presentada en este trabajo,  $\pm 5$  °C para observar que modificación favorece la producción

Realizar un estudio de mercado que permita visualizar la competitividad del ferrato (VI) como agente desinfectante.

La fase final de producción industrial sugiere apoyarse en un estudio de factibilidad que contemple la definición de un punto de equilibrio para producción mínima, en condiciones de competitividad del ferrato con otros agentes desinfectantes. Adicionalmente, establecer una estructura de costos en la cual se tenga en cuenta, además del costo directo de producción, por energía, reactivos y procesos, involucrar la mano de obra, costos directos de ubicación, transporte, comercialización, distribución, mercadeo, publicidad, impuestos, margen de utilidad y tasa de retorno de la inversión.