

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN
REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN TIPO BATCH**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

LUIS DANIEL PILAY GUEVARA

luis_pilay@outlook.com

DIRECTOR: Dr. PATRICIO J. ESPINOZA MONTERO

patricio.espinoza@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. M.Sc. LUIS JARAMILLO SANCHEZ

luis.jaramillo@epn.edu.ec

Quito, julio 2018

DECLARACIÓN

Yo, Luis Daniel Pilay Guevara, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

LUIS DANIEL PILAY GUEVARA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Daniel Pilay Guevara, bajo mi supervisión.

Dr. PATRICIO J. ESPINOZA MONTERO
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. M.Sc. LUIS JARAMILLO SANCHEZ
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A los principios inculcados por mi madre Melva, que ha sido el eje de toda mi familia.

A mi hija Amina, que su llegada me ha motivado profundamente por ella, por mí y por nuestra familia

A mi recién esposa Andrea Leonor por su amor, apoyo y nuestra convergencia en innumerables aspectos.

A mis hermanos y padre que me han apoyado lo más que han podido.

A la Sra. María Mercedes Álvarez por su apoyo incondicional.

Al Ingeniero Edison Vera por su paciencia y apoyo en el Departamento de Ciencias Nucleares donde hice los ensayos y medí la mayoría de los parámetros analizados en la tesis.

A los compañeros tesisistas de Ingeniería Química que me incluyeron en el laboratorio para poder desenvolverme en estos últimos tiempos.

A todas las personas que estuvieron en mi camino, no solo en la parte académica sino también a nivel personal que hacen un todo en las vivencias del ser humano.

A la Empresa Carlos Álvarez Saa por la apertura.

DEDICATORIA

A mi madre, Melva.

A mi hija, Amina.

A mi esposa, Andrea.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
PRESENTACIÓN	XVII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4 ALCANCE	3
CAPÍTULO 2.....	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 AGUAS RESIDUALES	4
2.1.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD)	4
2.1.2 AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES (ARI).....	4
2.1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	4
2.2 ELECTROQUÍMICA	5
2.2.1 REACCIONES REDOX	5
2.2.2 ELECTRÓLISIS.....	6
2.2.3 CELDAS ELECTROLÍTICAS	6
2.2.4 LEYES DE FARADAY	7

2.2.4.1	PRIMERA LEY	7
2.2.4.2	SEGUNDA LEY.....	7
2.2.4.3	TERCERA LEY	8
2.2.5	POTENCIAL DE ELECTRODO	8
2.2.6	POTENCIAL DE CELDA ECUACIÓN DE NERNST	9
2.2.7	DIAGRAMA DE POURBAIX	10
2.2.7.1	LÍNEAS	11
2.2.7.2	REGIONES	12
2.3	ELECTROCOAGULACIÓN	12
2.3.1	PROPIEDADES DE LOS COLOIDES	13
2.3.2	FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN.....	14
2.3.2.1	DENSIDAD DE CORRIENTE O CARGA.....	14
2.3.2.2	EFECTO DEL pH	14
2.3.2.3	TEMPERATURA.....	15
2.3.2.4	TIPO DE MATERIAL DE LOS ELECTRODOS.....	15
2.3.3	REACTORES	15
2.3.3.1	DIRECCIÓN DEL FLUJO	16
2.3.3.2	MODO DE CIRCULACIÓN.....	16
2.3.3.3	TIPOS DE CONEXIÓN ELECTRÓDICA.....	16
2.3.3.4	FINALIDAD DE LA CELDA.....	17
2.3.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	18
2.3.4.1	VENTAJAS.....	18
2.3.4.2	DESVENTAJAS	18
2.3.5	CONSUMO DE ENERGÍA Y DEL ÁNODO.....	18
2.4	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL (ARI)	19
2.5	AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA (ARD).....	20
	CAPÍTULO 3.....	22
	METODOLOGÍA.....	22
3.1	DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	22
3.1.1	GEOMETRÍA DEL REACTOR.....	23
3.1.2	FUENTE DE PODER.....	25
3.1.3	DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR A ESCALA DE LABORATORIO	26

3.1.3.1	RELACIONES ENTRE MAGNITUDES DIMENSIONALES DEL REACTOR ²⁸	
3.1.3.2	RELACIONES VOLUMÉTRICAS	28
3.1.3.3	RELACIONES LONGITUDINALES	29
3.2	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DE AGUAS RESIDUALES.....	29
3.2.1	MATERIALES.....	29
3.2.2	EQUIPOS	30
3.2.3	REACTIVOS.....	30
3.2.4	PARÁMETROS	30
3.2.4.1	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	30
3.2.4.2	CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT).....	31
3.2.4.3	OXÍGENO DISUELTO (OD)	31
3.2.4.4	COLOR REAL (CR).....	31
3.2.4.5	TUBIDEZ (TUR)	32
3.2.4.6	CONDUCTIVIDAD (σ).....	32
3.2.4.7	POTENCIAL HIDRÓGENO (pH)	32
3.2.4.8	HIERRO TOTAL (Fe_T).....	32
3.2.4.9	HIERRO FERROSO ($[Fe^{2+}]$).....	32
3.2.4.10	HIERRO FÉRRICO ($[Fe^{3+}]$).....	33
3.3	ESTUDIOS PRELIMINARES.....	33
3.3.1	PARÁMETROS INICIALES	33
3.3.2	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE ELECTRODO CON EL DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL HIERRO.....	34
3.3.3	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CELDA.....	35
3.3.3.1	PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO	35
3.3.3.2	PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO	35
3.3.3.3	EFICIENCIA DE CELDA	36
3.4	CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA.....	36
3.4.1	OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA POTABLE	38
3.4.2	OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANCO AGUA REAL.....	39
3.5	ANÁLISIS DE COSTOS	39
	CAPÍTULO 4.....	40
	RESULTADOS	40

4.1	CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	40
4.1.1	OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA CON AGUA POTABLE A pH = 11.....	40
4.1.1.1	PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE	40
4.1.1.2	PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA.....	42
4.1.1.3	PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA.....	44
4.1.1.4	EFICIENCIA DE CELDA	46
4.1.2	OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	48
4.1.2.1	PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE	48
4.1.2.2	PARÁMETROS FÍSICOS DE AGUA.....	49
4.1.2.3	PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA.....	51
4.1.2.4	EFICIENCIA DE CELDA	53
4.2	CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	55
4.2.1	OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA POTABLE A pH = 7,5.....	55
4.2.1.1	PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE	55
4.2.1.2	PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA	56
4.2.1.3	PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA.....	57
4.2.1.4	EFICIENCIA DE CELDA	59
4.2.2	OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	60
4.2.2.1	PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE	60
4.2.2.2	PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA.....	60
4.2.2.3	PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA.....	62
4.2.2.4	EFICIENCIA DE CELDA.....	64
4.3	COMPENDIO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE OPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES ANALIZADAS.....	65
4.4	DIMENSIONAMIENTO A ESCALA INDUSTRIAL DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	66
4.4.1	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.....	66
4.4.2	AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	67
4.5	ANÁLISIS DE COSTOS	69
4.5.1	COSTO DE INSTALACIÓN.....	69

4.5.2	COSTO DE OPERACIÓN.....	70
4.5.2.1	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	70
4.5.2.2	AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	71
	CAPÍTULO 5.....	73
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1	CONCLUSIONES.....	73
5.2	RECOMENDACIONES.....	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	ANEXOS.....	78
	ANEXO 1: TABLAS DE PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA	78
	ANEXO 2: GRÁFICAS DE LOS ENSAYOS A CADA POTENCIAL ANÓDICO ..	93
	ANEXO 3: REGISTRO FOTOGRÁFICO	142

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: ELECTRODO DE REFERENCIA PLATA/CLORURO DE PLATA.....	9
FIGURA 2.2: DIAGRAMA DE POURBAIX	11
FIGURA 2.3: ESQUEMA DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN	13
FIGURA 2.4: MODOS DE CIRCULACIÓN EN REACTORES DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	16
FIGURA 2.5: ARREGLO DE ELECTRODOS SEGÚN EL TIPO DE CONEXIÓN ELECTRÓDICA	17
FIGURA 2.6: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INDUSTRIA TEXTIL	19
FIGURA 2.7: PROCESO DE HIDROFILADO DE ALGODÓN	20
FIGURA 2.8: FLUJO DE AGUAS RESIDUALES AFLUENTES DEL RÍO MACHÁNGARA	20
FIGURA 2.9: UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO.....	21
FIGURA 3.1: SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	22
FIGURA 3.2: ESQUEMA DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN CON SUS ELEMENTOS DIMENSIONALES.....	23
FIGURA 3.3: ESQUEMA DE LOS ELECTRODOS CON SUS ELEMENTOS DIMENSIONALES.....	24
FIGURA 3.4: REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO	27
FIGURA 3.5: DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS	28
FIGURA 3.6: DIAGRAMA DE POURBAIX PARA CADA POTENCIAL ESTUDIADO	34
FIGURA 4.1: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11	40
FIGURA 4.2: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11	42
FIGURA 4.3: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11	44

FIGURA 4.4: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11	46
FIGURA 4.5: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.....	48
FIGURA 4.6: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.....	50
FIGURA 4.7: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRRICO, DQO Y COT EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	52
FIGURA 4.8: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.....	54
FIGURA 4.9: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5	56
FIGURA 4.10: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5	57
FIGURA 4.11: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5	58
FIGURA 4.12: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5	59
FIGURA 4.13: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	60
FIGURA 4.14: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	61
FIGURA 4.15: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRRICO, DQO Y COT EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	63
FIGURA 4.16: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	64

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1: FICHA DEL PUNTO DE MUESTREO	20
TABLA 3.1: DIMENSIONES LONGITUDINALES DE LOS ELEMENTOS DEL REACTOR	26
TABLA 3.2: PARÁMETROS BASE PROMEDIO	33
TABLA 3.3: PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA	37
TABLA 3.4: DISTRIBUCIÓN DE ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN	38
TABLA 4.1: PARÁMETROS ÓPTIMOS.....	65
TABLA 4.2: COSTO DE INSTALACIÓN.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS

DQO: Demanda química de oxígeno

COT: Carbono orgánico total

ARI: Agua residual industrial

ARD: Agua residual doméstica

AP: Agua potable

RESUMEN

Este trabajo de investigación consiste en diseñar, construir y caracterizar electroquímicamente un reactor de electrocoagulación a escala piloto para la remediación de dos tipos de aguas contaminadas, el agua residual industrial de origen textil (ARI) y el agua residual doméstica (ARD) del Río Machángara.

Se tomaron como referencia cuatro potenciales anódicos, de acuerdo a los diagramas de Pourbaix, los cuales se mantuvo constantes en cada uno de los ensayos.

Se optimizó la celda con agua potable al pH de las aguas estudiadas. Se midieron los parámetros de potencial de celda, intensidad de corriente, Hierro total, Hierro Ferroso, Oxígeno Disuelto, pH, Conductividad, Turbidez y Color Real; teniendo las mejores eficiencias de celda a los potenciales de 1,0 V y 1,5 V.

Se optimizó la celda con las aguas residuales midiendo los parámetros de potencial de celda, intensidad de corriente; DQO, COT, Hierro total, Hierro Ferroso, Oxígeno Disuelto, pH, Conductividad, Turbidez y Color Real; obteniendo la mayor remoción de DQO y COT al potencial de electrodo de 1,5 V para los dos tipos de agua con eficiencias de celda mayores al 70%, pero con la diferencia de que para el agua residual doméstica se obtuvo eficiencia también alta para 1,0 V. Se obtuvieron valores máximos de potencial de celda de 12 V, densidad de corriente 12 A/m² y producción de hierro de 9 g/m².

Finalmente, se dimensionó los reactores con una corriente eléctrica de 35 A para los dos tipos de agua, mientras que el volumen fue de 6 m³ y 10 m³, para el agua residual industrial y para el agua residual doméstica, respectivamente.

ABSTRACT

This research work consists of designing, constructing and electrochemically characterizing a pilot-scale electrocoagulation reactor for the remediation of two types of contaminated water, industrial wastewater of textile origin (ARI) and domestic wastewater (ARD) of the Machángara River.

Four anodic potentials were taken as reference, according to the Pourbaix diagrams, which remained constant in each of the trials.

The cell was optimized with drinking water at the pH of the studied waters. The parameters of cell potential, current intensity, Total Iron, Ferrous Iron, Dissolved Oxygen, pH, Conductivity, Turbidity and Real Color were measured; having the best cell efficiencies at the potentials of 1,0 V and 1,5 V.

The cell with the wastewater was optimized by measuring the parameters of cell potential, current intensity; COD, TOC, Total Iron, Ferrous Iron, Dissolved Oxygen, pH, Conductivity, Turbidity and Real Color; obtaining the highest removal of COD and TOC at the 1.5 V electrode potential for the two types of water with cell efficiencies greater than 70%, but with the difference that domestic wastewater also obtained high efficiency for 1,0 V. Maximum cell potential values of 12 V, current density 12 A/m² and iron production of 9 g/m² were obtained.

Finally, the reactors were sized with an electric current of 35 A for the two types of water, while the volume was 6 m³ and 10 m³, for industrial wastewater and for domestic wastewater, respectively.

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo, se desarrolló seis capítulos, estructurándose de la siguiente manera:

El Capítulo 1, muestra las condiciones iniciales para partir a la investigación sobre el estudio realizado.

En el Capítulo 2, se enfoca en una revisión bibliográfica sobre la base electroquímica del trabajo, además se acotan los procesos unitarios de la industria generadora de agua contaminada y de la doméstica.

En el Capítulo 3, se detalla la metodología paso a paso, comenzando por los ensayos de optimización con agua potable y con agua real, hasta obtener condiciones de operación para tratar los dos tipos de aguas residuales.

El capítulo 4, establece la discusión de resultados obtenidos en el presente trabajo, analizando las gráficas de los mejores ensayos tomando en cuenta la mayor eficiencia de celda y la mayor remoción de contaminantes.

Por último, el Capítulo 5 se puntualizan las conclusiones y recomendaciones, que se obtienen según los objetivos planteados proyectándose a futuros aportes en estos procesos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Toda actividad antrópica requiere el uso del agua, y a la vez la descarga de este líquido. En las descargas generalmente no existe un tratamiento previo, lo cual genera contaminación que puede ser severa en muchos de los casos, por lo que, en la actualidad es necesario tomar acciones de prevención, control y mitigación de la contaminación.

Existen procesos convencionales de tratamiento de descargas líquidas, incluyendo en ellas operaciones físicas, químicas, biológicas y métodos combinando de acuerdo al tipo de agua residual. Sin embargo, estos no son suficientes dado el tipo de contaminación que en la actualidad las industrias descargan a efluentes naturales. El desarrollo de nuevas alternativas de tratamiento de aguas residuales es una necesidad inminente que muchos grupos de investigación alrededor del mundo ya lo han abordado.

La electrocoagulación aparece como una alternativa y se la ha utilizado industrialmente en otros países, y ha demostrado ser una metodología con excelentes rendimientos en el tratamiento de efluentes que contienen sólidos en suspensión, aceites, grasas, y otros contaminantes como compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden ser floculados. (Chen, 2004).

Es por esto que en este trabajo de investigación se propone diseñar, construir y caracterizar una planta piloto de electrocoagulación para el tratar aguas residuales industriales y municipales, (Cazco & Jarrín, 2010) que nos permita estudiar a fondo la electrocoagulación de tal manera que se pueda aplicar con la mayor eficiencia.

La caracterización electroquímica de este reactor permitirá un ahorro de energía y a la vez permitirá alcanzar la mayor eficiencia del proceso de electrocoagulación.

Esta metodología además pretende aportar de manera directa en el cumplimiento de la ordenanza municipal N° 404 para descarga de aguas residuales.

1.1 ANTECEDENTES

La electrocoagulación es un proceso electroquímico utilizado en el tratamiento de aguas residuales, el cual consiste en desestabilizar partículas coloidales en el agua, suministrando una corriente eléctrica en placas metálicas conductoras en el agua a tratar, las placas de hierro y aluminio son las más utilizadas debido a que han reportado mayores remociones de contaminantes.

La electrocoagulación ha sido utilizada en la remoción de contaminantes de diversos tipos de agua residuales industriales como: industria de galvanoplastia, fábricas de envasados, electro-plateado metálico, fábricas de envasados, industria del papel, peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo, mercurio y otros generados por talleres de maquinaria, refinerías, transporte, efluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, además, se ha utilizado en depuración de aguas para consumo humano y residuales domésticas. (Arango, 2005). Sin embargo, a pesar de todas las aplicaciones que se le ha dado a esta tecnología, en la actualidad no existe un estudio detallado del fundamento de este método.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Según lo reportado en la actualidad, la electrocoagulación es en un proceso electroquímico fácil de implementar en nuestro país, mejorando algunos factores como el diseño del reactor, la eficiencia de la celda y la corriente aplicada, (Arango, 2005) ya que no existe un estudio detallado de estas variables. Es por ello que, en este proyecto de investigación se propone determinar las características electroquímicas óptimas para alcanzar la mayor eficiencia de celda en la remoción de contaminantes, empleando como herramienta las leyes de Faraday y los diagramas de Pourbaix.

Los procesos electroquímicos, en su mayoría, se realizan a presión y temperatura ambiente, por lo tanto, existe un ahorro en consumo de energía, además los costos de construcción son relativamente baratos, siendo así la inversión inicial requerida muy baja respecto de otros tratamientos.

Una vez eficientado el proceso, se espera que se logre remover la DQO hasta valores menores al permitido por la norma, de manera más eficiente y barata.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y caracterizar electroquímicamente un reactor de electrocoagulación a escala piloto para la remediación de aguas contaminadas de origen industrial y doméstico.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un reactor de electrocoagulación utilizando electrodos de hierro (ánodo) y aluminio (cátodo) para la remisión de contaminantes de origen industrial (de la industria textil) y doméstico (agua del río Machángara).
- Caracterizar y optimizar electroquímicamente el reactor de electrocoagulación (producción de hierro, densidad de corriente, potencial de celda) utilizando agua potable y agua contaminada de origen industrial y doméstico.
- Efectuar un seguimiento de la calidad del agua del efluente del reactor determinando la conductividad, pH, DQO y COT de las aguas tratadas a diferentes tiempos de electrolisis.
- Determinar el análisis de costos de esta tecnología

1.4 ALCANCE

Con el presente proyecto de investigación busca construir un reactor a escala piloto, y encontrar las mejores condiciones de operación, de tal manera que nos permita remover contaminantes mediante electrocoagulación con la mayor eficiencia posible, y con el menor consumo de energía.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales provienen de diversas actividades antrópicas domésticas e industriales, las cuales ocasionan un problema ambiental al enviarlas a los cuerpos de agua naturales, para resolver este problema se necesita un tratamiento previo determinando su origen y su calidad.(Aguilar, 2015)

2.1.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD)

Son la que provienen de las áreas residenciales y de actividades de carácter doméstico, de establecimientos comerciales e institucionales tales como hospitales, escuelas, universidades entre otros.(Aguilar, 2015)

2.1.2 AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES (ARI)

Son desechos líquidos provenientes de fábricas o empresas que producen cualquier tipo de material o artículo sometido a oferta y demanda en el mercado.

2.1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Actualmente existen muchos tipos de tratamiento de aguas residuales, se aplica cada tratamiento de acuerdo a las características fisicoquímicas y biológicas del agua estudiada.

Para agua residual de procedencia domestica generalmente se hacen tratamientos biológicos, debido a la materia orgánica en su composición, por lo tanto, son muy biodegradables permitiendo que las bacterias puedan degradar esta materia orgánica.

En cambio, el agua residual industrial, en su composición, no contiene muchos compuestos biodegradables, por lo que se opta por aplicar un proceso fisicoquímico, exceptuando el caso de industrias que generan altas cargas de materia orgánica biodegradable.

Según el tipo de tratamiento se tiene diferentes procesos unitarios:

TIPO DE TRATAMIENTO	OPERACIÓN UNITARIA
Preliminares	Dilaceración, desbaste, flotación, filtración, remoción por gravedad, tanque Imhoff, filtración por membrana, remoción de grasas y aceites, tamizado grueso y fino y micro tamizado.
Primarios	Tamizado, sedimentación primaria
Secundarios	Lodos activados, sistemas de lagunaje, reactores de lecho fijo, sedimentación secundaria, deshidratación.
Terciarios	Coagulación química, floculación, sedimentación seguida de filtración y carbón activado, osmosis inversa, intercambio iónico, electrocoagulación.

2.2 ELECTROQUÍMICA

Es el área de la química que tiene como objeto de estudio la conversión entre energía eléctrica y energía química. Estos procesos son reacciones redox en las cuales la energía liberada por una reacción espontánea hace fluir una corriente eléctrica que es utilizada para inducir una reacción química no espontánea, a este último proceso se le llama electrolisis. La primera refiriéndose a las Celdas Galvánicas y la segunda a las Celdas Electrolíticas. (Chang, 2010).

2.2.1 REACCIONES REDOX

Son procesos electroquímicos de transferencia de electrones. Aquí suceden dos tipos de semireacciones simultáneas:

- **Oxidación.** Proceso de pérdida de electrones aumentando el estado de oxidación del elemento que se oxida.

- **Reducción.** Proceso de ganancia de electrones disminuyendo el estado de oxidación del elemento que se reduce.

El estado o número de oxidación se refiere a la carga eléctrica que tiene un elemento cuando está en estado libre o forma parte de un compuesto. (Durán, 2004)

2.2.2 ELECTRÓLISIS

La electrólisis es una tecnología electroquímica, en la cual se induce un cambio químico en un líquido por el paso de una corriente eléctrica. La energía eléctrica se suministra mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre los elementos conductores (electrodos) sumergidos en el líquido, este líquido debe de ser conductor y contener sustancias capaces de oxidarse o reducirse. La diferencia de potencial genera el paso neto de corriente eléctrica (electrones) entre los electrodos, con la consecuente oxidación de especies en la superficie de uno de los electrodos (ánodo) y la reducción de otras en el otro (cátodo).

El electrodo conectado al polo negativo de la fuente de alimentación es el “cátodo”, y en él se dan los procesos de reducción, transferencia electrónica desde el electrodo a la especie química. Los productos reducidos resultantes pueden pasar a formar parte del cátodo (electrodeposición) o pueden continuar en la disolución (electro reducción).

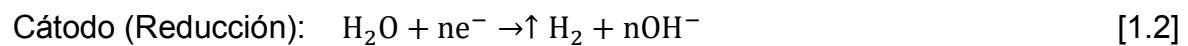
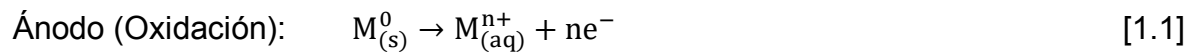
El electrodo conectado al polo positivo se denomina “ánodo”, y en él, tiene lugar la oxidación, transferencia electrónica hacia el electrodo desde la especie química, de algún compuesto presente en la disolución (electrooxidación), o bien la oxidación de parte del material electrolítico (electrodisolución).

2.2.3 CELDAS ELECTROLÍTICAS

Las celdas electrolíticas son celdas electroquímicas donde ocurren reacciones no espontáneas, a este proceso se denomina electrólisis. Las celdas constan de los siguientes elementos:

- Recipiente para el material de reacción, el cual debe ser de un material no conductor y si es posible translúcido para ver las zonas de reacción.
- Dos electrodos sumergidos conectados, que son de un material conductor sólido, generalmente un metal; llamados cátodo y en él tiene lugar la reducción, el otro llamado ánodo y en él tiene lugar la oxidación. El cátodo se conecta al polo negativo y el ánodo al polo positivo de la fuente de poder.
- Fuente de corriente continua
- Un electrolito, que es una disolución acuosa o una sal fundida.

El proceso en una celda electrolítica es el siguiente:



2.2.4 LEYES DE FARADAY

Las leyes de Faraday definen los principios que se aplican en las celdas electrolíticas y que se relacionan con la cantidad de material liberado o depositado en los electrodos en función de la energía suministrada a la celda.

2.2.4.1 PRIMERA LEY

La masa de un elemento liberada en la electrólisis es independiente de la composición química del electrolito, siempre que el estado de oxidación del elemento sea el mismo.

2.2.4.2 SEGUNDA LEY

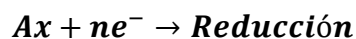
La masa de una sustancia liberada de un electrodo, durante el proceso electrolítico, es directamente proporcional a la carga eléctrica que circula a través de la celda, con respecto a la siguiente ecuación:

$$m = E * Q = \frac{Eg}{nF} * It = \frac{M*I*t}{nF} \quad [1.3]$$

Dónde, m es la masa depositada o liberada en gramos; M es la masa molar en gramos por mol; E es el equivalente electroquímico que mide la relación entre el peso equivalente (P_{eq}) y la constante de Faraday (F); Q es la carga expresado en coulomb (C); F es la constante de Faraday, representa la cantidad de electricidad necesaria para depositar o desprender un equivalente químico de cualquier sustancia, 1 mol de electrones se denomina 1 Faraday, que también es expresado en coulomb. $1F = 96500$ coulomb/mol de electrones; E_g : Equivalente químico, valor en gramos, que es la relación entre la masa molar y el número de electrones involucrados en la semireacción, intensidad de corriente (I): carga en unidad de tiempo que atraviesa el conductor, su unidad es el amperio, A.

2.2.4.3 TERCERA LEY

La masa de los elementos depositados o liberados en una celda electroquímica es directamente proporcional a los pesos equivalentes. Como se presenta a continuación:



$$m_{Ax} = \frac{Q \cdot P_{mAx}}{nF} \quad [1.4]$$

Donde, Q : Carga eléctrica total que pasa a través de la solución, expresada en Coulombs, n : Número de electrones, P_{mAx} : Peso molecular, n_{Ax} : número de moles del elemento químico, m_{Ax} : masa del compuesto químico depositado o liberado

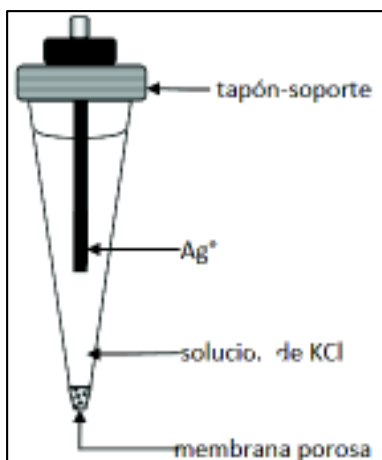
2.2.5 POTENCIAL DE ELECTRODO

El potencial de electrodo E , es el potencial de una celda electroquímica formada por el electrodo en cuestión que actúa como cátodo y el electrodo estándar que actúa como ánodo.

Los procesos en la interfase metal-solución de cualquier metal en contacto con un electrolito, no se pueden medir de una manera directa. El metal en contacto con el electrolito tiende a disolverse cargándose negativamente y los iones del electrolito

se depositan sobre el metal hasta llegar a un equilibrio en un tiempo determinado, esto hace que se genere una diferencia de potencial entre el metal y el electrolito, y para medir dicha diferencia se adopta un electrodo patrón de Hidrógeno. Existen diversos electrodos de referencia de los cuales se mide el potencial siempre con respecto al de Hidrógeno, como por ejemplo el electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) el cual está formado por un alambre delgado de Ag sobre el cual se deposita AgCl, generalmente por vía electroquímica en una solución de NaCl o KCl saturada, donde el alambre de Ag actúa como ánodo. El potencial aproximado del electrodo de Ag es de +0,25 V respecto al electrodo normal de Hidrógeno.

FIGURA 2.1: ELECTRODO DE REFERENCIA PLATA/CLORURO DE PLATA



2.2.6 POTENCIAL DE CELDA ECUACIÓN DE NERNST

La Ecuación de Nernst es la relación cuantitativa entre la fuerza electromotriz de una celda y la concentración de las especies químicas en condiciones no estándar, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \Delta E^0 - \frac{0,059}{n} \ln K \quad [1.5]$$

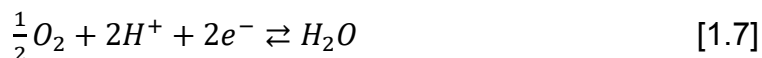
Donde, ΔE es el Potencial de celda, ΔE^0 es el potencial a condiciones estándar, n es la cantidad de mol de electrones que participan en la reacción y K la constante de equilibrio termodinámica correspondiente al Específico de la ecuación.

2.2.7 DIAGRAMA DE POURBAIX

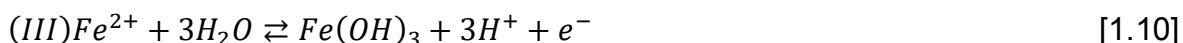
Un diagrama de Pourbaix es una representación gráfica del potencial eléctrico en función del pH para un metal bajo condiciones termodinámicas estándar. Este diagrama tiene como base los equilibrios químicos y electroquímicos y define el dominio de la estabilidad del electrolito, el metal y sus compuestos relacionados en proceso electrolítico. Los equilibrios se determinan a partir de la ecuación de Nernst y las constantes de equilibrio de los compuestos metálicos que se dan. (Pourbaix, 1974)

Estos diagramas se utilizan para ayudar en la predicción de los estados más estables de un metal, sus productos de corrosión, y sus iones asociados en una solución acuosa. Estos se presentan como un gráfico de potencial de equilibrio frente a la actividad de iones hidrógeno. Aun cuando la adición de iones al sistema de equilibrio puede modificar el diagrama, como por ejemplo los iones orgánicos, el mismo nos sirve de referencia para determinar cómo actúan ciertos compuestos en los problemas asociados a la corrosión.

Los procesos corrosivos en medio acuoso innatamente tienen involucradas las reacciones de desprendimiento de Hidrógeno y reducción de Oxígeno.



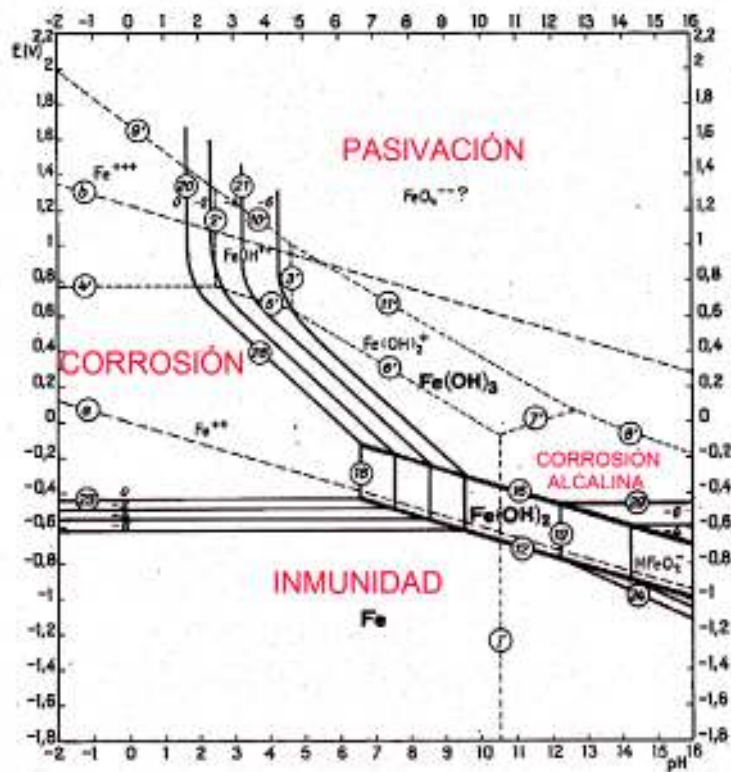
Unos de los casos más importantes es la corrosión del hierro y presenta los siguientes equilibrios:





Para construir un diagrama de Pourbaix se necesitan los valores de energía libre de formación dada por la ecuación de Nernst y se obtiene el diagrama correspondiente:

FIGURA 2.2: DIAGRAMA DE POURBAIX DEL Fe



2.2.7.1 LÍNEAS

- **Líneas horizontales.** Reacciones con dependencia solamente del potencial.
- **Líneas verticales.** Reacciones con dependencia solamente del pH.
- **Líneas oblicuas.** Reacciones con dependencia tanto del potencial como del pH.
- **Líneas continuas.** Equilibrio entre dos especies de estado sólido o entre una especie de estado sólido y otra especie soluble con distinta actividad.
- **Líneas discontinuas finas.** Equilibrio entre dos especies solubles.

- **Líneas discontinuas gruesas.** Con la letra “b” indica el equilibrio de descomposición de agua con desprendimiento de O_2 y con la letra “a” con desprendimiento de H_2 . La zona entre estas dos líneas representa una estabilidad entre el H_2O , H_2 y O_2 . Por encima de “b” son condiciones oxidantes, hay desprendimiento de O_2 . Por debajo de “a” son condiciones reductoras, hay desprendimiento de H_2 .

2.2.7.2 REGIONES

- **Inmunidad.** El metal en forma elemental es termodinámicamente estable
- **Corrosión.** Si la fase termodinámicamente estable es un catión soluble del metal.
- **Corrosión alcalina.** Ocurrirá si la fase termodinámicamente estable es un anión complejo soluble del catión en medio alcalino, lo que ocurre en el caso de metales anfóteros (sustancia que puede reaccionar ya sea como un ácido o como una base), como por ejemplo, hierro, aluminio, cinc, etc.,
- **Pasivación.** Zona en la que un compuesto poco soluble del metal forma una capa fina protectora sobre la superficie, resultando en una reacción muy lenta (zona de estabilidad de óxidos, hidróxidos). La película puede ser según el caso de diferente manera.

Protección Perfecta. Es la formación de una película no porosa que impide el contacto directo del electrodo y la solución, los metales en los que sucede esta protección nos generalmente Al, Cr, Fe y Sn.

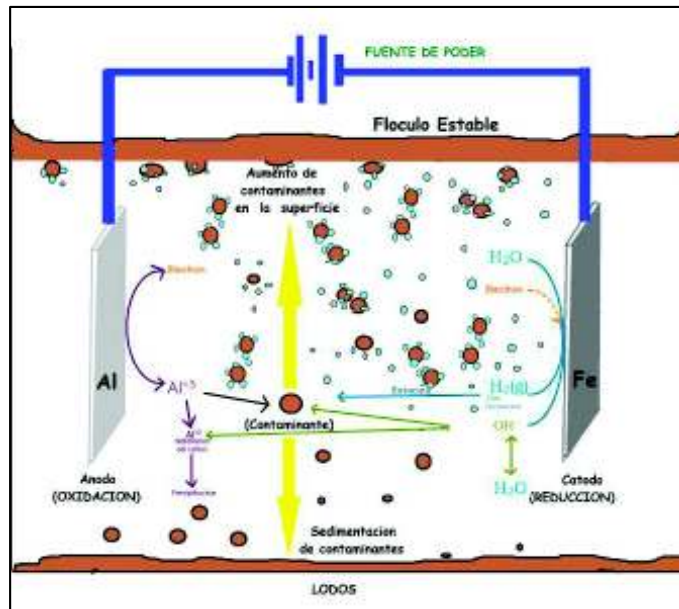
Protección Imperfecta. Es la formación sobre el electrodo de un depósito poroso que sustrae parcialmente el electrodo en contacto con la solución. Por lo tanto, la pasivación no implica necesariamente la ausencia de corrosión.

2.3 ELECTROCOAGULACIÓN

Es la coagulación asistida electroquímicamente, un proceso en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución del ánodo, la materia coloidal presente en el agua se aglomera aumentando su densidad para su posterior separación

sólido/líquido, tales como la decantación, la flotación y filtración; Como consecuencia los ánodos van desapareciendo a medida que transcurre el tratamiento, llegando a disolverse completamente (ánodos de sacrificio).

FIGURA 2.3: ESQUEMA DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN



Fuente: (Mollah, Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001)

2.3.1 PROPIEDADES DE LOS COLOIDES

Muchas de las impurezas existentes en el agua, incluidos los microorganismos patógenos y los ácidos húmicos son habitualmente responsables del color y turbidez, los complejos arcilla-meta y los ácidos fúlvicos están en el rango del tamaño coloidal: 1 nm a 10 μ m. Los coloides tienen tamaño intermedio de entre las moléculas y las partículas suspendidas; éstos ofrecen una variedad de propiedades, que a continuación se presentan las más importantes:

- **Movimiento browniano:** choque aleatorio y desordenado de partículas coloidales.
- **Difusión:** tiene la relación con el movimiento browniano. El movimiento constante de las moléculas del líquido.

- **Presión osmótica:** es la presión hidrostática que equilibra el agua y el sistema coloidal separados por una membrana semipermeable.
- **Propiedades ópticas:** efecto del Tyndall- Faraday.
- **Propiedades de superficie:** tienen una superficie específica muy alta debido al tamaño de sus partículas, lo que permite una gran capacidad de adsorción de sustancias.
- **Propiedades electrocinéticas:** los coloides generalmente tienen carga eléctrica, por lo tanto, interactúan electromagnéticamente.

2.3.2 FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

2.3.2.1 DENSIDAD DE CORRIENTE O CARGA

La energía suministrada a un sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones Al^{3+} o Fe^{3+} o Fe^{2+} liberados por los electrodos respectivamente. Para el aluminio la masa equivalente electroquímica es 335,6 mg/(Ah), para el hierro el valor es 1041 mg/(Ah). Una corriente grande significa una unidad pequeña de electrocoagulación, además, existe la posibilidad de gastar energía calentando el agua. Para que el sistema de electrocoagulación opere por un largo periodo de tiempo sin mantenimiento, se sugiere que la densidad de corriente se mantenga entre 20-23 A/m². (Halt, 2004)

La densidad de corriente es un parámetro de operación muy importante que debe de medirse junto con otros parámetros como: pH, temperatura y flujo, para asegurar una alta eficiencia de corriente. La eficiencia de la densidad de corriente en los electrodos de aluminio puede ser de 120% a 140%, mientras que para los de hierro es de alrededor del 100%, ello se atribuye al efecto de corrosión, especialmente cuando hay iones cloruro presentes. (Kovatchva & Parlapansky, 1999)

2.3.2.2 EFECTO DEL pH

El efecto del pH en el agua residual se refleja en la eficiencia de corriente, así como en la solubilidad de hidróxidos metálicos. (Barrera , 2009)

Se han reportado eficiencias del 53% en la DQO, en el tratamiento de efluentes de una industria alimenticia a valores de pH óptimos de 4 a 6. También se ha alcanzado una remoción del 70% de DQO, con ánodos de hierro y un 50% de DQO con ánodos de aluminio, para un efluente industrial a un valor de pH de 8.

El pH del efluente posterior a la electrocoagulación, se incrementa por la acción de influentes ácidos, pero se disminuye por influentes alcalinos, esta es una de las ventajas de este proceso.

Los electrodos de hierro se han usado en aguas residuales caracterizadas por presentar coloración y de giro textil, se ha empleado influentes alcalinos logrando alta remoción de color y DQO. (Zhaing, 1993)

2.3.2.3 TEMPERATURA

El efecto de la temperatura en esta tecnología no ha sido muy investigado (Chen, 2004), señala que la eficiencia máxima de corriente se consigue si se incrementa la temperatura hasta 60%. El incremento de la eficiencia de corriente se atribuye al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio sobre la superficie del electrodo. A mayor temperatura, mayor conductividad y, por ende, menor consumo de energía.

2.3.2.4 TIPO DE MATERIAL DE LOS ELECTRODOS

Los materiales que se suelen emplear en la electrocoagulación son aluminio y hierro. La configuración de los electrodos generalmente es en forma de platos de aluminio o hierro; se ha encontrado que la principal aplicación para estos electrodos es el tratamiento de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes.

2.3.3 REACTORES

Existe una gran variedad de celdas electroquímicas para el proceso de electrocoagulación y se clasifican considerando los siguientes criterios:

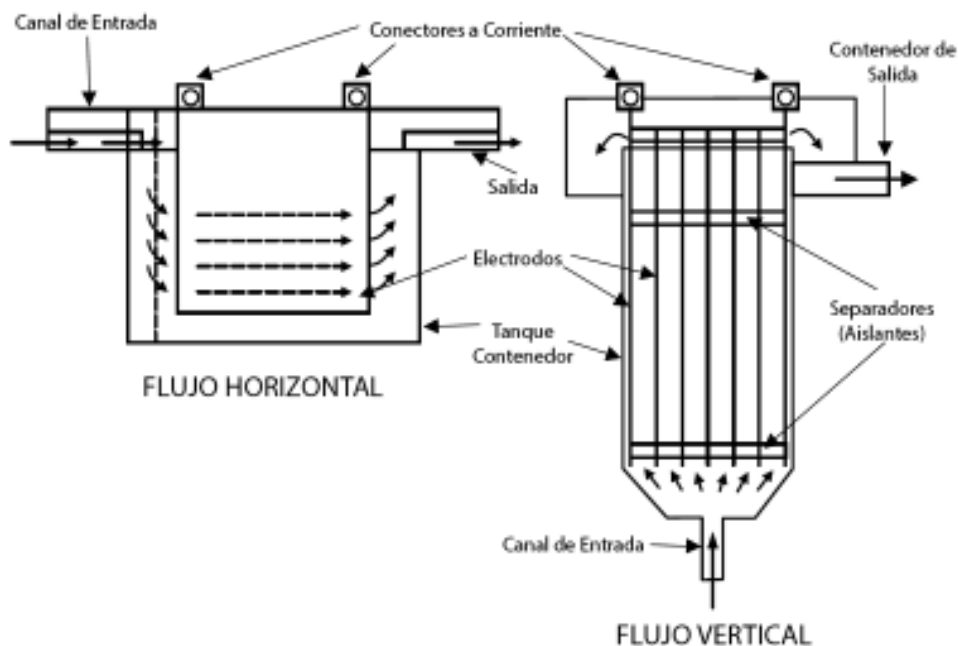
2.3.3.1 DIRECCIÓN DEL FLUJO

Los reactores se clasifican en unidades de flujo horizontal y vertical. Ésta disposición resulta importante para el aprovechamiento del movimiento provocado por el oxígeno e hidrógeno gaseosos

2.3.3.2 MODO DE CIRCULACIÓN

Existen celdas de canales múltiples, o bien de un solo canal; la ventaja de la celda de canales múltiples es la sencillez de su disposición, sin embargo, debido al bajo caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición podría favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos.

FIGURA 2.4: MODOS DE CIRCULACIÓN EN REACTORES DE ELECTROCOAGULACIÓN



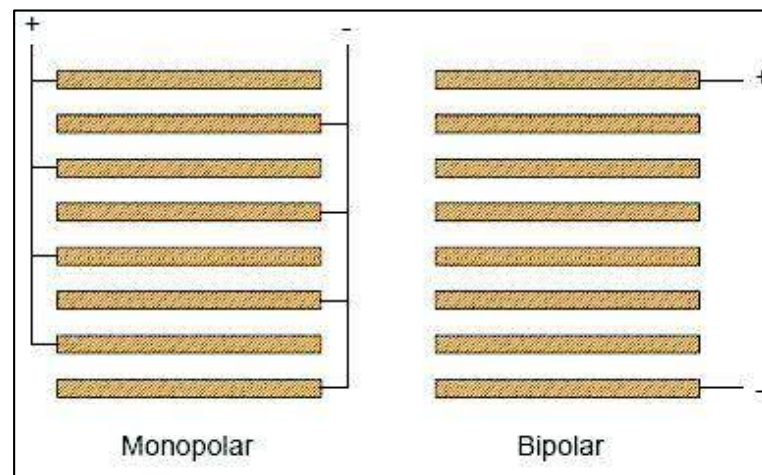
(Chen, 2004)

2.3.3.3 TIPOS DE CONEXIÓN ELECTRÓDICA

Los reactores pueden clasificarse en monoplares y bipolares. La configuración bipolar trabaja con menor intensidad y mayor voltaje que el monopolar. Las celdas

bipolares ofrecen la ventaja de la sencillez de su disposición ya que solo se necesitan la conexión de dos electrodos alimentadores, y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser menor. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de la corriente fluya a través de la disolución causando un *bypass* de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente; lo que se ha de tener en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de los electrodos.

FIGURA 2.5: ARREGLO DE ELECTRODOS SEGÚN EL TIPO DE CONEXIÓN ELECTRÓDICA



(Chen, 2004)

2.3.3.4 FINALIDAD DE LA CELDA

Un último elemento discriminatorio en el diseño de procesos de electrocoagulación, el más representativo dentro de esta aplicación, es la finalidad del reactor, que puede ser simplemente la dosificación de agente coagulante, o incluso llegar a favorecer el proceso de flotación mediante el análisis y uso de la generación del oxígeno y el hidrógeno gaseoso generados.

2.3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

2.3.4.1 VENTAJAS

- Necesita un equipo muy sencillo, fácil de operar y automatizable.
- Depura muchos tipos de contaminantes y puede ser selectivo dicha remoción.
- Baja generación de lodos con una menor humedad y mayor estabilidad que otros procesos en los que se producen lodos.
- Separación de fases mediante técnicas convencionales de separación sólido/líquido
- Rentabilidad a mediano plazo.
- Bajo consumo de energía eléctrica.
- Aplicación a distintos tipos de aguas residuales.

2.3.4.2 DESVENTAJAS

- Reemplazo de electrodos de sacrificio.
- Presencia de alta concentración de metales en los lodos, dependiendo al electrodo de sacrificio elegido.
- Disminución de la eficiencia, requiriendo más corriente eléctrica, debido a la formación de la película en el ánodo.

2.3.5 CONSUMO DE ENERGÍA Y DEL ÁNODO

La intensidad de corriente en el proceso requiere una energía que se gasta, también el consumo del ánodo de sacrificio es una consecuencia. (Ozyonar & Karagozoglu, 2011).

$$W = \frac{I \cdot t \cdot M_{Fe}}{V_A \cdot Z \cdot F} \quad [1.15]$$

Donde, W es cantidad de metal disuelto en g/m³, I es la corriente eléctrica en A, t es el tiempo de electrocoagulación en s, M_{Fe} es el peso molecular del ánodo g/mol,

Z es el número de electrones involucrados en la reacción de óxido – reducción, F es la constante de Faraday y V_A es el volumen de agua tratada m^3 .

El consumo de energía se lo expresa en la siguiente ecuación:

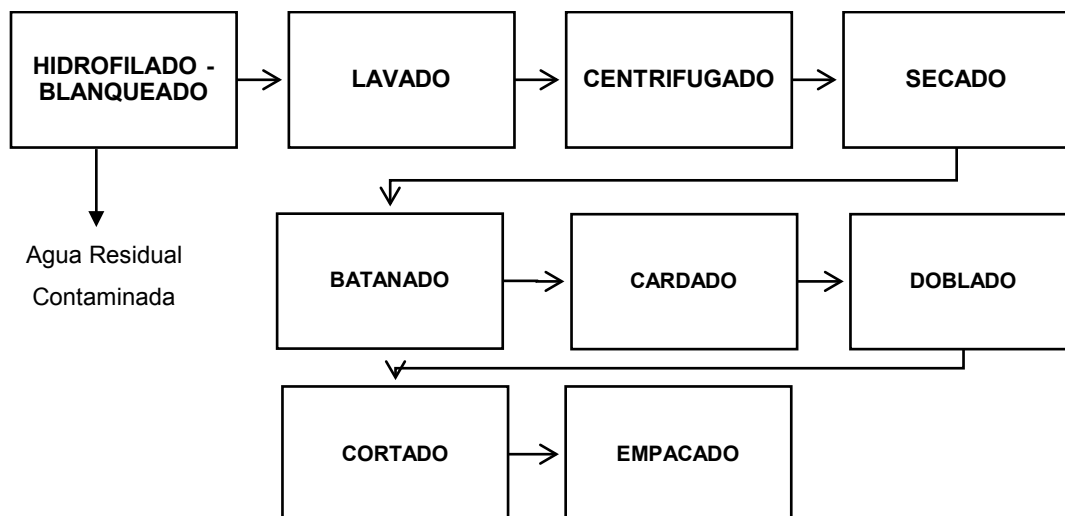
$$\text{Consumo de energía} = \frac{E \cdot I \cdot t}{V_A} \quad [1.16]$$

Donde, E es potencial de celda en voltios.

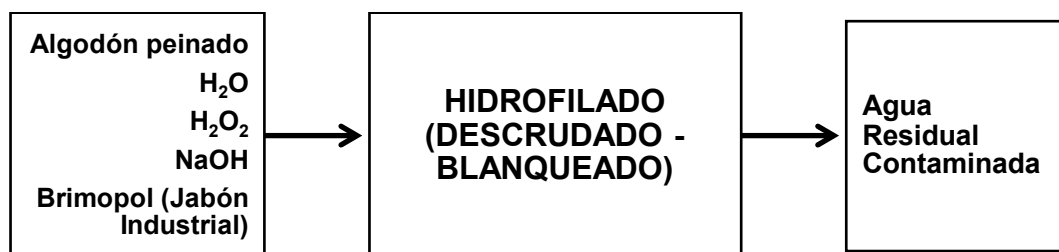
2.4 AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL (ARI)

El efluente estudiado en el presente trabajo proviene de la descarga de un proceso llamado Hidrofilado de Algodón en el que se descruda y se blanquea el algodón para uso quirúrgico, la empresa está ubicada en el Sector del Conde en el DMQ, a continuación, se presenta un diagrama de flujo y el punto donde se genera agua residual contaminada.

FIGURA 2.6: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INDUSTRIA TEXTIL

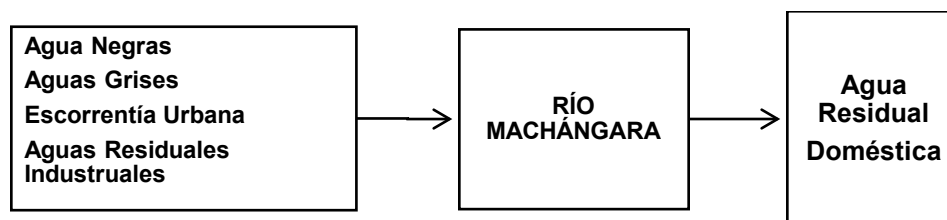


En el proceso de Hidrofilado-Blanqueado se descruda y blanquea algodón peinado con los reactivos que se muestra a continuación:

FIGURA 2.7: PROCESO DE HIDROFILADO DE ALGODÓN

2.5 AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA (ARD)

Se eligió el agua del Río Machángara que tiene distintos afluentes a nivel doméstico.

FIGURA 2.8: FLUJO DE AGUAS RESIDUALES AFLUENTES DEL RÍO MACHÁNGARA

El muestreo se realizó de acuerdo a la siguiente ficha:

TABLA 2.1: FICHA DEL PUNTO DE MUESTREO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Lugar de muestreo	Guápulo
Coordenadas	UTM 17M 780876 E 9976873 N.
Ciudad más cercana	Quito
Provincia	Pichincha
Tipo de masa de agua	Río
Nombre de la masa de agua	Machángara

La zona en la que se hizo el muestreo del Río Machángara se muestra en la gráfica siguiente:

FIGURA 2.9: UBICACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO



Fuente: (Google earth, 2017)

CAPÍTULO 3

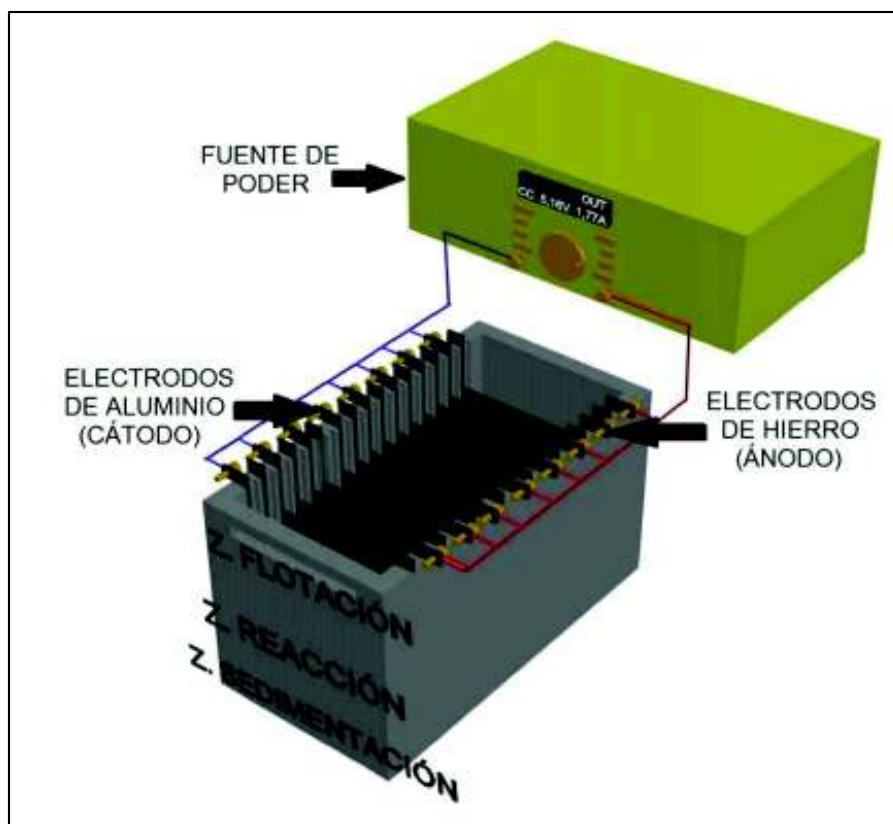
METODOLOGÍA

3.1 DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

Para la construcción del reactor se tomaron en consideración tres zonas importantes para el proceso de electrocoagulación, ya experimentada en los ensayos reportados en la literatura. (Cazco & Jarrín, 2010).

Se proyectó un reactor como se muestra en la Fig. 3.1, donde están identificadas las zonas de reacción, sedimentación y flotación, con la fuente de poder y sus electrodos.

FIGURA 3.1: SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN



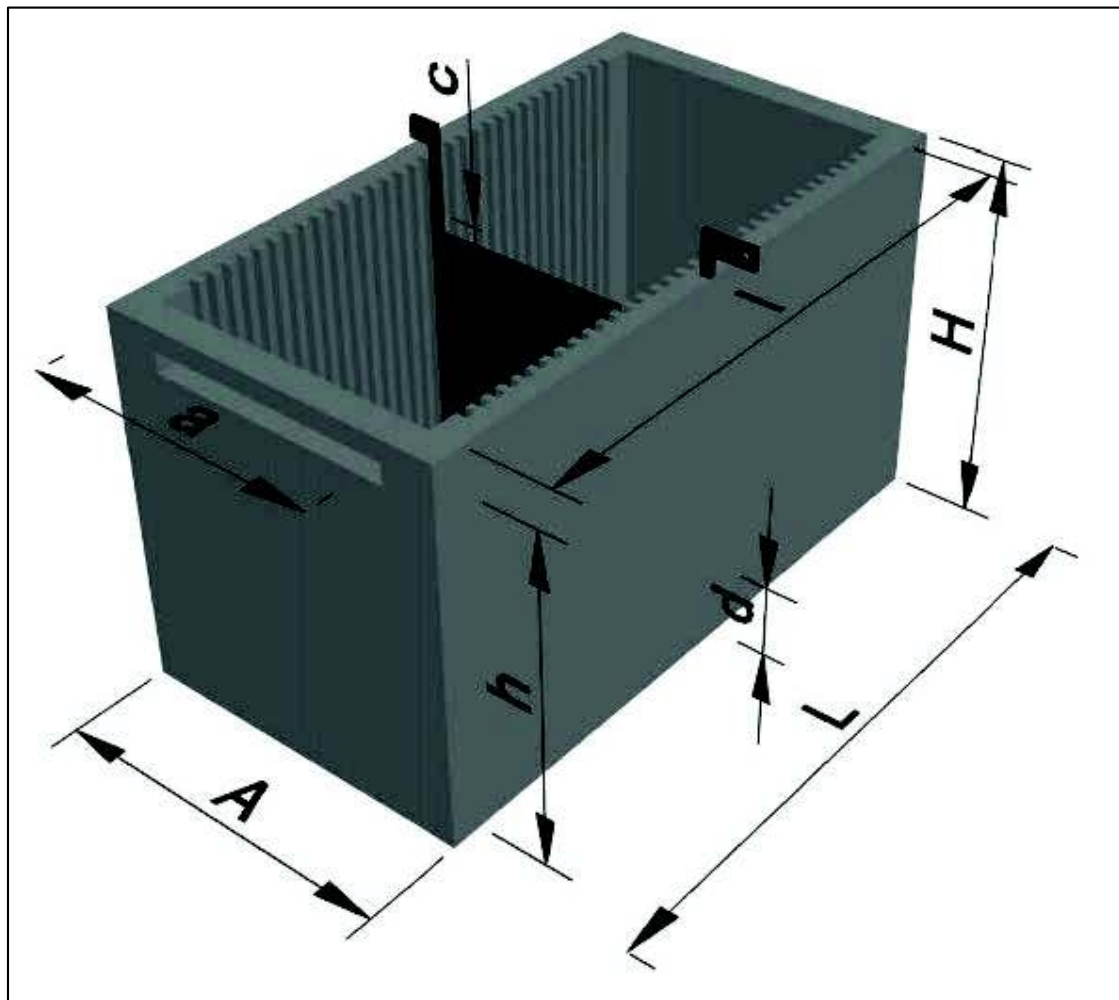
Fuente (Pilay, 2017)

3.1.1 GEOMETRÍA DEL REACTOR

Para el dimensionamiento se consideró los siguientes materiales:

- Se construyó el reactor el reactor en forma de prisma rectangular de material translúcido polimetacrilato de metilo (PMAM).
- Número de electrodos: 8 de hierro y 8 de aluminio, conectados en paralelo.
- Distancia entre los electrodos de 1,7 cm. (Guanoluiza, 2013)

FIGURA 3.2: ESQUEMA DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN CON SUS ELEMENTOS DIMENSIONALES

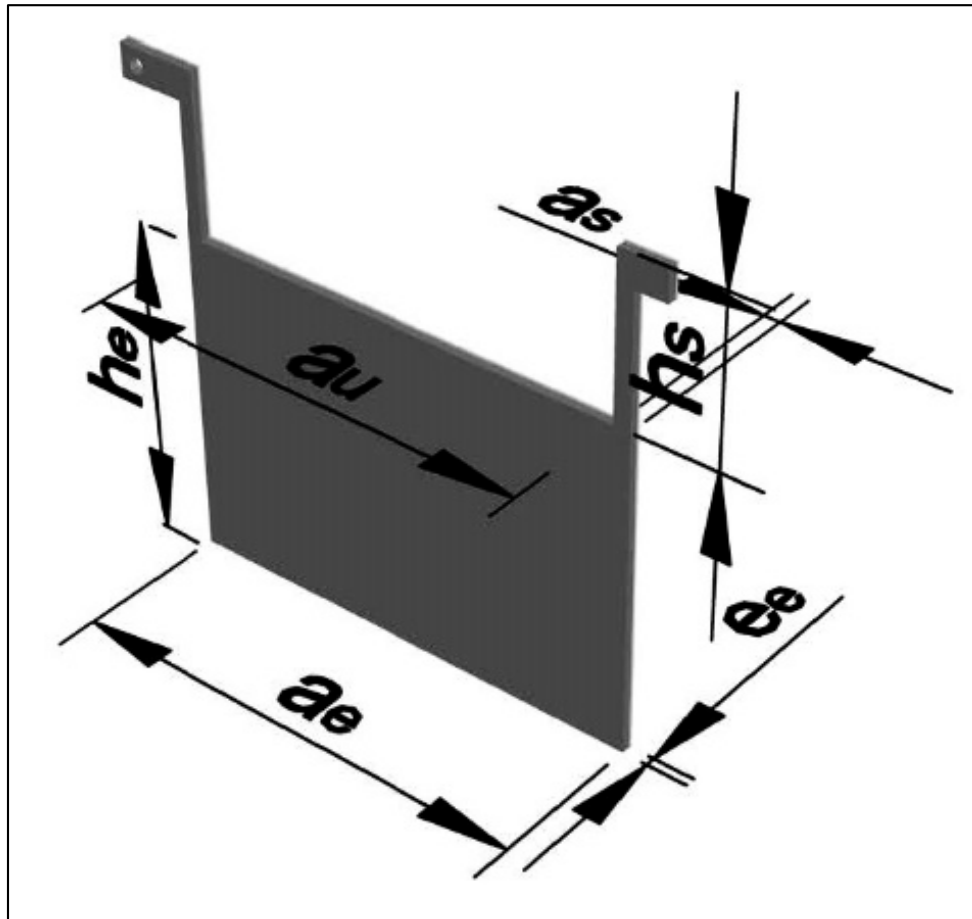


Fuente: (Pilay, 2017)

Dónde: “A” es el ancho total del reactor, “a” es el ancho interno, “L” es el largo total del reactor, “l” es largo interno del reactor, “H” es la altura total del reactor, “h” es el calado, “e” es el espesor de PMAM de 1,5 cm, “c” es la distancia del nivel del agua al electrodo, “d” es la distancia entre el fondo del reactor al electrodo.

Los electrodos se utilizaron con un área útil igual al ancho interno del reactor por 0,10 m para la zona de reacción (Fig. 3.3).

FIGURA 3.3: ESQUEMA DE LOS ELECTRODOS CON SUS ELEMENTOS DIMENSIONALES



Fuente: (Pilay, 2017)

Donde, “ a_e ” es el ancho total del electrodo, “ a_i ” es el ancho útil del electrodo, “ e_e ” es el espesor, “ h_e ” es la altura del electrodo, “ h_s ” es la altura de los soportes, “ a_s ” es el ancho de soportes.

Resumen de los parámetros dimensionales del sistema de electrocoagulación:

- V_T , volumen total del reactor de electrocoagulación se calculó con la ecuación

$$V_T = A * L * H \quad [2.1]$$

- V_P , volumen total las placas se calculó de la siguiente forma:

$$V_P = (L * H * e) + (a * H * e) = H * e * (L + a) \quad [2.2]$$

- V_I , volumen interno del reactor.

$$V_I = a * l * h \quad [2.3]$$

- V_E , volumen de todos los electrodos de hierro y aluminio, en total 16.

$$V_E = n_e * a * l * h \quad [2.4]$$

- V_A , volumen de agua, a tratar se definió como el volumen interno menos el volumen ocupado por los electrodos.

$$V_A = V_I - V_E \quad [2.5]$$

3.1.2 FUENTE DE PODER

Se utilizó una fuente reguladora de corriente continua, marca INSTEK, 8 – 18 A, 0 – 60 V, con una apreciación de 0,01 a 0,01 V. Esta fuente es de voltaje ajustable, medidor de intensidad de corriente.

Los parámetros eléctricos potencial de celda (E) e intensidad de corriente (I) fueron impuestos en la fuente de poder; mientras que, la densidad de corriente (J) fue calculada con la siguiente ecuación:

$$J = \frac{I}{n_e A_u} \quad [2.6]$$

Donde, J es la densidad de corriente (A/m²), A_u es el área útil del electrodo (m²), n_e es el número de electrodos (ánodo).

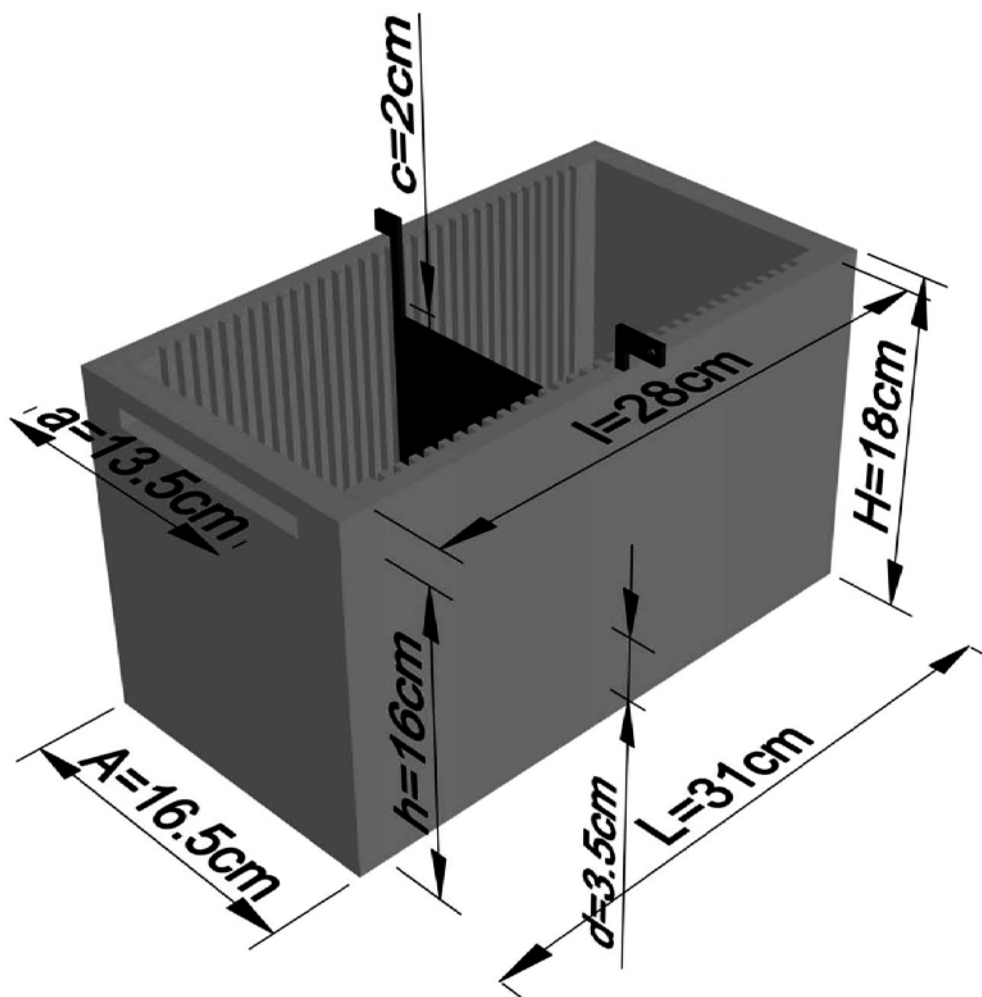
3.1.3 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR A ESCALA DE LABORATORIO

TABLA 3.1: DIMENSIONES LONGITUDINALES DE LOS ELEMENTOS DEL REACTOR

SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
CUERPO DEL REACTOR		
A	0,165	m
L	0,310	m
H	0,180	m
a	0,135	m
l	0,280	m
h	0,160	m
e	0,015	m
c	0,002	m
d	0,0035	m
ELECTRODOS		
a _e	0,145	m
a _i	0,135	m
e _e	0,003	m
h _e	0,100	m
h _s	0,050	m
a _s	0,005	m
n	16	-
VOLÚMENES		
V _T	0,00921	m ³
V _P	0,00187	m ³
V _I	0,00605	m ³
V _e	0,00065	m ³
V _A	0,00540	m ³

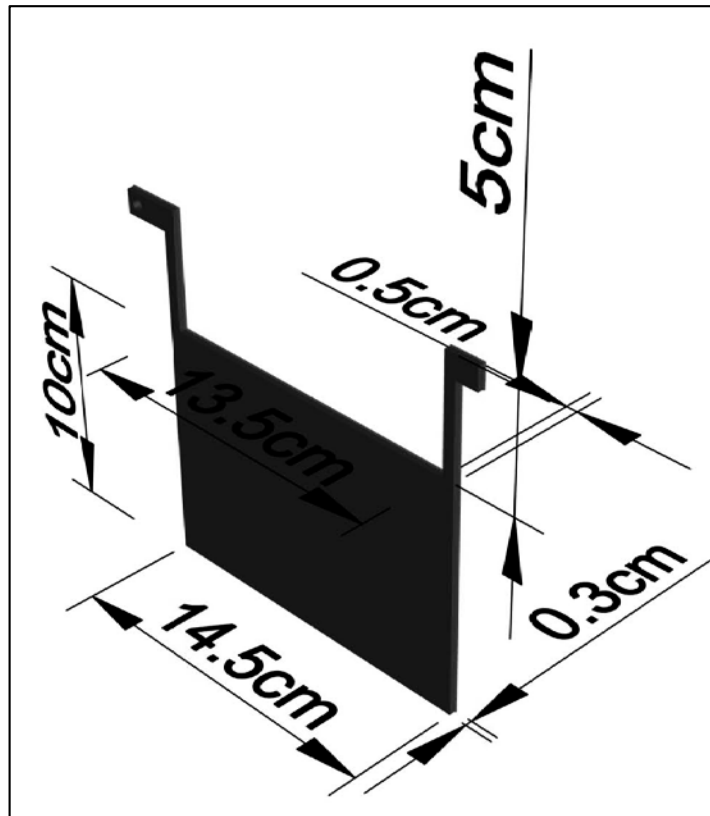
En la Fig. 3.4 se muestran las dimensiones del reactor de electrocoagulación utilizado a escala de laboratorio. Se construyeron los electrodos de acuerdo al volumen de agua a tratar con las medidas mostradas en la figura, considerando las mejores remociones de DQO con ánodo de hierro, y se tomó el área útil de 10 cm x 13,5 cm.

FIGURA 3.4: REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO



Fuente: (Pilay, 2017)

FIGURA 3.5: DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS



Fuente: (Pilay, 2017)

3.1.3.1 RELACIONES ENTRE MAGNITUDES DIMENSIONALES DEL REACTOR

Para el escalamiento a escala industrial se tomaron en cuenta las relaciones de distancias y volúmenes del reactor, ya construido a escala de laboratorio.

3.1.3.2 RELACIONES VOLUMÉTRICAS

- $\frac{V_A}{V_T} = \frac{0,0055 \text{ m}^3}{0,01004 \text{ m}^3} = 0.6$

$$V_A = 0,55V_T \quad [2.7]$$

- $\frac{V_I}{V_T} = \frac{0,00605 \text{ m}^3}{0,01004 \text{ m}^3} = 0.6$

$$V_I = 0,6V_T \quad [2.8]$$

3.1.3.3 RELACIONES LONGITUDINALES

$$\bullet \frac{L}{A} = \frac{0,31 m}{0,165 m} = 1,88$$

$$L = 1,88 A \quad [2.9]$$

$$\bullet \frac{H}{A} = \frac{0,18 m}{0,165 m} = 1,09$$

$$H = 1,09 A \quad [2.10]$$

$$\bullet \frac{h}{A} = \frac{0,16 m}{0,165 m} = 0,97$$

$$h = 0,97 A \quad [2.11]$$

$$\bullet \frac{d}{h} = \frac{0,035 m}{0,16 m} = 0,22$$

$$d = 0,22 h \quad [2.12]$$

$$\bullet \frac{c}{h} = \frac{0,02 m}{0,16 m} = 0,13$$

$$c = 0,13 h \quad [2.13]$$

$$\bullet h_e = h - c - d \quad [2.14]$$

3.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DE AGUAS RESIDUALES

La caracterización de las aguas residuales se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Tecnología de Radiaciones, el Laboratorio de Aguas y Microbiología y el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental, de la Escuela Politécnica Nacional. Se consideraron los procedimientos detallados por (Company, Water Analysis Handbook) HACH (1992) y (Piruch, 2006), que se detallan a continuación:

3.2.1 MATERIALES

- Matraces Erlenmeyer de 100 y 200 mL
- Celdas de vidrio de 25 mL para espectrofotómetro
- Matraces Kitasato de 500 mL
- Matraces Erlenmeyer de 250 y 500 mL
- Vasos de precipitación de 50 y 100
- Pipetas graduadas de 2, 10, 50 y 100 mL

- Probetas graduadas de 1000 mL
- Tubos de ensayo de 10 mL.
- Multímetro

3.2.2 EQUIPOS

- Reactor de DQO, PALINTEST, 0 °C – 160 °C, 1 °C
- Espectrofotómetro, HACH DR/2000
- Balanza analítica, KERN & Sohn GmbH, 10 mg – 220 g, 0,1 mg
- Bomba de vacío, EMERSON, 1/3 HP, 1 725 RPM
- pH-metro, HANNA Instruments, modelo 8521
- Turbidímetro, HACH, modelo 2100 A, 0.1 – 1
- Conductivímetro, HANNA Instruments
- Medidor de oxígeno disuelto, ORION, modelo 840, 0.1 mg/L.

3.2.3 REACTIVOS

- Ácido sulfúrico, 95 – 97 %, MERCK
- Hidróxido de Sodio, pellets, 96.6 %, LAM.
- Cloruro de Potasio, 5N, CICAM.
- Hierro FerroVer Método Iron Phenanthroline. (0 a 3.00 mg/L)
- Ferrous Iron Reagent, (0 a 3.00 mg/L).

3.2.4 PARÁMETROS

3.2.4.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La demanda química de oxígeno se determinó por espectrofotometría Uv-Vis, a una longitud de onda de 600 nm, según la técnica Reactor Digestion Method 8000. Se comenzó buscando pares de viales que presenten la misma absorbancia en el espectrofotómetro; en el primero de ellos, se pipetearon 2 mL de muestra y en el segundo un volumen igual de agua destilada (blanco). Después de homogeneizar

los viales, se los sometió a un proceso de digestión durante 2 h a una temperatura de 150 °C. Tras enfriar los viales a temperatura ambiente, se los ingresó en el espectrofotómetro HACH para la lectura, el resultado se expresó en mgO₂/L (HACH, 1992, p. 130).

3.2.4.2 CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)

Se utilizó el método de combustión y determinación por infrarrojos de COT. Se utilizó un TOC SHIMADZU modelo 5000 A. Procedimiento: se filtra la muestra y se coloca 5 mL en un tubo de ensayo (muestra), se ajusta la temperatura del equipo a 900 °C, se coloca 5 mL de agua grado HPLC en una celda (blanco), finalmente se inyecta el blanco y la muestra para realizar las mediciones de TOC (mg/L).

3.2.4.3 OXÍGENO DISUELTO (OD)

El oxígeno disuelto se midió como indica el método Oxigen Meter ORION. La muestra de agua se agitó y una alícuota de esta se trasvasó a un vaso de precipitación. Se sumergió el electrodo del equipo de medición en el líquido y se agitó suavemente hasta que el valor del oxígeno disuelto fuera estable en la pantalla digital del medidor de oxígeno. Se registró el valor en mg O₂/L (HACH, 1992, p. 576).

3.2.4.4 COLOR REAL (CR)

El análisis para la determinación de color real se basó en el método Platinum-Cobalt (Pt-Co) Standard Method 8025. Se pipetearon 25 mL de muestra, previamente filtrada, en una celda de vidrio, y 25 mL de agua destilada (blanco) en otra. En el espectrofotómetro HACH, con una longitud de onda de 455 nm, se introdujeron el blanco y la muestra, cada uno en su momento, para determinar el color real. El resultado final se reportó en unidades de color de Pt-Co (HACH, 1992, p. 265).

3.2.4.5 TUBIDEZ (TUR)

Se empleó el método Turbidimeter 2100P HACH. La muestra sin filtración se agitó y trasvasó en las celdas de vidrio, se colocó en el turbidímetro, se tapó y se midió el valor en unidades nefelométricas de turbidez, NTU (HACH, 1992, p. 410).

3.2.4.6 CONDUCTIVIDAD (σ)

Se empleó el método Turbidimeter 2100P HACH. La muestra sin filtración, se agitó y trasvasó en las celdas de vidrio, se colocó en el turbidímetro, se tapó y se midió el valor en unidades nefelométricas de turbidez, NTU (HACH, 1992, p. 410).

3.2.4.7 POTENCIAL HIDRÓGENO (pH)

El método implementado fue el Electrode Method 8156. La muestra se agitó y se separó una alícuota en un vaso de precipitación. Se sumergió el electrodo de medición en el agua y se registró el resultado indicado en la pantalla del equipo (HACH, 1992, p. 510).

3.2.4.8 HIERRO TOTAL (Fe_T)

Se usó el Método FerroVer aprobado por la EPA, se tomó una alícuota de la muestra en un vaso de precipitación y se pipeteó 25 mL de la muestra en una celda de vidrio y se añadió en el reactivo en polvo o ampolla AccueVac, se agitó y se dejó reposar por tres minutos, se pipeteó 25 mL de agua destilada en otra celda (blanco), se ajustó la longitud de onda a 510 nm. Se introdujeron el blanco y la muestra, cada uno en su momento, para determinar el hierro total. El resultado final se reportó en unidades de mg/L. (HACH, 1992, p. 206).

3.2.4.9 HIERRO FERROSO ($[Fe^{2+}]$)

Se usó el 1.10 Fenantrolina, se tomó una alícuota de la muestra en un vaso de precipitación y se pipeteó 25 mL de la muestra en una celda de vidrio y se añadió en el reactivo en polvo o ampolla AccueVac, se agitó y se dejó reposar por tres

minutos, se pipeteó 25 mL de agua destilada en otra celda (blanco), se ajustó la longitud de onda a 510 nm. Se introdujeron el blanco y la muestra, cada uno en su momento, para determinar el hierro total. El resultado final se reportó en unidades de mg/L. (HACH, 1992, p. 202).

3.2.4.10 HIERRO FÉRRICO (Fe^{2+})

La concentración de Hierro Férrico se calculó por diferencia como se muestra a continuación:

$$[Fe^{3+}] = [Fe_T] - [Fe^{2+}] \quad [2.15]$$

$[Fe^{3+}]$: Concentración de hierro férrico.

$[Fe_T]$: Concentración de hierro ferroso.

$[Fe^{2+}]$: Concentración de hierro total.

3.3 ESTUDIOS PRELIMINARES

3.3.1 PARÁMETROS INICIALES

La tabla 3.2 muestra los valores bases utilizados de pH, DQO y COT; el pH, de acuerdo al diagrama de Pourbaix.

TABLA 3.2: PARÁMETROS BASE PROMEDIO

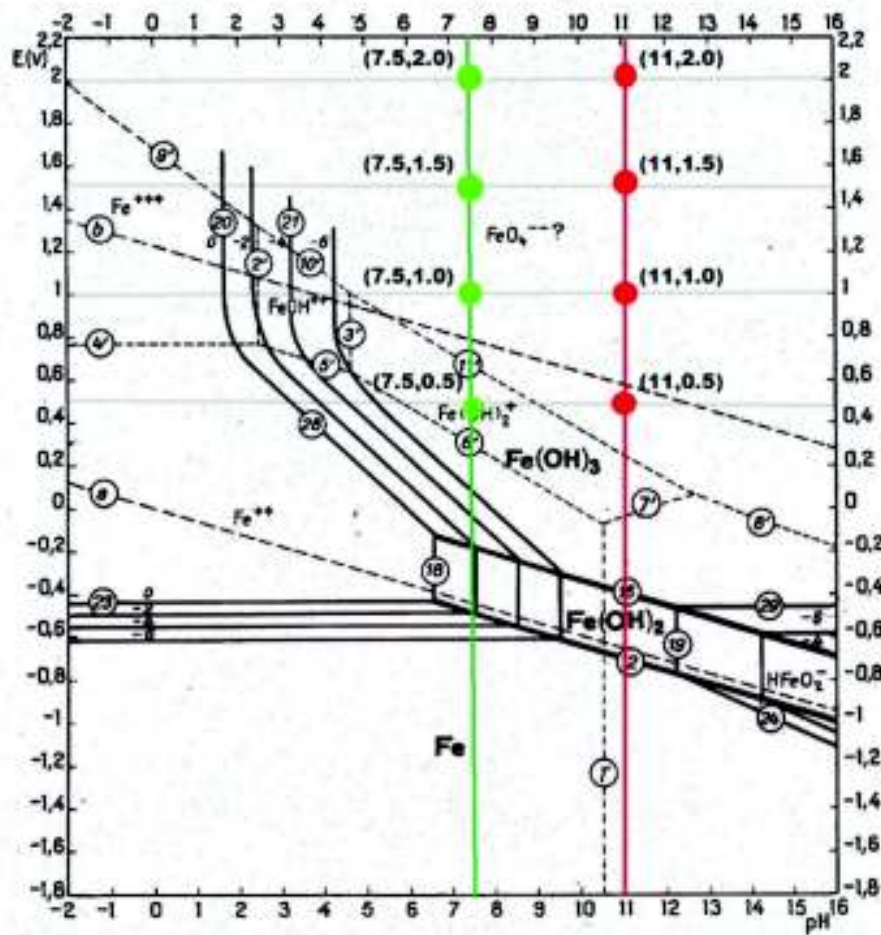
Agua Residual	pH _{prom}	DQO [mg/L]	COT [mg/L]
Industrial	11	1000	800
Municipal	7,5	417	90

Fuente: (Pilay, 2017)

3.3.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE ELECTRODO CON EL DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL HIERRO

Todos los ensayos se hicieron en base a la curva de Pourbaix, así que se tomó el pH promedio de los dos tipos de muestras de agua 11 y 7,5 para someterlos a los potenciales del ánodo de 0,5 V; 1,0 V; 1,5 V y 2,0 V.

FIGURA 3.6: DIAGRAMA DE POURBAIX PARA CADA POTENCIAL ESTUDIADO



Para medir y mantener el potencial del ánodo en los valores ya establecidos de potencial se utilizó un electrodo de referencia de Ag/Cl de potencial de electrodo referente al estándar de hidrógeno de 0,2 V (UNAM, 2009).

3.3.3 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CELDA

La producción de hierro del reactor se estableció como la masa por unidad de área útil de electrodos.

3.3.3.1 PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO

De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_{exp} = \frac{[Fe_T] * V_T}{\alpha A_u} \quad [2.16]$$

Donde, P_{exp} es la producción de hierro experimental en g/m^2 , $[Fe_T]$ es la concentración de hierro experimental, V_T es el volumen total, α es el número de electrodos como ánodo y A_u es el área útil.

3.3.3.2 PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO

La producción de Hierro teórico se mide con la masa de hierro producida según la Ley de Faraday dividida para el área total.

$$P_{teórica} = P_{Fe^{2+}} + P_{Fe^{3+}} = \frac{M * J * t}{n_{Fe^{2+}} * F} + \frac{M * J * t}{n_{Fe^{3+}} * F}$$

$$P_{teórica} = M * J * t * \left(\frac{1}{n_{Fe^{2+}}} + \frac{1}{n_{Fe^{3+}}} \right) = M * J * t * \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right)$$

$$P_{teórica} = \frac{5}{6} M * J * t \quad [2.17]$$

Donde, $P_{teórico}$ es la producción de hierro teórico en g/m^2 , m_{Fe_T} es lamasa de Hierro total, $n_{Fe^{3+}}$ es el número de electrones, M es la masa molar en g/mol , J es la densidad de corriente en A/m^2 , F es la constante de Faraday y t es el tiempo en segundos.

3.3.3.3 EFICIENCIA DE CELDA

Se analizó la eficiencia del proceso en función de la producción de hierro, por lo que se comparó el hierro total medido experimentalmente respecto al hierro calculado con la segunda ley de Faraday para la electrólisis presentada a continuación.

$$\eta = \frac{P_{exp}}{P_{teórico}} * 100 \quad [2.18]$$

3.4 CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA

La caracterización electroquímica se lleva a cabo mediante la medición de parámetros eléctricos correspondientes a la energía suministrada a la celda y los parámetros de calidad de agua, Tabla 3.3.

Los parámetros eléctricos que se midieron fueron: potencial de celda, intensidad y densidad de corriente; parámetros que describen el suministro de energía para mantener el potencial anódico constante en el proceso de electrocoagulación.

Los parámetros físicos fueron: temperatura, conductividad, turbidez y color real; el primero se lo seleccionó por verificar si la energía gastada es para calentar el agua, el segundo por ser necesario para el paso de corriente eléctrica en el agua, el tercero y el cuarto parámetro por registrar las remociones, ya que la turbidez y color es función de la cantidad de material suspendido y por ende del DQO que se espera remover.

Los parámetros químicos fueron pH, Oxígeno disuelto (OD), concentración de hierro ferroso y férrico, DQO y COT; el primero como punto de partida para relacionarlo con los diagramas de Pourbaix y verificar su efecto; el segundo para diagnóstico producción o consumo de oxígeno, el hierro ferroso y férrico se midió como parámetro central para ver su producción y relacionarla con la eficiencia de celda, ya que estos iones son los que actúan para la electrocoagulación, y los dos últimos para ver la remoción de carga contaminante presente en el agua.

TABLA 3.3: PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA

	TIPO	PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDADES
FUENTE DE PODER	ELÉCTRICOS	Potencial de celda	ΔE	V
		Intensidad de Corriente	I	A
		Densidad de Corriente	J	A/m ²
AGUA	FÍSICOS	Temperatura	T	°C
		Conductividad	σ	$\mu\text{S/cm}$ - mS/cm
		Turbidez	TUR	NTU
		Color Real	CR	Pt-Co
	QUÍMICOS	Potencial Hidrógeno	pH	-
		Concentración de Hierro Ferroso	[Fe ²⁺]	mg/L
		Concentración de Hierro Férrico	[Fe ³⁺]	mg/L
		Concentración de Hierro Total	[Fe _T]	mg/L
		Oxígeno Disuelto	OD	ppm
		Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L
		Carbono Orgánico Total	COT	mg/L

Fuente: (Pilay, 2017)

Para el ARI se hicieron tres repeticiones y para el ARD se hicieron dos repeticiones de los ensayos, los cuales se enfocaron en dos etapas para cada agua residual estudiada que se muestran a continuación (Tabla 3.4):

- Optimización con agua potable

- Optimización con agua real

En total tuvieron lugar 40 ensayos, 24 para el ARI y 16 para el ARD (Ver Anexo II) distribuidos como se muestra en la Tabla 3.4.

TABLA 3.4: DISTRIBUCIÓN DE ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN

TIPO DE AGUA RESIDUAL	SIMBOLOGÍA DE POTENCIAL ANÓDICO E	E(V)	N° DE ENSAYOS	
			OPTIMIZACIÓN CON AGUA POTABLE	CARACTERIZACIÓN CON AGUA REAL
ARI	E ₁	0,5	1	13
			2	14
			3	15
	E ₂	1,0	4	16
			5	17
			6	18
	E ₃	1,5	7	19
			8	20
			9	21
	E ₄	2,0	10	22
			11	23
			12	24
ARD	E ₁	0,5	25	33
			26	34
	E ₂	1,0	27	35
			28	36
	E ₃	1,5	29	37
			30	38
	E ₄	2,0	31	39
			32	40

3.4.1 OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA POTABLE

En esta etapa, se eligió, para el análisis, un ensayo por cada E, en función de la mayor eficiencia de celda en los tiempos de 30, 60 y 120 min; con potencial de

ánodo constante E midiendo los parámetros eléctricos y del agua, exceptuando DQO y COT, con agua potable modificado al pH de agua residual a estudiar, se toma como punto de partida de datos para ser verificados en la siguiente etapa.

3.4.2 OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANCO AGUA REAL

El objetivo de esta etapa es la remoción de parámetros de calidad del agua tales como DQO y COT, por lo que de las repeticiones se eligieron los ensayos con las más altas remociones a cada E , además de la determinación de la eficiencia de celda, se midieron todos los parámetros haciendo funcionar el reactor de electrocoagulación con las dos aguas residuales objetos de estudio, el ARI y el ARD.

3.5 ANÁLISIS DE COSTOS

Se tomó dos puntos en consideración, el costo de instalación del sistema y el costo de operación del tratamiento.

El costo de la instalación corresponde a la adquisición del material de construcción del reactor de electrocoagulación y su sistema eléctrico. Este costo se obtuvo sobre la base de los resultados del dimensionamiento del reactor.

Se tomó en cuenta el costo de operación del sistema por consumo de energía, teniendo en cuenta la tarifa de USD 0,15 y el costo de reemplazo del ánodo de sacrificio.

El volumen generado por la fábrica de algodón es de 5 m³ por semana, así que se establece un proceso por semana. Con respecto al ARD como el presente trabajo se toma tipo batch se va a calcular el volumen, considerando un caudal del río en el punto de toma de muestra de 120 L/s y el tiempo de la remoción de contaminantes.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

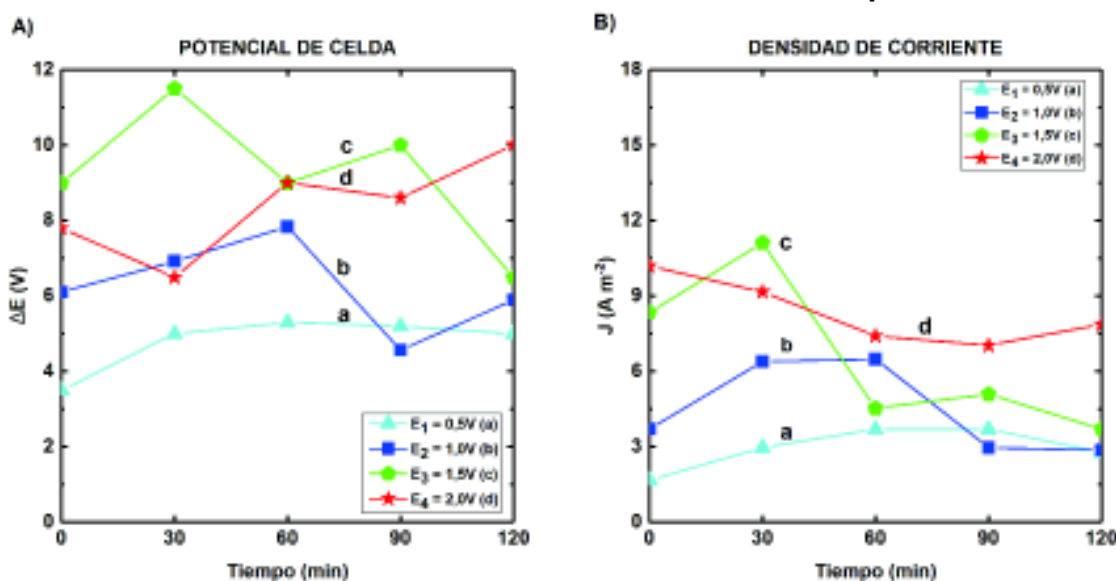
4.1 CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

4.1.1 OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA CON AGUA POTABLE A pH = 11

4.1.1.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE

La Fig. 4.1 muestra los valores de los parámetros eléctricos suministrados por la fuente de poder.

FIGURA 4.1: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11



La Fig. 4.1 A presenta el potencial de celda variado respecto al tiempo, donde se visualiza que a mayor potencial anódico aplicado se obtiene mayor ΔE exceptuando el $E_4 = 2,0$ V (curva “d”) que se mantiene entre las curvas $E_2 = 1,0$ V y $E_3 = 1,5$ V. En la curva “a”, ΔE se mantiene constante a partir de 30 min esto se debe a que el potencial aplicado es muy pequeño y no existe un cambio detectable en el agua con las reacciones involucradas en la electrocoagulación. Las curvas “b”, “c” y “d”

tienen variaciones en la resistencia del electrolito lo cual nos da indicios de que se está produciendo las etapas de la electrocoagulación como son: la formación de los iones de hierro con la desestabilización de las partículas en suspensión y la formación de flóculos (incremento de ΔE), y la sedimentación posterior (disminución de ΔE). La curva "b" tiene un incremento hasta los 60 min, decae hasta los 90 min y tiene un nuevo incremento hasta las 2 horas. El menor valor se lo tiene a los 90 min lo que se puede vincular al momento que se tendría la remoción de contaminantes. La curva "c" muestra los valores más altos donde se tiene un incremento de 0 a 30 min y de 60 a 90 min; y disminuciones de 30 a 60 min y de 90 a 120 min; tal comportamiento se explicaría de que las reacciones van pasando rápido y a diferencia de la curva "b" que se podrían tener remociones de contaminantes a dos tiempos diferentes. La curva "d" muestra bastantes variaciones respecto a los otros potenciales anódicos teniendo un descenso en los primeros 30 min y un incremento casi lineal hasta acabado el proceso, lo que nos indicaría que en este tiempo se está generando hierro y se está aglomerando las partículas, pero probablemente no dejaría precipitar los flóculos.

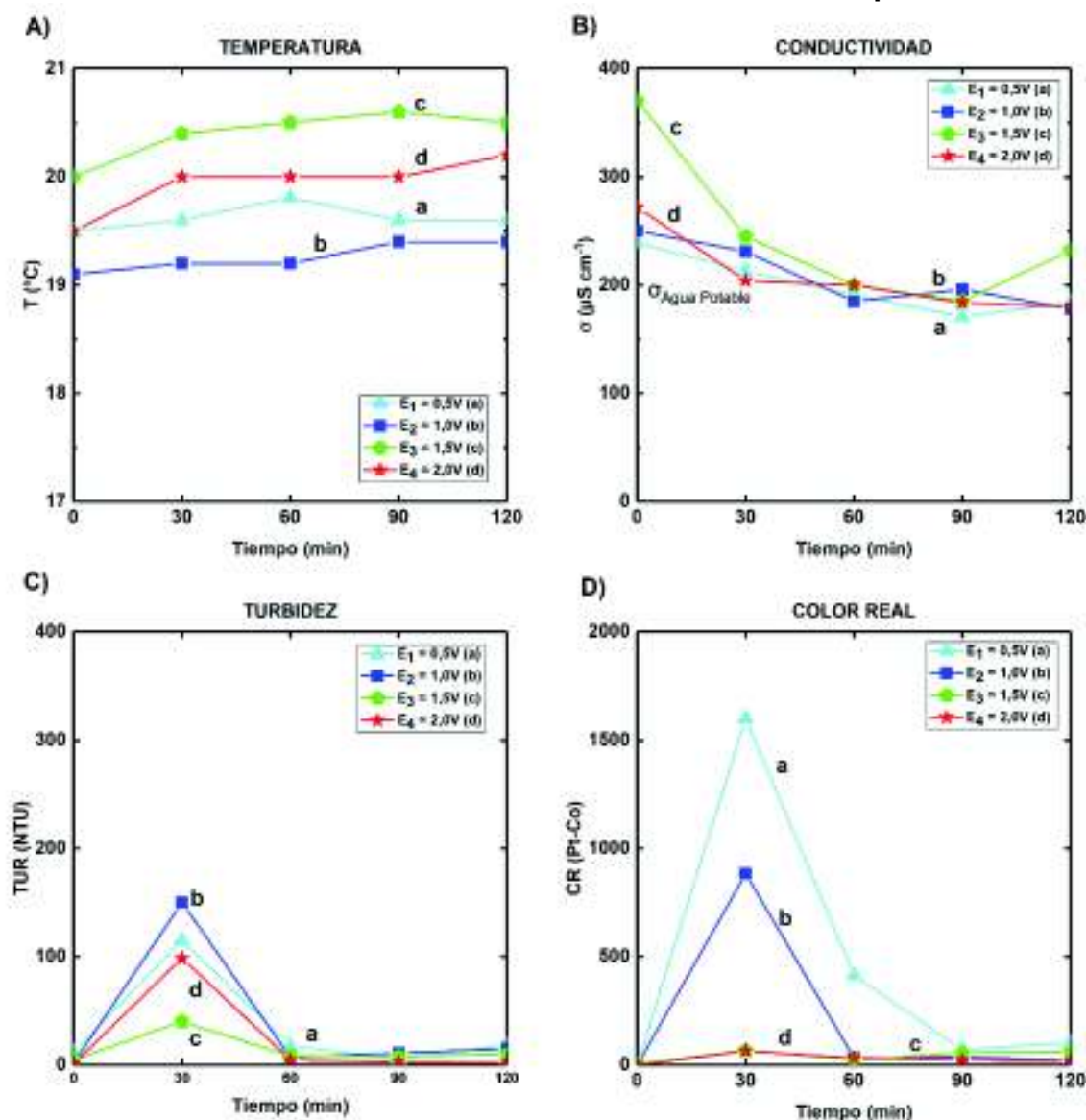
La densidad de corriente es de los más importantes parámetros en un proceso electrolítico ya que afecta el crecimiento de los flóculos debido a que controla la velocidad de reacción dentro del sistema y se muestra en la Fig. 4.1 B. A medida que aumenta el potencial anódico aumenta J , exceptuando el $E_3 = 1,5 \text{ V}$ (curva "c") ya que varía hasta por debajo de los demás potenciales, diferenciándose así del ΔE . La curva "a" y "b", son parecidas a las del potencial de celda, la primera manteniéndose constante y la segunda teniendo el mínimo valor pasado los 90 min, lo que nos indicaría que al potencial más bajo no suceden las reacciones esperadas en la electrocoagulación y para el siguiente potencial existiría la remoción de contaminantes a los 90 min. La curva "c" aumenta hasta los 30 min luego decae hasta los 60 min y se mantiene relativamente constante hasta acabado el proceso, lo que nos indicaría una remoción pasado los 90 min. La curva "d" tiene una tendencia lineal con pendiente negativa, lo que nos indicaría una proporcionalidad indirecta con el ΔE , por lo tanto, la resistencia va aumentando a medida avanza el proceso, lo que se explicaría de acuerdo a que no pasa de la primera etapa de la electrocoagulación, o sea genera y aglomera las especies pero no precipitan.

Se deduce que el sistema no necesita una aplicación de corriente eléctrica constante sino variable, en este caso medidos con el ΔE y la J . Los potenciales $E_3 = 1,0\text{ V}$ y $E_3 = 1,5\text{ V}$ son en los cuales se detecta la variación necesaria para que se den las etapas de la electrocoagulación.

4.1.1.2 PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA

La Fig. 4.2 expresa los parámetros físicos medidos en el proceso electrolítico.

FIGURA 4.2: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11



De acuerdo con la Fig. 4.2 A, la temperatura no varía considerablemente con el tiempo para cada potencial aplicado, lo que indica que no hay un gasto energético apreciable en calentar el agua, mientras se mantenga el potencial constante durante el tiempo estudiado.

La variación de la conductividad se muestra en Fig. 4.2 B en función del tiempo, en la cual se observa que siempre tiende a disminuir teniendo sus mínimos valores al minuto 90, este comportamiento se explica ya que en el proceso electrolítico se consumen iones disueltos para hacer los complejos necesarios para la coagulación.

La turbidez es el grado de transparencia perdido por partículas suspendidas mientras que el color real indica la presencia de material disuelto en el agua (muestra filtrada) que hace que el agua pierda su transparencia, las cuales de acuerdo con los ensayos realizados se muestran en las gráficas C y D resultando en tendencias similares a medida que se aumenta el potencial.

En todos los potenciales aplicados, para ambos parámetros se presentan aumentos de 0 a 30 min y disminución entre 30 a 60 min. El aumento lo hemos asociado a la generación de iones de hierro en el ánodo que aumentan la turbidez y el color amarillo de la solución; en la cual se intensifica dicha coloración hasta los 30 min, luego de este tiempo la solución se va aclarando (Ver Anexo III), lo que sugiere que se está dando la precipitación de los complejos formados. Los potenciales anódicos menores tienen mayor turbidez y color real; y los potenciales anódicos más altos tienen valores más bajos de turbidez y color real, asociado a la velocidad de reacción.

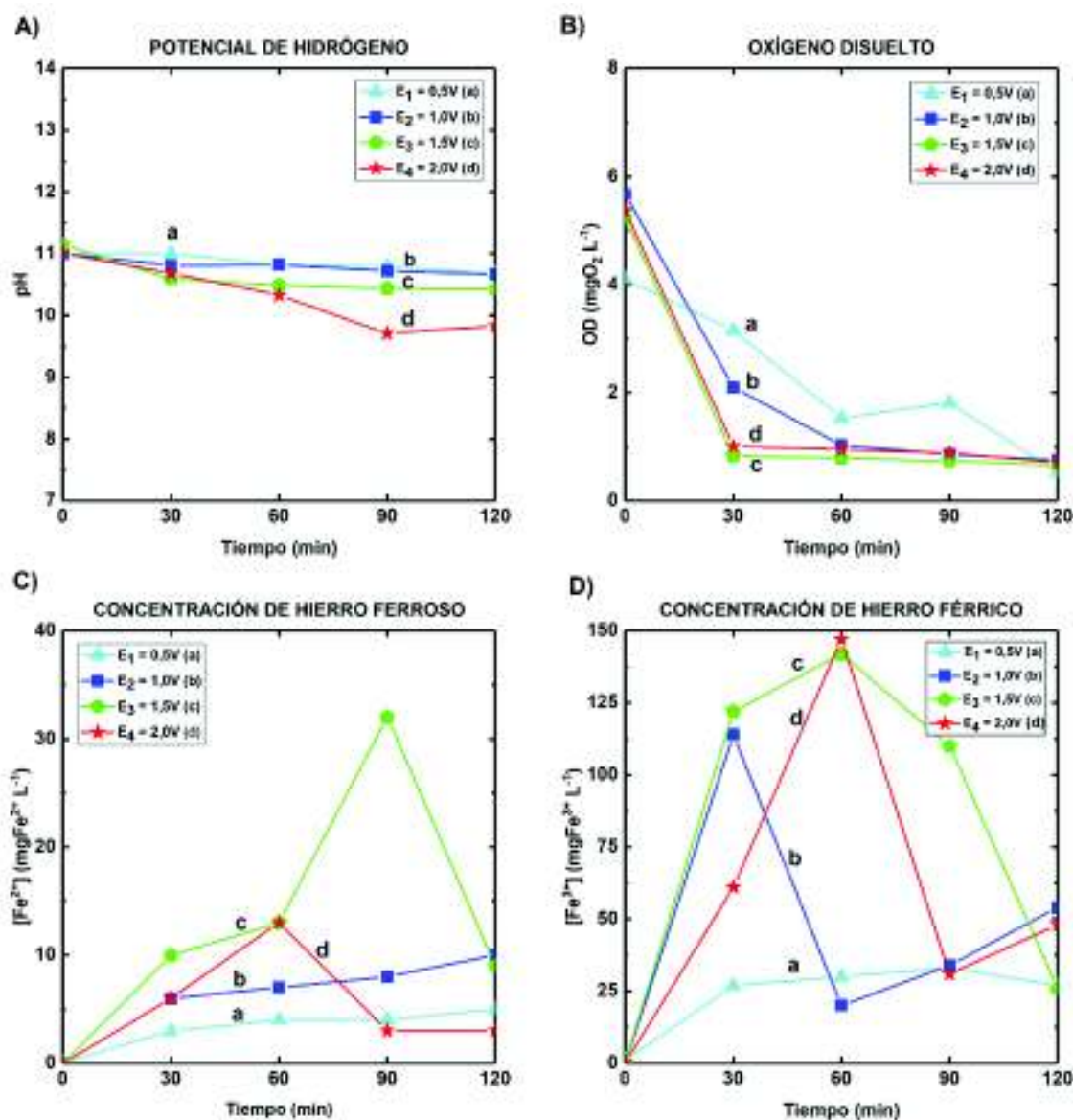
A menores potenciales anódicos mayor es la turbidez y el color real, lo que nos indicaría que son más lentas las reacciones y para los potenciales anódicos altos, menores son los valores de estos parámetros indicándonos que la clarificación se hace más rápido y comienzan a estabilizarse al minuto 60.

Se observa que a minuto 30 de mayor valor de turbidez y color real coincide con los mayores potenciales de celda y densidades de corriente, lo que se constata con la etapa de generación de hierro y formación de complejos.

4.1.1.3 PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA

La evolución de los parámetros químicos en función del tiempo de acuerdo al potencial aplicado se muestra en la Fig. 4.3.

FIGURA 4.3: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11



Para todos los potenciales aplicados el pH disminuyó muy poco excepto para la curva "d" (Fig. 4.3 A) en la cual disminuyó un valor de pH, este comportamiento lo hemos asociados a la formación de los hidroxicomplejos que consumen OH⁻ y a la pasivación del ánodo.

El OD disminuye con el aumento del potencial aplicado (Fig. 4.3 B), teniendo los mínimos valores entre los 30 y 60 min para luego estabilizarse en 1 mg/L. Las curvas “a” y “b” no disminuyen drásticamente como las curvas “c” y “d”, que ya al minuto 30, por lo tanto, a mayores potenciales el consumo es mucho más rápido, lo que concuerda con la velocidad de reacción y la densidad de corriente. Este comportamiento sugiere que el oxígeno se consume por oxidación de la materia orgánica y que existe una despreciable producción de oxígeno en el cátodo, relacionándolo con la Fig. 4.2 C y 4.2 D se ve que al minuto 30 del decaimiento del OD hay la mayor turbidez y color real, lo que nos indicaría que el OD está ayudando a la formación de óxidos de hierro.

Las concentraciones de hierro ferroso en el agua (Fig. 4.3 C), a valores bajos de potencial aumenta hasta aproximadamente 10 mg/L, curva “a” y “b”, mientras que a los potenciales más altos hay variaciones, para el potencial $E_3 = 1,5 \text{ V}$ (curva “c”) se ve un gran aumento de hasta 30 mg/L en el minuto 90, lo que asociamos a la mayor generación de aglomerados con el hierro ferroso.

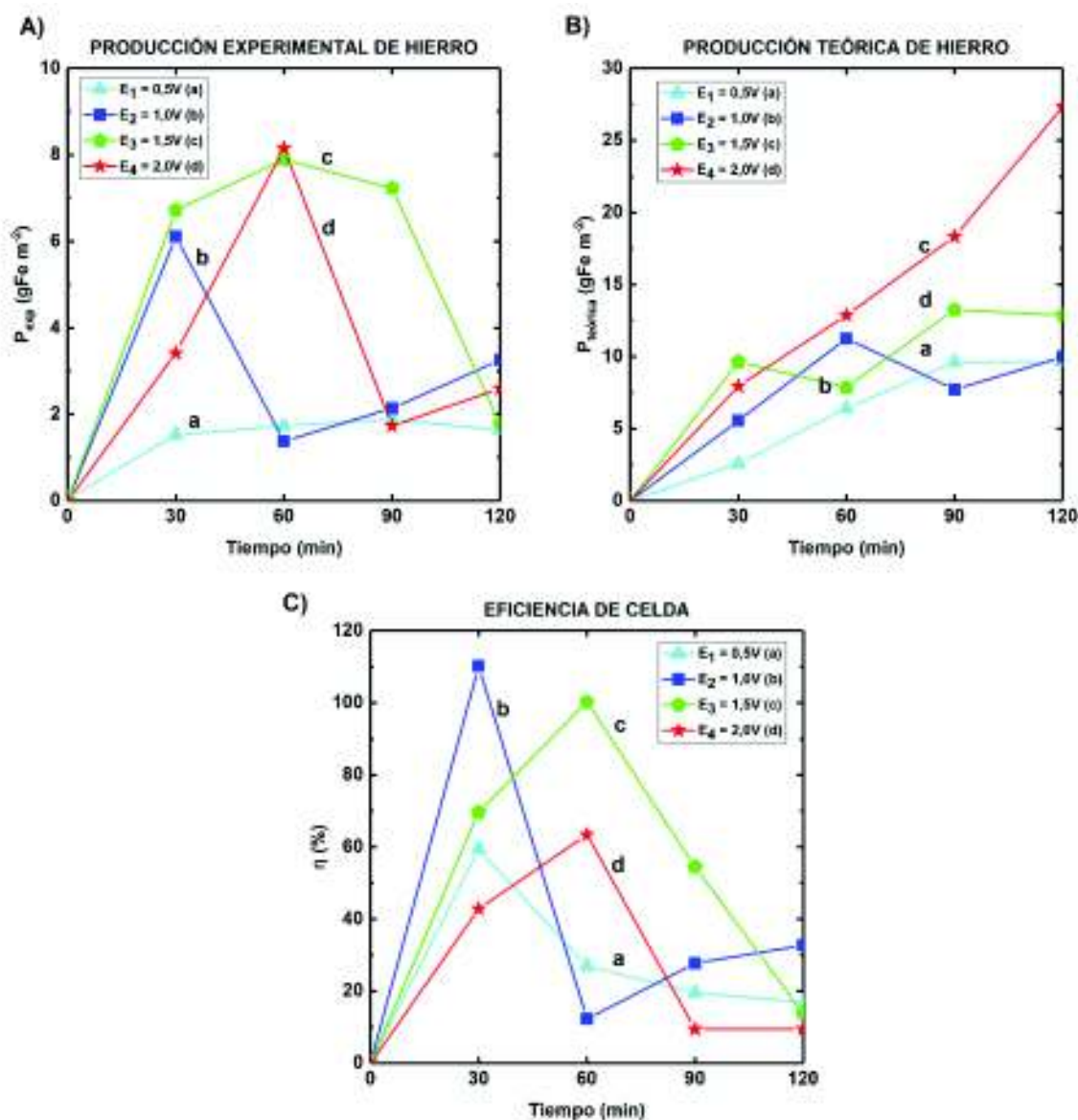
El contenido de hierro ferroso presente en el agua es bajo comparado con el hierro férrico, Fig. 4.3 B y C. La máxima concentración fue de 30 mg/L, mientras que para la del hierro férrico el valor es de 150 mg/L, Fig. 4.3 D. De acuerdo al diagrama de Pourbaix, a $\text{pH} = 11$, el hierro ferroso es la especie menos predominante; por lo tanto, el agente que actúa principalmente en la electrocoagulación es el hierro férrico. El hierro férrico para E_1 (curva a) presenta un incremento mínimo en el proceso; para $E_2 = 1,0 \text{ V}$ (curva b) tiene un punto máximo a los 30 min y luego decae a los 60 min hasta estabilizarse al final del proceso; para $E_3 = 1,5 \text{ V}$ (curva c) se mantiene en valores máximos entre los 30 min y 90 min; y para $E_4 = 2,0 \text{ V}$ (curva d) presenta un ascenso hasta su punto máximo a los 60 min para luego decaer hasta las 2 horas. Este comportamiento lo hemos asociado a que el hierro generado por el ánodo se inicia y esparce en el agua llegando a sus valores máximos de concentración, dando paso a la coagulación, con la aglomeración de las partículas suspendidas y precipitando los flóculos, provocando que la concentración de hierro en el agua disminuya.

Esto puede suceder en diferentes tiempos según el potencial anódico suministrado, y en este estudio sugerimos que la clarificación del agua real próxima a estudiar puede ocurrir a los tres potenciales anódicos más altos, mientras que para el potencial de 0,5 V se ve un aumento leve que no permitiría la coagulación.

4.1.1.4 EFICIENCIA DE CELDA

La Fig. 4.4 muestra la producción experimental y teórica del hierro, y la eficiencia de celda.

FIGURA 4.4: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 11



Existe una similitud en la tendencia de las gráficas de hierro férrico de la Fig. 4.3 D y la producción de hierro experimental de la Fig. 4.4 A, lo que es un reflejo de que el hierro férrico es el principal agente en el proceso, que como se explicó anteriormente es debido a la generación y posterior precipitación del hierro en iones y luego en los flóculos.

Las producciones teóricas de hierro para todos los potenciales anódicos tienen una tendencia lineal con pendiente positiva y a medida que aumenta el potencial anódico aumenta la producción, ya que no se toma en cuenta las reacciones que tiene el hierro.

La Fig. 4.4 C muestra la eficiencia de la celda electrolítica que concuerda con los máximos y mínimos valores a los mismos tiempos que se muestran en la gráfica A de la producción de hierro. Para los potenciales $E_2 = 1,0 \text{ V}$ y $E_2 = 1,5 \text{ V}$ de la curva "b" y "c" respectivamente, se tienen eficiencias del 100%, lo que indica que coinciden los resultados experimentales con los descritos teóricamente, y se puede explicar los valores que pasan del 100% como una posible oxidación de las placas de hierro mientras están sumergidas en el agua.

Las mejores eficiencias de celda se dan a los potenciales $E_2 = 1,0 \text{ V}$ y $E_2 = 1,5 \text{ V}$, lo que nos indica que estos son los potenciales anódicos óptimos en los ensayos con el agua potable a $\text{pH} = 11$, simulando el agua real industrial que se estudia en la siguiente etapa.

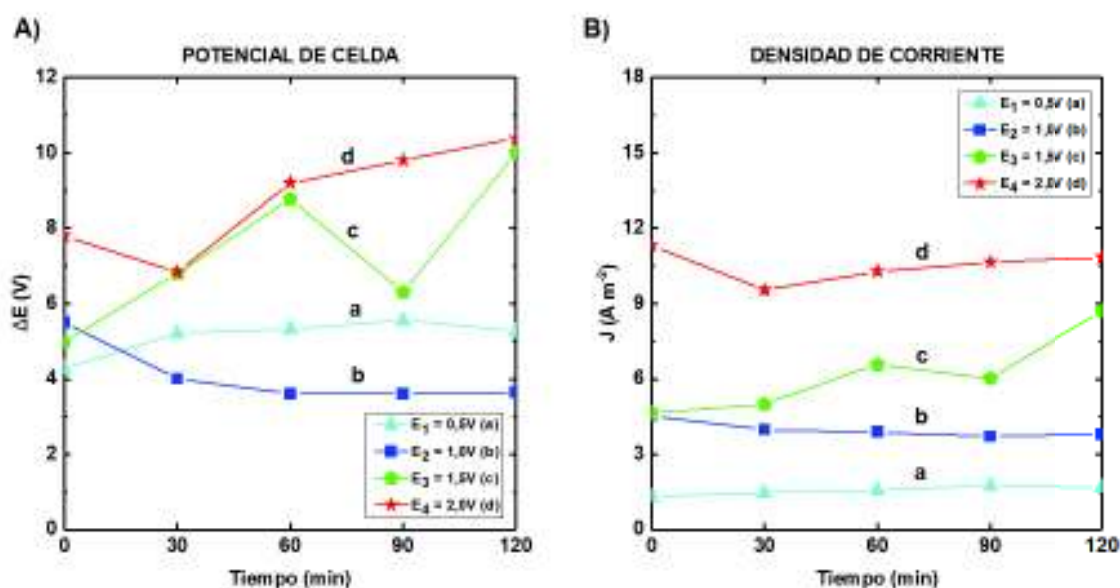
La eficiencia de celda tiene variaciones a medida que se da el proceso de electrocoagulación, lo que podemos explicar debido a que está en función de la concentración de hierro en el agua que a igual manera varía, ya que el hierro tiene un ciclo en el proceso electrolítico de este estudio, pasa de la placa al agua en forma de iones, luego aglomera las partículas suspendidas y finalmente precipita; y este comportamiento lo hace porque la intensidad de corriente no es constante, ya que este estudio se proyecta a la optimización de estos procesos sin desperdicio de energía.

4.1.2 OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

4.1.2.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE

La Fig. 4.5 muestra el potencial de celda y la densidad de corriente respecto al tiempo, que aumentan a medida que aumenta el potencial anódico aplicado.

FIGURA 4.5: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL



En la Fig. 4.5 A se observa que en las curvas “a” y “b”, ΔE se mantiene constante lo que nos indica que no hay una variación importante durante el proceso. La curva “c” tiene un aumento hasta los 60 min, luego decae al minuto 90 y asciende de nuevo hasta el final del proceso, contrastando con la etapa anterior, se puede decir que existe una variación en el agua del reactor que se deberían a las etapas del proceso de electrocoagulación. La curva “d” tiene una disminución en los primeros 30 minutos, y luego tiene una tendencia lineal con pendiente positiva hasta el final del proceso, lo que nos indica que la celda siempre requiere más energía a medida que transcurre el tiempo.

La densidad de corriente presenta variaciones (Fig. 4.5 B); las curvas “a”, “b” y “d” permanecen relativamente constantes con valores de alrededor de 1,5; 4,5 y 11 A/m²; mientras que la curva “c” de $E_3 = 1,5$ V muestra un aumento representativo del duplo de la inicial y una tendencia parecida al ΔE para este potencial anódico, lo que nos daría indicios de que en este valor se están dando las etapas involucradas en la electrocoagulación.

El potencial de celda y la densidad de corriente para el potencial anódico de 2,0 V refleja un aumento de la cinética de reacción de producción del hierro lo que no permitiría que se den las demás etapas involucradas en la electrocoagulación; a valores bajos de potencial anódico tenemos poca generación de hierro lo que no da paso a las etapas de coagulación, y a niveles altos se da más fácilmente.

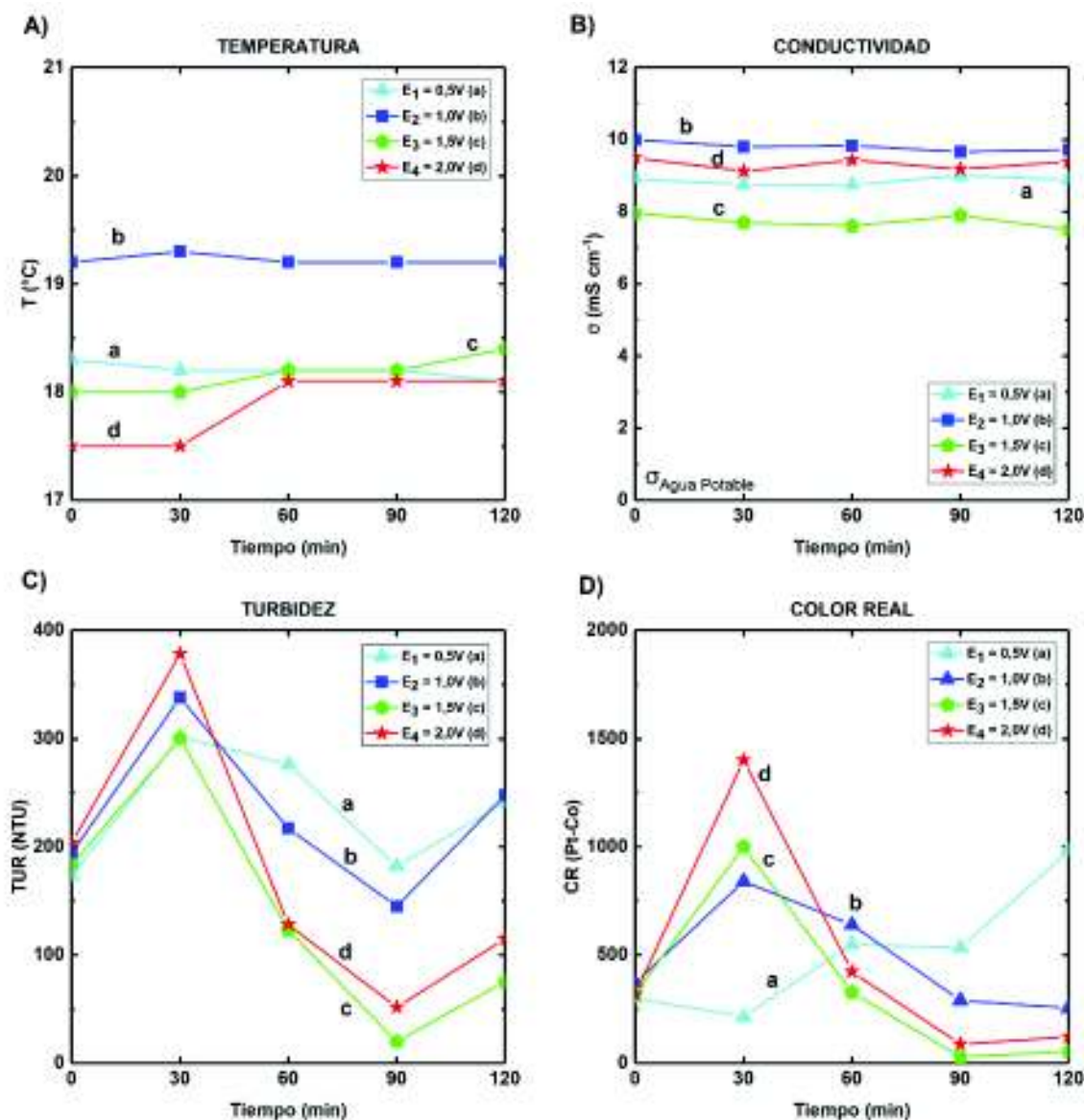
4.1.2.2 PARÁMETROS FÍSICOS DE AGUA

La Fig. 4.6 muestra que la temperatura se mantiene constante para los tres potenciales menores y para el mayor potencial tiene un leve aumento de 0,5 °C (Fig. 4.6 B), lo que nos indica que no se gasta energía en calentar el agua.

El agua residual industrial tiene una conductividad muy alta respecto del agua potable de 10 mS/cm, cercana al agua de mar (Fig. 4.6 B), lo que favorece la circulación de corriente eléctrica en el electrolito. En los ensayos realizados con el agua residual industrial se mantienen muy constantes, diferenciándose con el agua potable que sí se notaba su disminución.

La turbidez muestra claramente cómo se van dando las etapas de la electrocoagulación (Fig. 4.6 C), iniciado el proceso hasta el minuto 30 hay un aumento debido a la formación de especies químicas por la generación de iones de hierro; del minuto 30 al 90 hay un decaimiento hasta llegar a la máxima remoción explicado por la aglomeración de partículas hasta su precipitación; pasado el minuto 90 se ve un aumento leve lo que nos indica que 90 min demora el sistema en la remoción y pasado este tiempo se reiniciaría el proceso y dependería mucho de la pasivación del ánodo. Se reporta las mayores remociones de turbidez para los potenciales $E_3 = 1,5$ V y $E_4 = 2,0$ V en las curvas “c” y “d” respectivamente.

FIGURA 4.6: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL



El color real presenta una tendencia parecida a la de la turbidez (Fig. 4.6 D) excepto por el potencial de $E_1 = 0,5 \text{ V}$ (curva "a") en la que el color aumenta. El aumento de la coloración hasta los 30 min de este parámetro se explica por la misma razón que la turbidez, con el aumento de las sustancias disueltas del agua y la decoloración del minuto 30 al 90 se explica con la reacción de esas partículas disueltas para aglomerarse y precipitar por el aumento de la densidad; teniendo las mayores remociones de color real a los potenciales $E_3 = 1,5 \text{ V}$ y $E_4 = 2,0 \text{ V}$, al igual que en la turbidez.

4.1.2.3 PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA

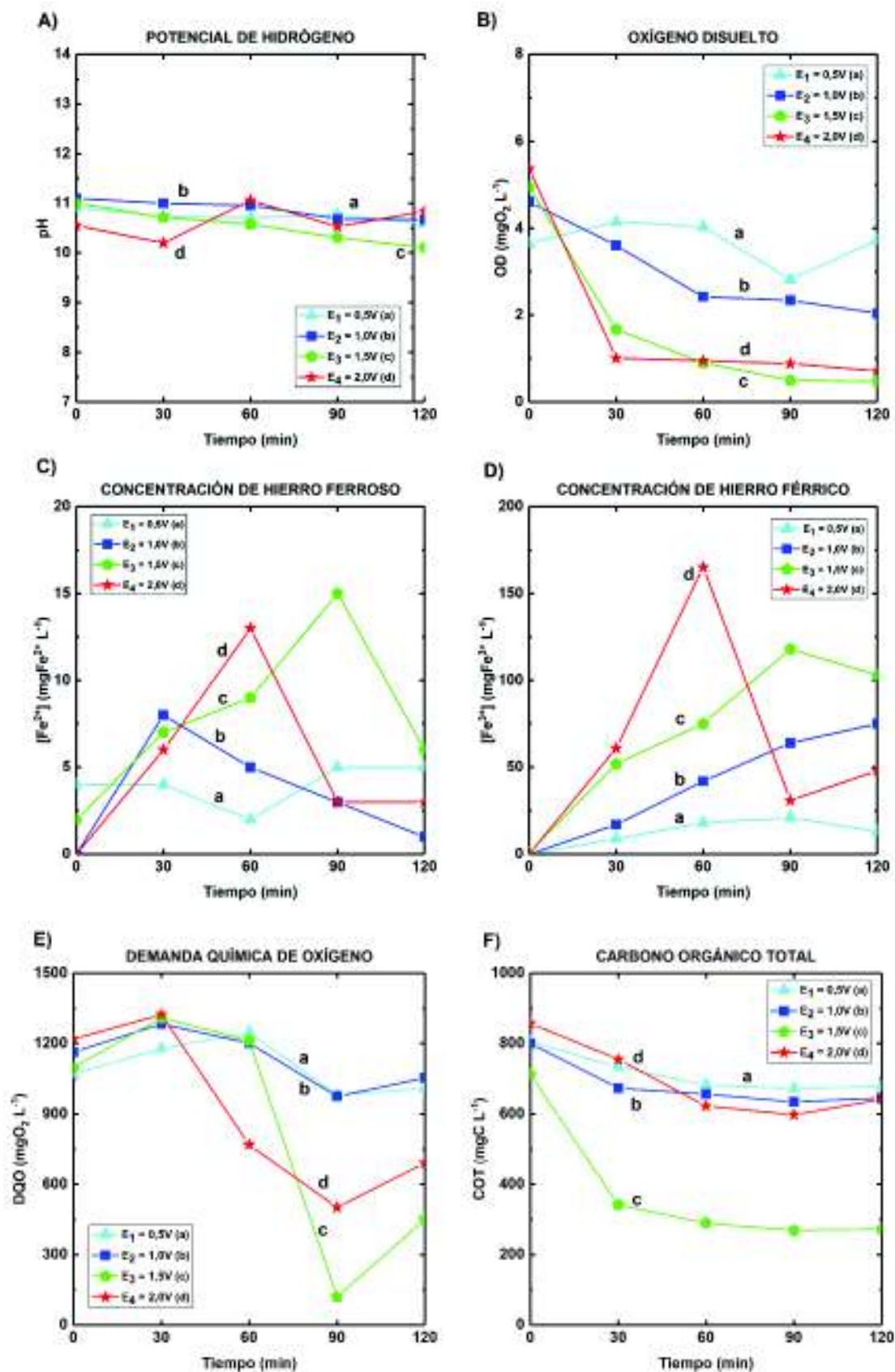
La tendencia de los parámetros químicos en la celda con el agua industrial es muy parecida a la optimización con agua potable (Fig. 4.7), el pH tiene una disminución lineal (Fig. 4.7 A) de máximo un valor de pH a excepción del potencial $E_4 = 2,0$ V, donde tiene más variaciones respecto al tiempo hasta llegar al mismo valor inicial.

El OD disminuye para todos los potenciales (Fig. 4.7 B) al igual que en la optimización con agua potable. Para el potencial $E_1 = 0,5$ V disminuye 1 mg/L al minuto 90 y luego aumenta levemente; para el $E_2 = 1,0$ V disminuye a la mitad. Para los potenciales altos se ve una disminución drástica al minuto 30 y se estabiliza. Como mencionamos en la etapa anterior, este comportamiento se debe a que el OD oxida la materia orgánica y ayuda a la remoción, para los dos potenciales altos se consume mayor oxígeno como se esperaba y al minuto 30 es cuando el OD ayuda a formar los aglomerados.

La concentración de hierro ferroso es en promedio 10 veces menor a la del hierro férrico como se muestra en la Fig. 4.7 C y 4.7 D. teniendo sus mayores concentraciones a 1,5 V y 2,0 V, en las curvas “c” y “d” respectivamente, eso nos indica que de acuerdo a los diagramas de Pourbaix el hierro férrico es el predominante como ya se determinó en la etapa anterior.

La concentración de hierro férrico (Fig. 4.7 D) presenta un aumento muy leve para $E_1 = 0,5$ V (curva “a”), para $E_2 = 1,0$ V (curva “b”) presenta una línea con pendiente positiva que llega al valor de 75 mg/L. Para $E_3 = 1,5$ V (curva “c”) aumenta hasta el minuto 90 en más de 100 mg/L y disminuye hasta las 2 horas. Para $E_4 = 2,0$ V (curva “d”) presenta un aumento hasta los 60 min, decae hasta el minuto 90 y tiene un aumento leve hasta el final del proceso. Existe menos variaciones en el tiempo, que, en la optimización con agua potable, lo que puede ser consecuencia de la mayor conductividad del agua residual que permite la transferencia de energía eléctrica más eficaz. Registramos las mayores concentraciones de iones de hierro para $E_3 = 1,5$ V y $E_4 = 2,0$ V.

FIGURA 4.7: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRICO, DQO Y COT EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL



Las gráficas de DQO tienen una tendencia similar a la de la turbidez lo cual concuerda con el proceso de remoción de carga contaminante, aumentan levemente en los inicios del proceso hasta alrededor de los 60 min y decaen drásticamente a los 90 min y luego tiene un ascenso lo que se puede explicar cómo una reiniciación del proceso por la reactivación de los electrodos (Fig. 4.7 E). El aumento en el inicio del proceso se puede asociar a la producción de peróxido de hidrógeno que se produce en el cátodo por la reducción del oxígeno.

Se logró un valor de DQO más bajo que lo indicado por la norma (350 mg/L), con valores de alrededor de 150 mg/L, para $E_3 = 1,5$ V (curva "c" Fig. 4.7 E) a los 90 min. El DQO no llega a norma para los demás potenciales anódicos, el valor pasa los 500 mg/L para el potencial de $E_4 = 2,0$ V el cual es el siguiente valor q llega cercano a norma.

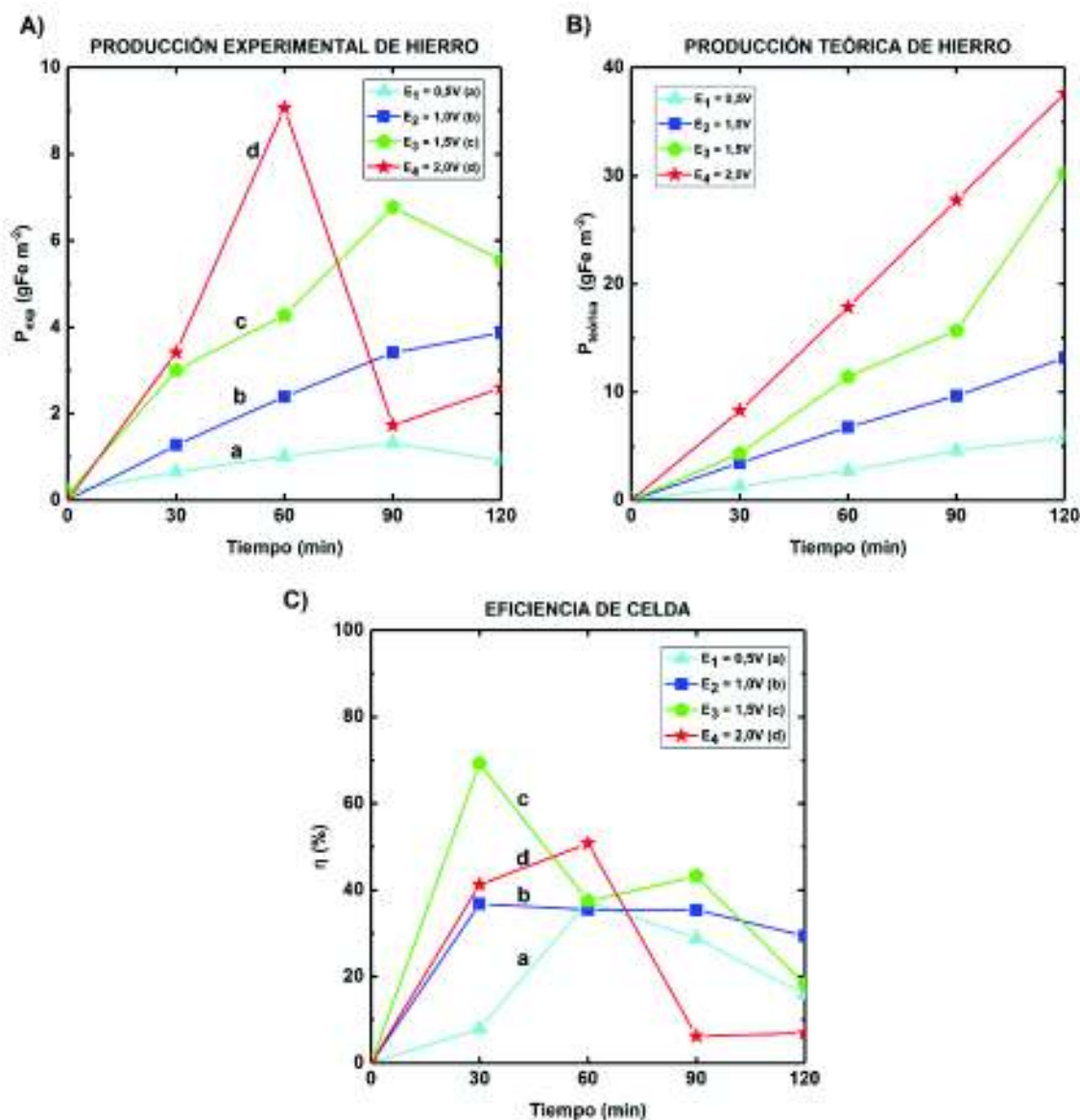
La Fig. 4.7 F muestra la variación de los valores del COT en función al tiempo de tratamiento. En el gráfico se observa que el mayor decaimiento de los valores se obtiene a potencial anódico de $E_3 = 1,5$ V, lo que concuerda con la máxima remoción de DQO; concluyendo así que la optimización del sistema de electrocoagulación para el agua residual industrial es a este potencial anódico.

4.1.2.4 EFICIENCIA DE CELDA

Las curvas de producción de hierro experimental y teórico son más uniformes que las de la optimización con agua potable Fig. 4.8, esto se puede explicar porque el agua real está contaminada entonces hay más material suspendido a remover.

La producción de hierro experimental tiene una particularidad al potencial de 2,0 V (Fig. 4.8 A curva "d") que al minuto 60 alcanza su máximo valor, para luego disminuir drásticamente en el minuto 90 y aumentar levemente hasta las dos horas del proceso, lo que se puede deber a que el proceso electrolítico se da muy rápidamente.

FIGURA 4.8: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL



La producción de hierro teórico (Fig. 4.8 B) incrementa, mientras que la producción de hierro experimental (Fig. 4.8 A) tiene variaciones similares a las curvas de concentración de hierro férrico, este comportamiento se debe a que el hierro férrico es el principal agente coagulante. El hierro calculado teóricamente para los tres primeros potenciales presenta tendencias parecidas a las curvas de hierro experimental lo que indica la proporcionalidad directa con los potenciales en concordancia con la Ley de Faraday, es decir que al aumentar el potencial anódico aumenta la producción de hierro.

La eficiencia de celda a todos los potenciales es menor que en la optimización con agua potable, pero sigue siendo variante (Fig. 4.8 C), teniendo las mayores eficiencias entre los 30 y 60 min. A los potenciales de $E_1 = 0,5 \text{ V}$ y $E_2 = 1,0 \text{ V}$ se tiene un máximo valor de 40%, mientras que para los potenciales más altos de $E_1 = 1,5 \text{ V}$ y $E_2 = 2,0 \text{ V}$ se tiene eficiencias de celda máximas de 70% y 50%, respectivamente. Este comportamiento se debe a la variación en la concentración de hierro que muestra las etapas de la electrocoagulación de acuerdo a su producción, aglomeración y precipitación.

La optimización del proceso de electrocoagulación de la celda electrolítica para esta agua residual industrial se da a $E_1 = 1,5 \text{ V}$, con la mayor eficiencia de celda y los menores valores de carga contaminante en función de DQO, COT, Turbidez y el Color Real.

4.2 CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

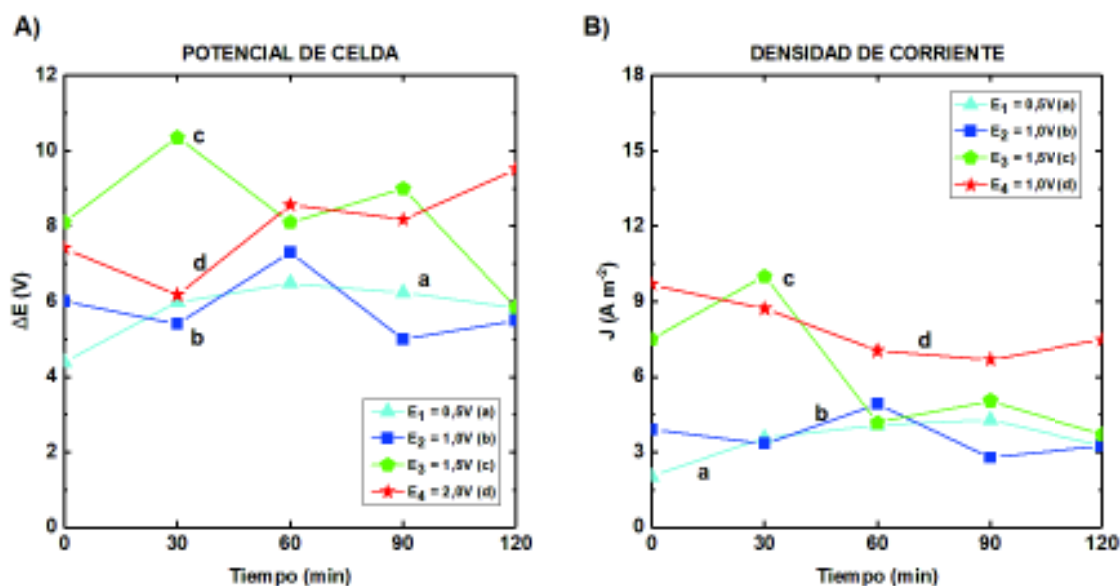
4.2.1 OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA POTABLE A $\text{pH} = 7,5$

4.2.1.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE

El potencial de celda es más bajo que en la optimización con agua potable a $\text{pH} = 11$ como muestra la Fig. 4.9 A, lo que nos indica que se requiere menos energía para llegar a los potenciales anódicos analizados, con la diferencia de que sus valores son más variantes a medida que pasa el tiempo. Para los $E_1 = 0,5 \text{ V}$ y $E_2 = 1,0 \text{ V}$ (curvas "a" y "b") se mantiene entre 5 V y 8 V; para los $E_3 = 1,5 \text{ V}$ y $E_4 = 2,0 \text{ V}$ (curvas "c" y "d") varían entre los valores de 6 V y 11 V.

La densidad de corriente para $E_1 = 0,5 \text{ V}$ y $E_2 = 1,0 \text{ V}$ son relativamente constantes a potencial $E_3 = 1,5 \text{ V}$ se tiene un ascenso a los 30 min, un decaimiento hasta los 60 min y luego se estabiliza; el potencial más alto presenta una tendencia lineal con pendiente negativa.

FIGURA 4.9: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5

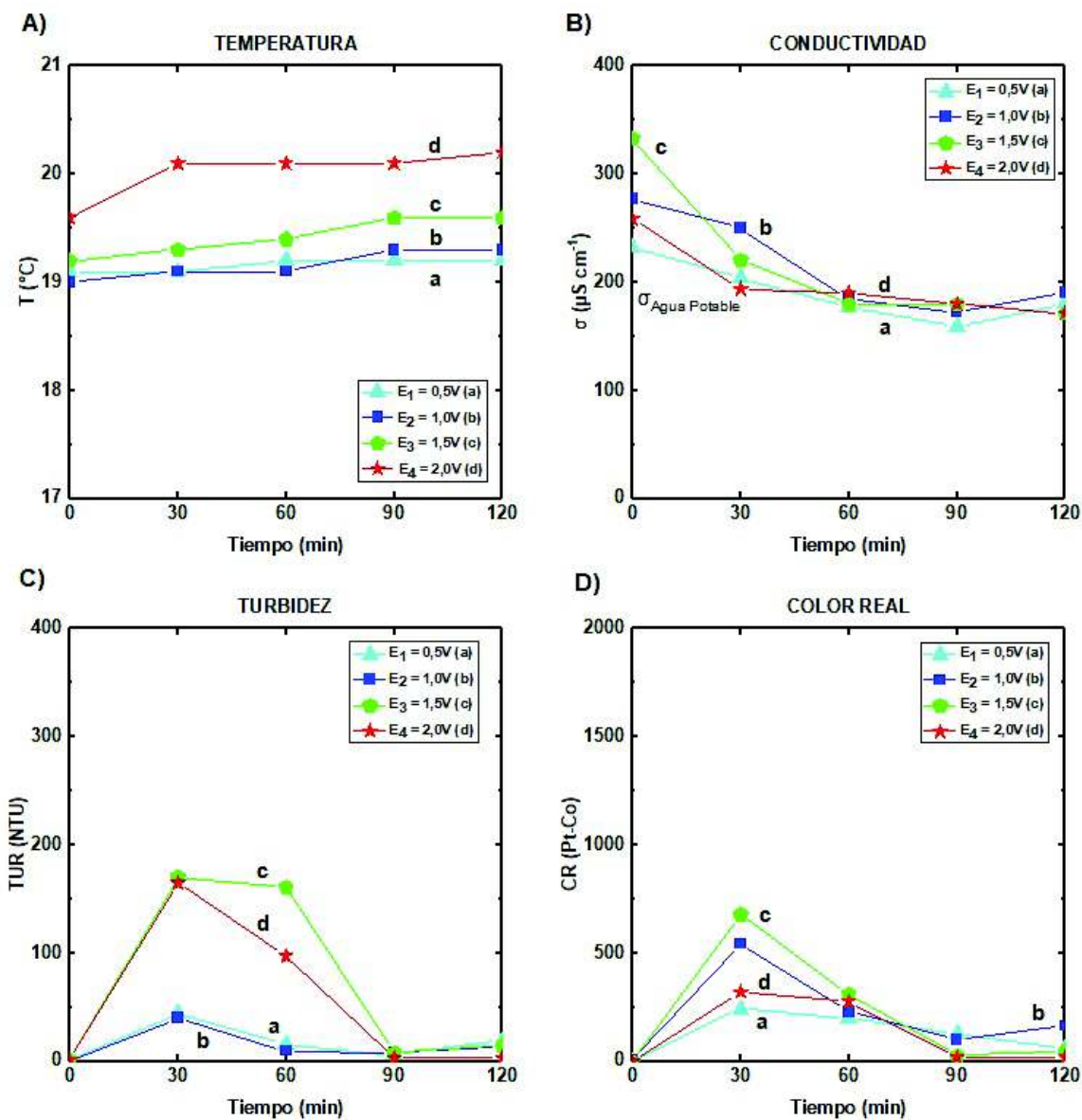


Según la experiencia con el agua residual industrial se puede indicar que a potenciales anódicos $E_1 = 0,5 \text{ V}$ y $E_2 = 1,0 \text{ V}$, no suceden las reacciones esperadas para la electrocoagulación. Para los potenciales $E_3 = 1,5 \text{ V}$ y $E_4 = 2,0 \text{ V}$, hay variaciones que nos indican que se está generando hierro, aglomerándose las partículas suspendidas y precipitando los complejos, indicando así que se pueden estar dando los procesos involucrados en el proceso electrolítico que se ha constatado en los ensayos anteriormente analizados.

4.2.1.2 PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA

La temperatura se mantiene constante y la conductividad tiene la misma tendencia que en la optimización a $\text{pH} = 11$ (Fig. 4.10 A y 4.10 B), lo que se puede explicar debido a que el pH solo se subió hasta 7,5 constatando así que el efecto del pH de las optimizaciones no es muy significativo, ya que el agua potable es un agua menos compleja.

FIGURA 4.10: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5



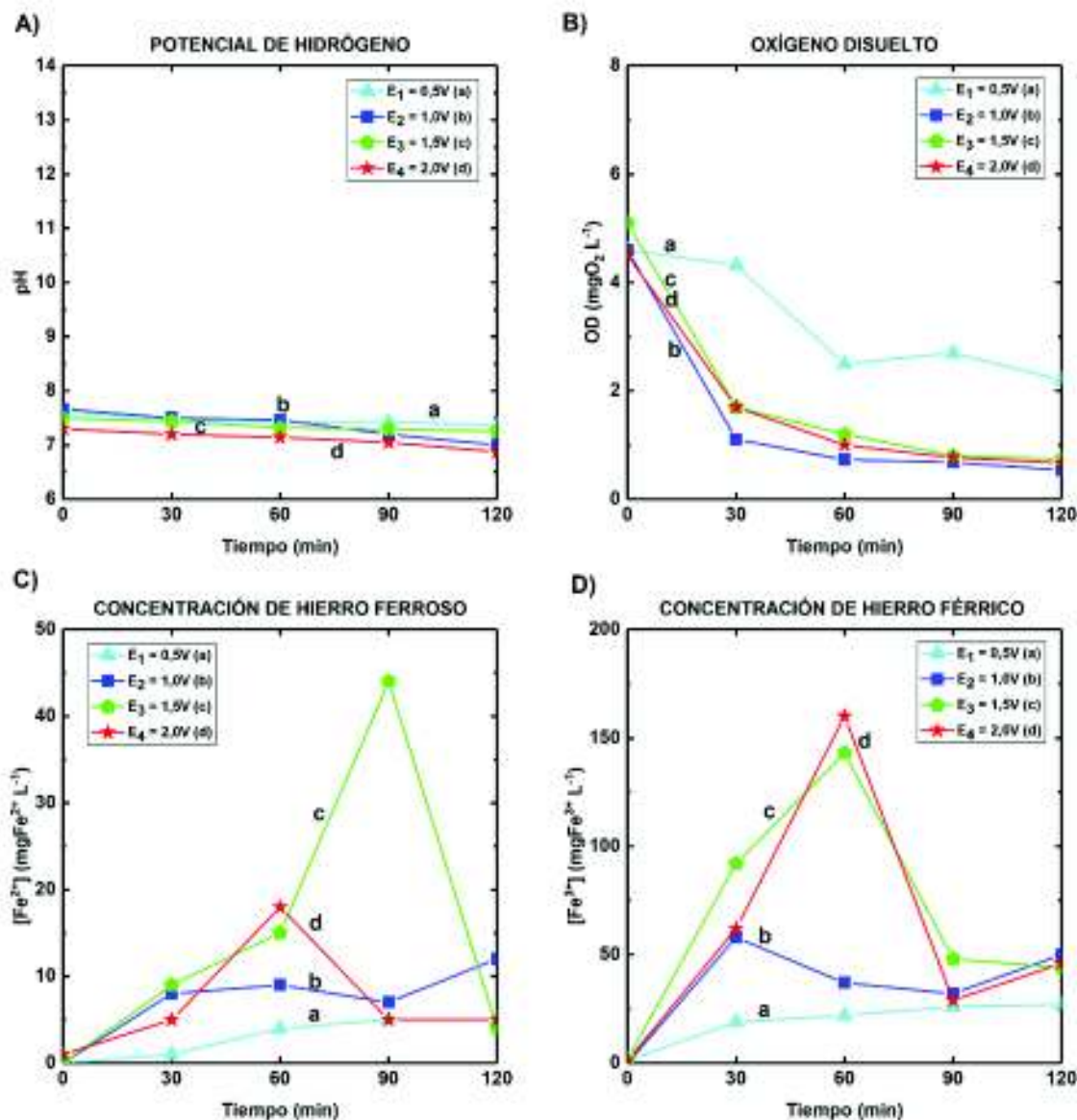
La turbidez y el color real tiene la misma tendencia que en la optimización para el agua residual industrial solo que en este caso los valores máximos son más bajos, o sea se tiene menor turbiedad y coloración como muestra la Fig.4.10 C y 4.10 D, lo que se puede explicar debido que requirió menos NaOH por su pH más bajo.

4.2.1.3 PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA

El pH, el OD y la concentración de hierro ferroso tiene la misma tendencia que la optimización para el agua residual industrial, con la diferencia que los mínimos y

máximos valores son para distintos potenciales anódicos como muestran las gráficas A, B y C de la Fig. 4.11, respectivamente.

FIGURA 4.11: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5



La Fig. 4.11 B, muestra el OD, que, a diferencia de la optimización del ARI, el mayor consumo de oxígeno se da al potencial 1,0 V lo que se puede asociar con el menor pH de esta agua y por ende uana gua más limpia.

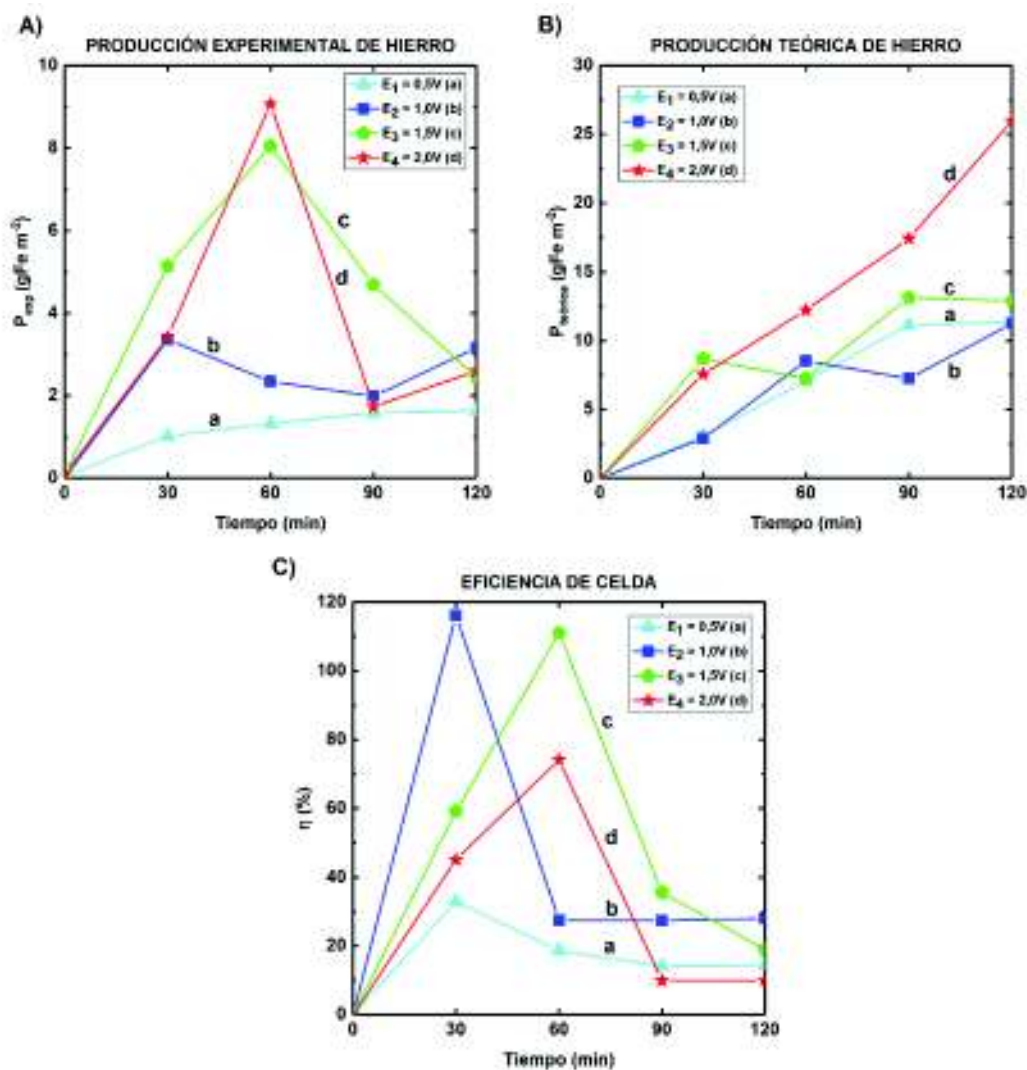
La concentración de hierro férrico es menor en promedio que en la optimización del agua residual industrial como se muestra en la Fig. 4.11 D, esto es debido a que se tiene un pH cercano al neutro lo que hace que se genere menos hierro, además se

constata una similitud entre la proporción entre hierro ferroso y hierro férrico, ya que el hierro ferroso sigue siendo mucho menor a la concentración de hierro férrico.

4.2.1.4 EFICIENCIA DE CELDA

La mayor eficiencia se tiene a los potenciales anódicos de E_2 y E_3 , llegando a superar el 100%, lo que se puede explicar cómo una adicional aportación por parte de la oxidación del hierro, como se muestra en la Fig. 4.12; y así estableciéndose estos dos potenciales como los dos mejores de esta etapa de ensayos.

FIGURA 4.12: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA POTABLE A pH = 7,5

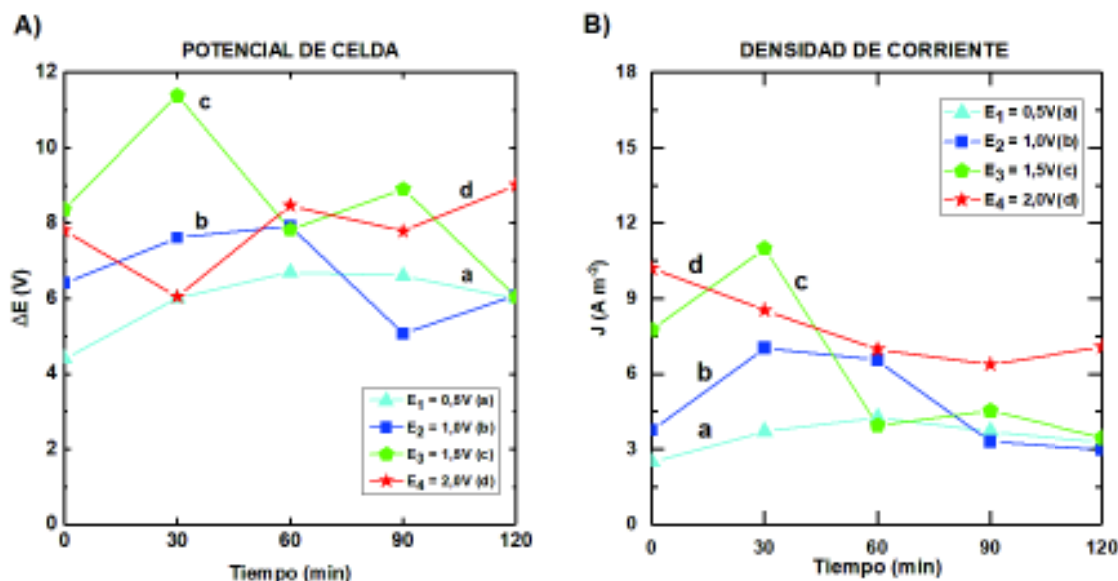


4.2.2 OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

4.2.2.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA FUENTE

Los parámetros eléctricos tienen la misma tendencia que los ensayos de optimización con los valores máximos para $E_3 = 1,5 \text{ V}$ (Fig. 4.13 A), para el potencial de $E_2 = 1,0 \text{ V}$ se ve que entre los 30 min y 60 min se llega a una máxima densidad de corriente y luego baja al valor inicial a los 90 min, lo que concuerda con el potencial más óptimo de clarificación que se describió en el agua residual industrial, ya que a los 90 min se obtuvo la mayor remoción de contaminantes, dejando así indicado que este potencial puede ser el más óptimo.

FIGURA 4.13: POTENCIAL DE CELDA Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

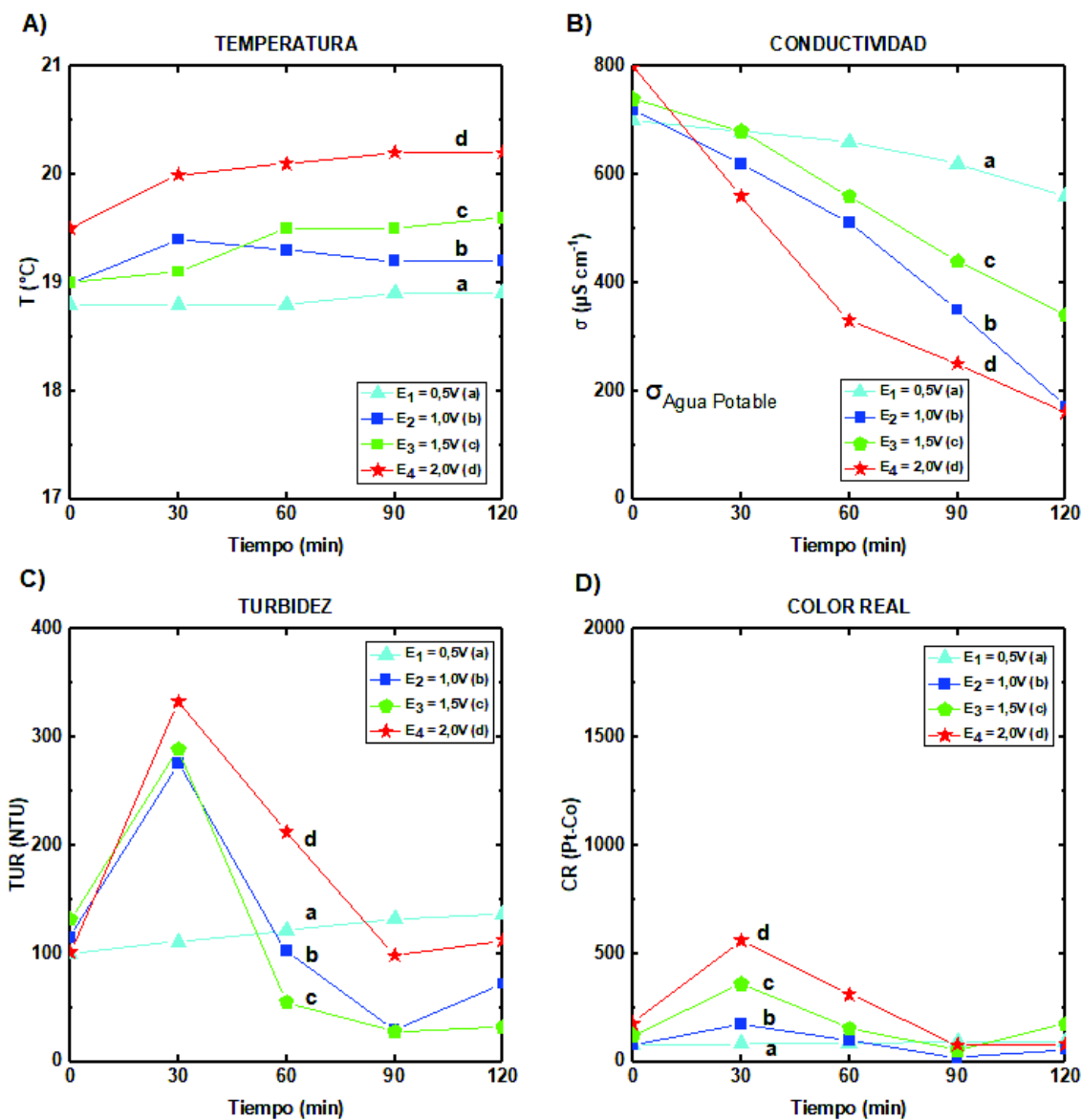


4.2.2.2 PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA

No existe un cambio considerable en la temperatura. la conductividad tiene una disminución de hasta cuatro veces el valor inicial, pero hay que puntualizar que esta agua residual tiene valores bajos comparado con las aguas de los demás ensayos,

los cuales se medían en *mili Siemens por centímetro* y aquí los valores se miden en *micro Siemens por centímetro* como se muestra en la Fig. 4.14.

FIGURA 4.14: TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD, TURBIDEZ Y COLOR REAL EN FUNCIÓN DE TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA



Para $E_1 = 0,5 \text{ V}$, la turbidez y el color real se mantienen invariables, mientras que en los otros potenciales tienen las tendencias esperadas para la remoción, dadas en los ensayos anteriores del ARI mostrados en la Fig. 4.14, teniendo las mejores remociones a potenciales anódicos de $E_2 = 1,0 \text{ V}$ y $E_3 = 1,5 \text{ V}$.

4.2.2.3 PARÁMETROS QUÍMICOS DEL AGUA

El pH se mantiene relativamente constante y el OD de esta agua residual es muy bajo, alrededor de 1 mg/L aunque también disminuye hasta quedarse cercano a 0, pero tiene una tendencia lineal con pendiente negativa que difiere con la tendencia en la optimización como se muestra en la Fig. 4.15 B, ya que se tenía una disminución drástica a los 30 min.

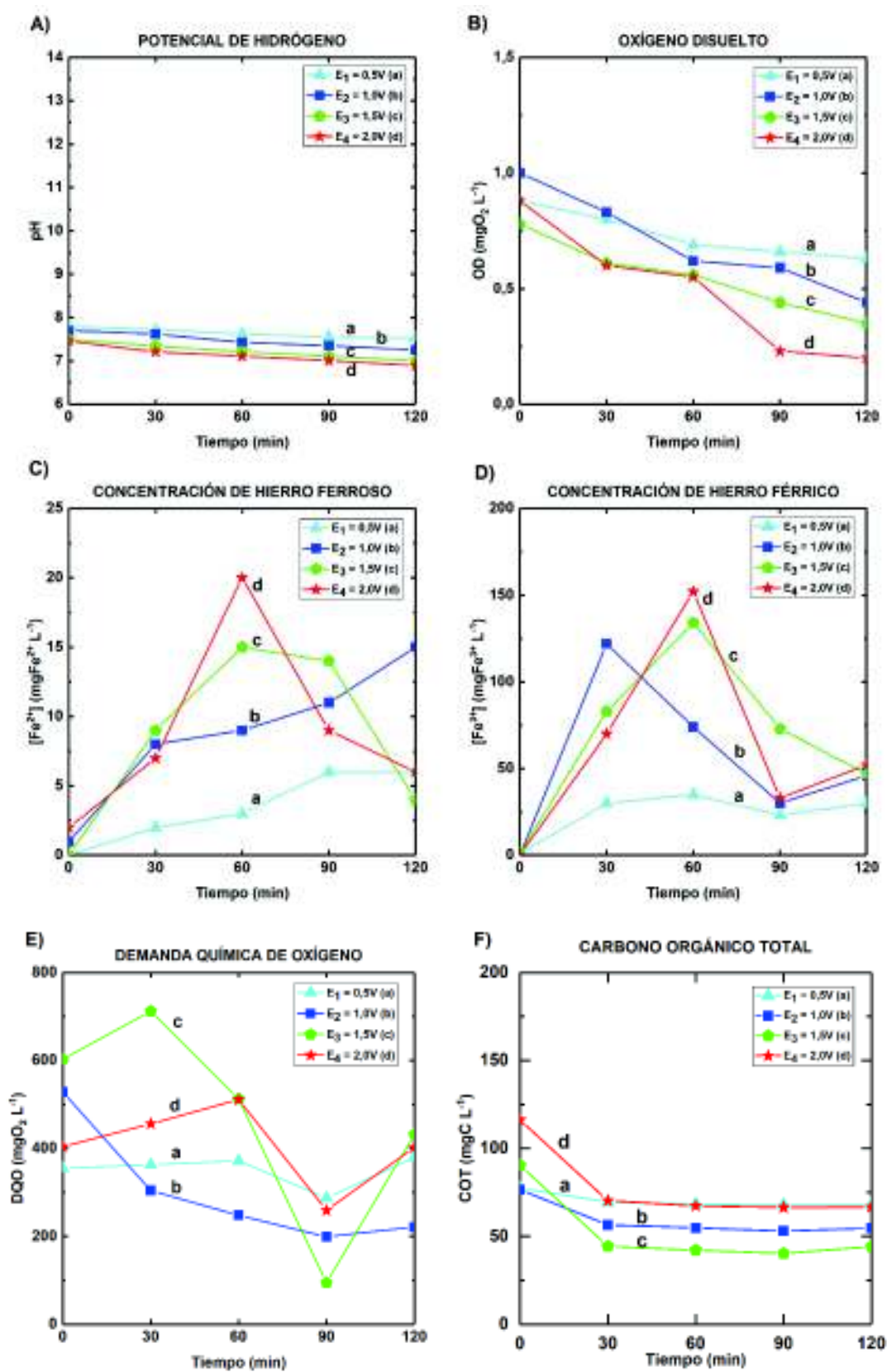
La concentración de hierro ferroso es más alta que en la optimización pero aun sigue siendo mucho más baja que la concentración de hierro férrico constatando la razón explicada por los diagramas de Pourbaix que define el hierro férrico como el predominante (Fig. 4.15 C y 4.15 D).

La concentración de hierro férrico tiene sus valores cercanos a los obtenidos en la optimización pero su tendencia es menos variante, ya que se visualiza que por más tiempo se mantiene produciéndose hierro (Fig. 4.15 D), teniendo para $E_1 = 0,5$ V, $E_2 = 1,0$ V y $E_3 = 1,5$ V concentraciones parecidas y también con sus mínimos valores a los 90 min, donde se puntualizó que es el tiempo en donde hay la máxima remoción de contaminates.

El DQO tiene un comportamiento más variante que lo obtenido en el agua residual industrial y llega bajo la norma (350 mg/L), a los 90 min, en dos potenciales anódicos de $E_2 = 1,0$ V y $E_3 = 1,5$ V, con valores de 221 mgO₂/L y 74 mgO₂/L, respectivamente (Fig. 4.15 E).

El COT se llega a remover a más de la mitad del valor inicial para los potenciales de $E_2 = 1,0$ V y $E_3 = 1,5$ V; teniendo una menor remoción que el agua residual industrial lo que se puede asociar a que este tipo de agua tiene más carbono asociado a fuentes no ligadas a los seres vivos ya que esta agua tiene muchos afluentes de diferentes fuentes.

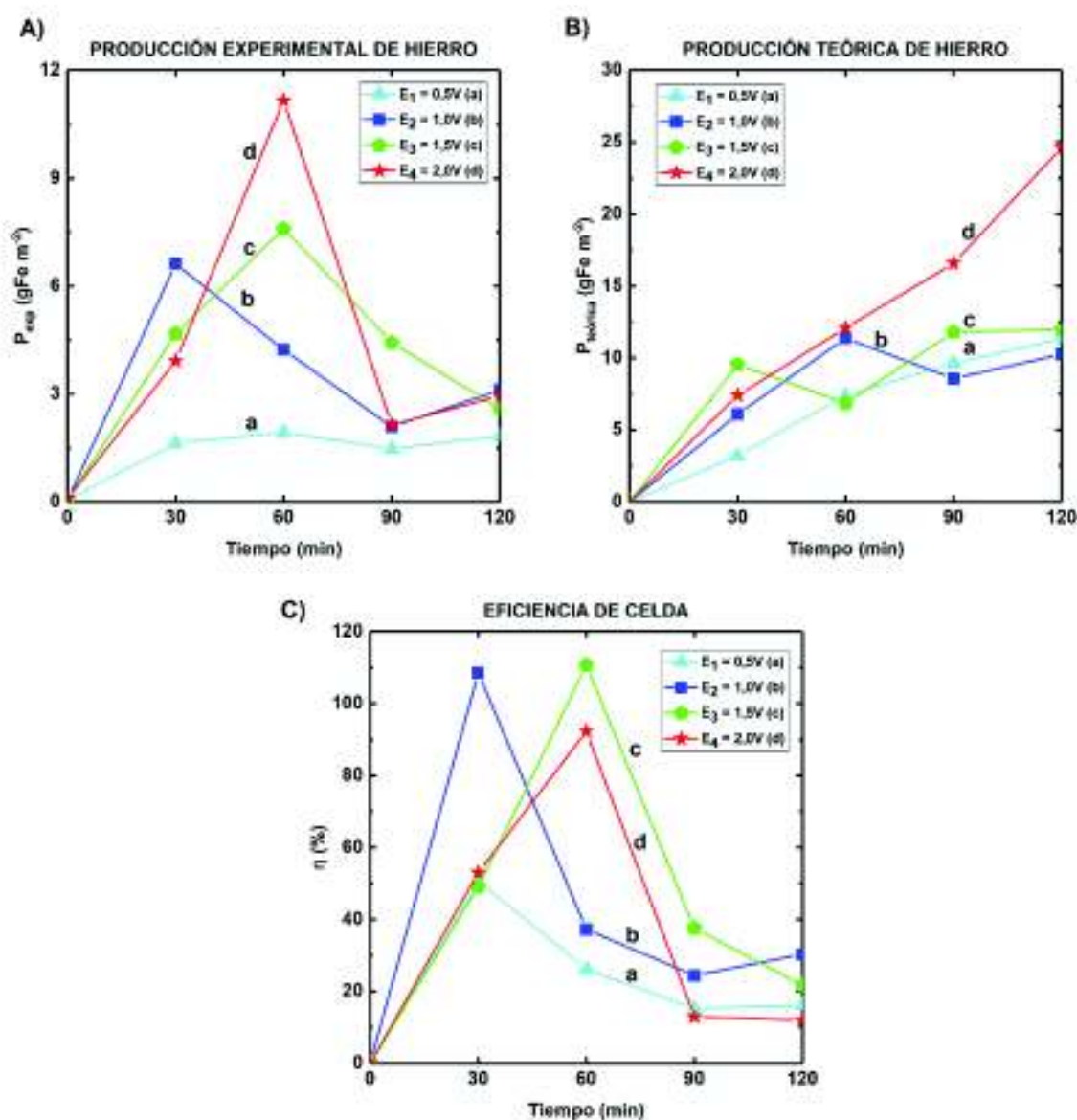
FIGURA 4.15: pH, OD, CONCENTRACIÓN DE HIERRO FERROSO Y FÉRRICO, DQO Y COT EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA



4.2.2.4 EFICIECIA DE CELDA

Las tendencias de la producción de hierro experimental y teórico son muy concordantes con la optimización con agua potable (Fig. 4.16 A y 4.16 B). Se tienen buenas eficiencias de celda para los $E_2 = 1,0$ V, $E_3 = 1,5$ V y $E_3 = 2,0$ V, con la diferencia que para E_2 se llega a su máxima a los 30 min y para los otros dos potenciales se llega a los 60 min (Fig. 4.16 C).

FIGURA 4.16: PRODUCCIÓN DE HIERRO Y EFICIENCIA DE CELDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO CON AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA



La optimización del proceso electrolítico se da $E_2 = 1,0 \text{ V}$ y $E_3 = 1,5 \text{ V}$ lo que concuerda con los valores más bajos de DQO y COT, pero no con los valores de la turbidez y color real, diferenciándose así, del agua residual industrial en el cual se tenía las mayores remociones para estos parámetros.

Existe otra diferencia entre las 2 aguas reales, ya que en el agua residual doméstica se tiene eficiencias de celda mayores al 100% lo que se podría asociar a una oxidación de las placas de hierro.

4.3 COMPENDIO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE OPERACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES ANALIZADAS

Las mejores condiciones de operación, la mayor remoción de contaminantes y la mayor eficiencia en todo el proceso de los ensayos fueron a un $E = 1,5 \text{ V}$ en el tiempo de 90 minutos, con un potencial de celda máximo de 11,5 V y una variación de densidad de corriente de 3,5 a 11 A/m^2 , así que los valores óptimos para los cuales hubo la mayor eficiencia de celda y las mayores remociones de DQO y COT se presentan en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1: PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

PARÁMETRO	ARI	ARD	
E (V)	1,5	1,0	1,5
† Remoción de contaminantes (min)	90	90	90
ΔE máx. (V)	12	8	10
I máx. (A)	2	0,5	1
J máx. (A/m^2)	11	7,5	8,8
Turbidez mín. (NTU)	20	34	21
Color Real (Pt-Co)	28	33	18
OD (ppm)	0,5	0,4	0,4
DQO (mg/L)	120	153	74
COT (mg/L)	269	73	54

4.4 DIMENSIONAMIENTO A ESCALA INDUSTRIAL DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

4.4.1 AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

Se toma el valor máximo de densidad de corriente con un factor de seguridad de 1,3.

$$J = \frac{11A}{m^2} * 1.3 = \frac{14,4A}{m^2} \approx 15 A/m^2$$

El espesor de las placas y de la escritura de PMAM quedan constantes y en el proceso generador de agua residual en esta industria es de 5 m³/semana, por lo que se hace un proceso semanal, se acondiciona el reactor a 5 m³ con un factor de seguridad de 1,2.

- $V_A = 5 m^3 * 1,2$
 $V_A = \mathbf{6 m^3}$
- $V_A = 0,55 V_T$
 $V_T = \frac{V_A}{0,55} = \frac{6 m^3}{0,55}$
 $V_T = \mathbf{11 m^3}$
- $V_I = 0,6V_T$
 $V_I = 0,6 * 11 m^3$
 $V_I = \mathbf{6,6 m^3}$
- $V_T = L * H * A$
 $11m^3 = 1,88 A * 1,09 A * A$
 $A = \mathbf{1,75 m}$
- $L = 1,88 A$
 $L = \mathbf{3,3 m}$
- $H = 1,09 A$
 $H = \mathbf{2 m}$
- $h = 0,97 A$
 $h = \mathbf{1,8 m}$

- $c = 0,13 h$
 $c = 0,23 m$
- $d = 0,22 h$
 $d = 0,4 m$
- $A = a_e = 1,75 m$
- $h_e = h - c - d$
 $h_e = 1,8 m - 0,23 m - 0,22 m$
 $h_e = 1,35 m$
- $V_P = H * e * (L + a)$
 $A_P = H * (L + a)$
 $A_P = 2 m * (3,3 m + 1,75 m)$
 $A_P = 10 m^2$
- $V_E = n_e * e_e * a_e * h_e$
 $A_E = n_e * a_e * h_e$
 $A_E = 16 * 1,75 m * 1,35 m$
 $A_E = 38 m^2$

En este caso sería $19 m^2$ para el aluminio y $19 m^2$ para el hierro y para una $J = 15 A/m^2$ se calcula la intensidad de corriente de la fuente que se necesita para tratar el agua residual.

$$I = J * A_e = J * h_e * a_e$$

$$I = J * A_e = 15 \frac{A}{m^2} * 1,35 m * 1,75 m$$

$$I = 35 A$$

4.4.2 AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

El espesor de las placas y de la escritura de PMAM quedan constantes, se toma en consideración el caudal del ARD de 120 L/s, el tiempo de mayor remoción en los ensayos de 90 min y un factor que representa el tiempo de descarga y de llenado del reactor tipo batch.

- $V_A = Q * t * f$

$$V_A = \frac{120 L}{s} * \frac{60 s}{1 min} * \frac{1 m^3}{10^3 L} * 90 min * (1,4)$$

$$V_A = 10 m^3$$

- $V_A = 0,55 V_T$

$$V_T = \frac{V_A}{0,55} = \frac{10 m^3}{0,55}$$

$$V_T = 18,2 m^3$$

- $V_I = 0,6 V_T$

$$V_I = 0,6 * 18,2 m^3$$

$$V_I = 11 m^3$$

- $V_T = L * H * A$

$$18,2 m^3 = 1,88 A * 1,09 A * A$$

$$A = 2,1 m$$

- $L = 1,88 A$

$$L = 4 m$$

- $H = 1,09 A$

$$H = 2,3 m$$

- $h = 0,97 A$

$$h = 2 m$$

- $c = 0,13 h$

$$c = 0,26 m$$

- $d = 0,22 h$

$$d = 0,44 m$$

- $A = a_e = 2,1 \text{ m}$

- $h_e = h - c - d$

$$h_e = 2 \text{ m} - 0,26 \text{ m} - 0,44 \text{ m}$$

$$\mathbf{h_e = 1,3 \text{ m}}$$

- $V_P = H * e * (L + a)$

$$A_P = H * (L + a)$$

$$A_P = 2,3 \text{ m} * (4 \text{ m} + 2,1 \text{ m})$$

$$\mathbf{A_P = 14 \text{ m}^2}$$

- $V_E = n_e * e_e * a_e * h_e$

$$A_E = n_e * a_e * h_e$$

$$A_E = 16 * 2,1 \text{ m} * 1,3 \text{ m}$$

$$\mathbf{A_E = 44 \text{ m}^2}$$

Para cada material de electrodo nos queda 22 m^2 y la intensidad de corriente es la misma que para el caso del ARI, por tener rango de densidad de corriente parecido, dando una $I = 35 \text{ A}$.

4.5 ANÁLISIS DE COSTOS

4.5.1 COSTO DE INSTALACIÓN

Se toma en consideración los precios medios del mercado para todos los materiales, de 3 mm para los metales y de 1,5 cm para el PMAM. El costo de instalación de muestra en a la siguiente tabla.

TABLA 4.2: COSTO DE INSTALACIÓN

MATERIAL	COSTO POR UNIDAD	CANTIDAD NECESARIA	TOTAL
ARI			
Fuente de poder	500	500	500
Hierro	60	19	1140
Aluminio	45	19	855
PMAM	75	10	750
Mano de Obra	-	-	500
TOTAL			3745
ARD			
Fuente de poder	500	500	500
Hierro	60	22	1320
Aluminio	45	22	990
PMAM	75	14	1050
Mano de Obra	-	-	500
TOTAL			4360

4.5.2 COSTO DE OPERACIÓN

Se consideró la mayor producción de Fe^{3+} .

4.5.2.1 AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

$$W_{ARI} = \frac{I * t * M_{Fe}}{V_A * Z * F}$$

$$W_{ARI} = \frac{33A * 90 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * 55,85 \text{ g/mol}}{6 \text{ m}^3 * 3 * \frac{96500 \text{ C}}{\text{mol}}}$$

$$W_{ARI} = \frac{5,7 \text{ g}}{m^3}$$

Con un costo de 22 USD/kg de hierro se calculó el costo de operación:

$$\text{Costo del hierro} = \frac{5,7 \text{ g}}{m^3} * \frac{22 \text{ USD}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$\text{Costo del hierro} = 0,13 \text{ USD}/m^3$$

$$\text{Consumso de energía} = \frac{E * I * t}{V_A}$$

$$\text{Consumso de energía} = \frac{11,5 \text{ V} * 33 \text{ A} * 90 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}}{6 \text{ m}^3}$$

$$\text{Consumso de energía} = \frac{342 \text{ kJ}}{m^3} * \frac{1 \text{ W} * \text{s}}{1 \text{ J}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0,095 \text{ KWh}/m^3$$

$$\text{Costo consumo de energía} = \frac{0,095 \text{ KWh}}{m^3} * \frac{0,15 \text{ USD}}{\text{KWh}}$$

$$\text{Costo consumo d energía} = 0,014 \text{ USD}/m^3$$

4.5.2.2 AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

$$W_{ARD} = \frac{I * t * M_{Fe}}{V_A * Z * F}$$

$$W_{ARI} = \frac{33 \text{ A} * 90 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * 55,85 \text{ g/mol}}{10 \text{ m}^3 * 3 * \frac{96500 \text{ C}}{\text{mol}}}$$

$$W_{ARI} = \frac{3,4 \text{ g}}{m^3}$$

Con un costo de 22USD/kg de hierro se calculó el costo de operación:

$$\text{Costo del hierro} = \frac{3,4 \text{ g}}{m^3} * \frac{22 \text{ USD}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$\text{Costo de Hierro} = 0,08 \text{ USD}/\text{m}^3$$

$$\text{Consumso de energía} = \frac{E * I * t}{V_A}$$

$$\text{Consumso de energía} = \frac{11,5 \text{ V} * 33 \text{ A} * 90 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}}{10 \text{ m}^3}$$

$$\text{Consumso de energía} = \frac{342 \text{ kJ}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ W} * \text{s}}{1 \text{ J}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0,057 \text{ KWh}/\text{m}^3$$

$$\text{Costo consumo de energía} = \frac{0,057 \text{ KWh}}{\text{m}^3} * \frac{0,15 \text{ USD}}{\text{KWh}}$$

$$\text{Costo consumo d energía} = 0.01 \frac{\text{USD}}{\text{m}^3}$$

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un reactor con forma de un prisma rectangular para tratar un volumen de 5,5 L, con 16 electrodos de área útil de 10 cm x 13,5 cm, con ánodo de hierro.
- Se obtuvieron las mayores eficiencias para el agua potable a pH 11, que pasan del 100%, a potenciales anódicos de 1,0 V y 1,5 V con potenciales de celda máximos de 8 y 12 V; densidades de corriente máximas de 7 y 12 A/m², y producciones de hierro máximas de 6 y 8 g/m². Se obtuvieron eficiencias mayores 100% para los mismos potenciales de 1,0 V y 1,5 V obteniéndose un consumo de energía más bajo con potenciales de celda máximos de 8 y 10 V; densidades de corriente máximas de 4,5 y 10 A/m², y producciones de hierro máximas de 4 y 8 g/m². El agua residual industrial tuvo su mayor eficiencia de 70% al potencial anódico de 1,5 V con potencial de celda máximo de 10 V; densidad de corriente máxima de 9 A/m² y una producción de hierro máxima de 7 g/m². El agua residual doméstica del Río Machángara tuvo remociones que pasaron del 100% para los potenciales anódicos de 1,0 V y 1,5 V con potenciales de celda máximos de 8 y 12 V; densidades de corriente máximas de 7 y 11 A/m², y producciones de hierro máximas de 7 y 8 g/m².
- La mayor reducción de contaminación de los dos tipos de agua se obtuvo a potencial anódico de 1,5 V, con la particularidad de que el agua doméstica también disminuyó a potencial anódico de 1,0 V. El DQO bajó más de un 90%, el COT para el agua residual industrial bajó un 60% y para el agua residual doméstica bajó un 50%, la turbidez y el color real disminuyó en más de 70%.
- Para un volumen de 5 m³ se analizaron los costos de instalación obteniéndose un costo de alrededor de USD\$ 3745 y USD\$ 4360 para el ARI

y el ARD respectivamente. El costo de operación para el ARI fue de 0.13 USD\$/m³ de agua y USD\$ 0.014 USD\$/m³ de agua respecto del consumo de hierro y energía, respectivamente. El costo de operación para el ARD fue de 0.08 USD\$/m³ de agua y USD\$ 0.01 USD\$/m³ de agua respecto del consumo de hierro y energía, respectivamente.

5.2 RECOMENDACIONES

- En el escalamiento nivel industrial sale más factible para la ARI, por tener un flujo de agua pequeño de 5 m³/semana, pero para el ARD, tipo batch no es tan conveniente porque el flujo es mucho más grande, y los procesos tiene lugar 120 min a tiempo corrido, para este tipo de efluente es más propicio hacer estudios de un reactor de tipo flujo continuo.
- Para los siguientes ensayos se debe establecer como punto de partida el Diagrama de Pourbaix, ya que en estudios anteriores se han utilizado intensidades de corriente altas sin considerar el potencial al cual el hierro sólido pasa a iones y las múltiples especies que se dan cuando entra en contacto con el electrolito.
- En el caso del agua residual proveniente del Río Machángara se debe hacer un seguimiento más exhaustivo con más parámetros como metales pesados para ver su comportamiento de acuerdo al proceso estudiado en el presente trabajo.
- Se debe estudiar más a fondo la capa fina que se hace en el ánodo de acuerdo al agua residual estudiada, ya que esta impide la ionización del metal y, por ende, aumenta el gasto de energía suministrada, y necesitaría un proceso de reactivación para no tener que quitar la capa.
- Se notó en todos los ensayos una disminución en el oxígeno disuelto, por lo que se debe de estudiar que está pasando con este, ya que nos ayuda a la remoción de contaminantes, pero al final nos queda muy poco, lo cual es perjudicial para el agua tratada.

- Como base en este estudio se debería proyectar para seguirlo con una cinética de reacción para saber de manera más exhaustiva lo que pasa con cada compuesto involucrado en el proceso de electrocoagulación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis de Posgrado. Universidad Nacional de San Marcos. Lima, Perú.
- Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 49-56.
- Barrera , C. (2009). *Removal of Biorefractory Compounds in Industrial Wastewater by Chemical and Electrochemical Pretreatments*.
- Barrera Díaz, C. E. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. México D.F.: Reverté.
- Cazco, A., & Jarrín, S. (2010). Diseño, Construcción y Análisis de los parámetros de operación de un Sistema de Electrocoagulación. Tesis de Pregrado. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
- Chang, R. (2010). *Química*. México: McGraw-Hill.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 34.
- Company, H. (Water Analysis Handbook). *Hach*. Loveland.
- Durán, O. (2004). *Reacciones Redox y Estados de Oxidación*.
- Guanoluiza, L. E. (2013). *Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con y sin radiación de electrones acelerados*. Quito.

- Halt, P. (2004). Deciphering the science behind electrocoagulation to remove suspended clay particles from water. *Water Science and Technology*, 177-184.
- Kovatchva, V., & Parlapansky, M. (1999). Sono- electrocoagulation of iron hydroxides. *Colloides surface*, 603-608.
- Llive, L. E. (Noviembre de 2013). Dimensionamiento de un Sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de Aguas Residuales Domésticas, con y sin Irradiación de Electrones Acelerados. Tesis de Pregrado. Escuela Politécnica Nacional.
- Mollah, M., Yousuf, A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) - science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 29-41.
- Ozyonar, F., & Karagozoglu, B. (2011). Operating cost analysis and treatment of domestic wastewater by electrocoagulation using aluminim electrodes. *Polish Journal of Enviromental Studies*, 173-179.
- Piruch, E. (2006). *Desarrollo de los procedimientos específicos enmarcados en los requerimientos de la norma ISO 17025:2005 para el laboratorio de aguas y microbiología de la Escuela Politécnica Nacional.*
- UNAM. (2009). Electroodos de Medida y referencia.
- Zhaing, S. (1993). Metal ion remove by electrochemical means. *Enviromental Science Technology*.

ANEXOS

ANEXO 1: TABLAS DE PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA

ETAPA UNO DE ENSAYOS CON AGUA POTABLE PARA EL ARI A E₁ = 0,5 V

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m ²)	pH	T (°C)	σ (μ S/cm)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe _T] (mg/L)	P _{exp} (g/m ²)	P _{Fe²⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe³⁺ teórico} (g/m ²)	P _{teórica} (g/m ²)	η (%)
1	0,5	0	3,50	0,18	1,67	11,00	19,5	239	12	2	4,10	0,01	1	1	0,06	0,00	0,00	0,00	0,0
		30	5,00	0,32	2,96	11,00	19,6	213	115	1600	3,15	3	27	30	1,53	1,54	1,03	2,57	59,4
		60	5,30	0,40	3,70	10,82	19,8	191	18	415	1,53	4	30	34	1,73	3,86	2,57	6,43	26,9
		90	5,20	0,40	3,70	10,80	19,6	171	5	70	1,82	4	33	37	1,88	5,79	3,86	9,65	19,5
		120	5,00	0,30	2,78	10,68	19,6	184	19	105	0,52	5	27	32	1,63	5,79	3,86	9,65	16,9
2	0,5	0	3,98	0,20	1,85	11,00	19,6	245	7	0	4,50	0	1	1	0,06	0,00	0,00	0,00	0,0
		30	5,44	0,35	3,24	10,92	19,7	215	111	1300	3,05	3	26	29	1,48	1,69	1,13	2,81	52,5
		60	5,89	0,40	3,70	10,80	19,8	186	16	367	1,67	3	32	35	1,78	3,86	2,57	6,43	27,7
		90	5,67	0,42	3,89	10,82	19,7	167	6	59	1,78	4	37	41	2,09	6,08	4,05	10,13	20,6
		120	5,30	0,32	2,96	10,71	19,7	190	19	98	0,45	6	27	33	1,68	6,17	4,12	10,29	16,3
3	0,5	0	4,00	0,20	1,85	11,00	19,4	241	8	1	4,50	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
		30	5,45	0,40	3,70	10,90	19,6	215	130	1200	3,64	4	21	25	1,27	1,93	1,29	3,22	39,6
		60	5,50	0,45	4,17	10,85	19,7	195	9	350	1,65	5	24	29	1,48	4,34	2,89	7,23	20,4
		90	5,70	0,46	4,26	10,80	19,7	180	6	57	1,90	5	30	35	1,78	6,66	4,44	11,09	16,1
		120	5,24	0,36	3,33	10,70	19,6	184	20	96	0,67	6	24	30	1,53	6,94	4,63	11,57	13,2

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA CON AGUA POTABLE PARA EL ARI A $E_2 = 1,0$ V

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T (°C)	σ ($\mu S/cm$)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ^{-I}] (mg/L)	P _{exp} (g/m^2)	P _{Fe²⁺teórico} (g/m^2)	P _{Fe³⁺teórico} (g/m^2)	P _{teórica} (g/m^2)	η (%)	
4		0	5,80	0,37	3,43	11,00	19,0	257	2	0	5,23	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		30	6,58	0,64	5,93	10,80	19,1	220	138	1100	1,59	5	105	110	110	5,60	3,09	2,06	5,14	108,9
		60	7,54	0,66	6,11	10,76	19,1	175	175	6	29	0,85	6	17	23	1,17	6,37	4,24	10,61	11,0
		90	4,36	0,27	2,50	10,94	19,3	189	189	11	26	0,75	7	33	40	2,04	3,91	2,60	6,51	31,3
		120	5,34	0,28	2,59	10,67	19,3	176	176	11	23	0,69	10	47	57	2,90	5,40	3,60	9,00	32,2
5	1,0	0	6,10	0,40	3,70	11,00	19,1	250	2	0	5,67	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		30	6,92	0,69	6,39	10,81	19,2	231	150	884	2,10	6	114	120	120	6,11	3,33	2,22	5,55	110,2
		60	7,84	0,70	6,48	10,82	19,2	185	185	7	31	1,03	7	20	27	1,38	6,75	4,50	11,25	12,2
		90	4,56	0,32	2,96	10,72	19,4	196	196	11	38	0,86	8	34	42	2,14	4,63	3,09	7,72	27,7
		120	5,90	0,31	2,87	10,67	19,4	178	178	15	20	0,75	10	54	64	3,26	5,98	3,99	9,97	32,7
6		0	6,50	0,42	3,89	11,00	19,5	280	4	0	5,00	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		30	7,21	0,76	7,04	10,74	19,6	258	130	980	2,30	6	114	120	120	6,11	3,67	2,44	6,11	100,0
		60	7,75	0,80	7,41	10,68	19,6	187	187	3	23	1,10	7	13	20	1,02	7,72	5,14	12,86	7,9
		90	5,20	0,38	3,52	10,86	19,8	167	167	10	19	0,89	7	48	55	2,80	5,50	3,67	9,16	30,6
		120	5,45	0,42	3,89	10,75	19,8	156	156	11	18	0,74	11	51	62	3,16	8,10	5,40	13,50	23,4

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA CON AGUA POTABLE PARA EL ARI A $E_3 = 1,5$ V

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T (°C)	σ ($\mu S/cm$)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ^{-I}] (mg/L)	P _{exp} (g/m^2)	P _{Fe²⁺teórico} (g/m^2)	P _{Fe³⁺teórico} (g/m^2)	P _{teórica} (g/m^2)	η (%)	
7		0	8,80	0,85	7,87	11,15	20,0	362	4	5	4,75	0	1	0,5	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
		30	11,20	1,04	9,63	10,40	20,3	239	40	81	0,79	9	118	127	6,47	5,02	3,34	8,36	77,4	
		60	8,76	0,46	4,26	10,47	20,4	211	10	25	0,77	10	130	140	7,13	4,44	2,96	7,39	96,4	
		90	9,38	0,51	4,72	10,57	20,5	205	8	51	0,66	29	103	132	6,72	7,38	4,92	12,30	54,7	
		120	6,68	0,33	3,06	10,82	20,4	242	13	80	0,59	11	26	37	1,88	6,37	4,24	10,61	17,8	
8	1.5	0	9,00	0,90	8,33	11,15	20,0	370	5	4	5,23	0	1	0,5	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
		30	11,50	1,20	11,11	10,59	20,4	245	40	67	0,83	10	122	132	6,72	5,79	3,86	9,65	69,7	
		60	9,00	0,49	4,54	10,49	20,5	200	9	25	0,79	13	142	155	7,89	4,73	3,15	7,88	100,2	
		90	10,00	0,55	5,09	10,44	20,6	185	8	55	0,74	32	110	142	7,23	7,96	5,30	13,26	54,5	
		120	6,50	0,40	3,70	10,43	20,5	232	10	60	0,66	9	26	35	1,78	7,72	5,14	12,86	13,9	
9		0	8,50	0,84	7,78	11,00	20,0	300	2	0	5,00	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
		30	11,00	1,10	10,19	10,30	19,9	250	50	58	1,50	10	124	134	6,82	5,30	3,54	8,84	77,2	
		60	8,50	0,75	6,94	10,50	20,0	201	9	20	0,90	12	143	155	7,89	7,23	4,82	12,06	65,5	
		90	9,20	0,81	7,50	10,64	20,1	192	8	23	0,84	35	106	141	7,18	11,72	7,81	19,53	36,8	
		120	6,50	0,64	5,93	10,82	20,0	181	10	74	0,61	15	20	35	1,78	12,35	8,23	20,58	8,7	

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ARI A $E_1 = 0,5 \text{ V}$

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T (°C)	σ (mS/cm)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ²⁺] (mg/L)	P _{Fe²⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe³⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe²⁺ teórico} (g/m ²)	η (%)	DQO (mg/L)	REMOCIÓN DE DQO (%)	COT (mg/L)	REMOCIÓN DE COT (%)
13		0	4,28	0,14	1,30	10,91	18,3	8,91	173	300	3,65	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0	1070	0,0	805,3	0,0
		30	5,20	0,16	1,48	10,74	18,2	8,76	302	214	4,15	6	21	27	27	1,38	0,77	0,51	8,0	1180	-10,3	733,1	9,0
		60	5,32	0,17	1,57	10,71	18,2	8,75	276	549	4,03	3	53	56	56	2,85	1,64	1,09	104,4	1247	-16,6	682,3	15,3
		90	5,56	0,19	1,76	10,77	18,2	9,01	182	534	2,82	0	80	80	80	4,07	2,75	1,83	88,9	981	8,3	672,1	16,5
		120	5,26	0,18	1,67	10,59	18,1	8,89	241	980	3,73	0	91	91	91	4,63	3,47	2,31	80,1	1010	5,6	679,2	15,7
14	0,5	0	5,14	0,16	1,48	11,00	18,5	8,00	190	312	3,89	0	1	1	1	0,05	0,00	0,00	0,0	1200	0,0	925,5	0,0
		30	5,72	0,18	1,63	10,86	18,5	7,27	291	230	4,10	7	22	29	29	1,48	0,85	0,57	104,4	1400	-16,7	859,8	7,1
		60	6,38	0,20	1,89	10,67	18,5	7,55	218	620	4,43	4	36	40	40	2,04	1,97	1,31	62,1	1249	-4,1	788,7	14,8
		90	6,80	0,30	2,78	10,60	18,5	7,94	191	712	3,67	3	90	93	93	4,74	4,34	2,89	65,5	1145	4,6	771,4	16,7
		120	6,20	0,22	2,00	10,55	18,5	7,90	280	976	4,07	0	100	100	100	5,09	4,17	2,78	73,3	1156	3,7	783,5	15,3
15		0	4,00	0,13	1,20	10,87	18,4	9,09	156	270	4,19	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0	980	0,0	746,2	0,0
		30	4,47	0,15	1,39	10,64	18,4	8,70	299	173	4,36	8	17	25	25	1,27	0,72	0,48	105,6	1111	-13,4	683,1	8,5
		60	4,58	0,15	1,35	10,58	18,4	8,80	200	494	4,23	5	42	47	47	2,39	1,41	0,94	101,8	989	-0,9	642,3	13,9
		90	5,00	0,17	1,57	10,80	18,4	9,23	172	680	2,96	3	64	67	67	3,41	2,46	1,64	83,2	957	2,3	632,1	15,3
		120	4,52	0,16	1,48	10,53	18,4	9,00	224	882	3,92	1	75	76	76	3,87	3,09	2,06	75,2	1020	-4,1	639,2	14,3

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ARI A $E_2 = 1,0 \text{ V}$

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T (°C)	σ (mS/cm)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ⁺] (mg/L)	P _{Fe²⁺} teóric (g/m ²)	P _{Fe³⁺} teóric (g/m ²)	P _{Fe⁺} teóric (g/m ²)	η (%)	DQO (mg/L)	REMOCIÓN DE DQO (%)	COT (mg/L)	REMOCIÓN DE COT (%)	
16		0	5,12	0,50	4,63	10,99	18,9	9,83	183	412	5,23	4	0	4	0,20	0,00	0,00	0,00	0,0	1098	0,0	765,6	0,0
		30	3,84	0,45	4,17	10,96	19,0	9,59	331	1050	4,15	4	9	13	0,66	2,17	1,45	3,62	18,3	1300	-18,4	622,1	18,7
		60	3,70	0,44	4,07	10,85	18,8	9,74	230	500	3,10	2	18	20	1,02	4,24	2,83	7,07	14,4	1210	-10,2	617,6	19,3
		90	3,70	0,44	4,07	10,58	18,8	9,56	143	312	3,00	5	21	26	1,32	6,37	4,24	10,61	12,5	972	11,5	607,2	20,7
		120	3,70	0,46	4,26	10,56	18,8	9,73	245	247	2,83	5	13	18	0,92	8,87	5,92	14,79	6,2	1054	4,0	615,6	19,6
17	1,0	0	4,10	0,35	3,24	11,00	19,0	9,54	178	367	5,10	2	2	2	0,10	0,00	0,00	0,0	1065	0,0	732,3	0,0	
		30	3,81	0,32	2,96	10,80	19,3	9,21	321	935	4,30	3	15	18	0,92	1,54	1,03	2,57	35,6	1239	-16,3	602,3	17,8
		60	3,92	0,32	2,96	10,76	19,3	9,54	230	898	3,50	3	22	25	1,27	3,09	2,06	5,14	24,7	1187	-11,4	592,3	19,1
		90	4,00	0,36	3,33	10,60	19,0	9,32	132	278	2,75	4	26	30	1,53	5,21	3,47	8,68	17,6	936	12,1	573,1	21,7
		120	3,63	0,29	2,69	10,54	19,0	9,59	249	220	2,28	6	9	15	0,76	5,59	3,73	9,32	8,2	996	6,5	582,3	20,5
18		0	5,50	0,49	4,54	11,10	19,2	10,00	194	372	4,60	2	2	4	0,20	0,00	0,00	0,0	0,0	1164	0,0	801,2	0,0
		30	4,00	0,43	3,98	11,00	19,3	9,80	338	840	3,60	5	8	13	0,66	2,07	1,38	3,46	19,2	1284	-10,3	673,6	15,9
		60	3,60	0,42	3,89	10,96	19,2	9,83	217	639	2,42	3	17	20	1,02	4,05	2,70	6,75	15,1	1202	-3,3	656,7	18,0
		90	3,60	0,40	3,70	10,69	19,2	9,66	145	290	2,34	5	21	26	1,32	5,79	3,86	9,65	13,7	975	16,2	634,4	20,8
		120	3,65	0,41	3,80	10,67	19,2	9,72	247	254	2,04	5	13	18	0,92	7,91	5,27	13,18	7,0	1054	9,4	645,6	19,4

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ARI A $E_3 = 1,5 \text{ V}$

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T (°C)	σ (mS/cm)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ⁻] (mg/L)	P _{Fe²⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe³⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe⁻ teórico} (g/m ²)	η (%)	DQO (mg/L)	REMOCIÓN DE DQO (%)	COT (mg/L)	REMOCIÓN DE COT (%)	
19		0	5,06	0,38	3,52	10,54	17,7	8,20	197	333	4,75	1	0	1	0,05	0,00	0,00	0,00	0,0	1180	0,0	765,6	0,0
		30	5,70	0,53	4,91	10,27	17,7	8,05	227	1300	0,79	4	55	59	3,00	2,56	1,70	4,26	70,5	1360	-15,3	376,7	50,8
		60	8,32	0,78	7,22	10,14	17,9	7,79	212	213	0,77	7	77	84	4,28	7,52	5,02	12,54	34,1	1232	-4,4	329,2	57,0
		90	5,52	0,71	6,57	9,86	17,9	8,24	32	21	0,66	7	126	133	6,77	10,27	6,85	17,12	39,6	190	83,9	318,8	58,4
		120	9,36	1,00	9,26	9,77	18,0	8,11	108	88	0,59	5	104	109	5,55	19,29	12,86	32,15	17,3	650	44,9	321,6	58,0
20		0	6,07	0,46	4,22	10,75	18,5	9,02	184	180	5,04	2	0	2	0,10	0,00	0,00	0,00	0,0	996	0,0	812,4	0,0
		30	7,00	0,69	6,38	10,56	18,6	9,66	423	702	1,27	6	59	65	3,31	3,32	2,22	5,54	59,8	1140	-14,5	409,2	49,6
		60	8,50	0,80	7,41	10,43	18,6	8,10	340	115	0,68	9	89	98	4,99	7,72	5,14	12,86	38,8	1023	-2,7	371,8	54,2
		90	7,34	0,67	6,20	10,12	18,7	8,91	34	11	0,61	10	150	160	8,15	9,69	6,46	16,16	50,4	182	81,7	337,5	58,5
		120	10,49	1,12	10,37	9,81	18,7	9,05	130	48	0,57	4	107	111	5,65	21,60	14,40	36,01	15,7	700	29,7	356,6	56,1
21		0	5,00	0,50	4,63	11,00	18,0	7,95	183	323	4,94	2	1	3	0,15	0,00	0,00	0,00	0,0	1100	0,0	711,6	0,0
		30	6,80	0,54	5,00	10,72	18,0	7,70	300	1000	1,67	7	52	59	3,00	2,60	1,74	4,34	69,2	1310	-19,1	342,0	51,9
		60	8,78	0,71	6,57	10,58	18,2	7,61	123	328	0,90	9	75	84	4,28	6,85	4,57	11,41	37,5	1213	-10,3	289,2	59,4
		90	6,30	0,65	6,02	10,31	18,2	7,89	20	28	0,50	15	118	133	6,77	9,40	6,27	15,67	43,2	120	89,1	269,1	62,2
		120	10,00	0,94	8,70	10,11	18,4	7,51	75	53	0,47	6	103	109	5,55	18,13	12,09	30,22	18,4	450	59,1	272,2	61,7

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ARI A $E_4 = 2,0 \text{ V}$

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T (°C)	σ (mS/cm)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ⁻¹] (mg/L)	P _{Feexp} (g/m ²)	P _{Fe²⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe³⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe^{Teórico}} (g/m ²)	η (%)	DDO (mg/L)	REMOCIÓN DE DDO (%)	COT (mg/L)	REMOCIÓN DE COT (%)
22		0	7,80	1,22	11,30	10,55	17,5	9,50	203	319	5,36	0	0	0,1	0,01	0,00	0,00	0,00	0,0	1220	0,0	857,6	0,0
		30	6,84	1,03	9,54	10,20	17,5	9,12	378	1400	1,01	6	61	67	3,41	4,97	3,31	8,28	41,2	1324	-8,5	755,4	11,9
		60	9,20	1,11	10,28	11,06	18,1	9,43	128	423	0,95	13	165	178	9,06	10,71	7,14	17,84	50,8	769	37,0	622,6	27,4
		90	9,80	1,15	10,65	10,53	18,1	9,18	52	87	0,88	3	31	34	1,73	16,64	11,09	27,73	6,2	502	58,9	597,5	30,3
		120	10,38	1,17	10,83	10,84	18,1	9,39	115	122	0,71	3	48	51	2,60	22,57	15,05	37,62	6,9	690	43,4	641,6	25,2
		0	9,36	1,34	12,43	11,08	18,0	8,93	178	330	4,82	0	0	0,1	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	1070	0,0	712,3
23		30	8,00	1,28	11,85	10,71	18,6	8,57	292	1912	1,50	7	67	74	3,77	6,17	4,12	10,29	36,6	1213	-13,4	608,1	14,6
		60	9,50	1,29	11,94	11,13	18,7	8,77	133	518	0,86	15	185	200	10,19	12,44	8,29	20,74	49,1	800	25,2	563,2	20,9
		90	10,60	1,31	12,13	11,06	18,7	8,35	95	94	0,79	5	47	52	2,65	18,95	12,64	31,59	8,4	490	54,2	511,2	28,2
		120	11,32	1,36	12,59	11,38	18,8	8,45	125	115	0,64	5	62	67	3,41	26,23	17,49	43,72	7,8	750	29,9	479,8	32,6
		0	7,50	1,00	9,26	10,87	17,8	8,55	164	343	6,00	1	1	2	0,10	0,00	0,00	0,00	0,0	985	0,0	915,2	0,0
		30	6,75	0,97	8,98	10,53	18,2	8,12	335	1638	2,10	8	51	59	3,00	4,68	3,12	7,80	38,5	1123	-14,0	653,3	28,6
24		60	9,00	1,22	11,30	11,23	18,5	8,57	152	505	1,21	18	127	145	7,38	11,77	7,84	19,61	37,7	912	7,4	639,8	30,1
		90	9,80	1,25	11,57	10,80	18,5	8,20	102	221	1,02	6	24	30	1,53	18,08	12,06	30,14	5,1	505	48,7	666,1	27,2
		120	11,30	1,77	16,39	11,00	18,5	8,42	143	193	0,68	5	41	46	2,34	34,14	22,76	56,91	4,1	590	40,1	652,3	28,7

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA CON AGUA POTABLE PARA EL ARD DE E₁ = 0,5 V Y E₂ = 1,0 V

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m ²)	pH	T (°C)	σ (mS/cm)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ⁻] (mg/L)	P _{Fe²⁺} (g/m ²)	P _{Fe³⁺} (g/m ²)	P _{Fe^{teórico}} (g/m ²)	η (%)	
25	0,5	0	3,68	0,27	2,50	7,50	19,0	330	18,0	0	4,31	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0	
		30	5,25	0,48	4,44	7,55	19,0	316	32,0	345	4,00	2	20	22	1,12	2,31	1,54	3,86	29,0
		60	5,57	0,60	5,56	7,61	19,0	292	26,6	267	2,10	2	23	25	1,27	5,79	3,86	9,65	13,2
		90	5,46	0,60	5,56	7,63	19,0	244	8,1	102	2,00	4	24	28	1,43	8,68	5,79	14,47	9,9
		120	5,00	0,45	4,17	7,63	19,0	253	28,2	43	1,50	1	30	31	1,58	8,68	5,79	14,47	10,9
26	0,5	0	4,38	0,22	2,04	7,60	19,1	233	1,0	0	4,60	0	1	1	0,06	0,00	0,00	0,0	
		30	5,98	0,39	3,56	7,48	19,1	204	44,0	245	4,32	1	19	20	1,02	1,86	1,24	3,09	32,9
		60	6,48	0,44	4,07	7,42	19,2	177	16,0	199	2,50	4	22	26	1,32	4,24	2,83	7,07	18,7
		90	6,24	0,46	4,28	7,43	19,2	159	6,0	127	2,70	5	26	31	1,58	6,68	4,46	11,14	14,2
		120	5,83	0,35	3,26	7,37	19,2	181	19,1	59	2,20	5	27	32	1,63	6,79	4,53	11,32	14,4
27	1,0	0	6,00	0,42	3,89	7,66	19,0	277	0,0	3	4,60	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0	
		30	5,40	0,36	3,33	7,50	19,1	250	39,8	543	1,10	8	58	66	3,36	1,74	1,16	2,89	116,2
		60	7,30	0,53	4,91	7,46	19,1	184	9,76	230	0,73	9	37	46	2,34	5,11	3,41	8,52	27,5
		90	5,00	0,30	2,78	7,20	19,3	172	8,21	99	0,68	7	32	39	1,99	4,34	2,89	7,23	27,5
		120	5,50	0,35	3,24	7,00	19,3	190	12,8	163	0,54	12	50	62	3,16	6,75	4,50	11,25	28,1
28	1,0	0	6,71	0,44	4,07	7,70	19,0	318	0	0	4,00	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0	
		30	7,61	0,76	7,03	7,62	19,3	290	76	557	1,56	8	69	77	3,92	3,66	2,44	6,10	64,3
		60	8,62	0,77	7,13	7,43	19,3	202	62	201	0,99	9	34	43	2,19	7,43	4,95	12,38	17,7
		90	5,02	0,35	3,26	7,35	19,5	165	28	72	0,78	11	25	36	1,83	5,09	3,40	8,49	21,6
		120	6,49	0,34	3,16	7,25	19,4	145	32	70	0,52	15	41	56	2,85	6,58	4,39	10,96	26,0

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA CON AGUA POTABLE PARA EL ARD DE E₃ = 1,5 V Y E₄ = 2,0 V

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m ²)	pH	T (°C)	σ (mS/cm)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ⁻] (mg/L)	P _{Fe²⁺teórico} (g/m ²)	P _{Fe³⁺teórico} (g/m ²)	P _{Fe^{Teórico}} (g/m ²)	η (%)		
29	1,5	0	8,45	0,82	7,56	7,40	20,0	340	0,0	0	3,94	0	1	0,5	0,03	0,00	0,00	0,00	0,0	
		30	10,75	0,95	8,76	7,35	20,0	225	101,0	992	1,50	7	80	87	4,43	4,56	3,04	7,61	58,2	
		60	8,41	0,45	4,17	7,27	19,9	198	198	54,0	390	1,00	9	83	92	4,69	4,35	2,90	7,25	64,7
		90	9,00	0,50	4,68	7,33	19,8	195	195	1,0	19	0,55	8	26	34	1,73	7,30	4,87	12,17	14,2
		120	8,08	0,41	3,76	7,29	19,7	237	237	11,3	28	0,49	2	28	30	1,53	7,83	5,22	13,05	11,7
30	1,5	0	8,10	0,81	7,50	7,50	19,0	333	1,0	0	5,10	0	2	2	0,10	0,00	0,00	0,00	0,0	
		30	10,35	1,08	10,00	7,44	19,3	221	170,0	677	1,70	9	92	101	5,14	5,21	3,47	8,68	59,3	
		60	8,10	0,45	4,17	7,32	19,4	180	180	161,0	310	1,20	15	143	158	8,05	4,35	2,90	7,25	111,0
		90	9,00	0,54	5,04	7,29	19,6	180	180	8,0	27	0,80	44	48	92	4,69	7,88	5,25	13,13	35,7
		120	5,85	0,40	3,70	7,25	19,6	171	171	15,1	49	0,74	4	44	48	2,44	7,72	5,14	12,86	19,0
31	2,0	0	7,41	1,05	9,68	7,30	20,0	258	2	0	4,50	1	1	2,0	0,10	0,00	0,00	0,00	0,0	
		30	6,18	0,94	8,71	7,20	20,1	194	165	321	1,70	5	62	67	3,41	4,54	3,02	7,56	45,1	
		60	8,56	0,76	7,04	7,14	20,1	190	190	97	276	1,00	18	160	178	9,06	7,33	4,89	12,22	74,2
		90	8,17	0,72	6,69	7,05	20,1	180	180	3	20	0,77	5	29	34	1,73	10,45	6,96	17,41	9,9
		120	9,51	0,81	7,48	6,87	20,2	171	171	3	18	0,67	5	46	51	2,60	15,58	10,38	25,96	10,0
32	2,0	0	6,97	1,02	9,44	7,68	19,0	300	1	0	5,00	1	0	1,0	0,05	0,00	0,00	0,00	0,0	
		30	5,75	0,88	8,19	7,43	19,5	223	112	280	1,50	9	60	69	3,51	4,26	2,84	7,11	49,5	
		60	8,03	0,71	6,53	7,24	19,6	209	209	87	202	0,98	20	135	155	7,89	6,80	4,54	11,34	69,6
		90	7,61	0,70	6,45	7,05	19,7	186	186	4	25	0,86	9	31	40	2,04	10,08	6,72	16,81	12,1
		120	8,25	0,78	7,24	7,00	19,7	190	190	2,5	18	0,73	7	42	49	2,50	15,08	10,06	25,14	9,9

CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ARD A $E_1 = 0,5 \text{ V}$ Y $E_2 = 1,0 \text{ V}$

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T ($^{\circ}C$)	σ ($\mu S/cm$)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ¹⁺] (mg/L)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	P _{Fe²⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe³⁺ teórico} (g/m ²)	P _{Fe¹⁺ teórico} (g/m ²)	η (%)	DQO (mg/L)	REMOCIÓN DE DQO (%)	COT (mg/L)	REMOCIÓN DE COT (%)
33	0,5	0	2,80	0,14	1,33	7,60	18,5	650	60	100	0,80	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	350	0,0	82,5	0,0
		30	4,00	0,26	2,37	7,58	660	18,5	660	69	189	0,72	1	27	28	1,43	1,23	0,82	2,06	69,3	367	-4,9	79,9	3,2
		60	4,51	0,32	2,96	7,50	700	18,5	700	71	191	0,70	2	19	21	1,07	3,09	2,06	5,14	20,8	371	-6,0	75,0	9,1
		90	4,16	0,32	2,96	7,46	660	18,5	660	73	203	0,69	3	30	33	1,68	4,63	3,09	7,72	21,8	301	14,0	73,9	10,4
		120	4,20	0,24	2,22	7,38	610	18,6	610	77	210	0,62	1	27	28	1,43	4,63	3,09	7,72	18,5	400	-14,3	73,2	11,2
34	0,5	0	4,40	0,27	2,50	7,80	18,8	700	100	76	0,88	0	1	1	0,06	0,00	0,00	0,00	0,0	355	0,0	77,3	0,0	
		30	6,00	0,40	3,70	7,72	680	18,8	680	111	83	0,80	2	30	32	1,63	1,93	1,29	3,22	50,7	363	-2,3	69,5	10,0
		60	6,70	0,46	4,26	7,62	660	18,8	660	121	89	0,69	3	35	38	1,94	4,44	2,96	7,39	26,2	372	-4,8	68,3	11,6
		90	6,60	0,40	3,70	7,55	620	18,9	620	132	92	0,66	6	23	29	1,48	5,79	3,86	9,65	15,3	287	19,2	67,8	12,3
		120	6,00	0,35	3,26	7,53	560	18,9	560	136	94	0,63	6	30	36	1,83	6,79	4,53	11,32	16,2	380	-7,0	68,1	11,9
35	1,0	0	5,50	0,31	2,87	7,50	18,8	600	66	66	0,85	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	400	0,0	105,8	0,0	
		30	6,00	0,36	3,33	7,35	550	19,0	550	192	135	0,72	7	51	58	2,95	1,74	1,16	2,89	102,1	463	-15,8	77,5	26,7
		60	6,70	0,43	3,98	7,22	510	19,2	510	55	104	0,56	15	37	52	2,65	4,15	2,76	6,91	38,3	440	-10,0	74,3	29,8
		90	5,56	0,32	2,96	7,12	410	19,3	410	34	33	0,43	12	20	32	1,63	4,63	3,09	7,72	21,1	153	61,8	72,6	31,4
		120	6,30	0,39	3,61	6,50	210	19,4	210	59	46	0,33	15	17	32	1,63	7,52	5,02	12,54	13,0	224	44,0	73,7	30,3
36	1,0	0	6,41	0,40	3,74	7,70	19,0	720	115	80	1,00	1	0	1	0,05	0,00	0,00	0,00	0,0	528	0,0	76,5	0,0	
		30	7,61	0,76	7,03	7,62	620	19,4	620	276	172	0,83	8	122	130	6,62	3,66	2,44	6,10	108,5	304	42,4	56,5	26,1
		60	7,92	0,71	6,55	7,43	510	19,3	510	102	97	0,62	9	74	83	4,23	6,82	4,55	11,37	37,2	248	53,0	54,9	28,2
		90	5,06	0,36	3,29	7,35	350	19,2	350	30	19	0,59	11	30	41	2,09	5,14	3,43	8,56	24,4	199	62,3	52,9	30,8
		120	6,08	0,32	2,96	7,25	170	19,2	170	72	55	0,44	15	46	61	3,11	6,16	4,11	10,27	30,3	221	58,1	54,7	28,5

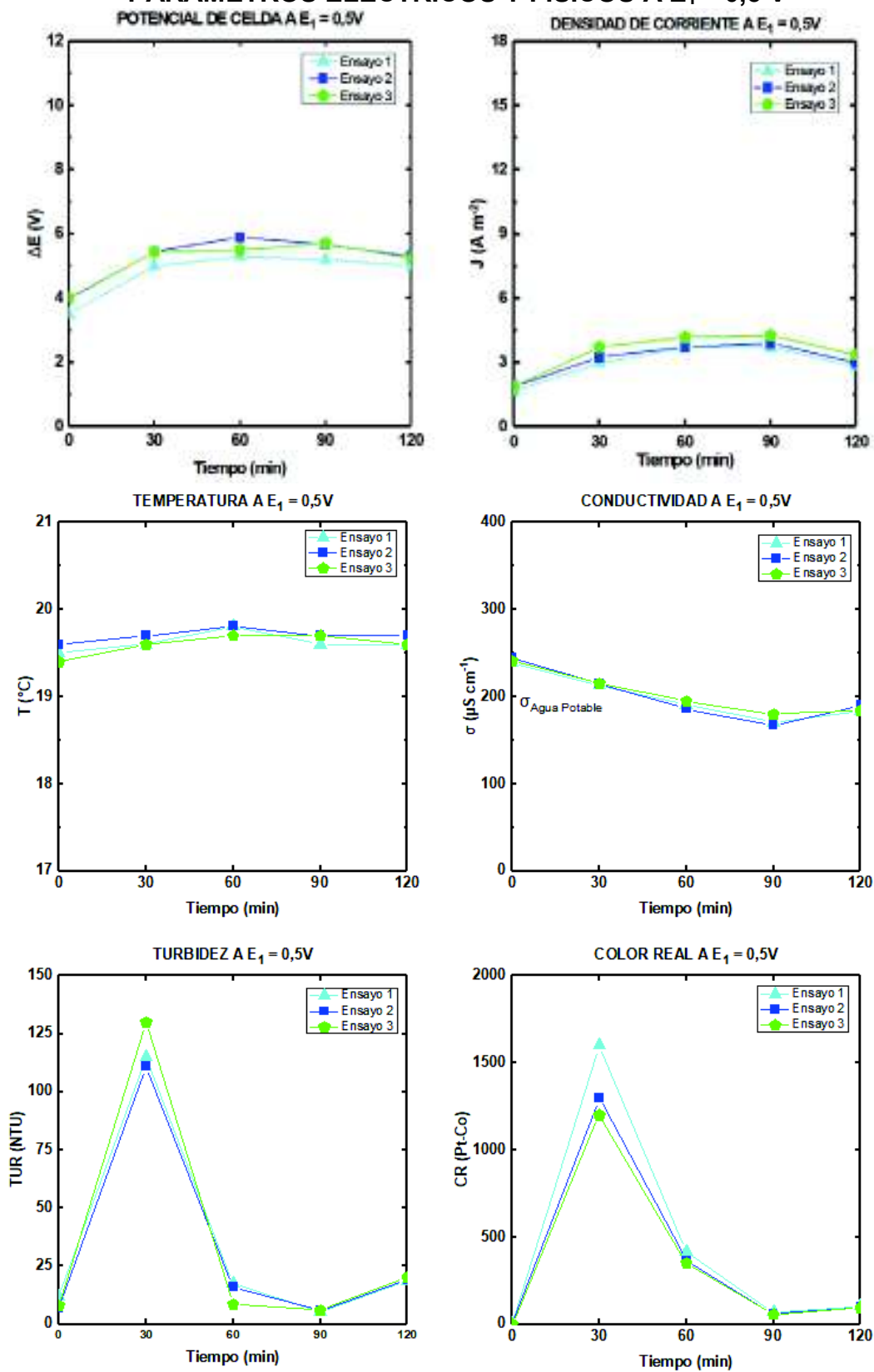
CARACTERIZACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ARD A $E_3 = 1,5$ V Y $E_4 = 2,0$ V

N° Ensayo	E (V)	t (min)	ΔE (V)	I (A)	J (A/m^2)	pH	T (°C)	σ ($\mu S/cm$)	Turbidez (NTU)	Color Real (Pt-Co)	OD (ppm)	[Fe ²⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)	[Fe ⁺] (mg/L)	P _{Fe²⁺teórico} (g/m ²)	P _{Fe³⁺teórico} (g/m ²)	P _{Fe⁺teórico} (g/m ²)	η (%)	DQO (mg/L)	REMOCIÓN DE DQO (%)	COT (mg/L)	REMOCIÓN DE COT (%)	
37		0	7,92	0,82	7,56	7,72	20,0	790	100	55	0,89	1	2	3	0,15	0,00	0,00	0,00	0,0	396	0,0	108,9	0,0
		30	10,08	0,95	8,76	7,50	19,8	730	321	567	0,72	9	78	87	4,43	4,56	3,04	7,61	58,2	457	-15,4	59,8	45,1
		60	7,94	0,45	4,17	7,34	19,8	670	120	321	0,62	14	78	92	4,69	4,35	2,90	7,25	64,7	330	16,7	57,6	47,1
		90	8,54	0,50	4,68	7,12	19,7	550	21	18	0,43	14	20	34	1,73	7,30	4,87	12,17	14,2	74	81,3	54,3	50,1
		120	7,35	0,41	3,76	6,78	19,6	400	56	43	0,33	7	23	30	1,53	7,83	5,22	13,05	11,7	354	10,6	55,3	49,2
38	1,5	0	8,37	0,84	7,75	7,50	19,0	740	132	123	0,78	0	1	1	0,05	0,00	0,00	0,00	0,0	603	0,0	90,5	0,0
		30	11,39	1,19	11,00	7,34	19,1	680	289	359	0,61	9	83	92	4,69	5,73	3,82	9,55	49,1	712	-18,1	44,3	51,0
		60	7,83	0,43	3,95	7,21	19,5	560	55	154	0,56	15	134	149	7,59	4,11	2,74	6,85	110,7	512	15,1	42,1	53,5
		90	8,90	0,49	4,53	7,11	19,5	440	28	55	0,44	14	73	87	4,43	7,08	4,72	11,80	37,5	94	84,4	40,2	55,6
		120	6,05	0,37	3,44	7,00	19,6	340	32	176	0,35	4	47	51	2,60	7,18	4,78	11,96	21,7	432	28,4	44,2	51,1
39		0	7,80	1,10	10,19	7,46	20,0	800	101	178	0,88	2	0	2,0	0,10	0,00	0,00	0,00	0,0	404	0,0	116,2	0,0
		30	6,05	0,92	8,53	7,21	20,0	560	333	560	0,60	7	70	77	3,92	4,44	2,96	7,40	53,0	456	-12,9	70,3	39,5
		60	8,47	0,75	6,96	7,11	20,1	330	212	312	0,55	20	152	219	11,15	7,25	4,84	12,09	92,3	511	-26,5	67,3	42,1
		90	7,78	0,69	6,37	7,01	20,2	250	98	77	0,23	9	33	42	2,14	9,95	6,63	16,58	12,9	259	35,9	66,4	42,9
		120	9,01	0,77	7,08	6,89	20,2	160	112	81	0,20	6	52	58	2,95	14,76	9,84	24,59	12,0	402	0,5	66,7	42,6
40		0	7,50	1,10	10,19	7,62	20,0	740	75	98	0,72	1	1	2,0	0,10	0,00	0,00	0,00	0,0	300	0,0	83,5	0,0
		30	6,20	0,90	8,33	7,31	19,9	640	200	612	0,62	7	64	71	3,62	4,34	2,89	7,23	50,0	342	-14,0	51,9	37,9
		60	7,89	0,68	6,30	7,22	20,1	550	110	222	0,45	14	146	173	8,81	6,56	4,37	10,93	80,6	379	-26,3	49,3	41,0
		90	7,70	0,70	6,45	7,00	20,1	440	86	67	0,33	10	45	55	2,80	10,08	6,72	16,81	16,7	198	34,0	48,3	42,2
		120	9,22	0,87	8,09	6,84	19,9	210	132	98	0,29	9	59	68	3,46	16,86	11,24	28,10	12,3	354	-18,0	48,9	41,5

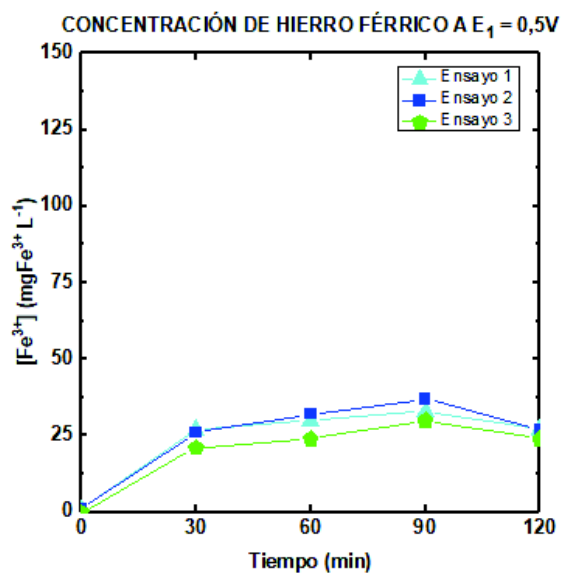
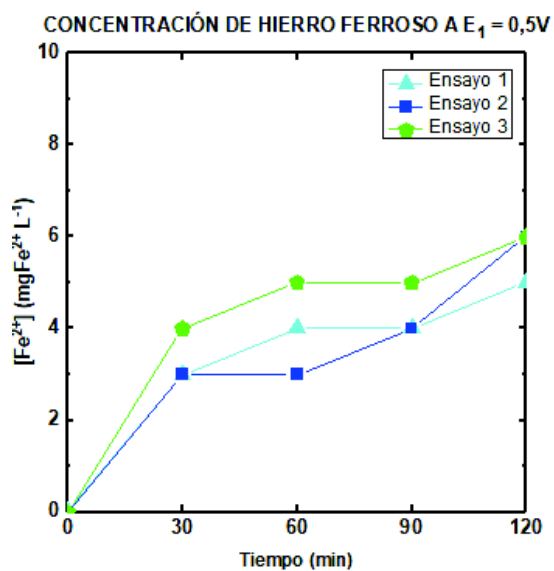
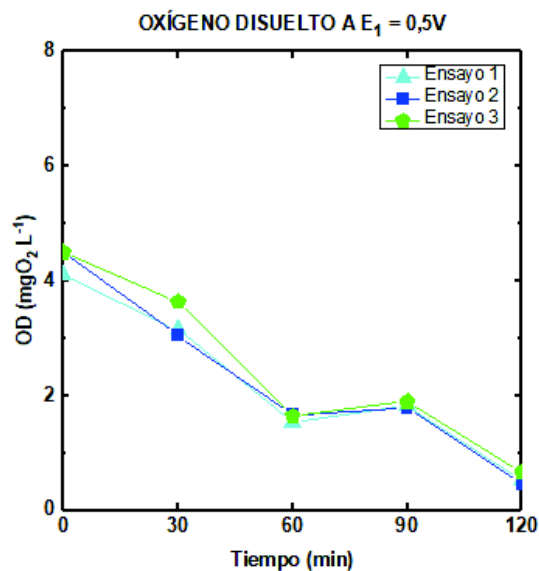
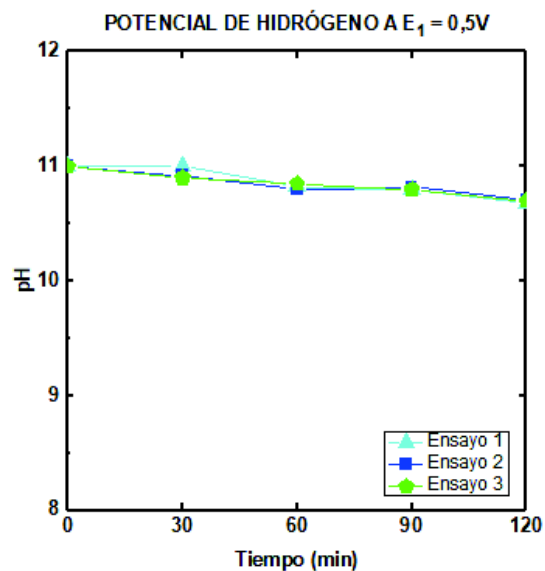
**ANEXO 2: GRÁFICAS DE LOS ENSAYOS A CADA
POTENCIAL ANÓDICO**

OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA POTABLE A pH = 11

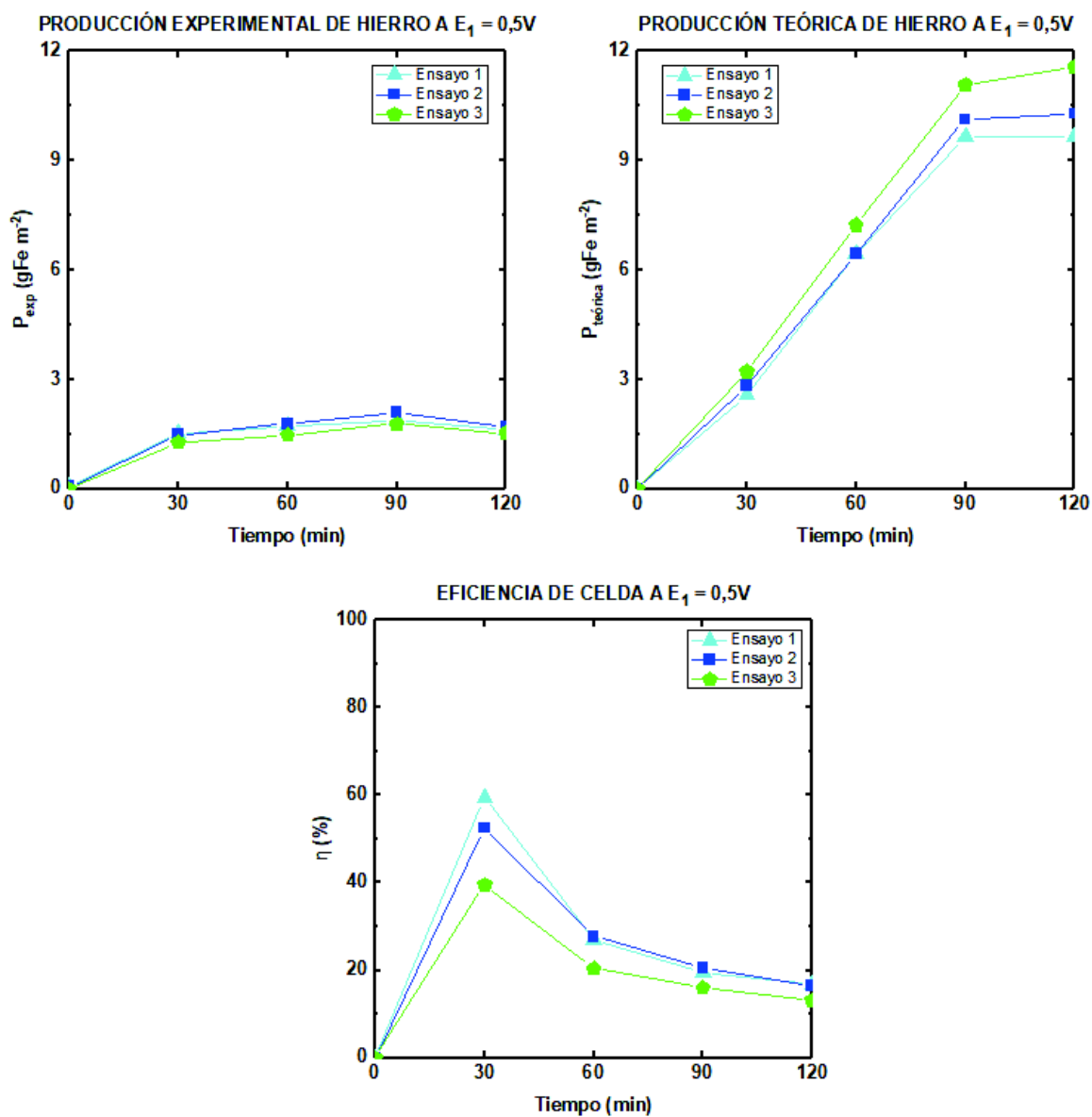
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_1 = 0,5\text{ V}$



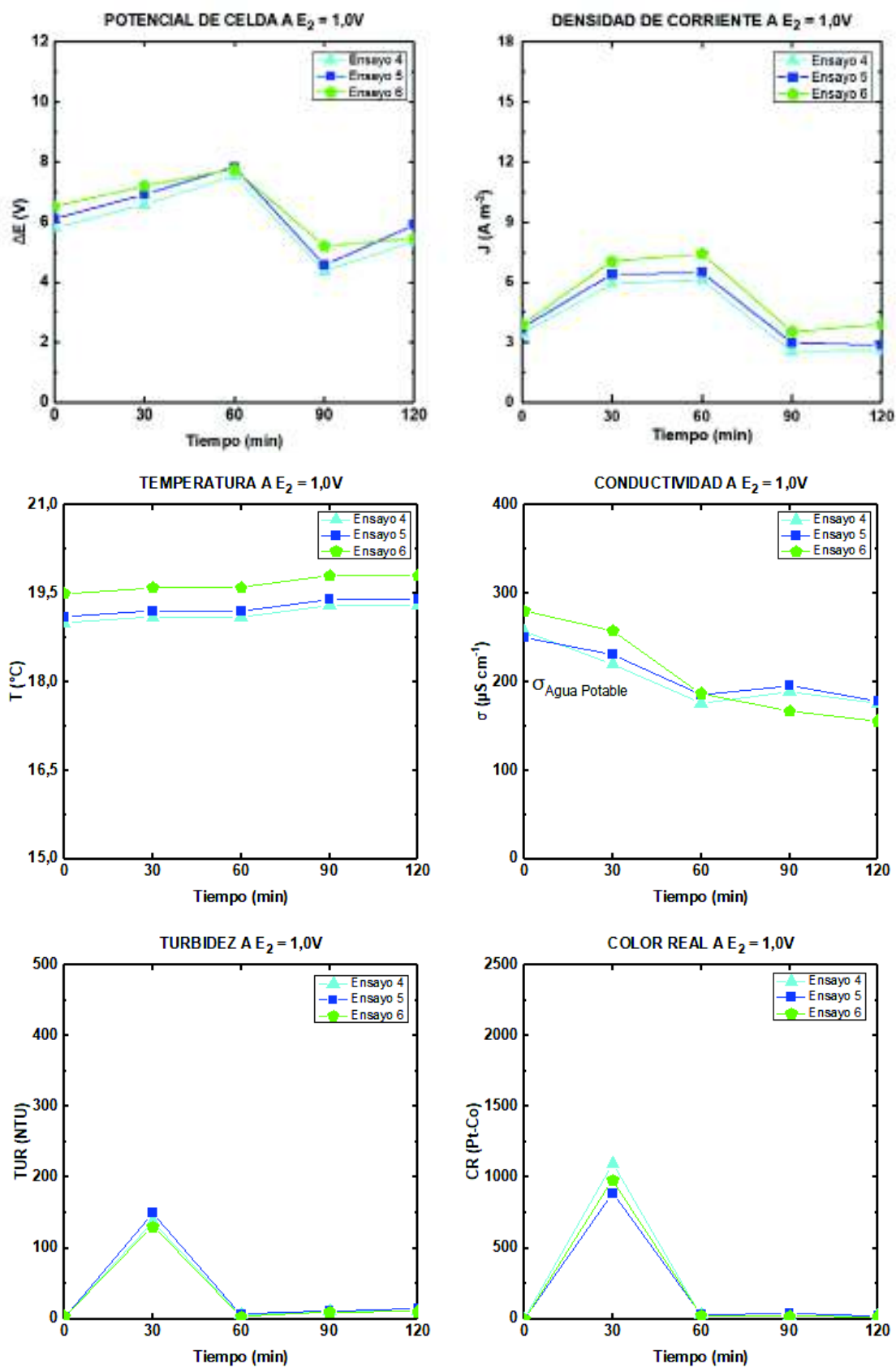
PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_1 = 0,5\text{ V}$



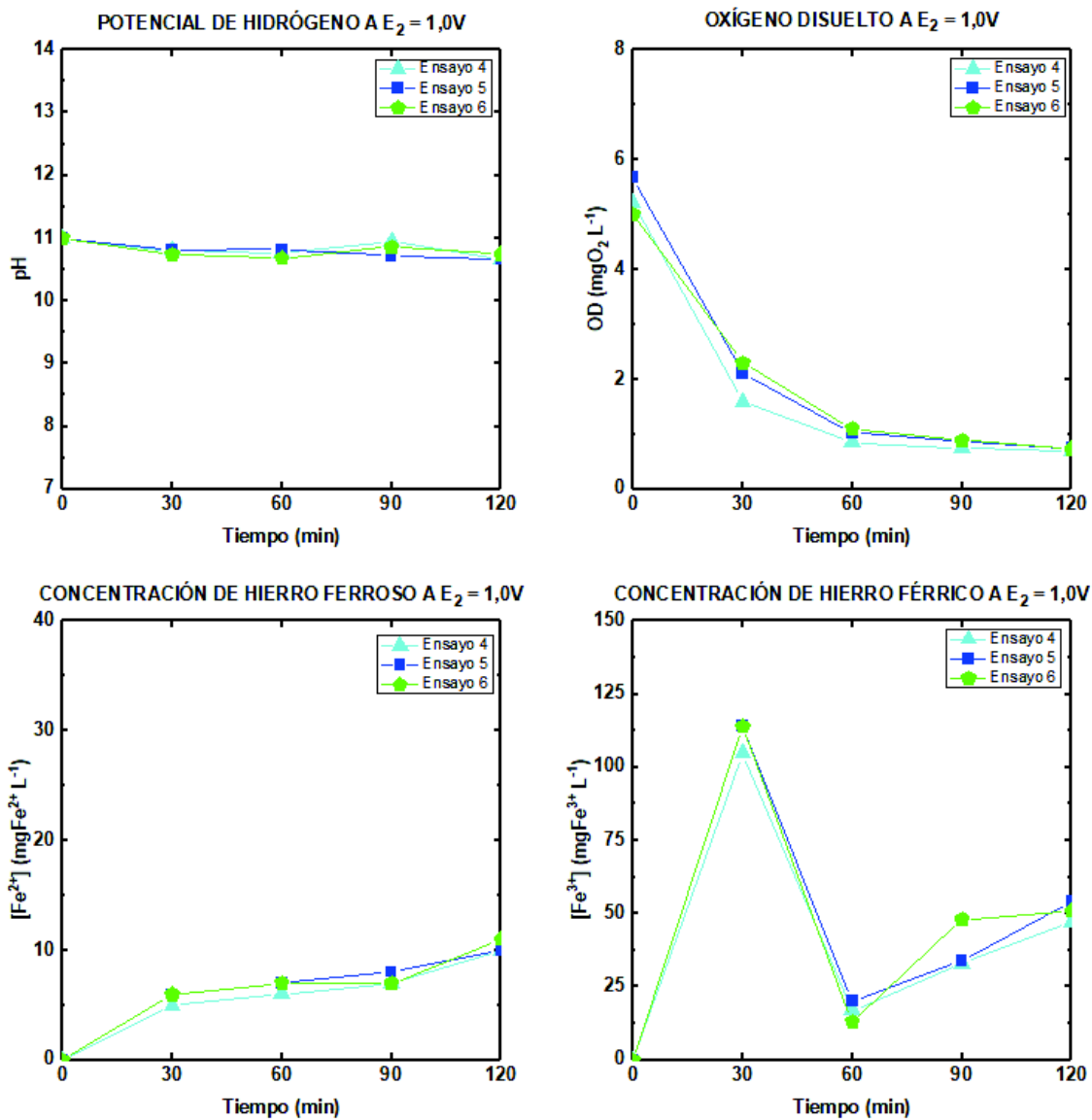
EFICIENCIA DE CELDA A $E_1 = 0,5\text{ V}$



PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_2 = 1,0\text{ V}$

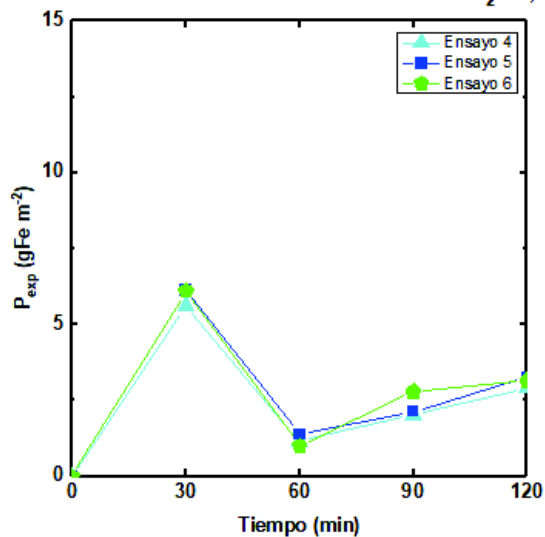


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_2 = 1,0\text{ V}$

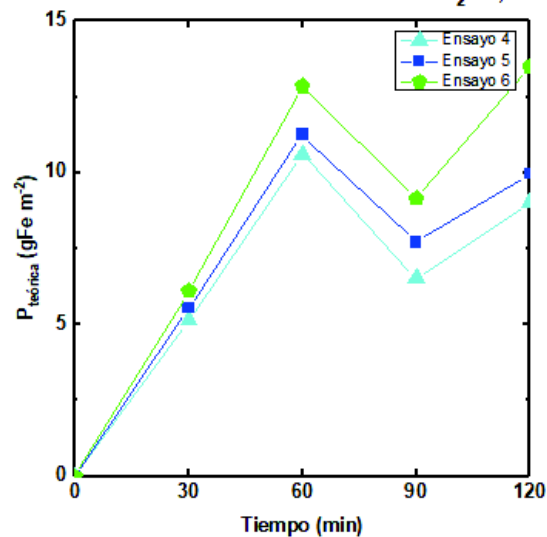


EFICIENCIA DE CELDA A $E_2 = 1,0\text{ V}$

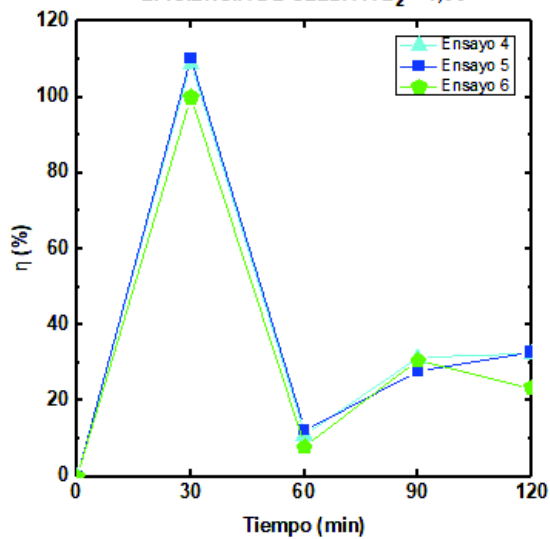
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_2 = 1,0\text{ V}$



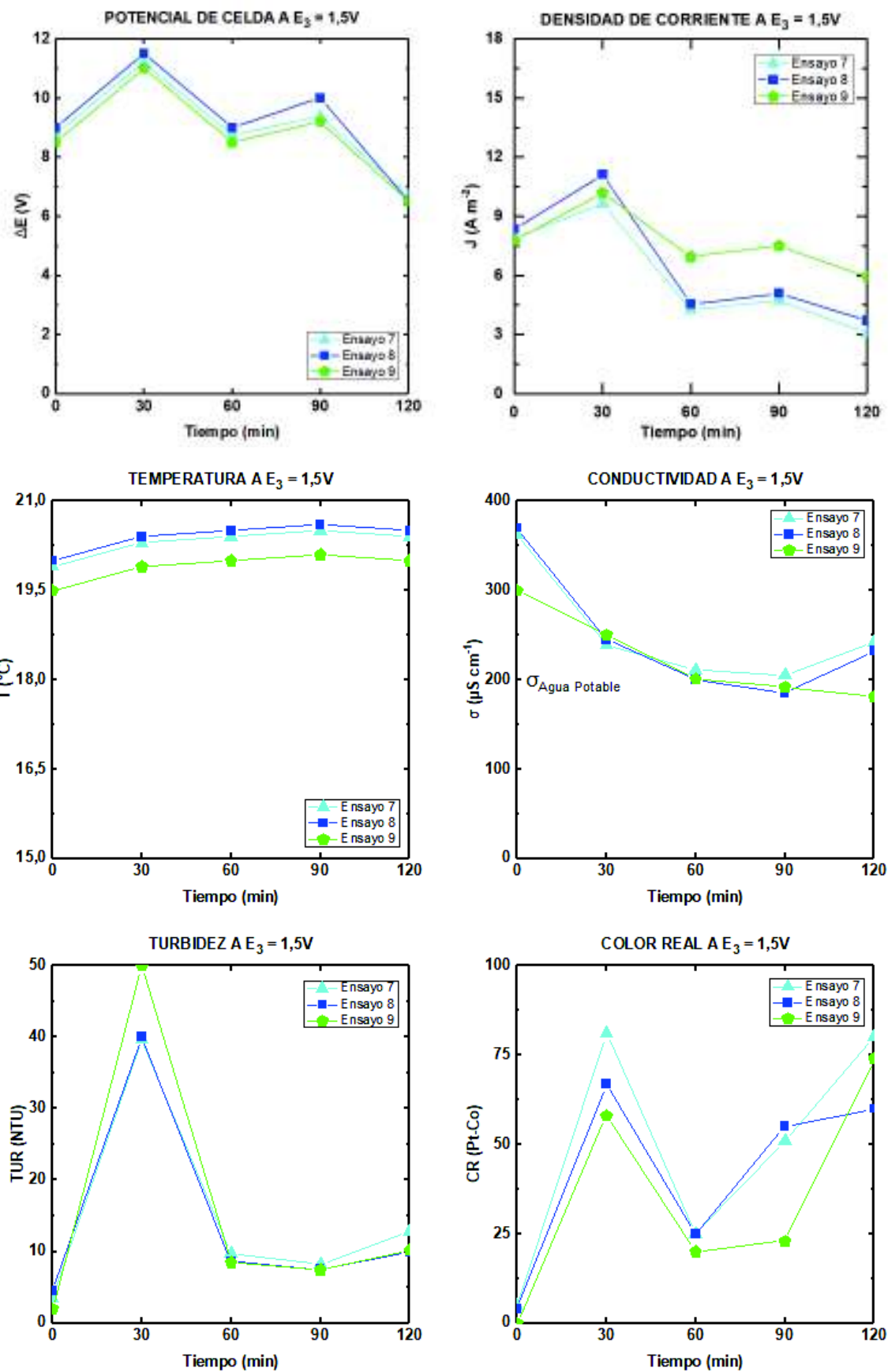
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_2 = 1,0\text{ V}$



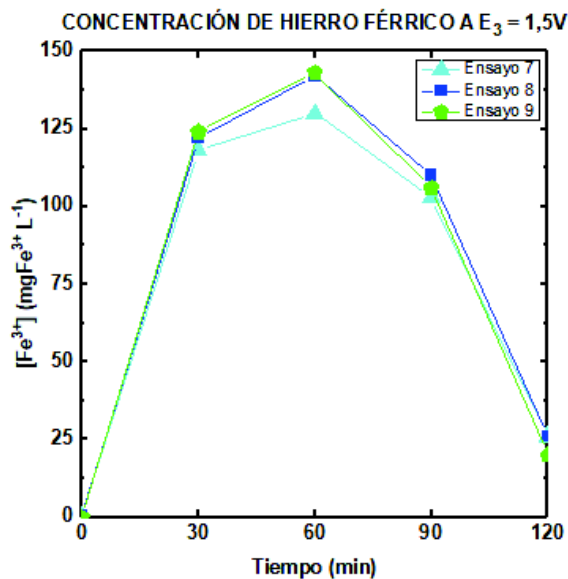
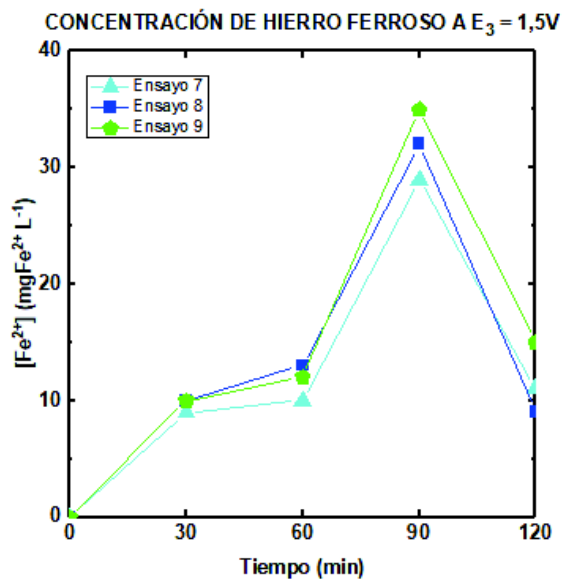
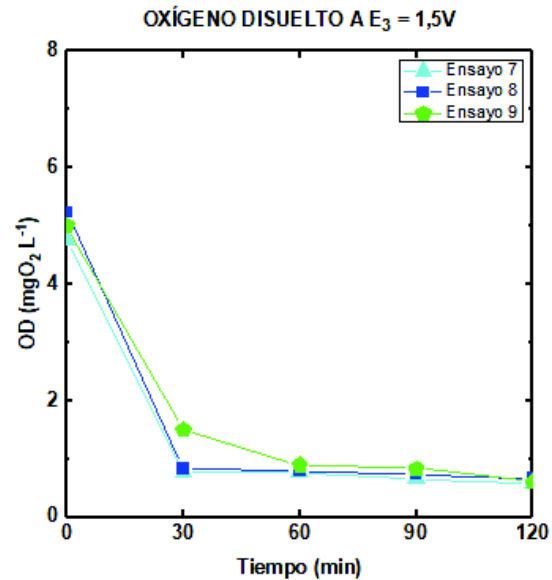
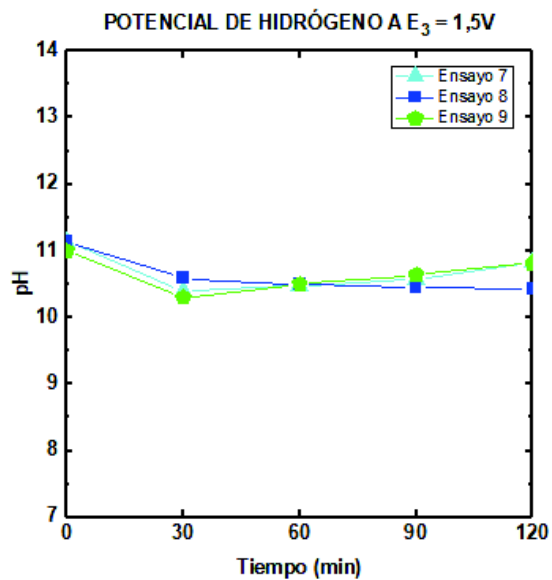
EFICIENCIA DE CELDA A $E_2 = 1,0\text{ V}$



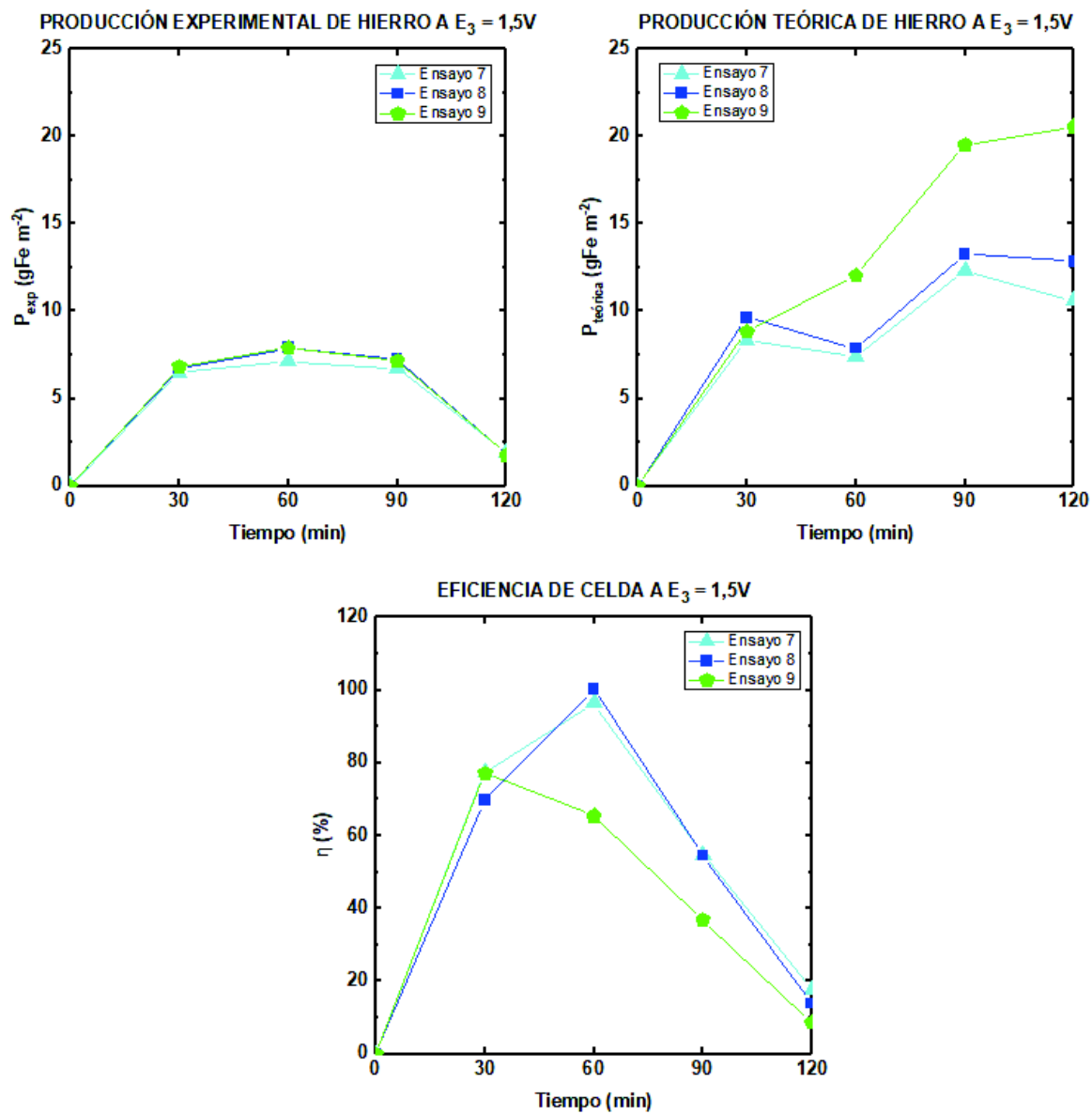
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_3 = 1,5\text{ V}$



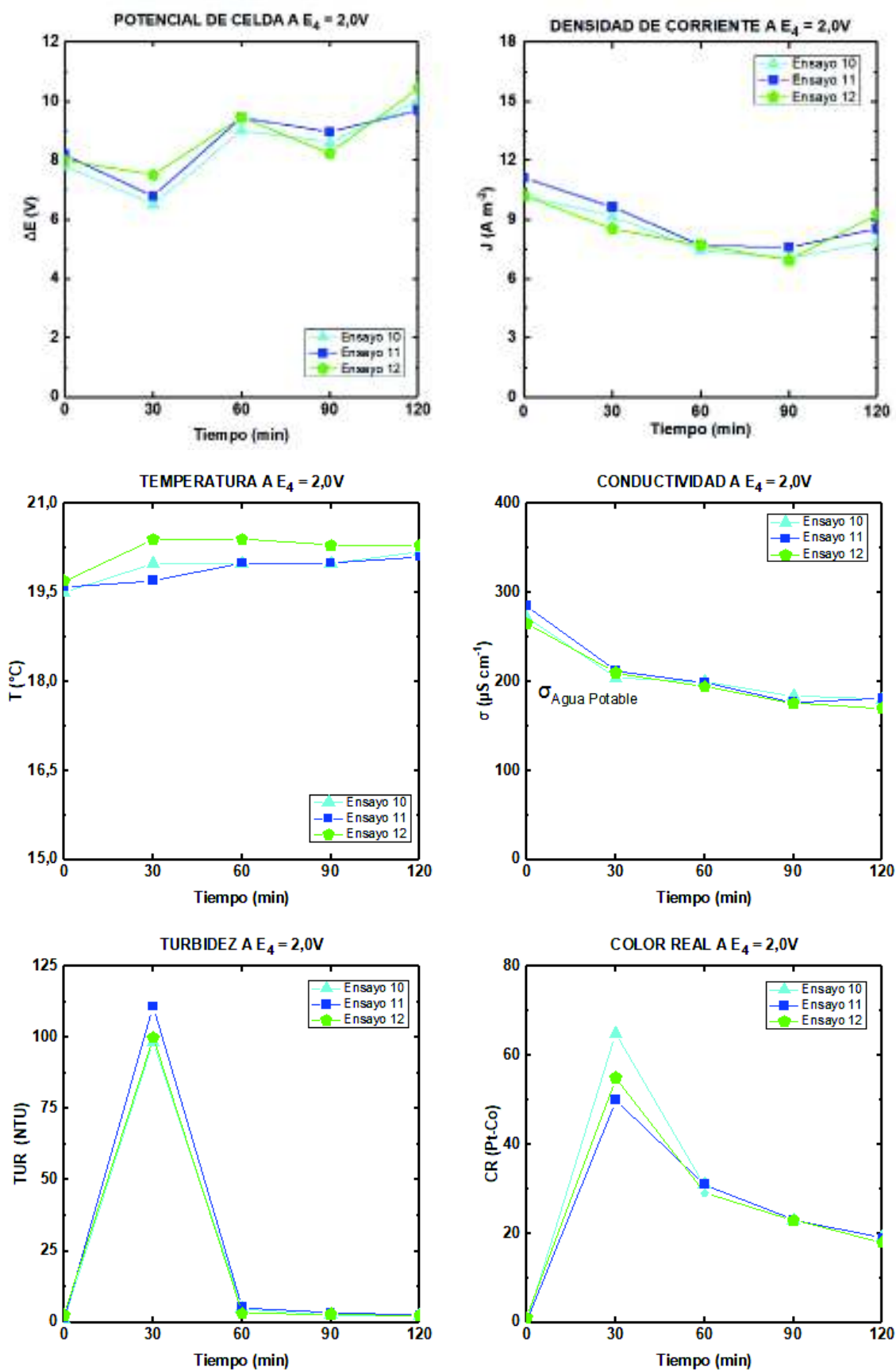
PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_3 = 1,5\text{ V}$



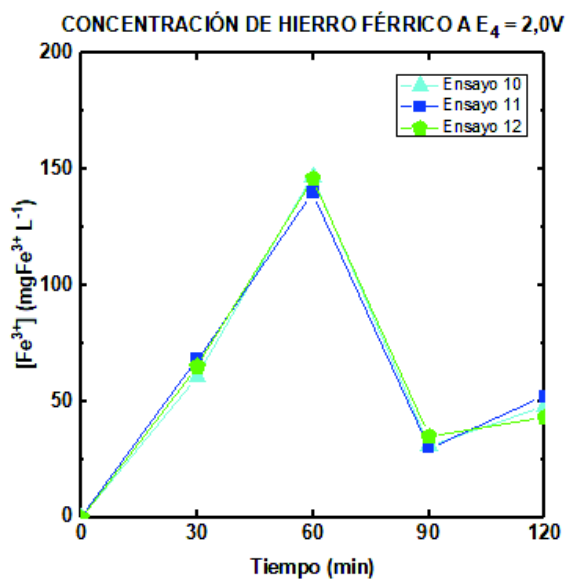
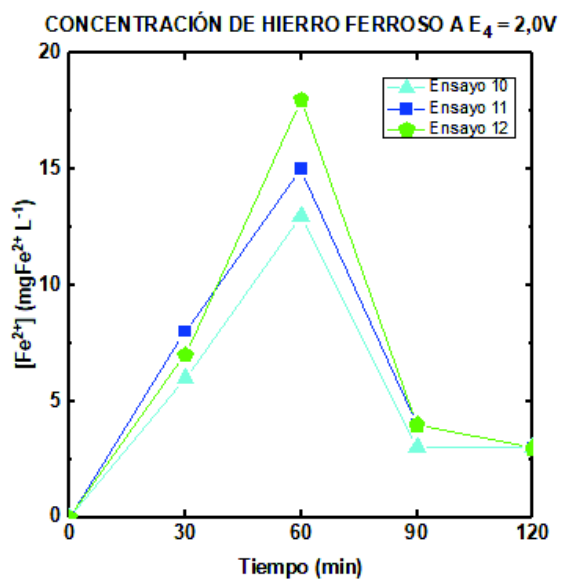
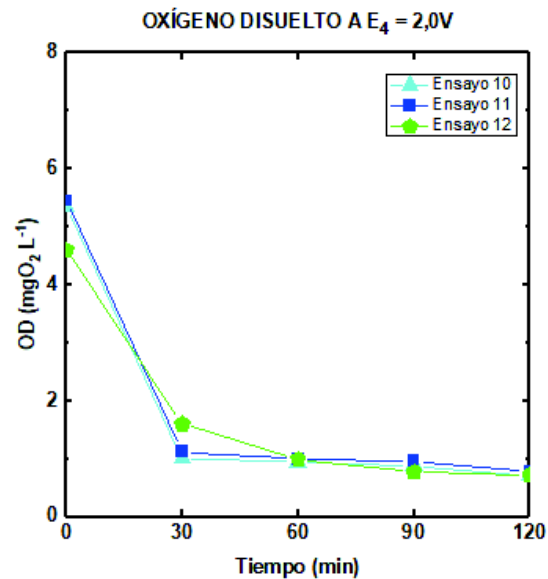
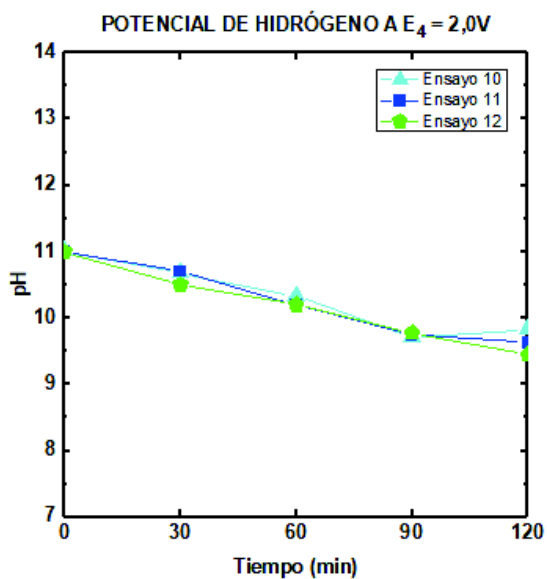
EFICIENCIA DE CELDA A $E_3 = 1,5\text{ V}$



PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_4 = 2,0\text{ V}$

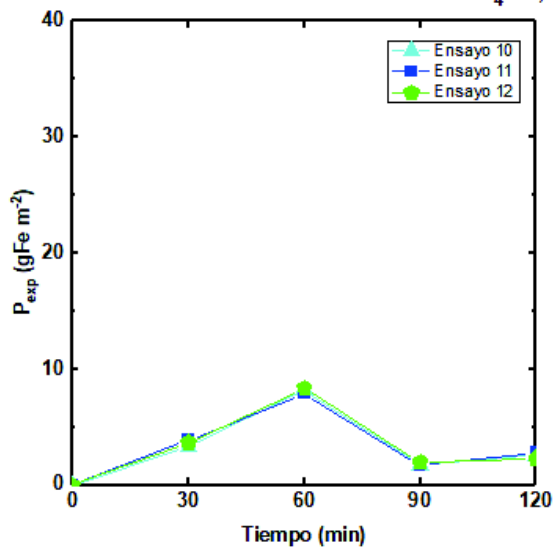


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_4 = 2,0\text{ V}$

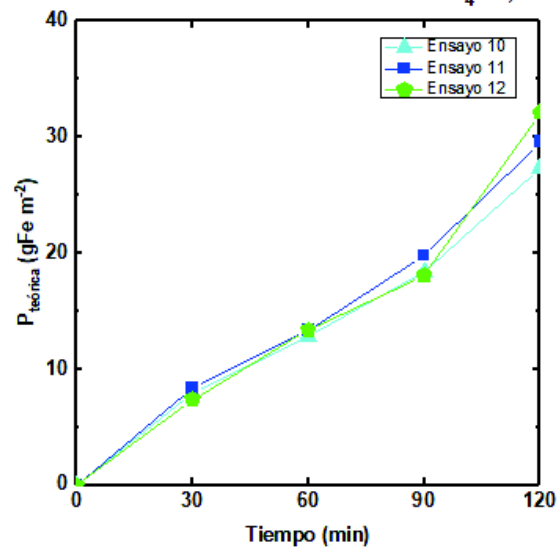


EFICIENCIA DE CELDA A $E_4 = 2,0\text{ V}$

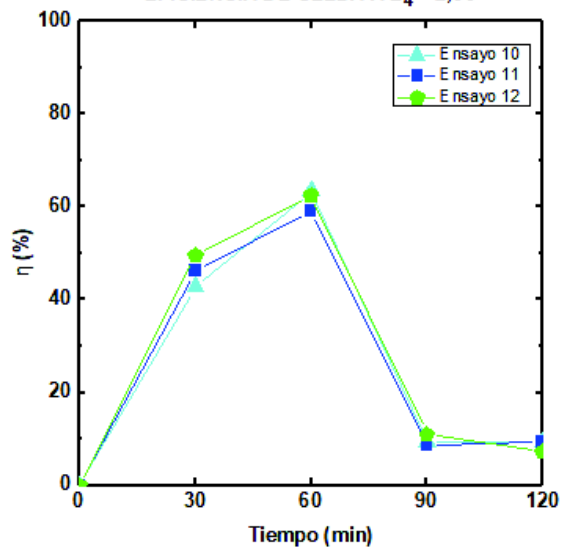
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_4 = 2,0\text{ V}$



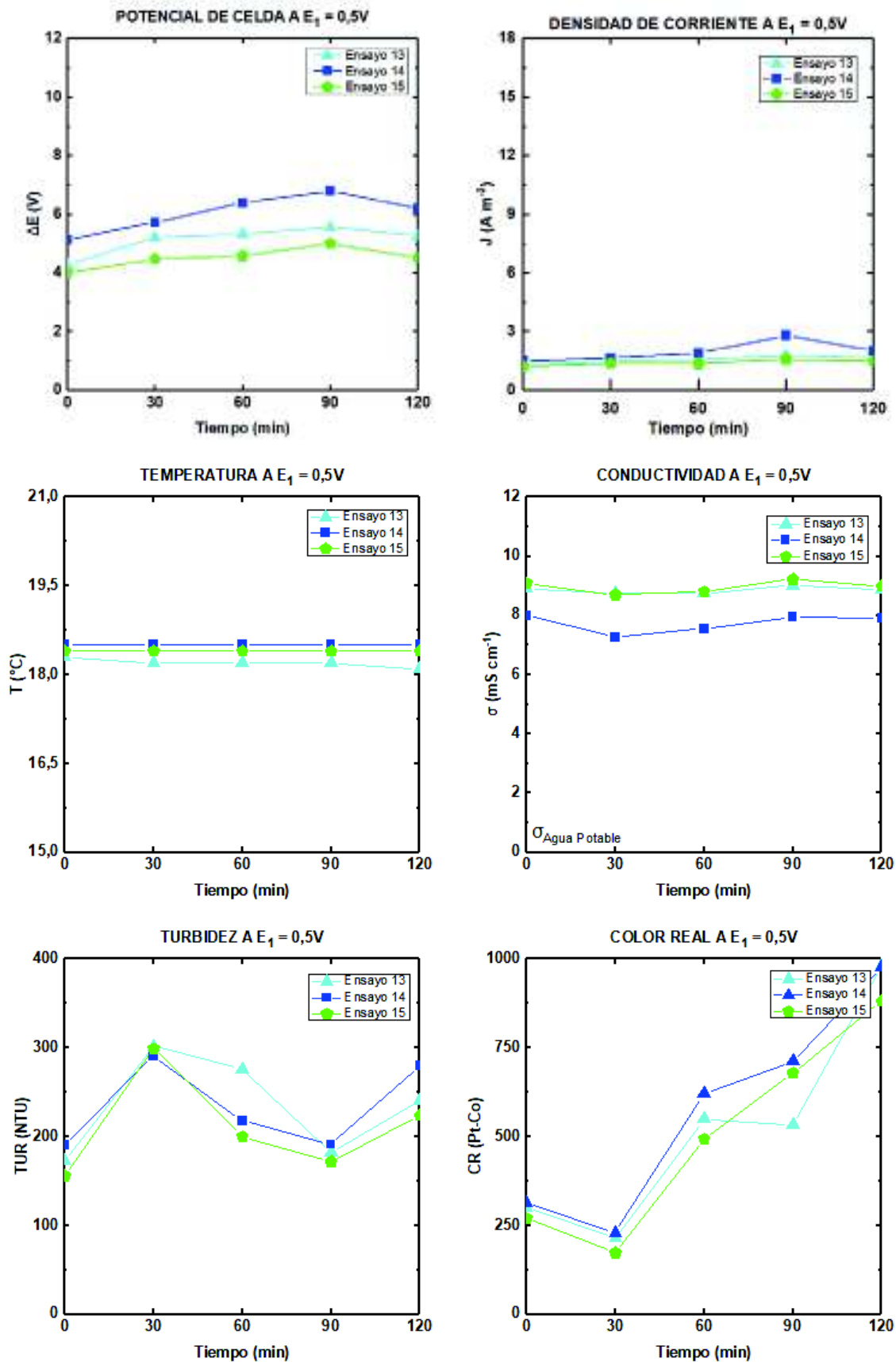
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_4 = 2,0\text{ V}$



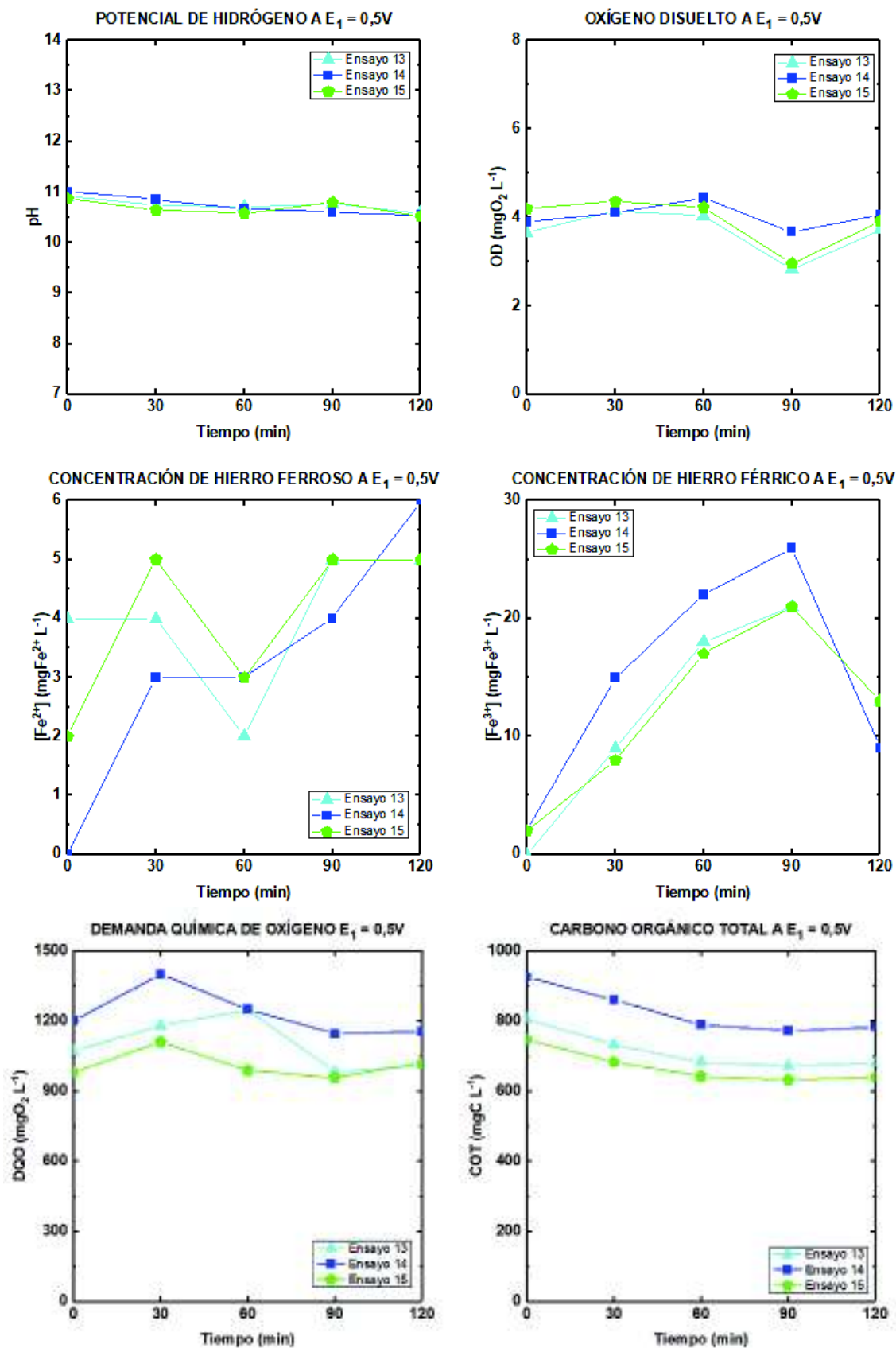
EFICIENCIA DE CELDA A $E_4 = 2,0\text{ V}$



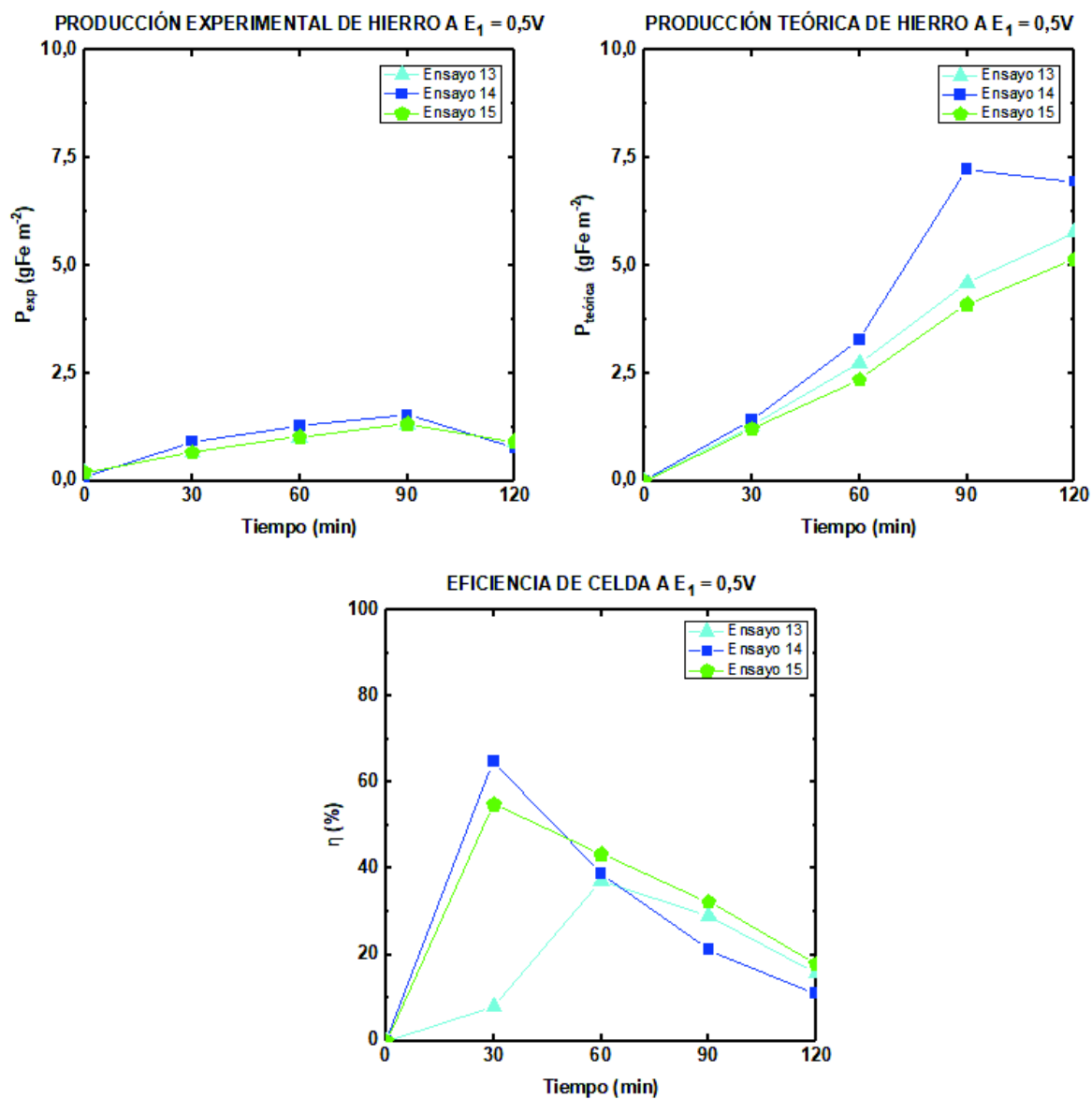
OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_1 = 0,5V$



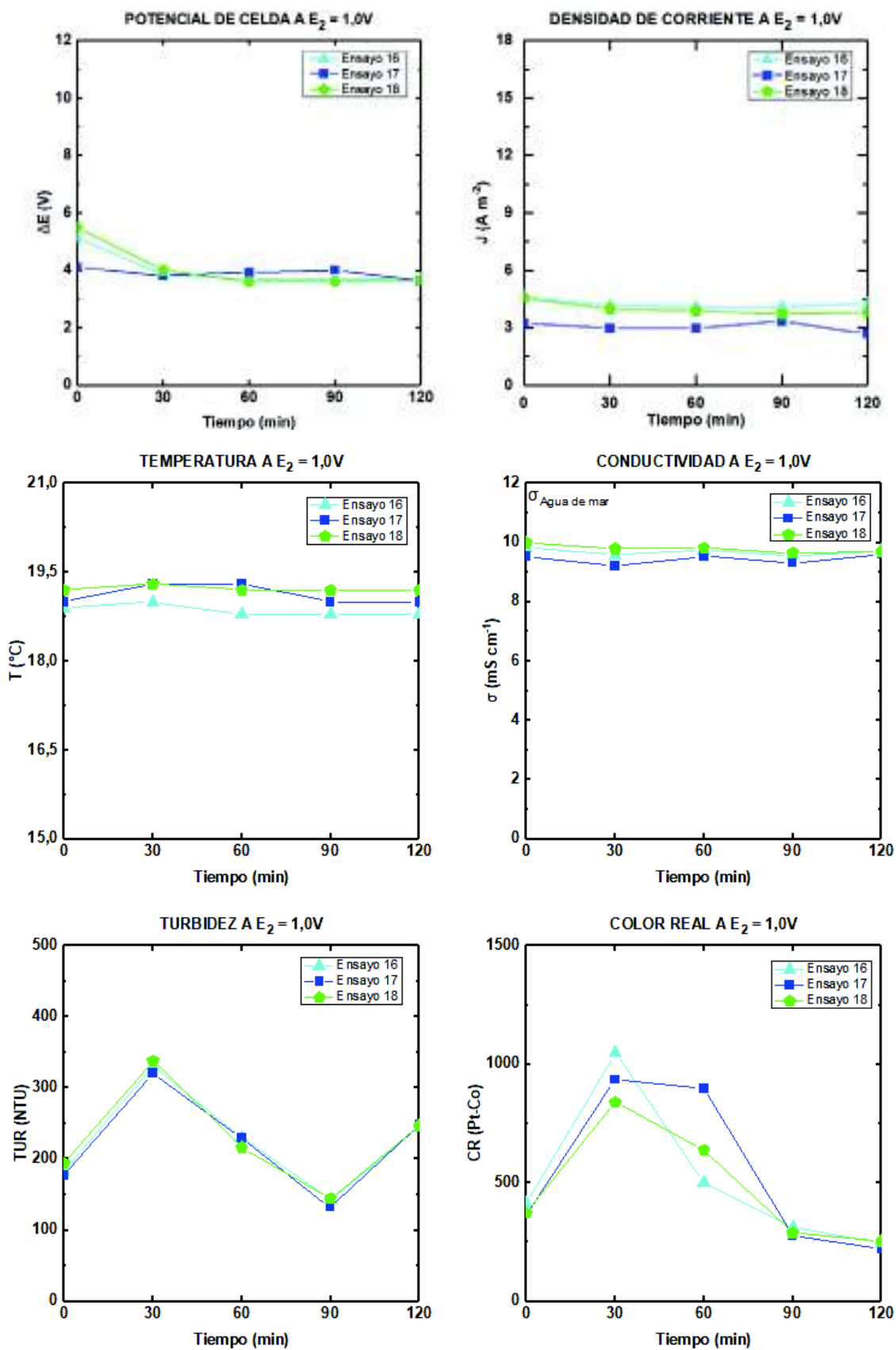
PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_1 = 0,5\text{ V}$



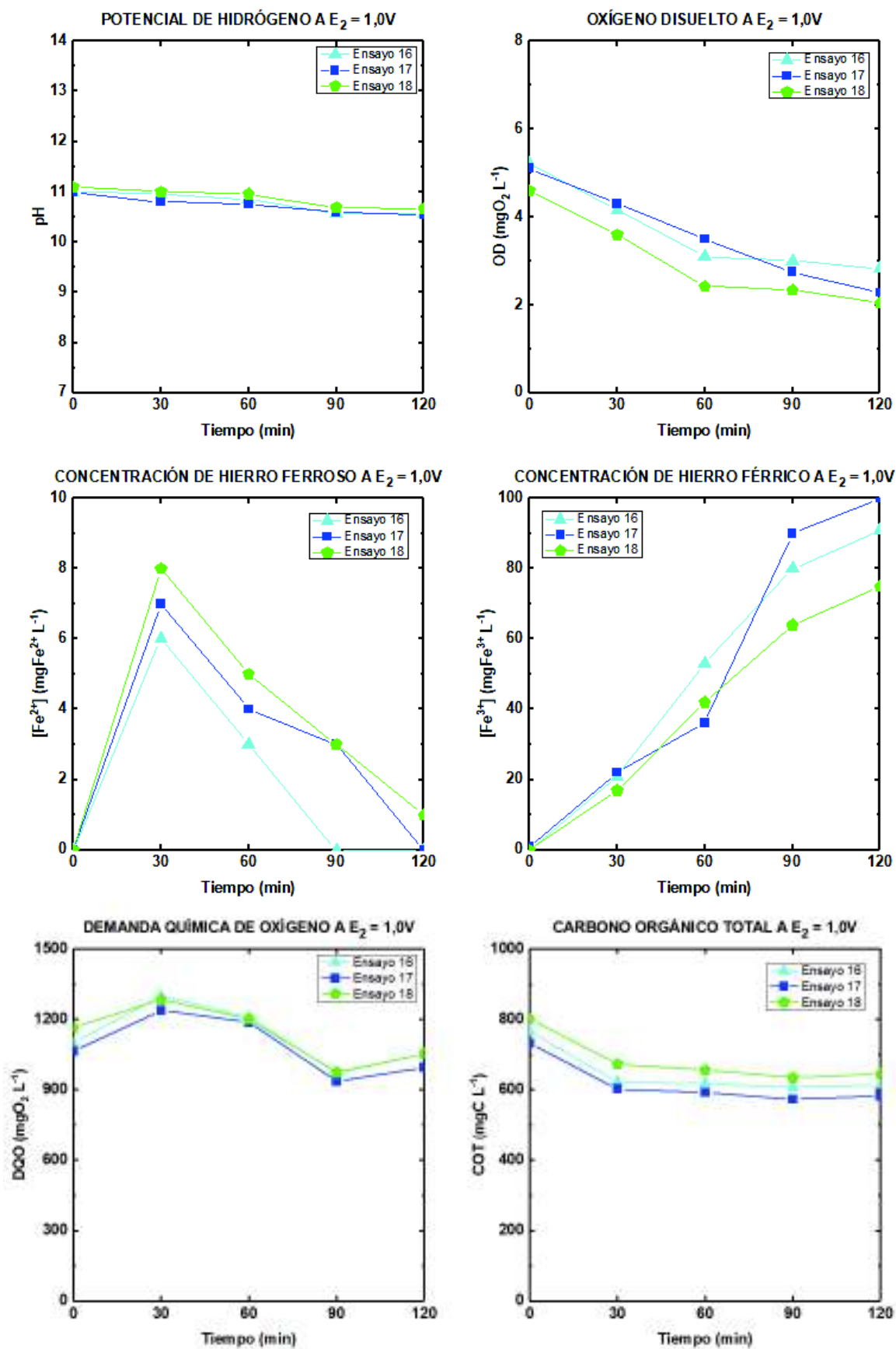
EFICIENCIA DE CELDA A $E_1 = 0,5\text{ V}$



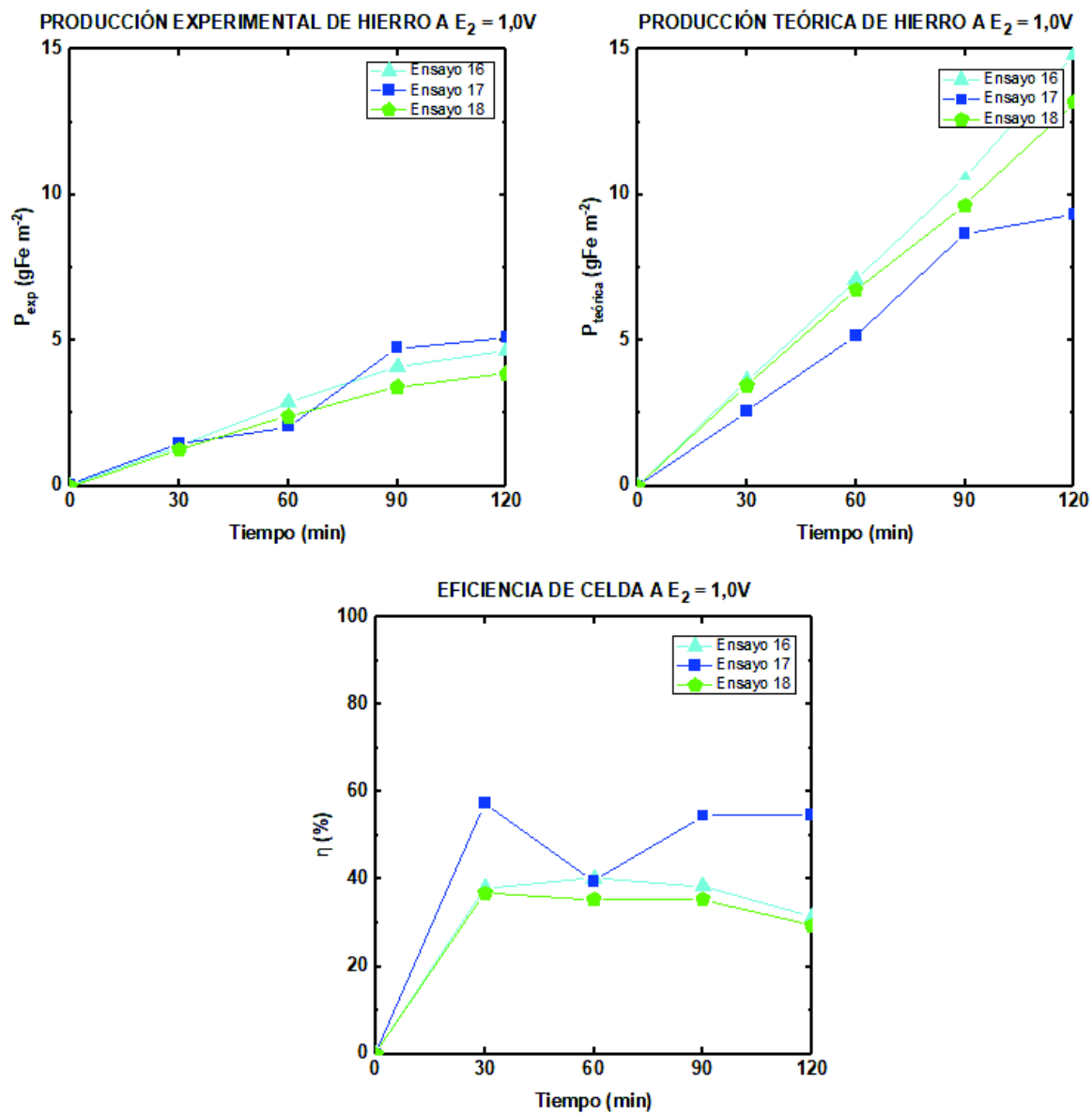
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_2 = 1,0\text{ V}$



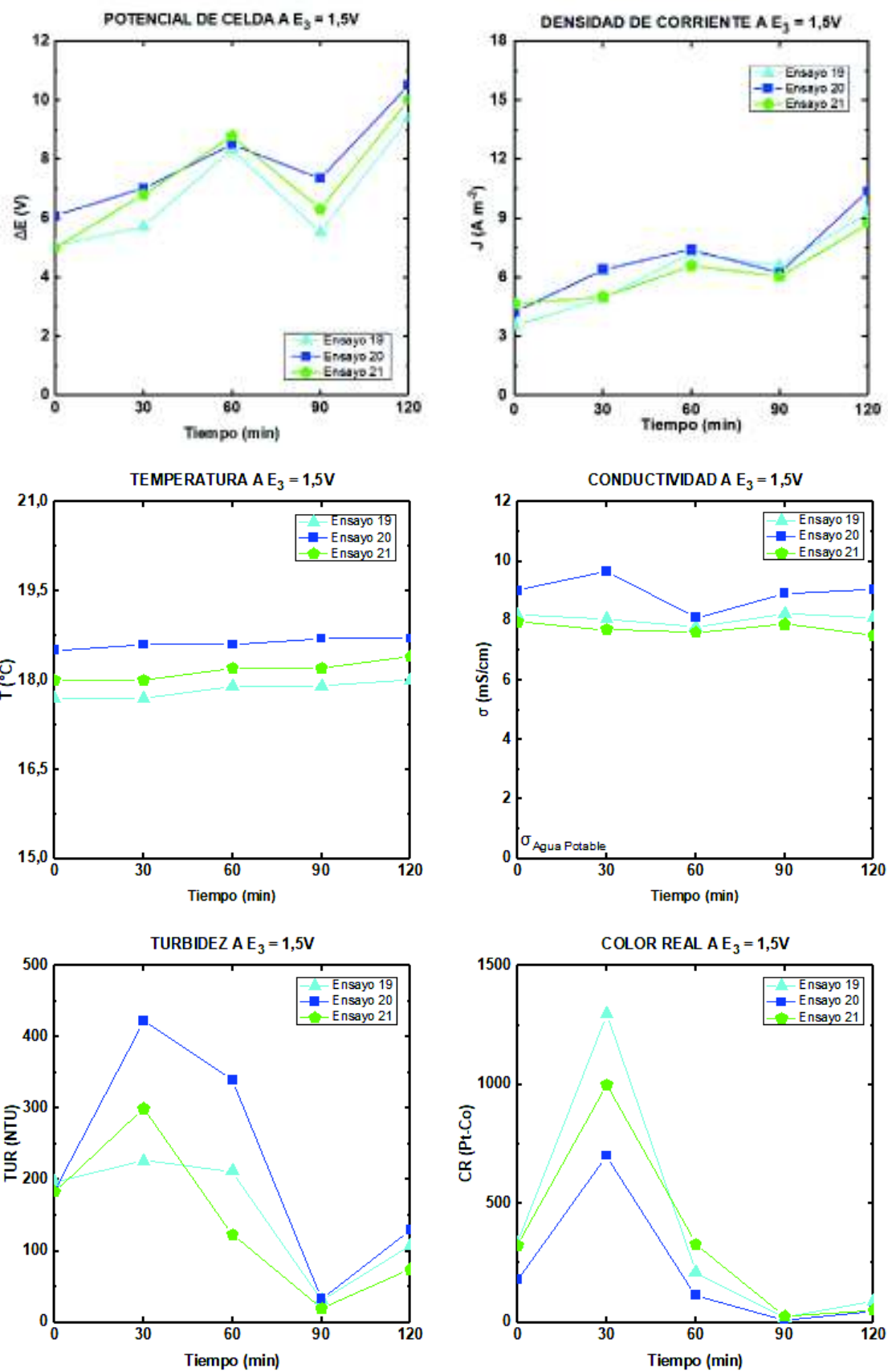
PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_2 = 1,0\text{ V}$



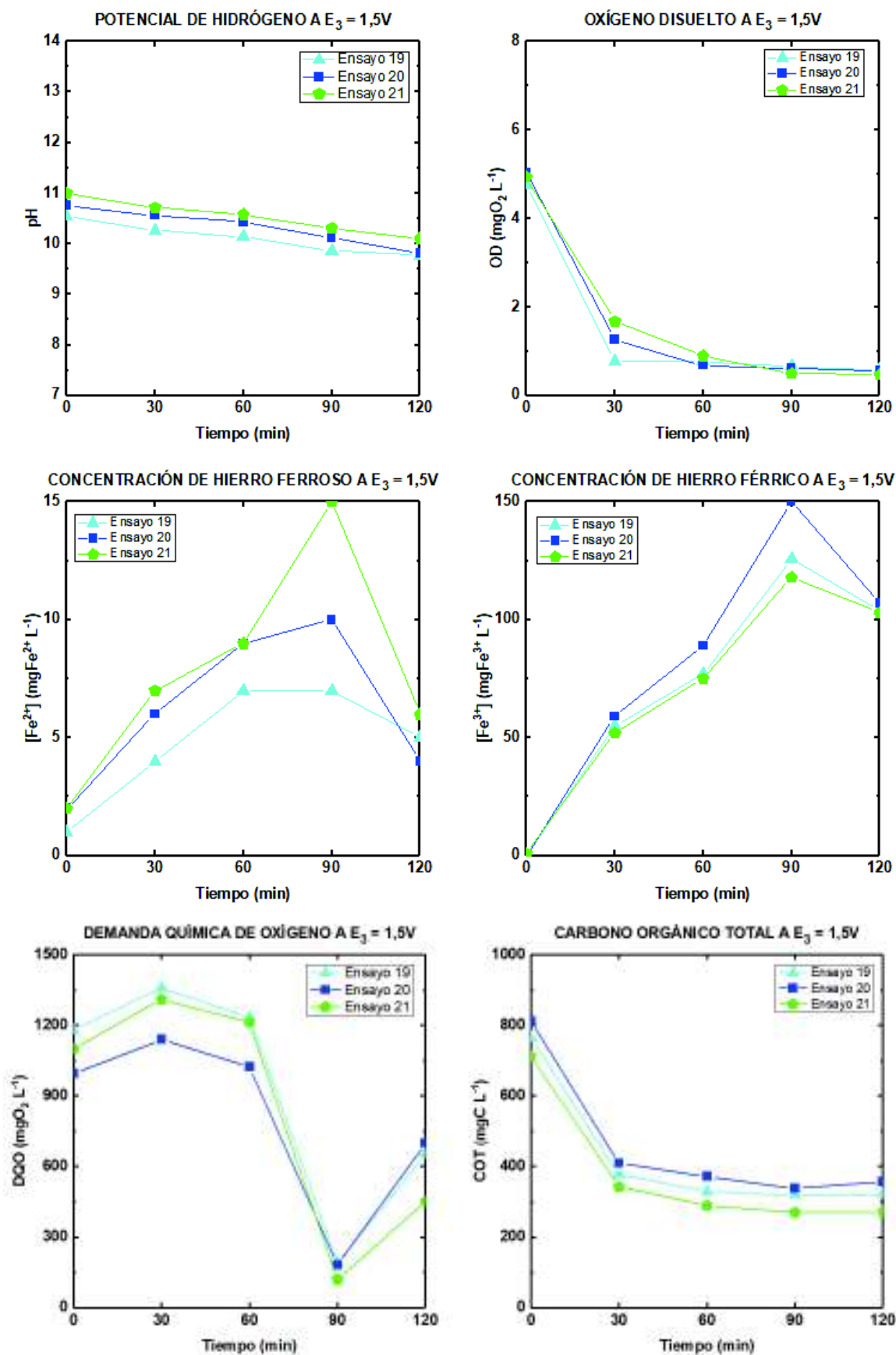
EFICIENCIA DE CELDA A $E_2 = 1,0\text{ V}$



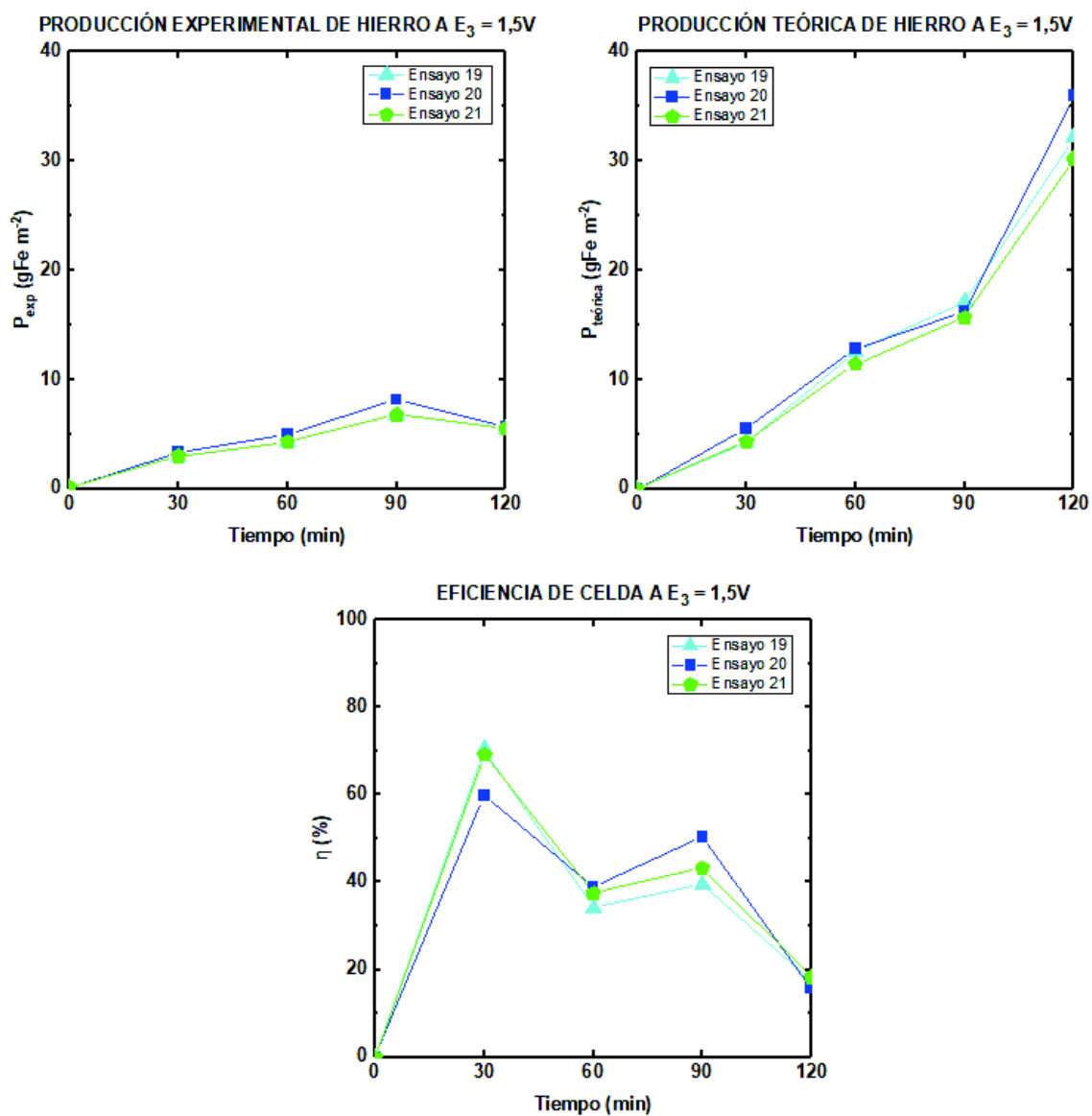
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_3 = 1,5V$



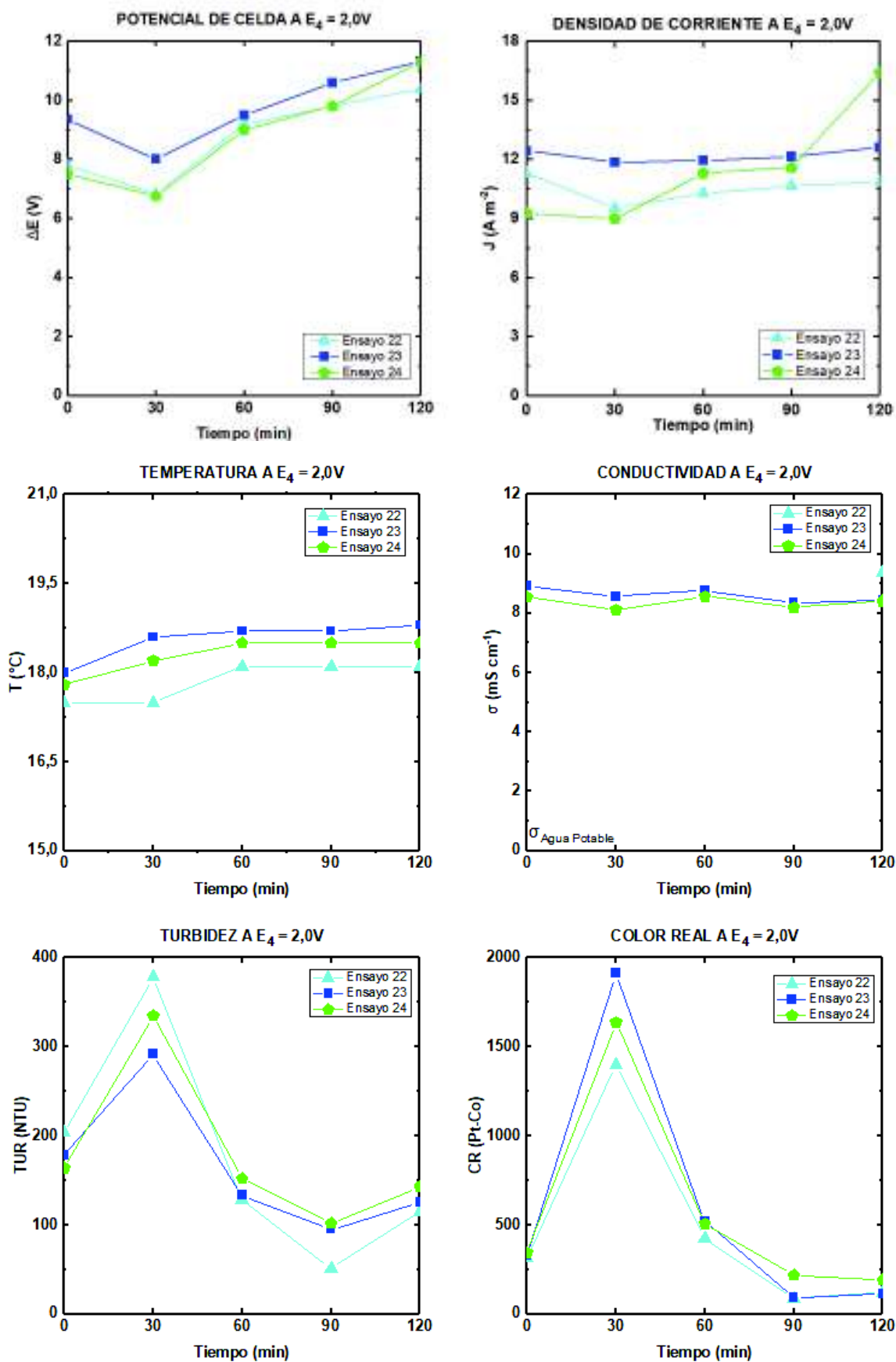
PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_3 = 1,5\text{ V}$



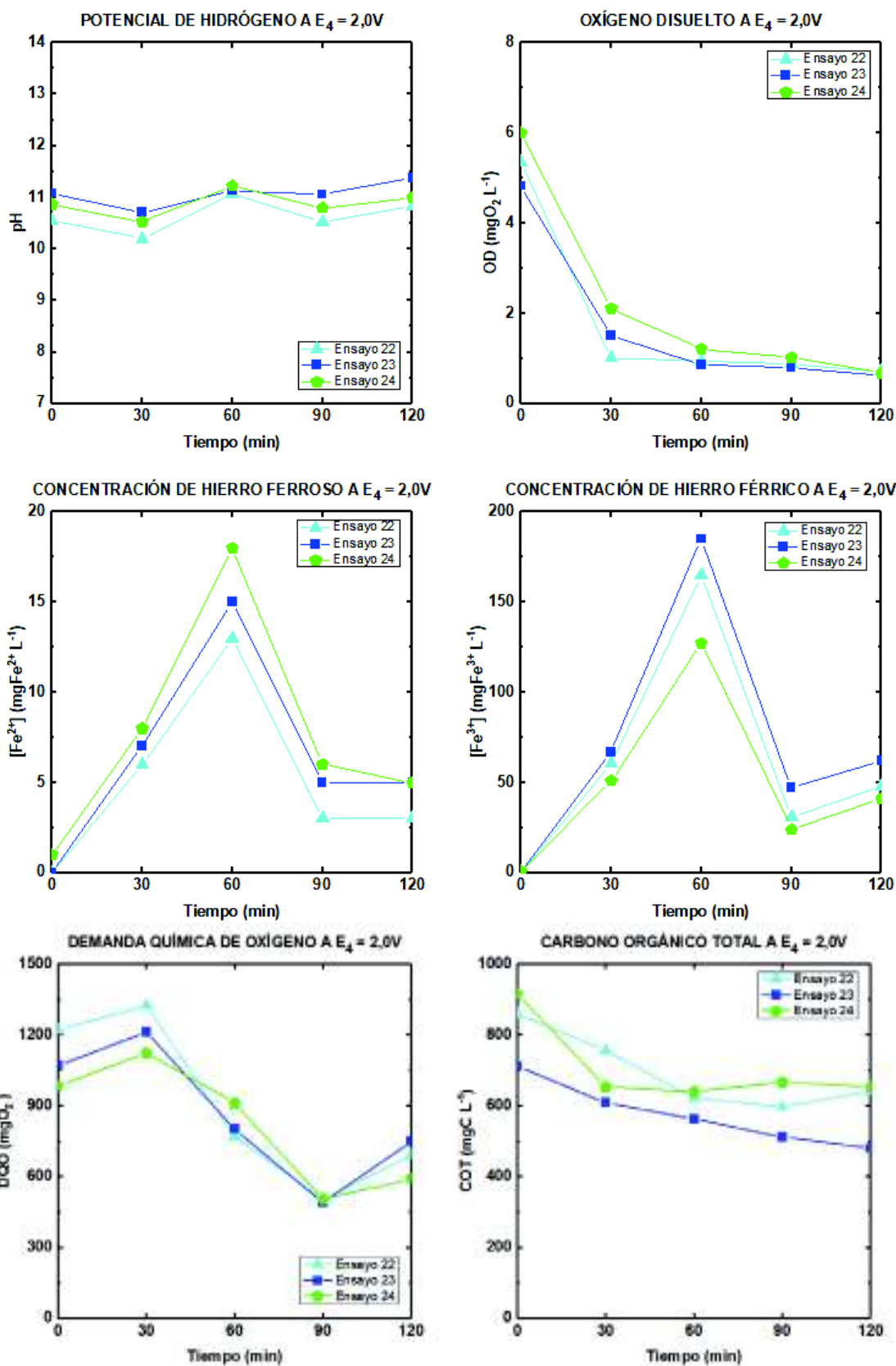
EFICIENCIA DE CELDA A $E_3 = 1,5\text{ V}$



PARÁMETROS ELÉCTRICOS A $E_4 = 2,0$ V

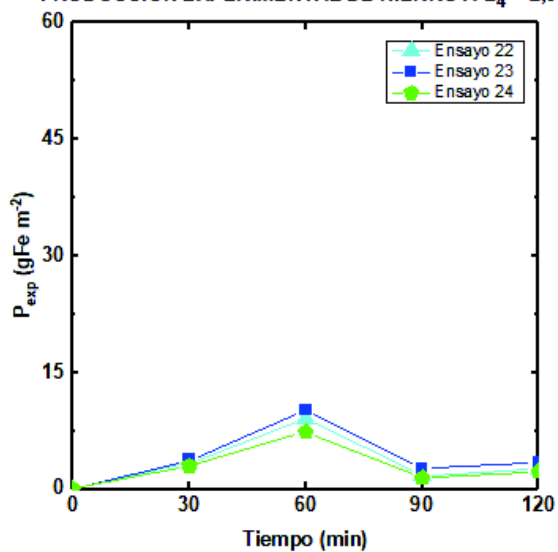


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_4 = 2,0\text{ V}$

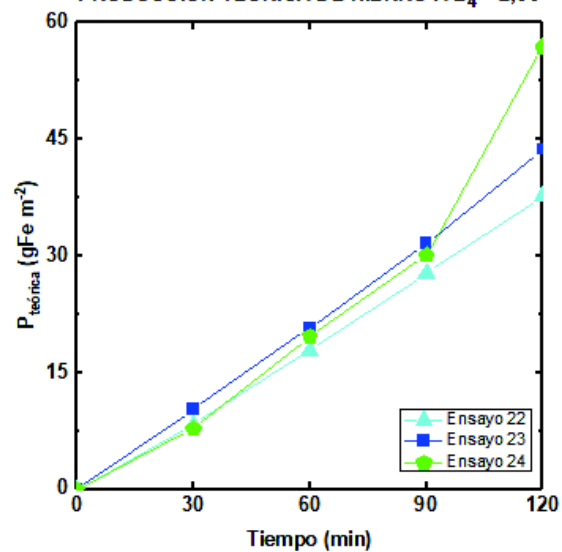


EFICIENCIA DE CELDA A $E_4 = 2,0\text{ V}$

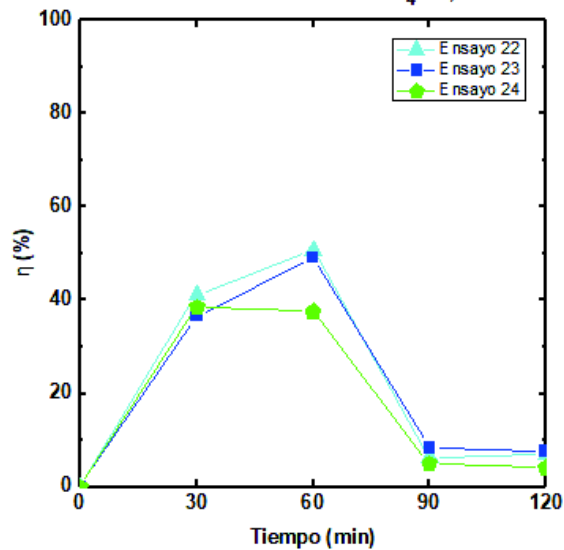
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_4 = 2,0\text{ V}$



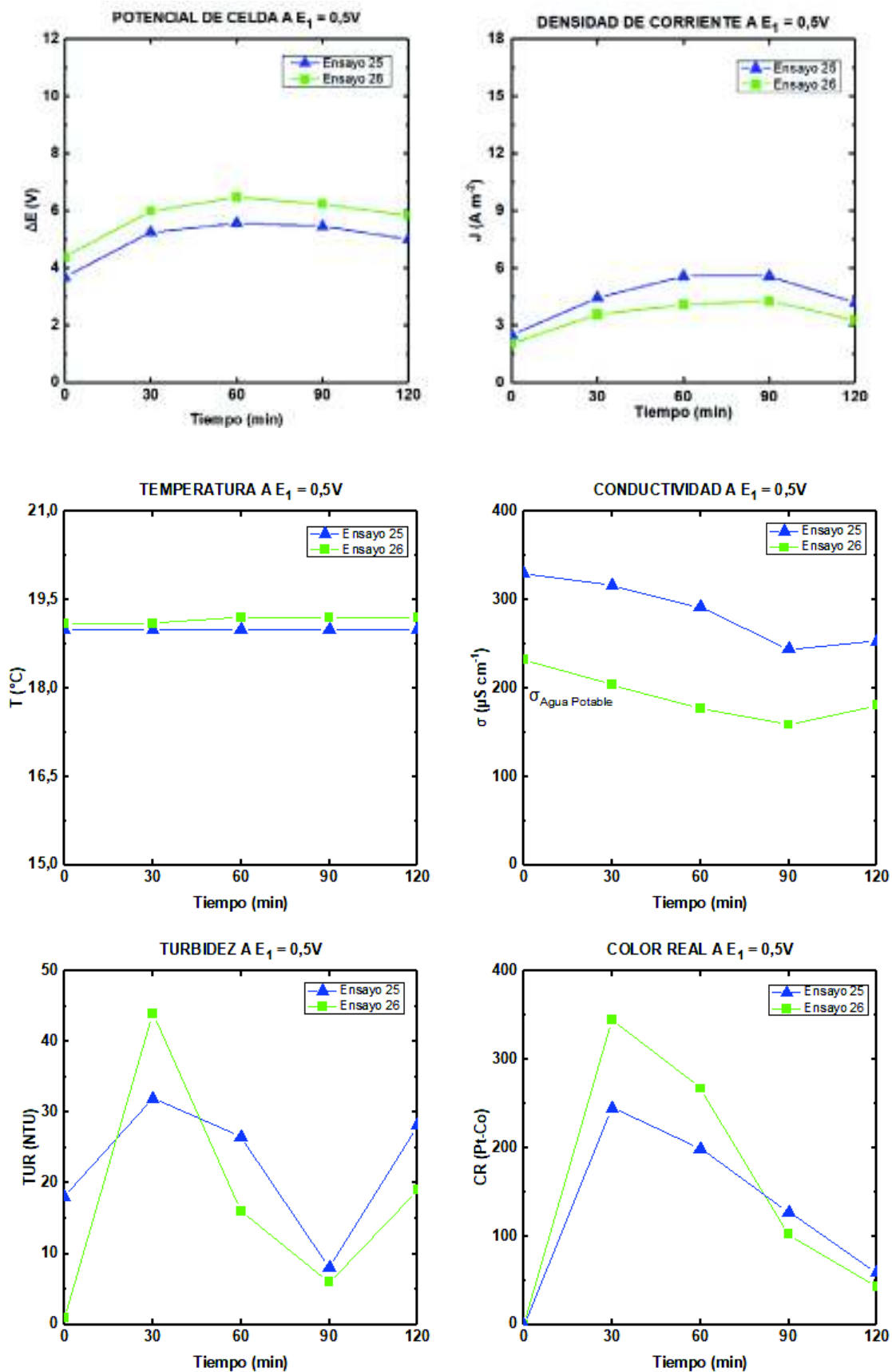
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_4 = 2,0\text{ V}$



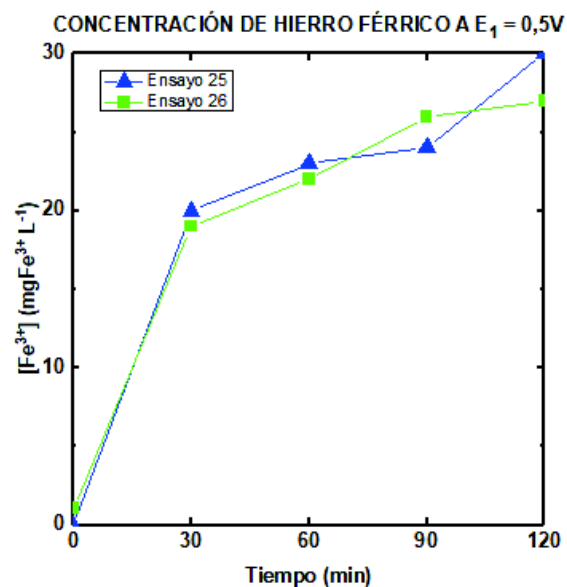
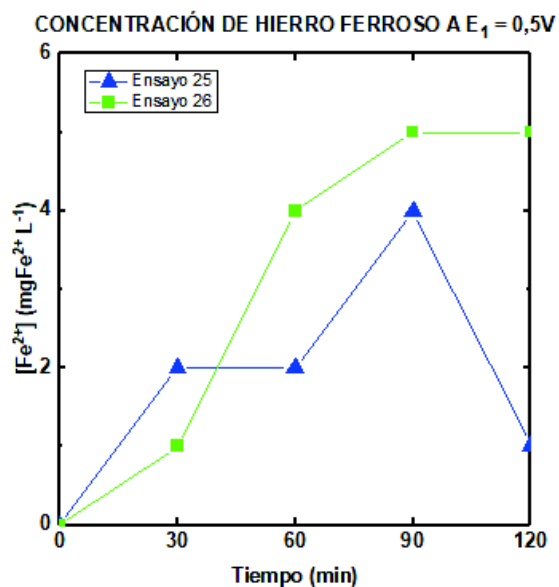
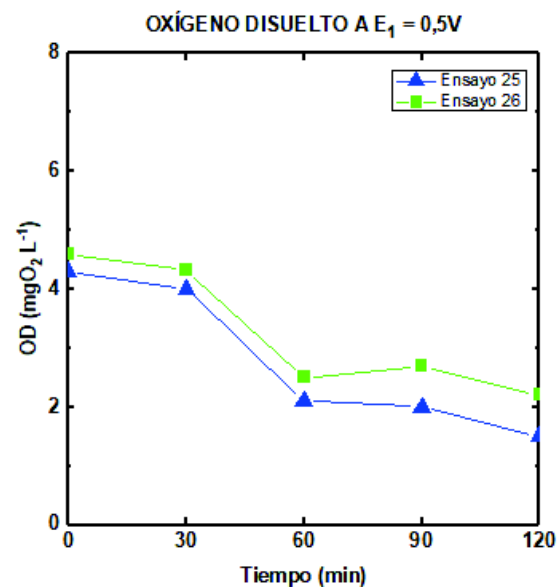
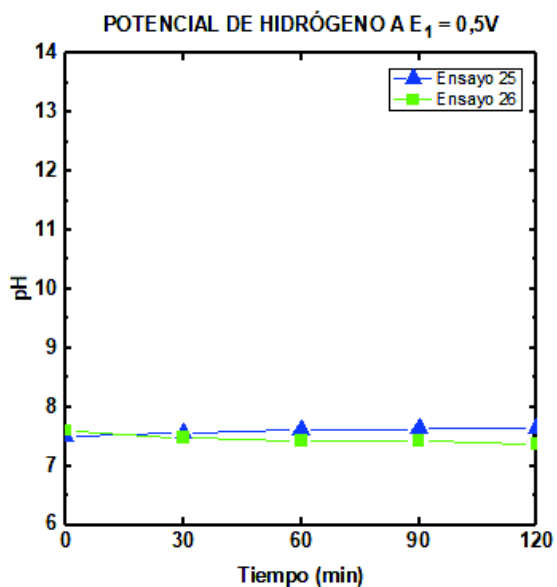
EFICIENCIA DE CELDA A $E_4 = 2,0\text{ V}$



OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA POTABLE A pH = 7,5 PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_1 = 0,5V$

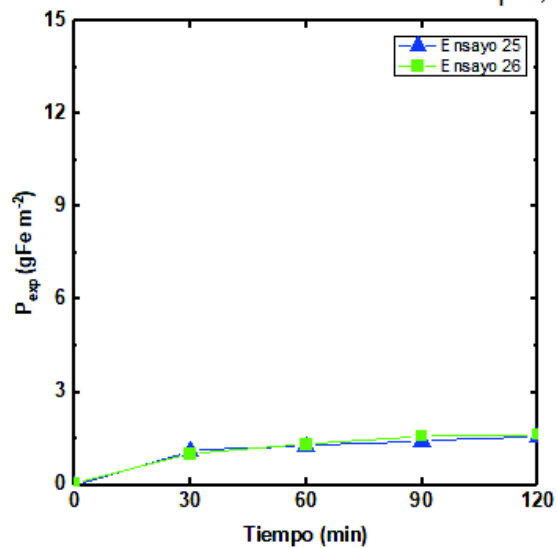


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_1 = 0,5\text{ V}$

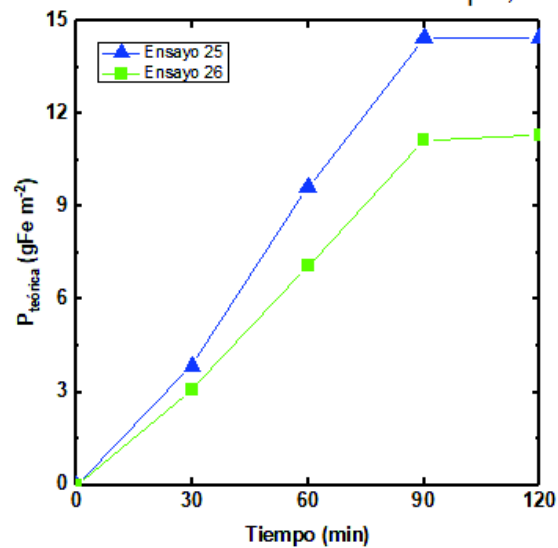


EFICIENCIA DE CELDA A $E_1 = 0,5 \text{ V}$

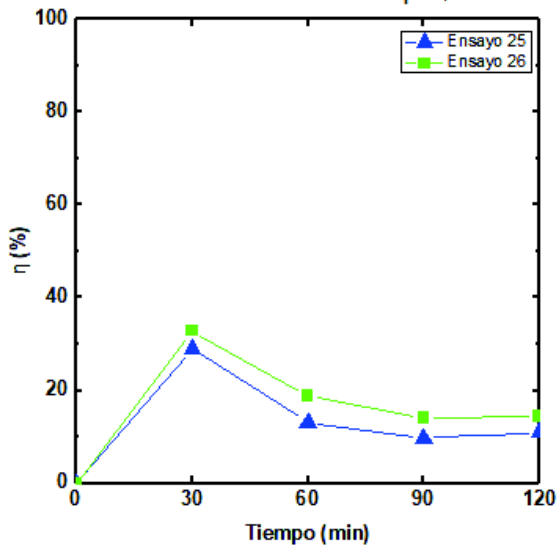
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_1 = 0,5 \text{ V}$



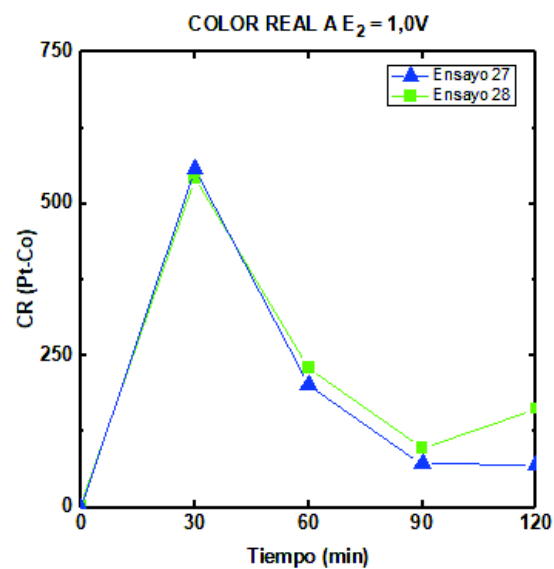
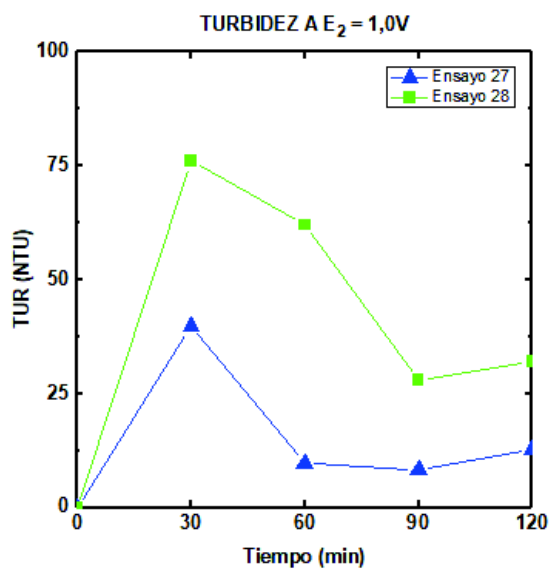
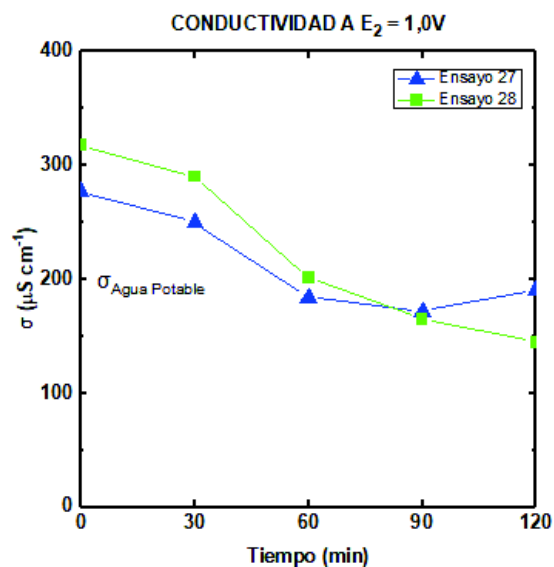
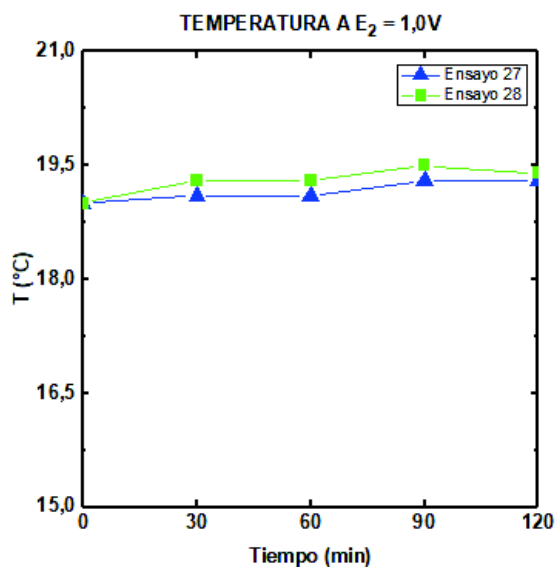
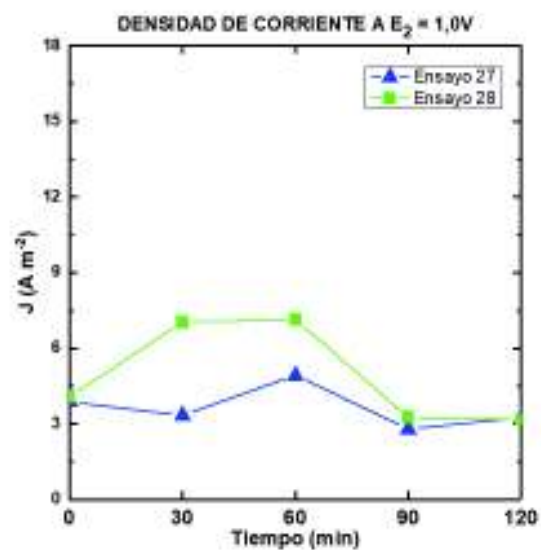
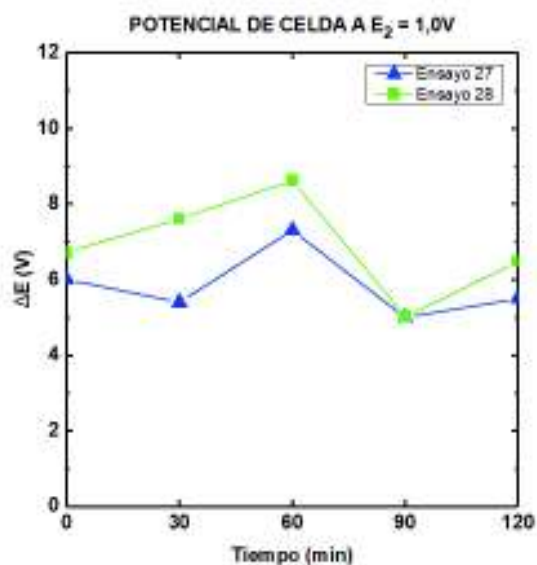
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_1 = 0,5 \text{ V}$



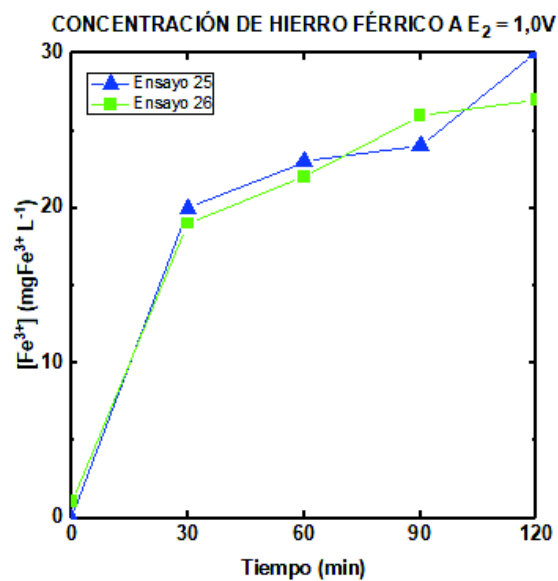
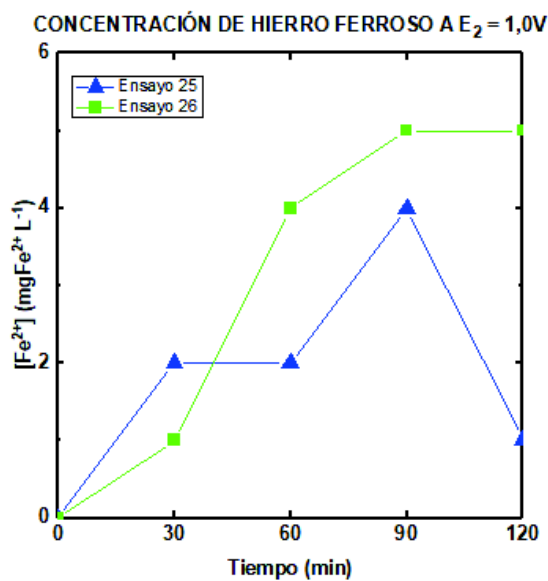
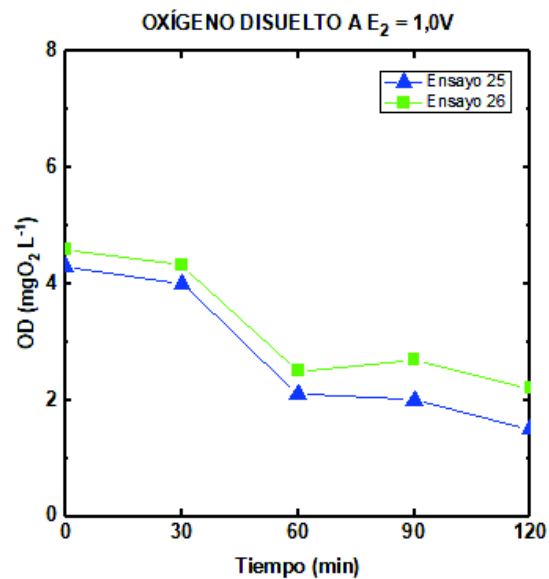
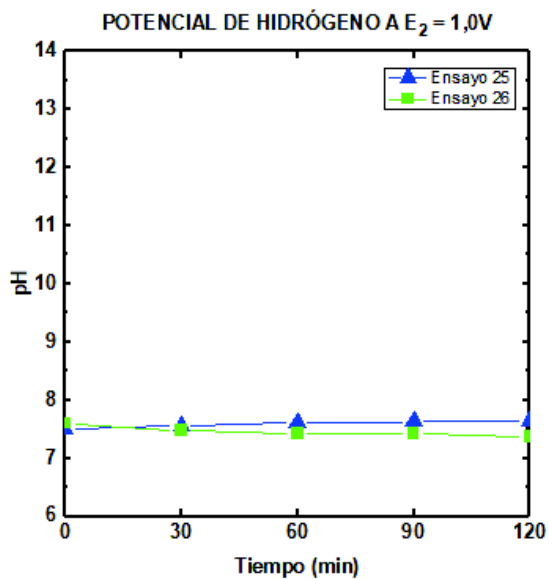
EFICIENCIA DE CELDA A $E_1 = 0,5 \text{ V}$



PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_2 = 1,0V$

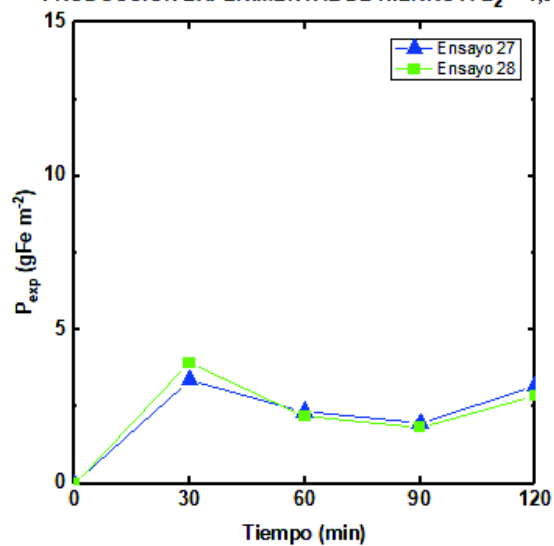


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_2 = 1,0\text{ V}$

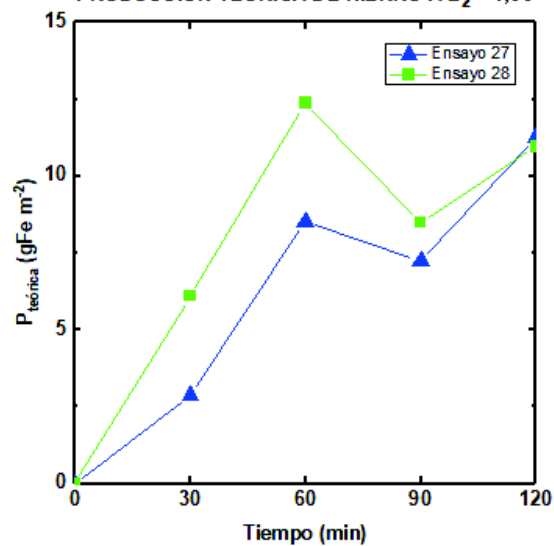


EFICIENCIA DE CELDA A $E_2 = 1,0\text{ V}$

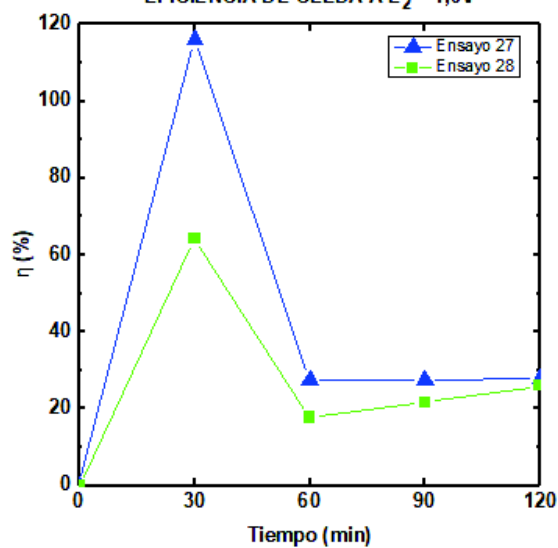
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_2 = 1,0\text{V}$



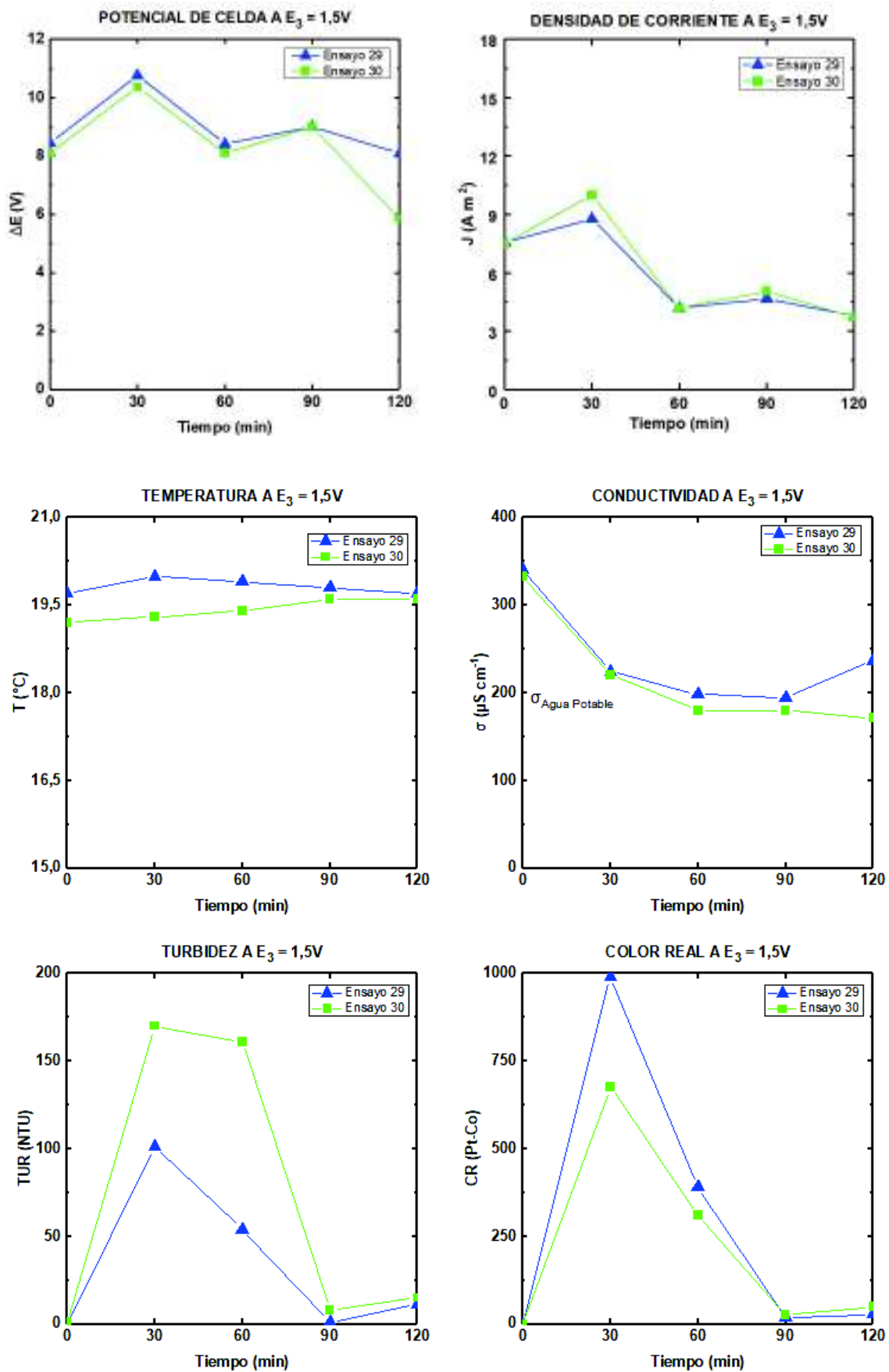
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_2 = 1,0\text{V}$



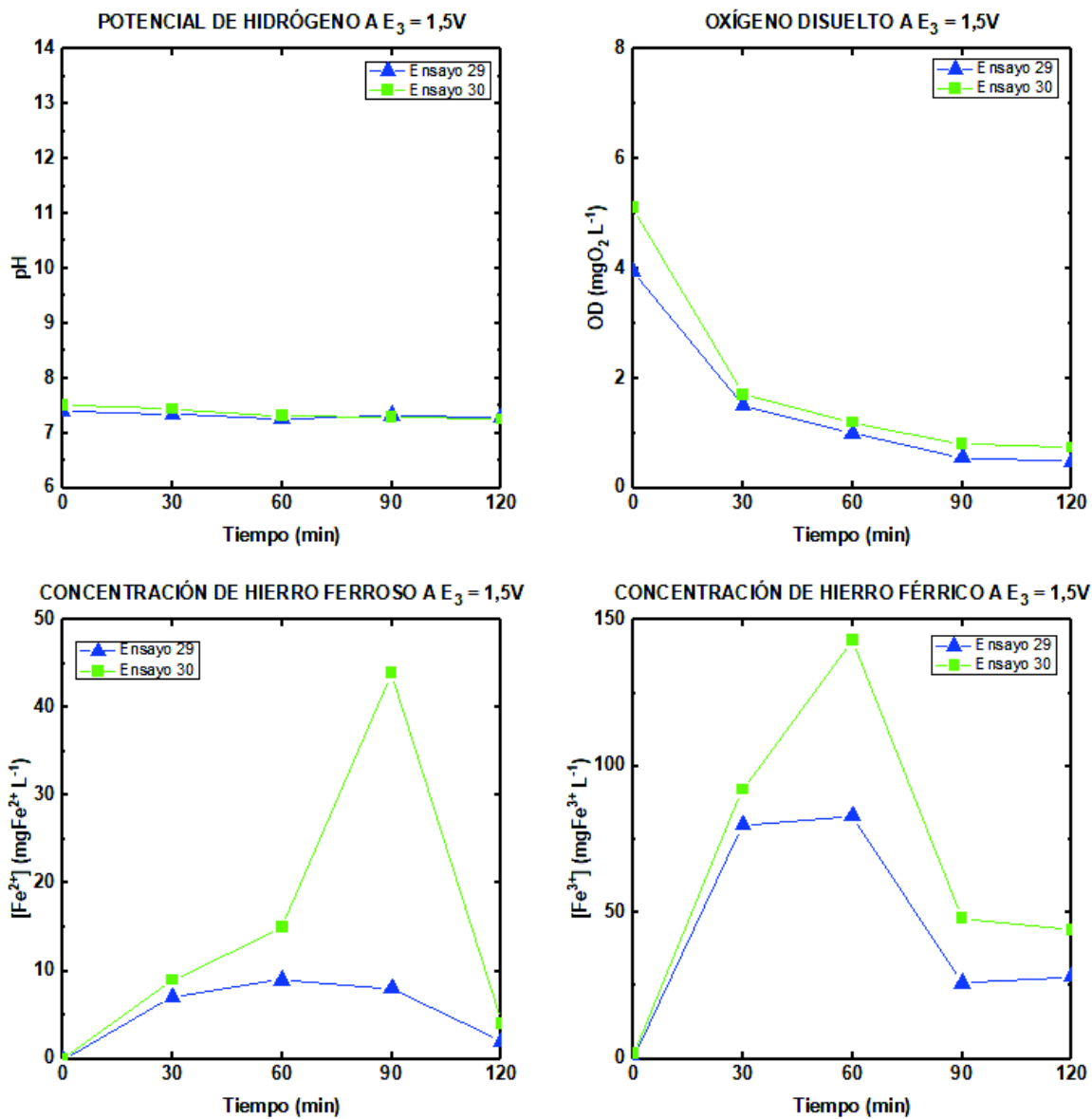
EFICIENCIA DE CELDA A $E_2 = 1,0\text{V}$



PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_3 = 1,5\text{ V}$

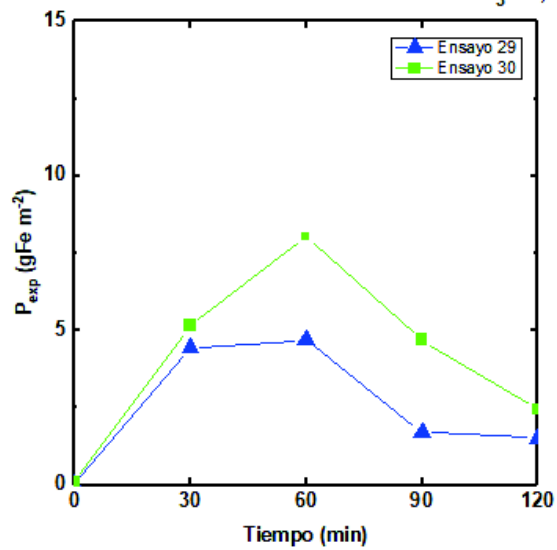


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_3 = 1,5V$

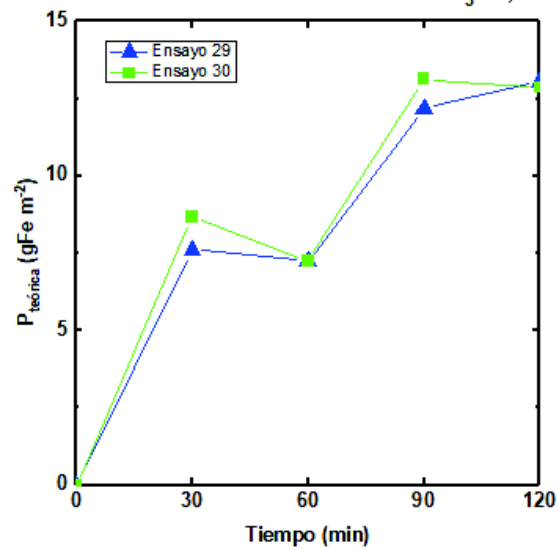


EFICIENCIA DE CELDA A $E_3 = 1,5V$

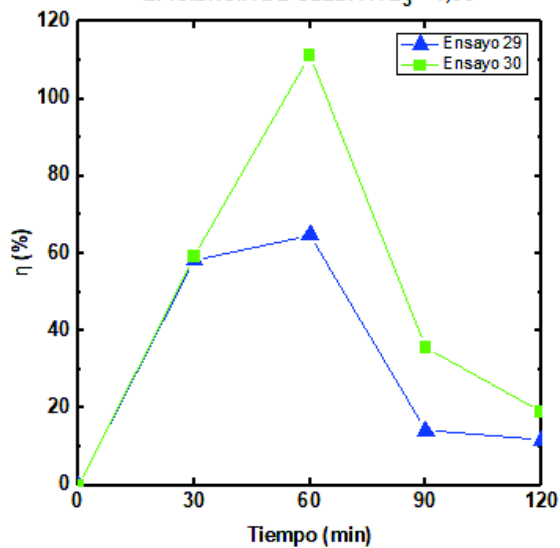
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_3 = 1,5V$



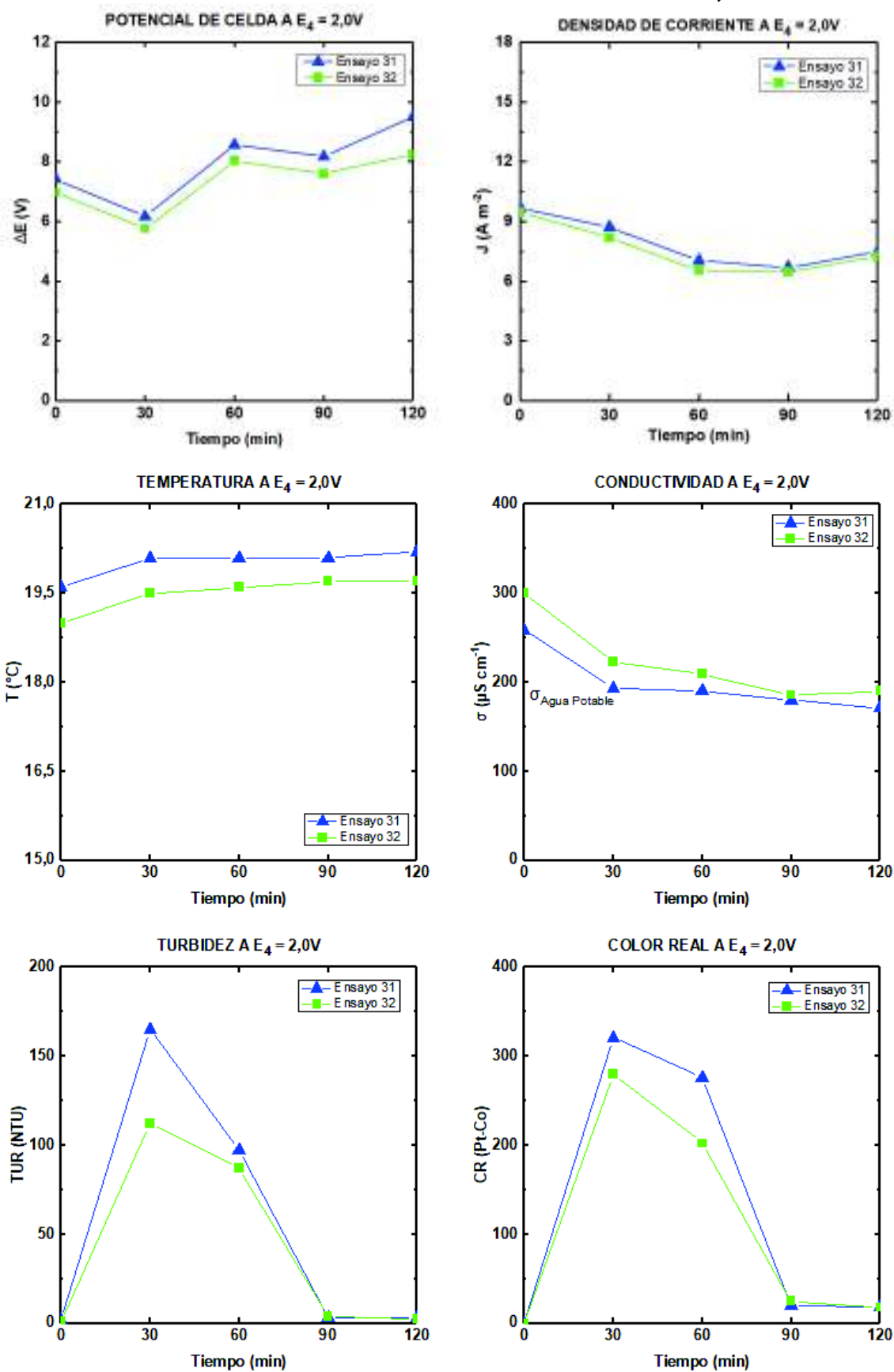
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_3 = 1,5V$



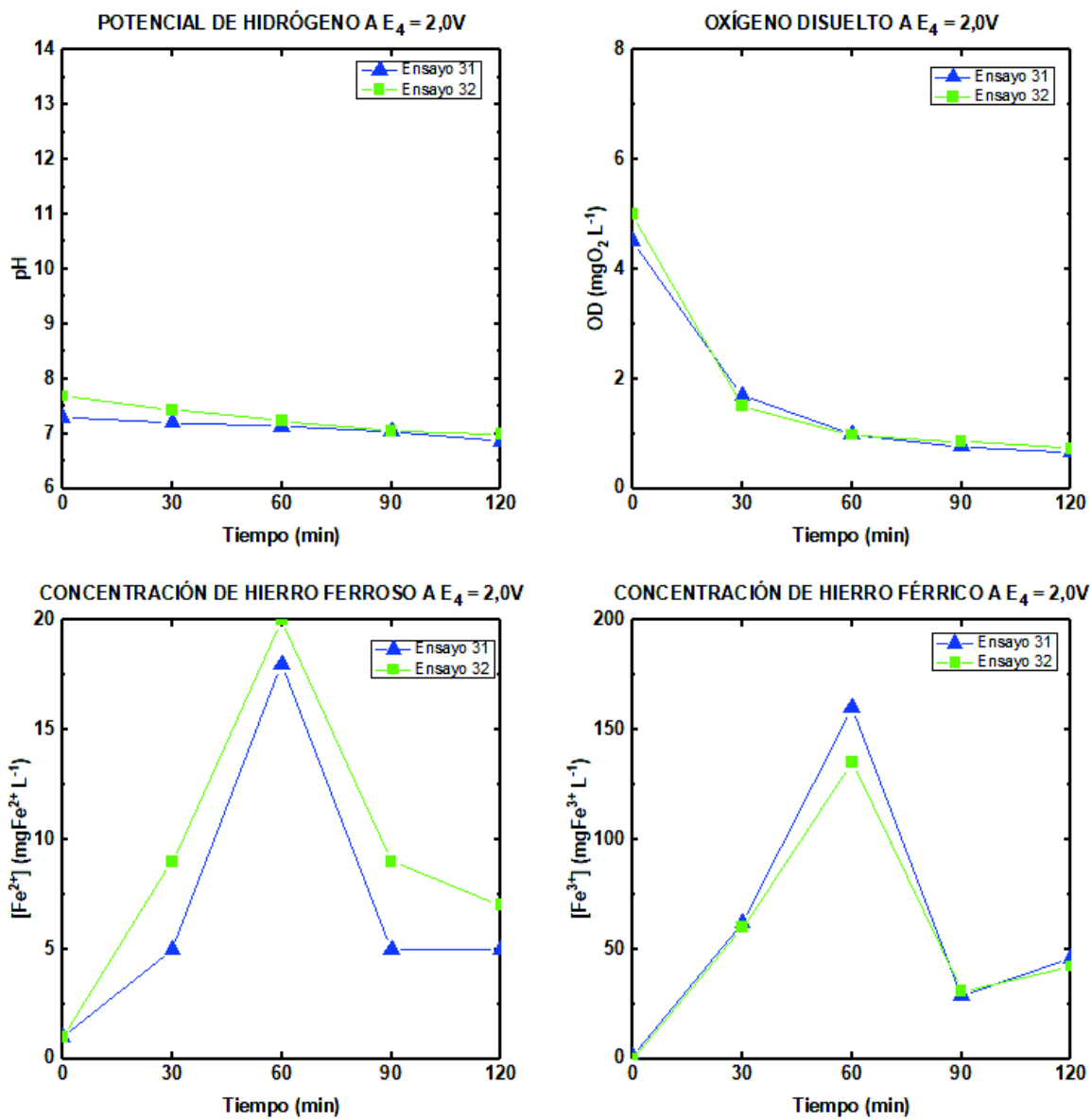
EFICIENCIA DE CELDA A $E_3 = 1,5V$



PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_4 = 2,0\text{ V}$

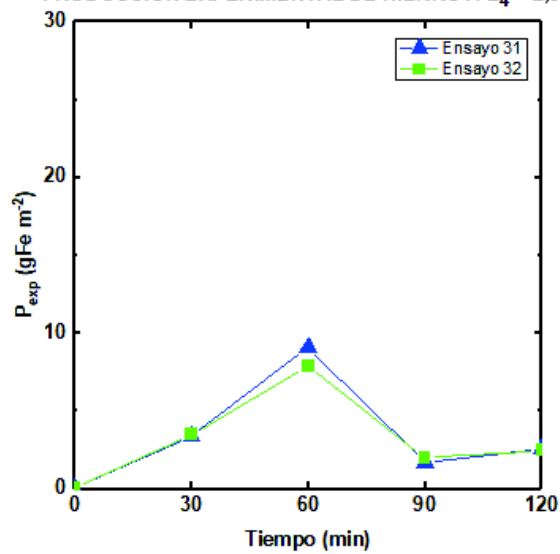


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_4 = 2,0\text{ V}$

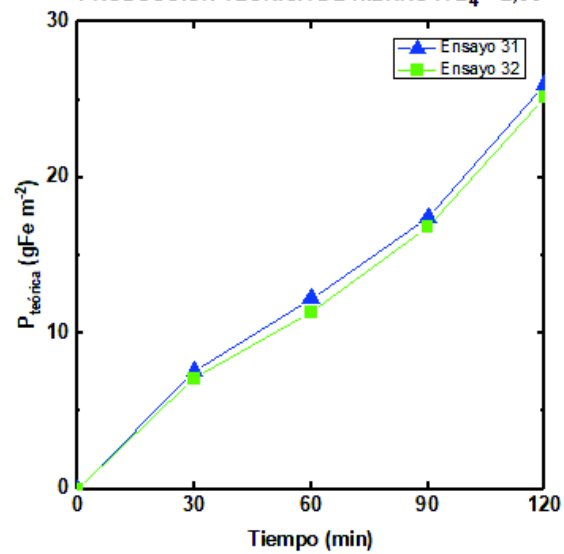


EFICIENCIA DE CELDA A $E_4 = 2,0\text{ V}$

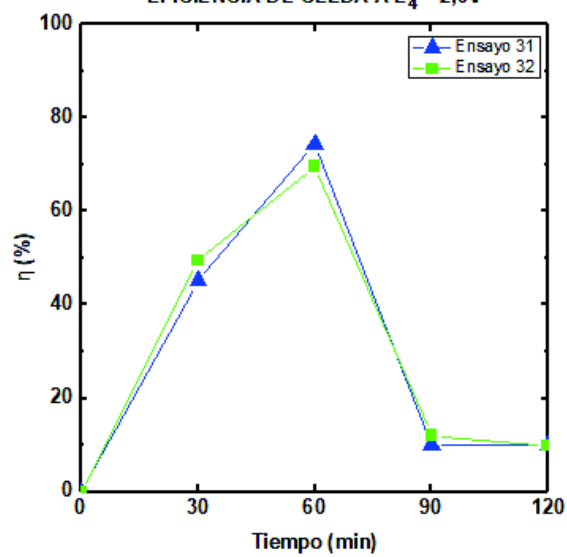
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_4 = 2,0\text{ V}$



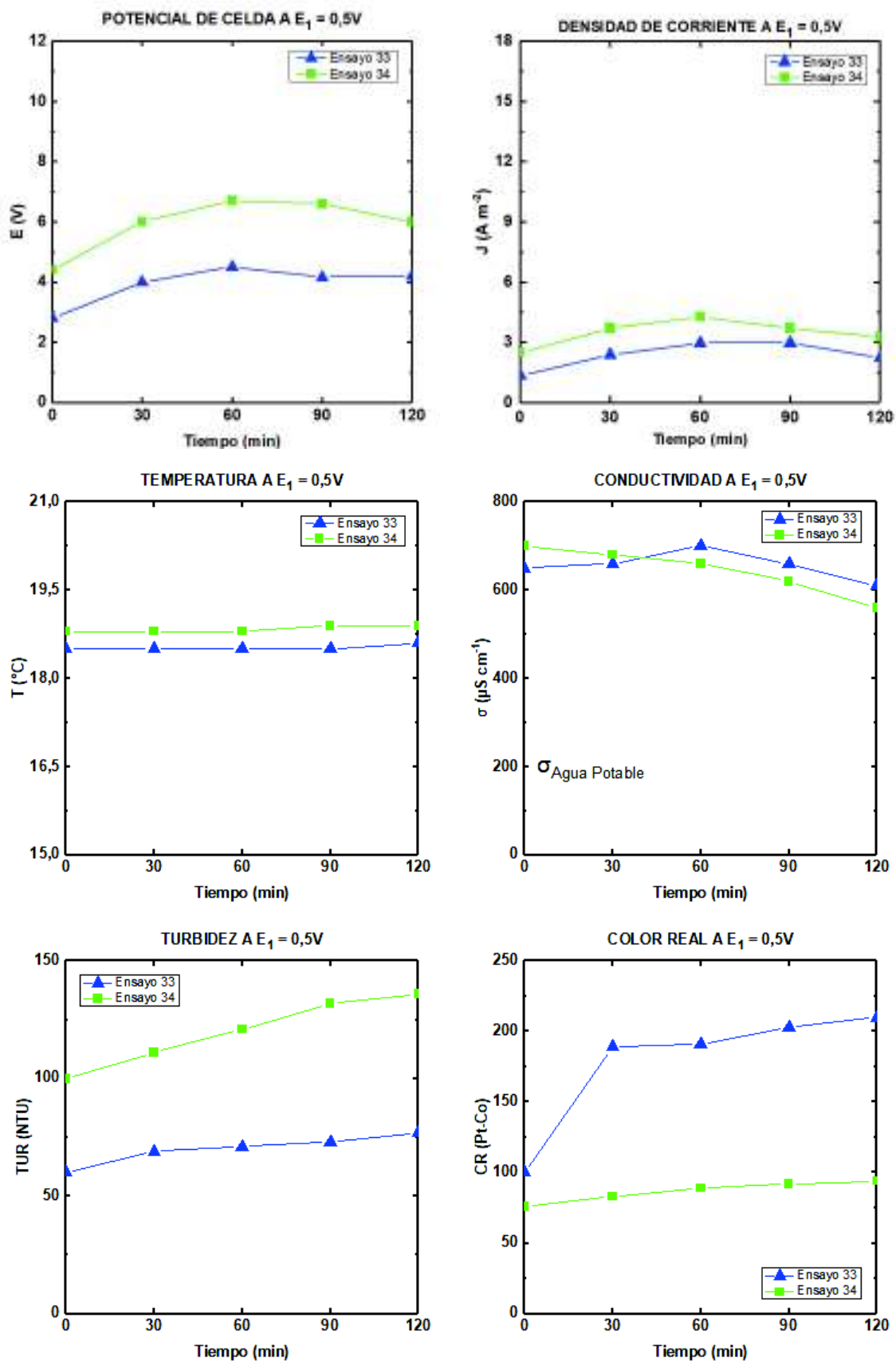
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_4 = 2,0\text{ V}$



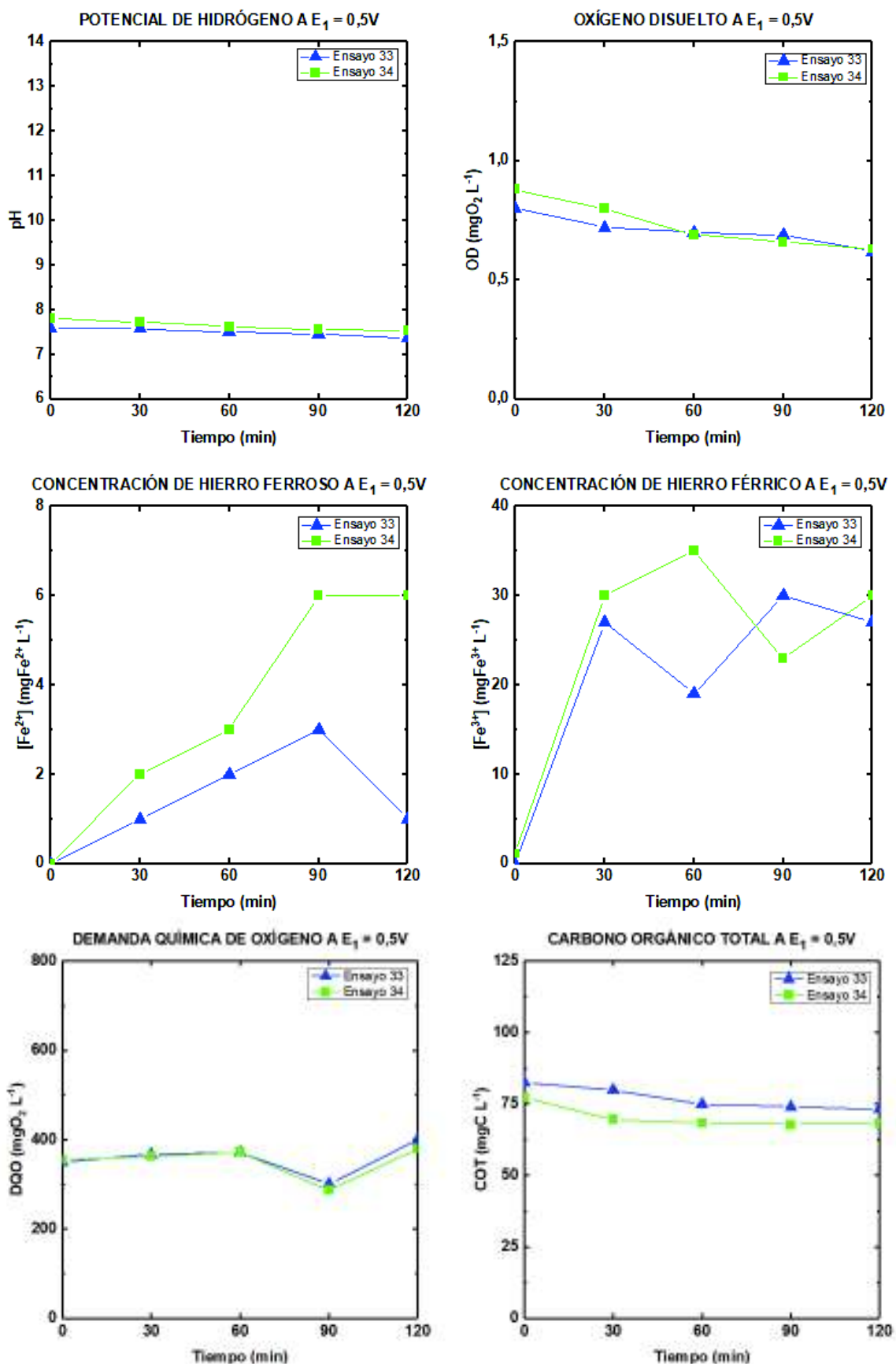
EFICIENCIA DE CELDA A $E_4 = 2,0\text{ V}$



OPTIMIZACIÓN DE LA CELDA UTILIZANDO AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_1 = 0,5V$

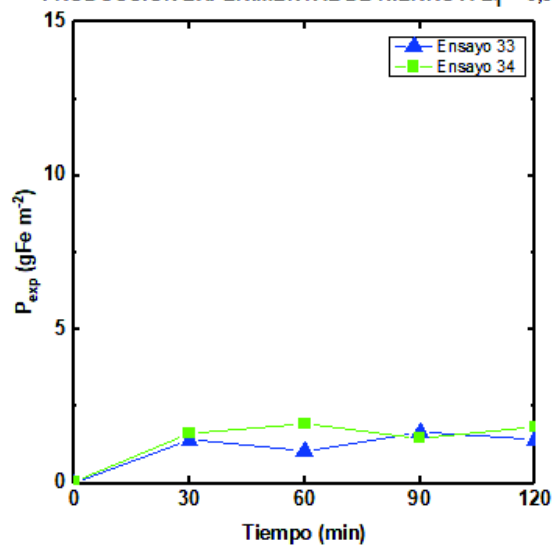


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_1 = 0,5\text{ V}$

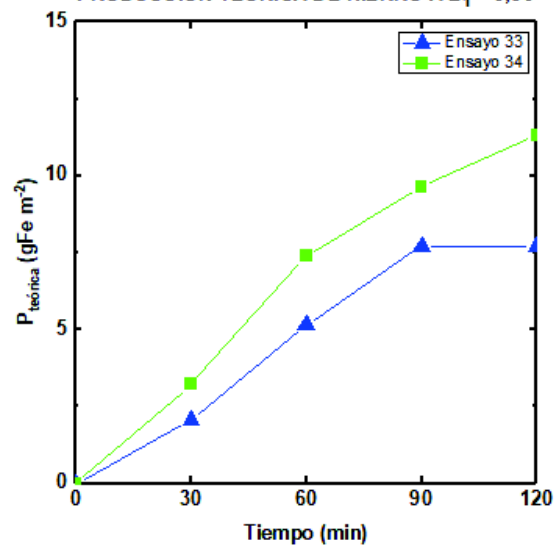


EFICIENCIA DE CELDA A $E_1 = 0,5 \text{ V}$

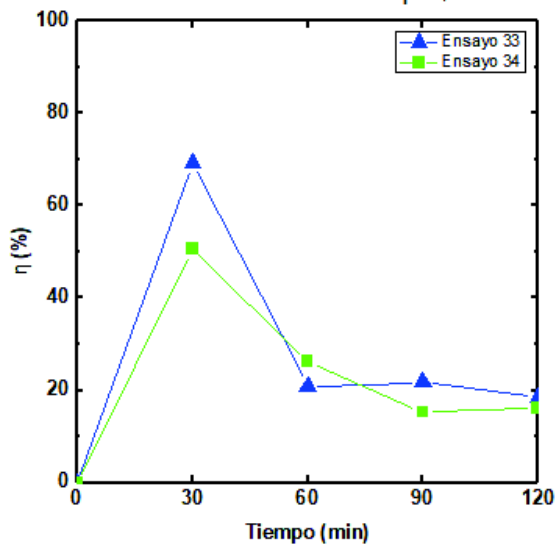
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_1 = 0,5 \text{ V}$



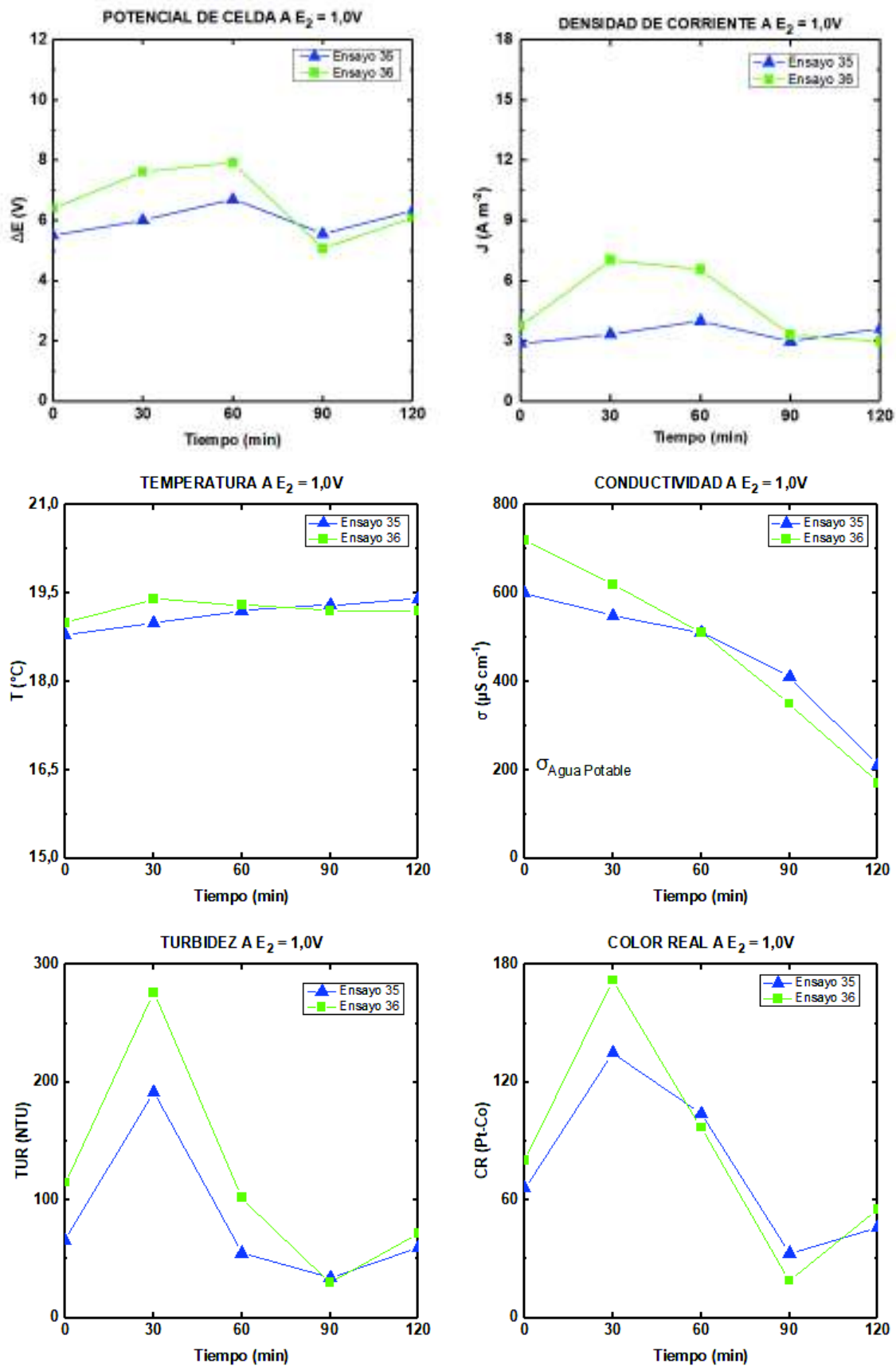
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_1 = 0,5 \text{ V}$



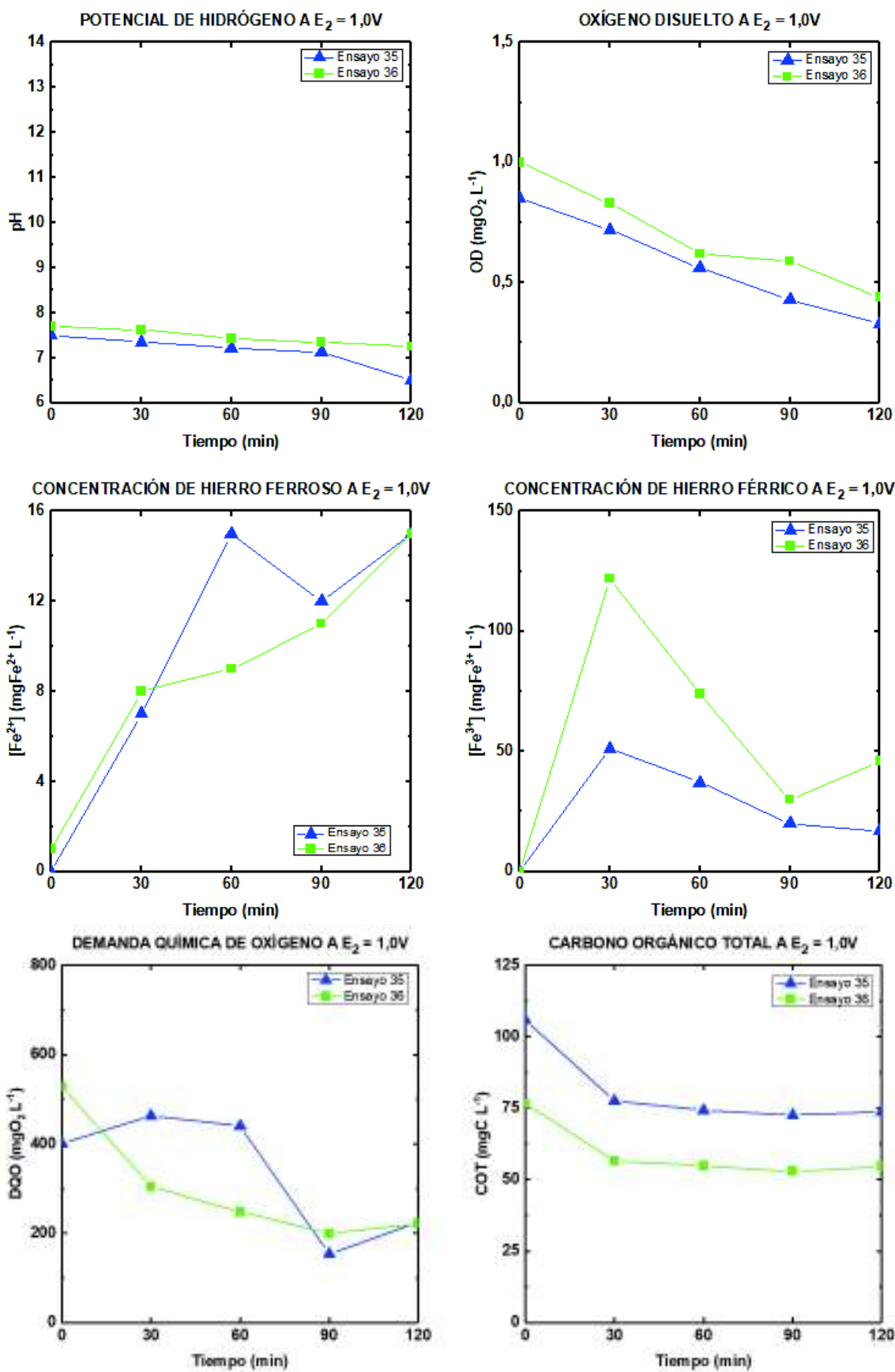
EFICIENCIA DE CELDA A $E_1 = 0,5 \text{ V}$



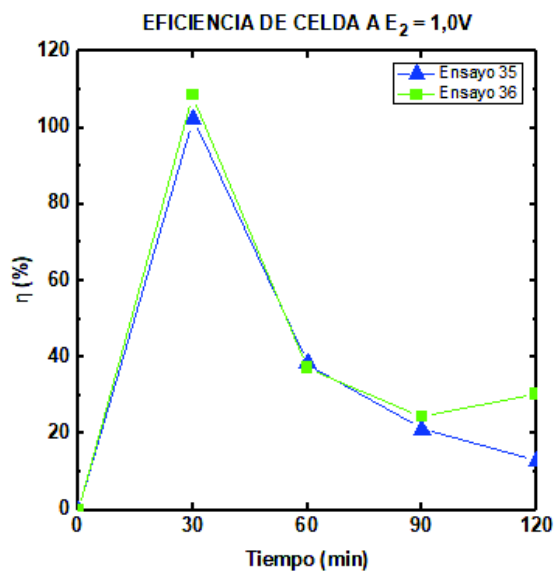
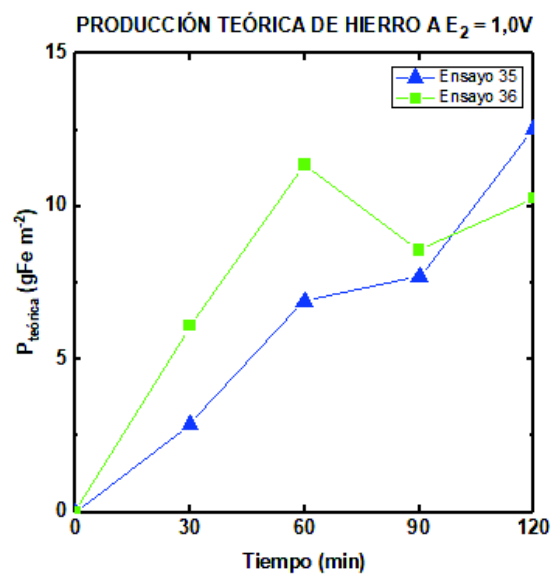
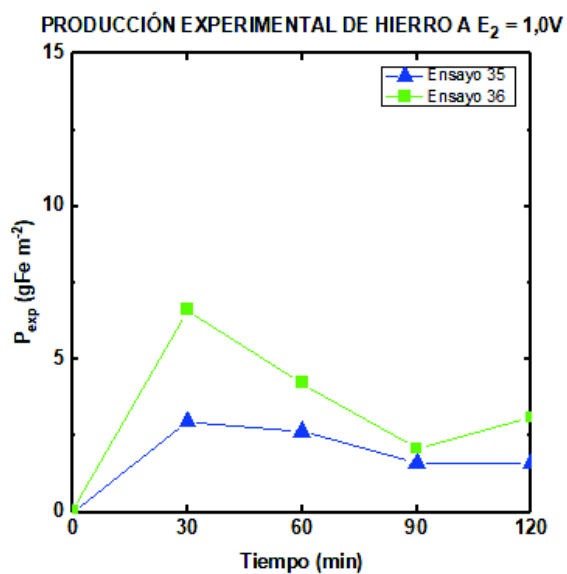
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_2 = 1,0\text{ V}$



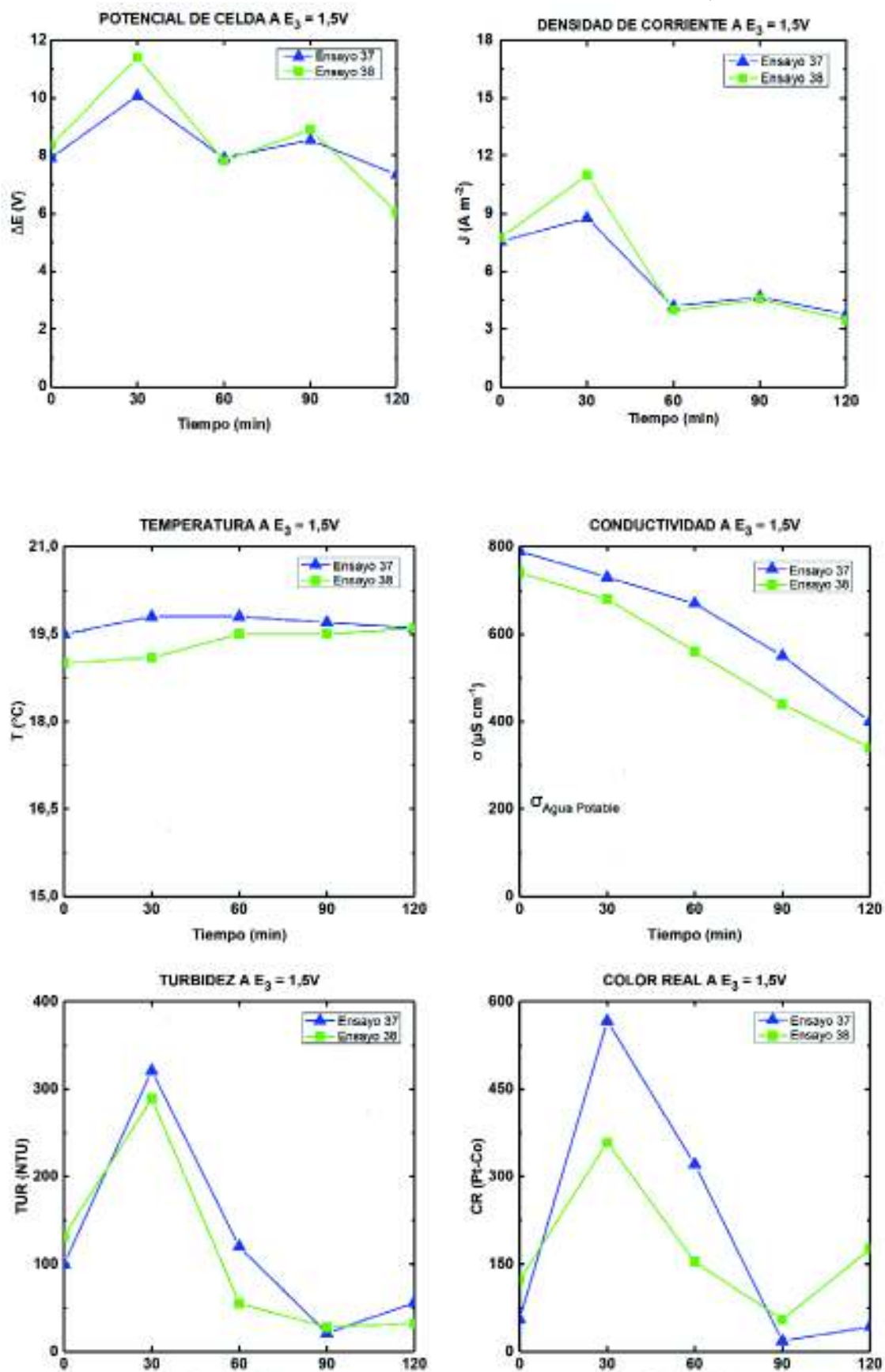
PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_2 = 1,0\text{ V}$



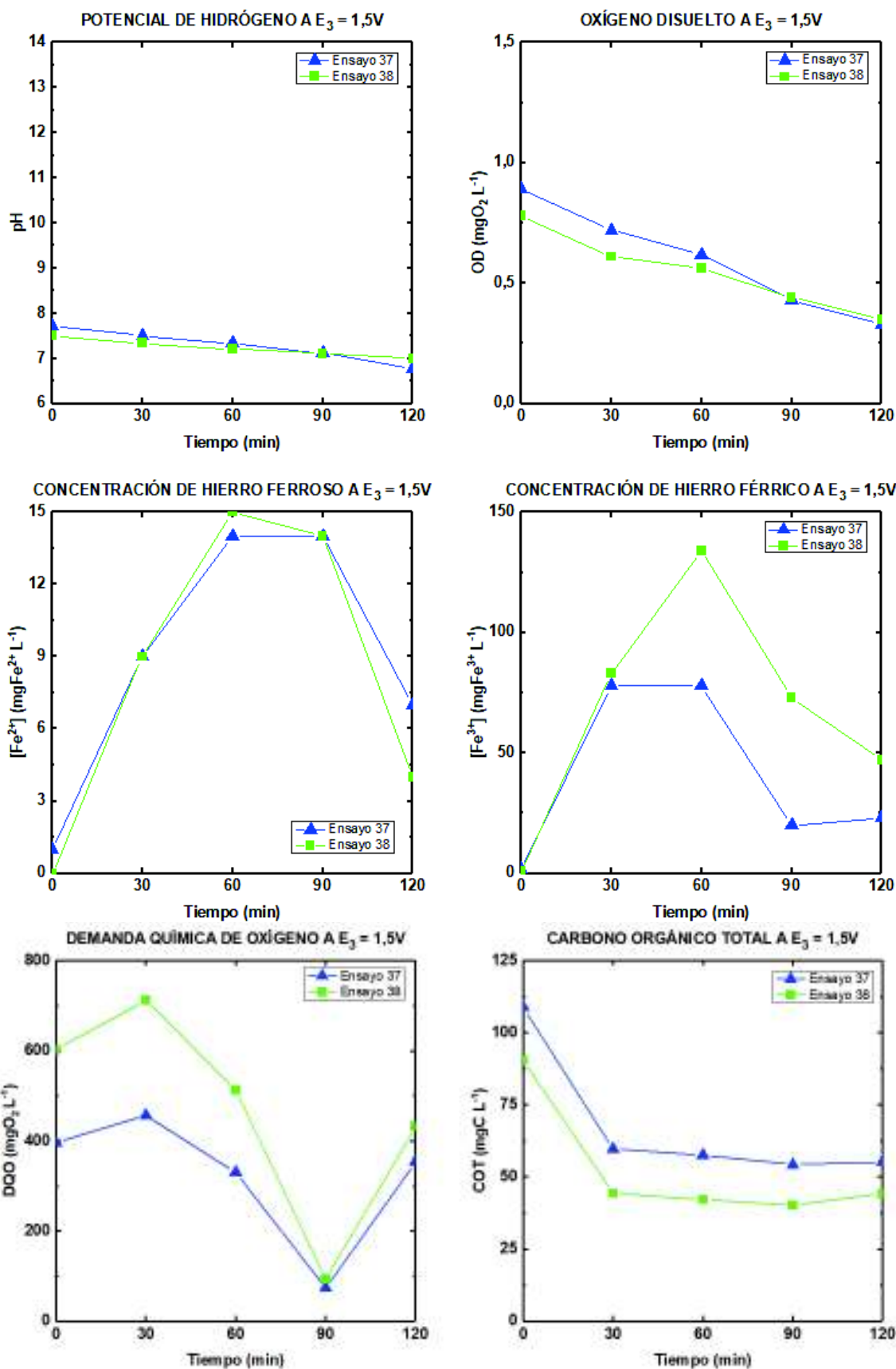
EFICIENCIA DE CELDA A $E_2 = 1,0\text{ V}$



PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_3 = 1,5V$

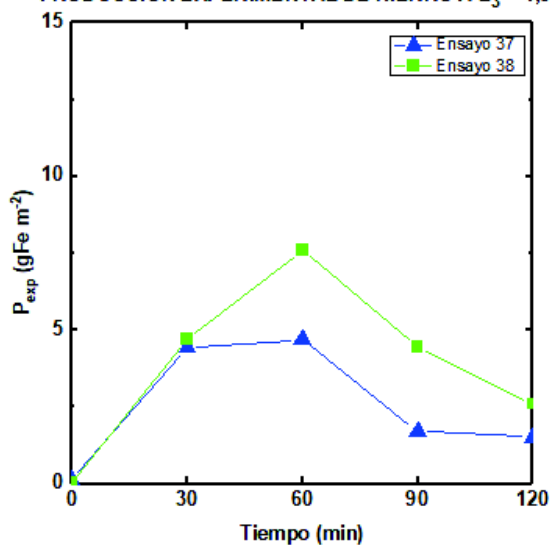


PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_3 = 1,5$ V

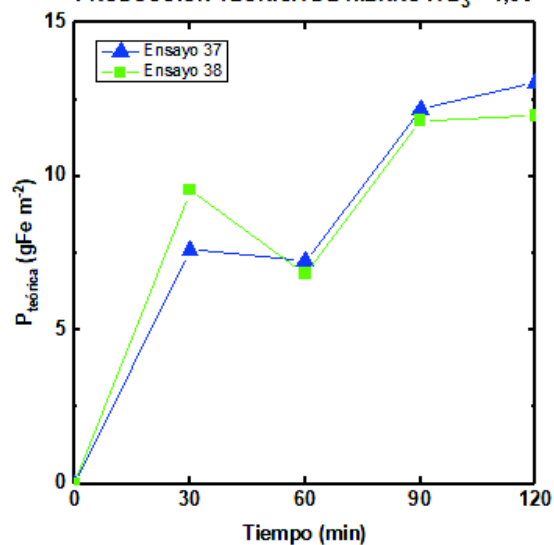


EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE HIERRO A $E_3 = 1,5\text{ V}$

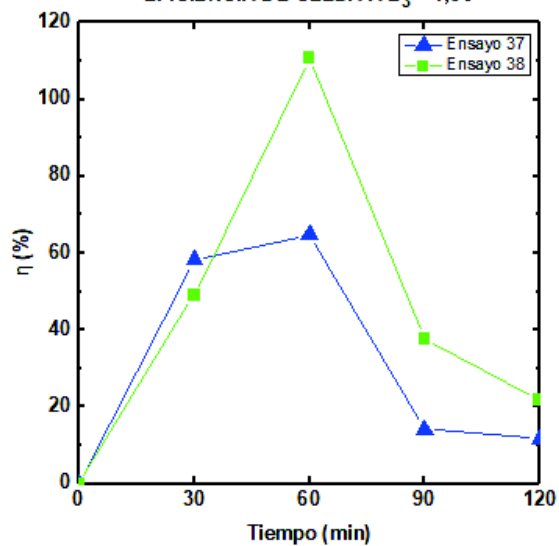
PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HIERRO A $E_3 = 1,5\text{ V}$



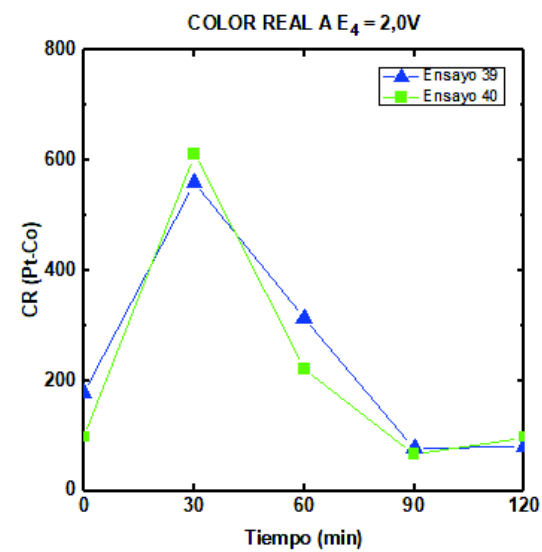
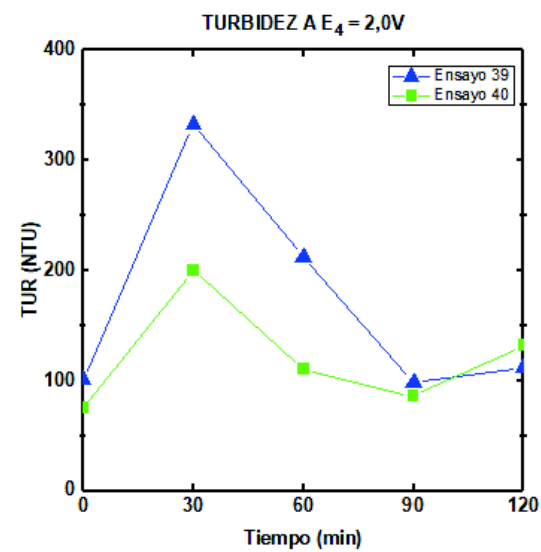
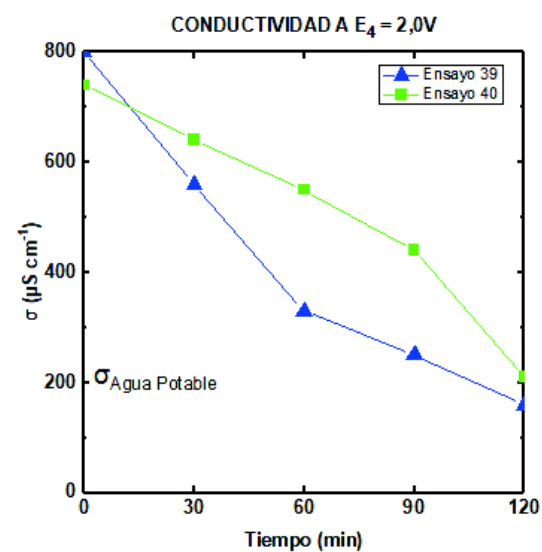
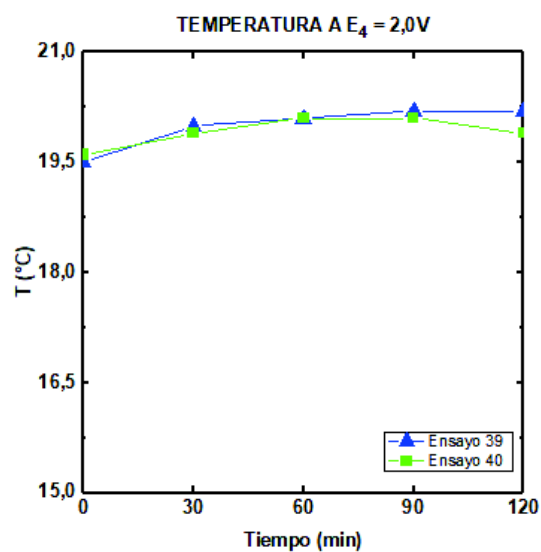
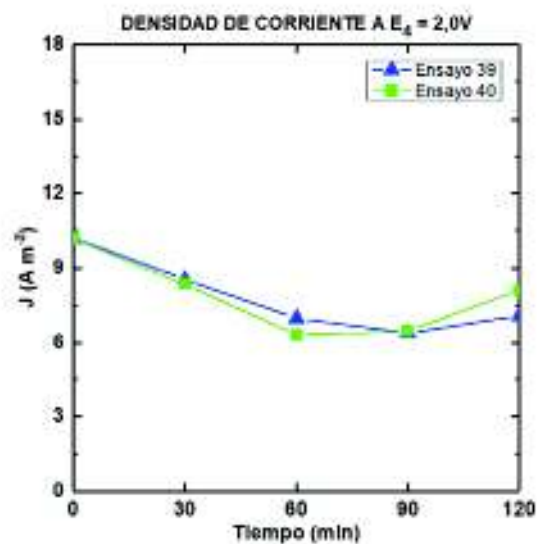
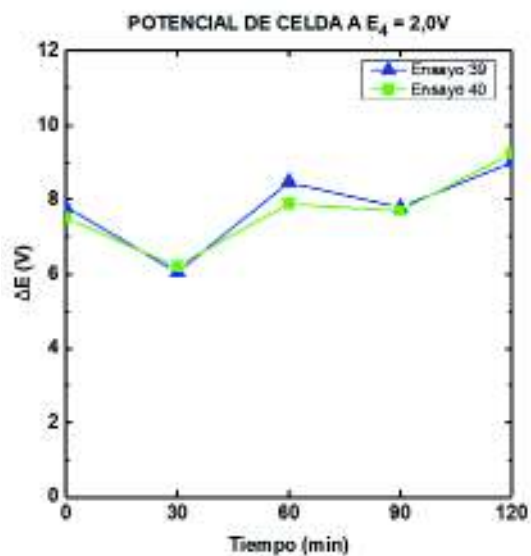
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE HIERRO A $E_3 = 1,5\text{ V}$



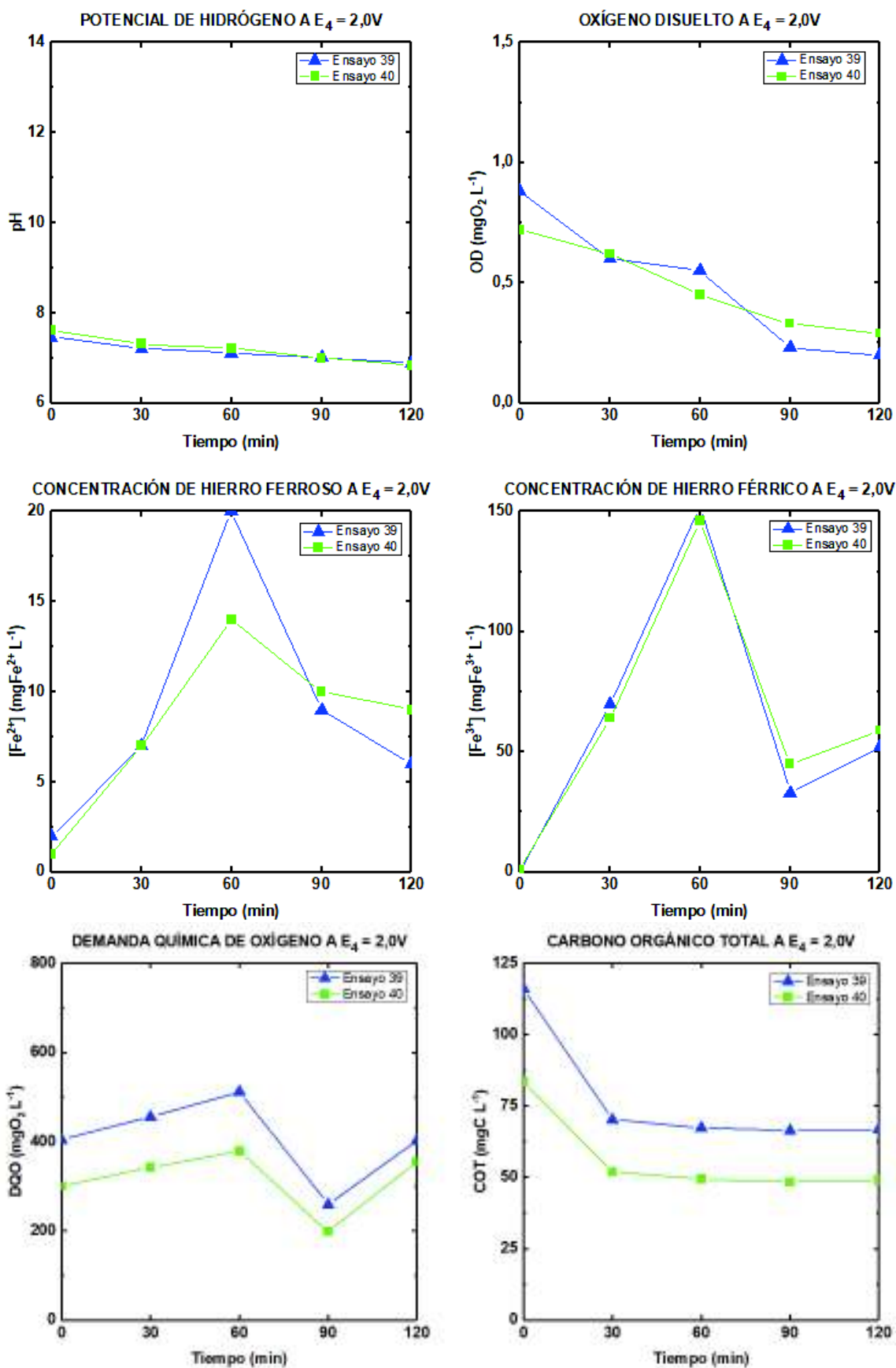
EFICIENCIA DE CELDA A $E_3 = 1,5\text{ V}$



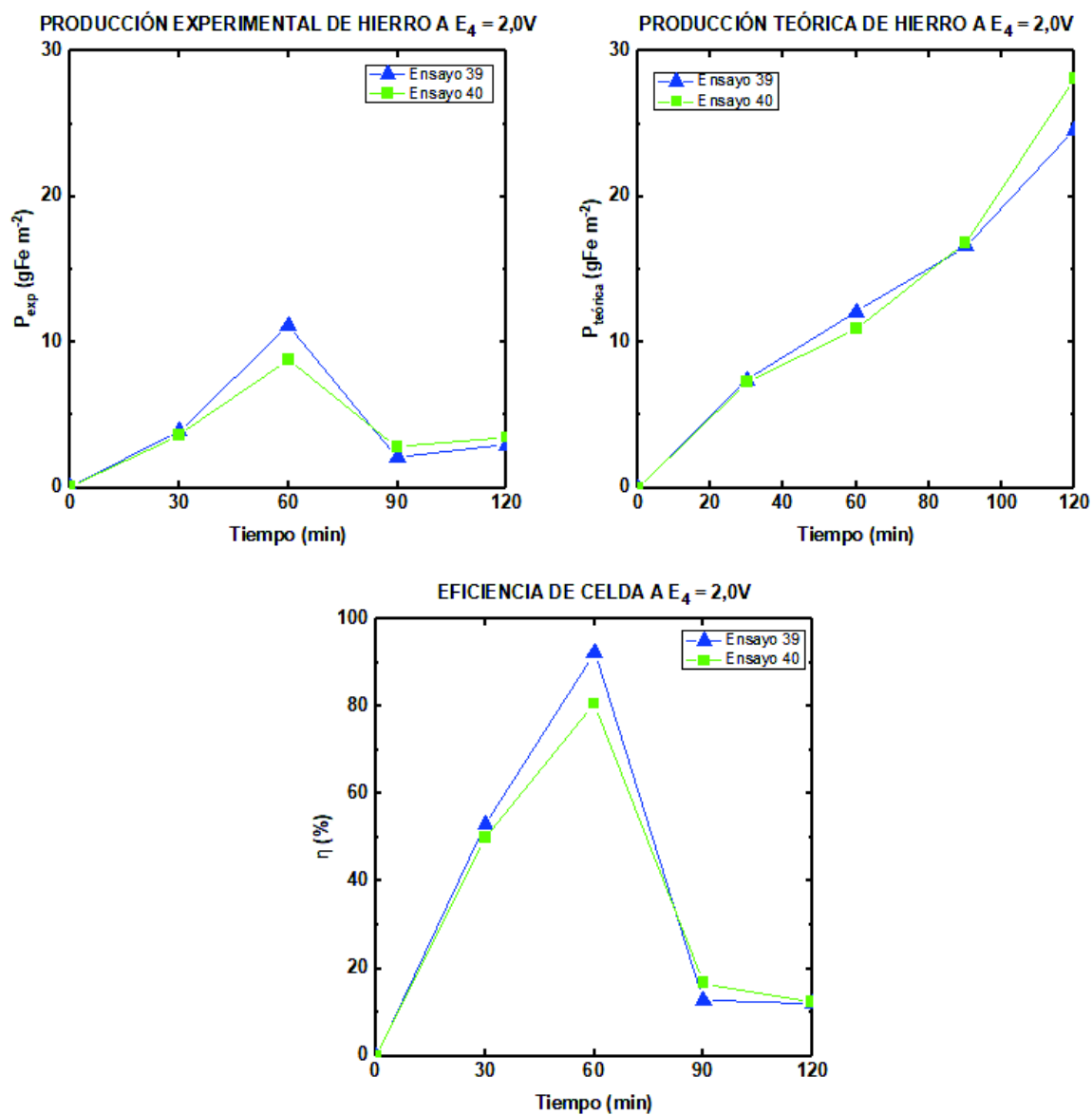
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y FÍSICOS A $E_4 = 2,0\text{ V}$



PARÁMETROS QUÍMICOS A $E_4 = 2,0\text{ V}$

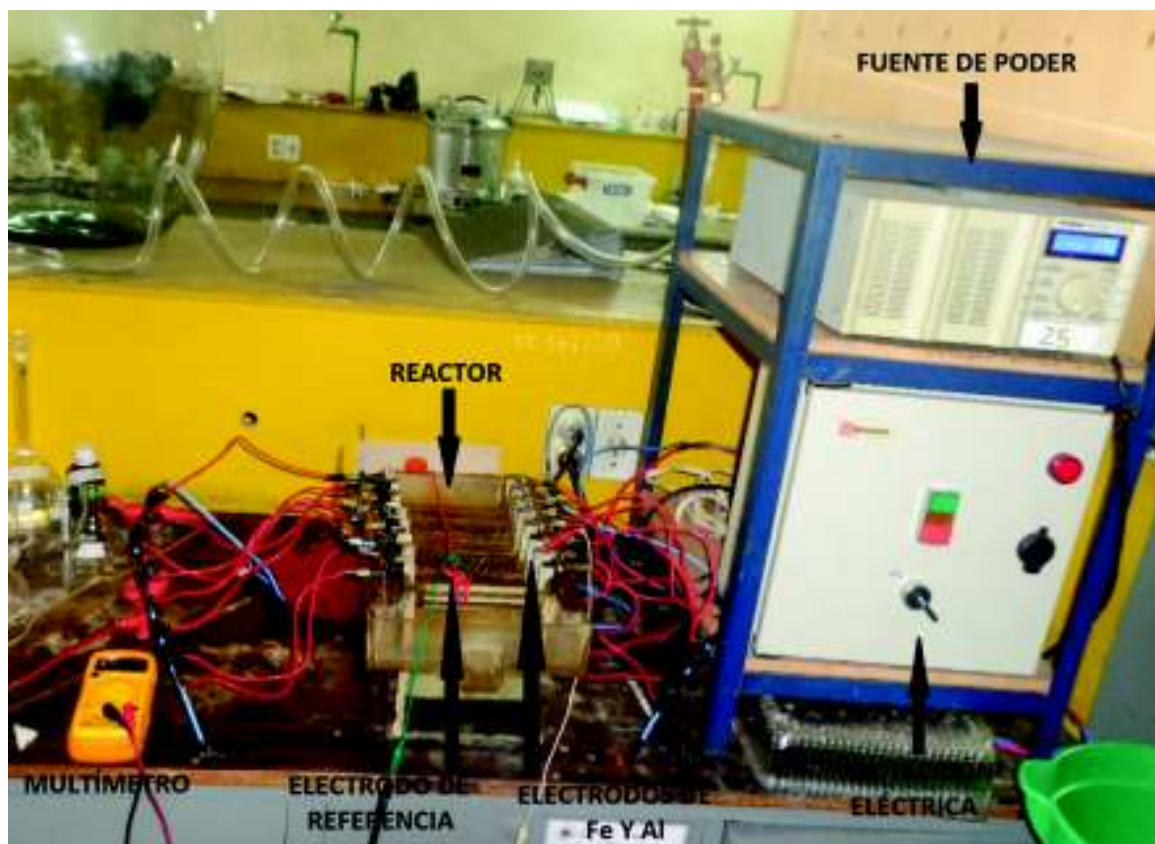


EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE HIERRO A $E_4 = 2,0\text{ V}$



ANEXO 3: REGISTRO FOTOGRÁFICO

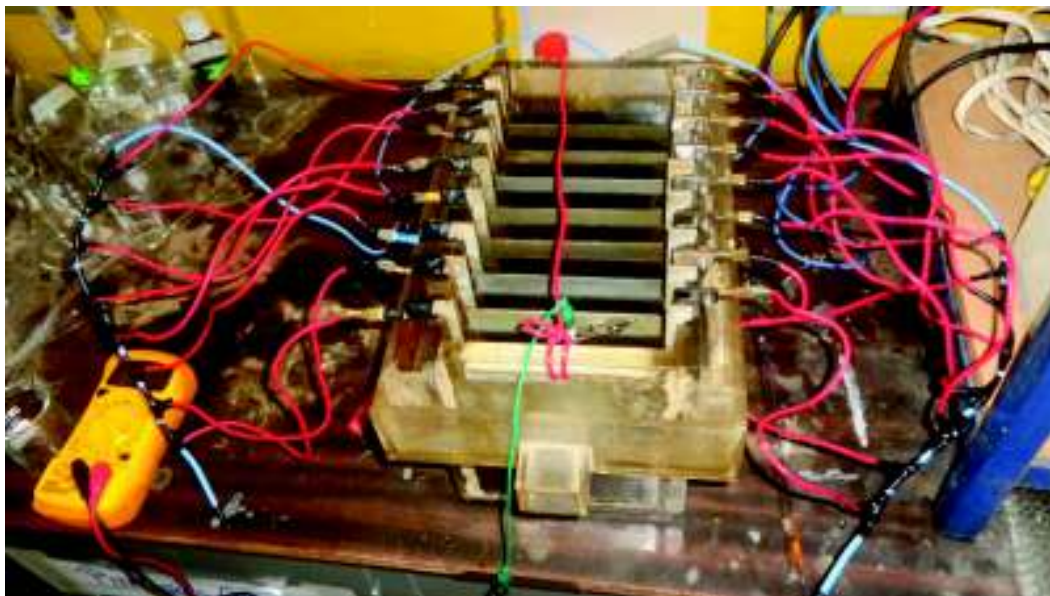
FOTOGRAFÍA DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN



FUENTE DE PODER



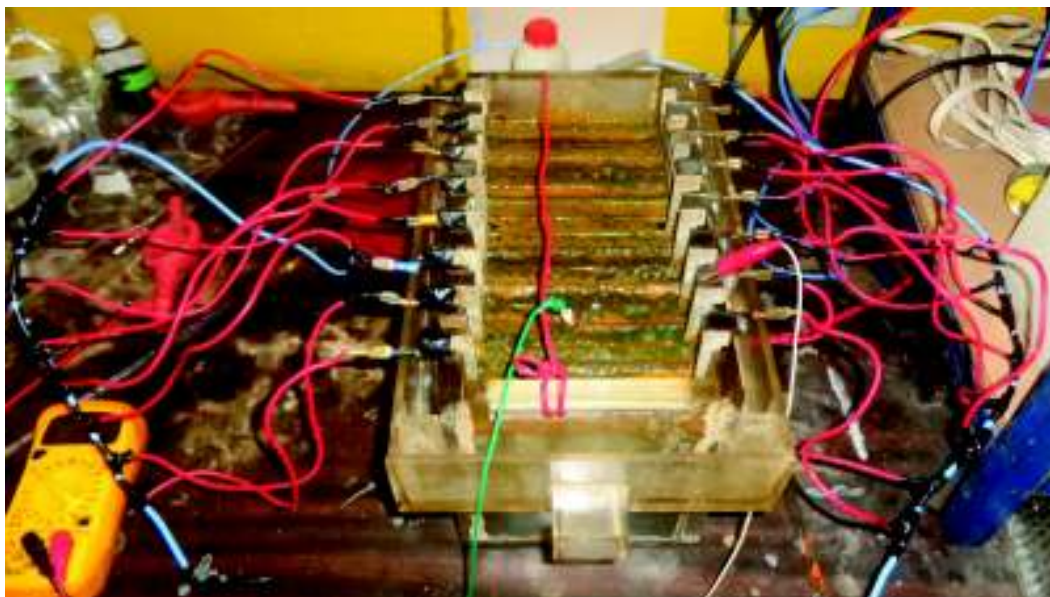
REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN



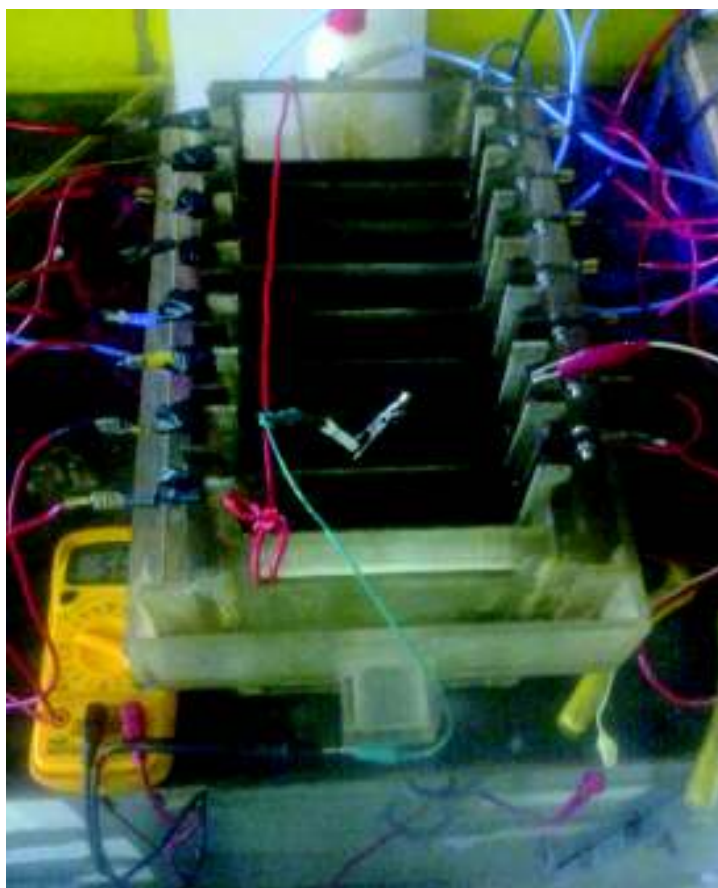
VISTA SUPERIOR DEL REACTOR DURANTE EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

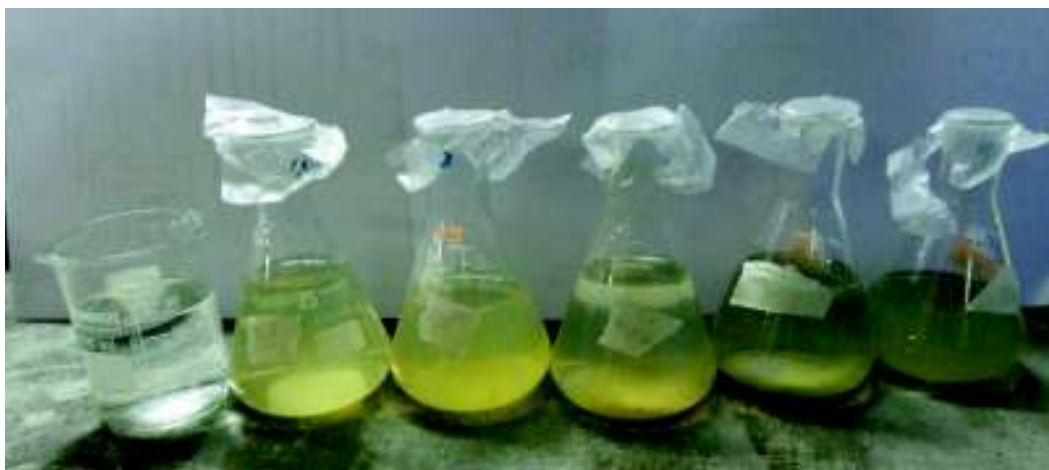
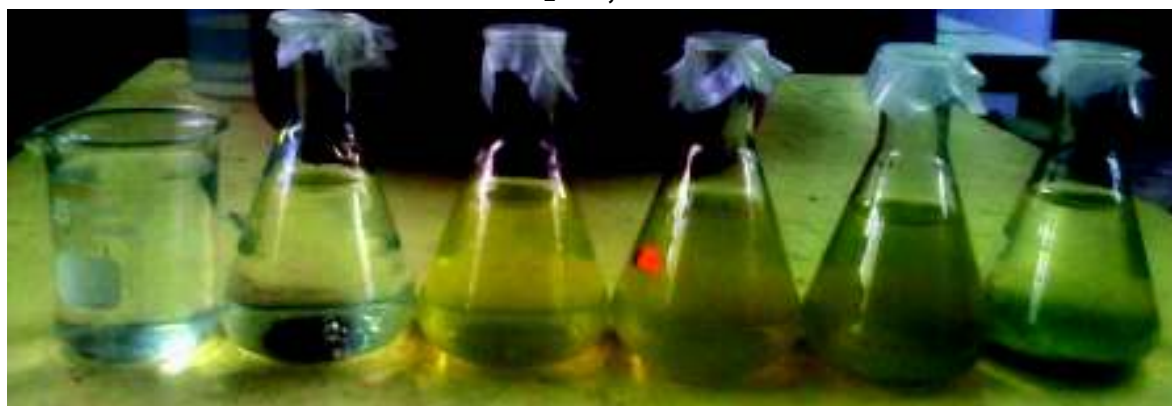


VISTA FRONTAL DEL REACTOR DURANTE EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN



REACTOR CON EL ELECTRODO DE REFERENCIA



MUESTRAS DEL ARI **$E_1 = 0,5 \text{ V}$**  **$E_2 = 1,0 \text{ V}$**  **$E_3 = 1,5 \text{ V}$** 

$E_4 = 2,0 \text{ V}$



MUESTRAS DEL ARD

$E_1 = 0,5 \text{ V}$



$E_2 = 1,0 \text{ V}$



$E_3 = 1,5 \text{ V}$



$E_4 = 2,0 \text{ V}$

