

**LAS VOLTAMPEROMETRÍAS CÍCLICAS ABORDADAS MEDIANTE
ESTUDIOS DE CASO FUNDAMENTADOS EN LA EVALUACIÓN
AUTÉNTICA Y LA EXPERIMENTACIÓN ILUSTRATIVA COMO EJE DE
APRENDIZAJE EN QUÍMICA**

PRESENTADO POR:

SERGIO ESTEBAN PATARROYO HERNÁNDEZ

JULIANA SUAREZ VARELA

KEVIN SANTIAGO TORRALBA MOLANO

DIRECTOR

M. SC. DIEGO ALEXANDER BLANCO MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN QUÍMICA**

Bogotá, D.C

2025

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
3. OBJETIVOS.....	14
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	14
4. JUSTIFICACIÓN.....	15
5. ANTECEDENTES.....	17
6. MARCO REFERENCIAL.....	22
6.1. Estudios de caso y la experimentación ilustrativa.....	23
6.2. La evaluación auténtica.....	26
6.3 Técnicas analíticas electroquímicas.....	29
6.4. Métodos voltamperométricos.....	30
6.4.1. Voltamperometría de barrido lineal:.....	31
6.4.2. Voltamperometría de impulso diferencial:.....	31
6.4.3. Voltamperometría de redisolución:.....	31
6.4.4. Voltamperometría cíclica (CV):.....	31
6.5. Ciclovoltamperograma.....	32
6.5.1 Barrido de potencial:.....	32
6.5.2. Variables del ciclovoltamperograma o voltamperograma cíclico:.....	33
6.5.3. Celda electroquímica:.....	35
6.5.4. Electroodos:.....	35
6.5.7. Potenciostato:.....	35
7. METODOLOGÍA.....	41
7.1 Tipo de investigación.....	41
7.2 Participantes.....	41
7.3. Etapas de la investigación.....	41
7.3.1. Etapa de fundamentación y gestión.....	41
7.3.2. Etapa de diseño y aplicación.....	50
7.3.3. Etapa de recolección de datos.....	66

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
8.1. Prototipo de potencióstato	67
8.2. Entrevista inicial	74
8.2 Primer Estudio de Caso	82
8.3. Taller fundamentado en la experimentación ilustrativa	90
8.4. Segundo Estudio de Caso	96
8.4 Entrevista final	103
CONCLUSIONES.....	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXOS	126

AGRADECIMIENTOS

Al mirar atrás en el recorrido que me ha traído hasta aquí, siento una profunda gratitud hacia quienes han sido pilares fundamentales en mi vida. A mi madre, que siempre confió en mis capacidades a pesar de las adversidades y me motivó a ingresar a la universidad, y a mi hermana, que con sus consejos me acompañó en muchos aspectos de mi vida. La vida poco a poco nos está retribuyendo todo aquello por lo que hemos luchado.

No habría sido posible llegar hasta este punto sin las experiencias académicas que me enriquecieron. En especial, agradezco al profesor Diego Blanco, quien aportó a mi vida profesional y me inspiró a aspirar a grandes metas, ampliando mi visión de la academia y de la Química como engranajes que marcarán mi vida laboral. También reconozco el trabajo de Daniel Rey, cuya dedicación dio columna vertebral a este proyecto. A mis profesoras Nidia y Carolina, y a los docentes insignia del departamento, les expreso respeto y gratitud por sus conocimientos y por ser ejemplos que me honra seguir.

A mis reales de la red de la inorgánica, quienes fueron confidentes y apoyo constante, gracias por escucharme, por hacerme sentir especial y por mantener una amistad que trasciende más allá de lo académico. Su compañía fue esencial para culminar este proceso y ser recibidos como licenciados.

A todas las personas que han visto cualidades en mí y han creído en mi potencial, les prometo que no los decepcionaré. Así como ustedes enaltecieron mis valores, yo también los valoro profundamente como personas y les deseo lo mejor, recordándoles que tienen mucho que aportar al mundo.

Hoy me enfrento a nuevas circunstancias académicas, laborales y emocionales, orgulloso de lo que he construido y consciente de que este es apenas el inicio de mi proyecto de vida. Con humildad, empatía y sabiduría, afronto los retos venideros, convencido de que mis acciones hablarán por mí.

O futuro ninguém vê, o passado já passou, e o presente é você.

Sergio Patarroyo

Cuando comencé este proceso nunca me imaginé todo lo que aprendería en esta carrera, tuve que afrontar diferentes retos que el día de hoy me han ayudado a mi crecimiento profesional y personal. Primeramente, me gustaría agradecer al profesor Diego Blanco por su apoyo y compromiso en este trabajo y en mi formación académica, una gran persona que me ha enseñado a nivel disciplinar y personal, siendo un modelo a seguir para mí, gracias profe.

Agradezco a mis padres y hermana por apoyarme durante todo este proceso, al esforzarse y realizar sacrificios para que el día de hoy yo pueda cumplir esta meta, no podría sin ellos. Me siento igualmente infinitamente agradecida con mis amigos y colegas Karen Pedroza y Sergio Patarroyo por acompañarme en todo este proceso y compartir conmigo frustraciones, miedos y risas, han sido un gran apoyo para mí durante todo este recorrido. También agradezco a Mariana Gómez y Nicolas Fonseca por ser amigos incondicionales que siempre han estado conmigo y me han brindado momentos de felicidad y alegría. Por último, quiero agradecerle a Diego Sanchez, mi compañero de vida, quien me ha apoyado desde el primer día brindándome su cariño y compañía en momentos en los que toque fondo y me he levantado, una persona que ha creído en mí y en mis capacidades sin dudarlo, gracias, amor. No obstante, quiero dedicarle este trabajo a mi gatita lila, por trasnochar conmigo y darme su dulce compañía.

Juliana Suárez Varela.

Durante el transcurso de la carrera me ha dejado valiosos aprendizajes, uno de ellos y el más importante es aprender a confiar en mí, aprender que por más dificultades que se presenten siempre va a tener una solución, aprender a conocer por lo que eres como persona y por lo que sabes, con humildad y respeto. Siempre recuerdo con felicidad y gratitud por todo lo aprendido durante estos años, donde en algunas ocasiones se tornaba aún con mayor dificultad, pero no imposible, siempre con el reflejo de ser mejor cada día. Agradezco primeramente a Dios quien me ha dado la sabiduría y paciencia para llevar a cabo este gran sueño, siendo un guía espiritual para los momentos más difíciles en los cuales he atravesado y que me ha brindado paz y tranquilidad en esos momentos para saberlos resolver; A mi madre y mi padre quienes fueron pilares fundamentales en este proceso, un apoyo incondicional y que siempre me apoyaron y me brindaban sus mejores consejos para seguir adelante, son mi mayor motivación, mi hermano quien fue la persona en la cual me motivaba día a día para seguir adelante con trabajo, dedicación y esfuerzo. Agradecer a mi familia quien ha sido parte de este gran proceso y proyecto de vida, que desde un comienzo siempre estuvieron apoyándome y ayudándome en lo que necesitaba para seguir adelante. Agradecer a Karen por su apoyo incondicional y su familia que fueron grandes personas durante mi proceso de formación, el camino apenas comienza y Dios siempre tendrá las mejores cosas para nosotros.

Agradecer al profesor Diego Alexander Blanco, quien ha sido un profesor referente para mí, dejándome miles de enseñanzas a nivel personal y académico, sus consejos han sido muy claves para mi formación profesional y su compromiso durante este proyecto ha sido fundamental, al profesor Jaime Augusto Casas quien durante la carrera me hizo amar y ser apasionado por la

química y la labor docente, su enseñanza y experiencia fue valiosa para mi durante este trayecto, y a todos los docentes que durante la carrera me dejaron su valioso conocimiento y aprendizaje para la vida.

Agradecer a Daniel Rey que con su valioso conocimiento nos fue de gran ayuda para articular este proyecto, siendo pieza clave por su compromiso y aporte con este proyecto.

Finalmente agradecer a mis amigos y compañeros de tesis, que a pesar de las adversidades siempre estuvieron ahí para apoyarme y brindarme sus consejos y que con su compromiso, esfuerzo y trabajo se logró. Siempre estaré agradecido por conocer y ser parte de la Universidad Pedagógica Nacional quien me hizo conocer de grandes colegas, especialmente de Brayan Martínez quien ha sido mi mejor amigo y pieza clave para estudiar en esta excelente universidad brindándome su ayuda, cariño y respeto durante la formación académica; Solo me queda por decir que este logro es dedicado a mis dos ángeles que están en el cielo y que siempre luche para poder conseguirlo y dedicárselo a ellos.

Kevin Torralba

1. INTRODUCCIÓN

El desafío en la formación inicial de profesores en Química radica en desarrollar competencias científicas de tipo procedimental en específico para abordar los trabajos prácticos de laboratorio (TPL) y la manera en cómo se evalúan con relación al gestionar, ejecutar y revisar los resultados de la ejecución de los mismos, a través de un informe técnico elaborado para el aprendizaje de la Química.

Este trabajo de investigación se orientó en el diseño de una estrategia de enseñanza fundamentada en los estudios de caso y la experimentación ilustrativa para comprender las Voltamperometrías Cíclicas y analizar un ciclovoltamperograma obtenido con un potenciostato construido de bajo costo, donde el objetivo principal es evaluar auténticamente la capacidad de comprensión, reflexión y motivación en todo el proceso de aprendizaje de los estudiantes del espacio académico Sistemas Fisicoquímicos II. Además, pretendió utilizar herramientas de investigación como los estudios de caso, con el fin de visualizar la utilidad y aplicación de la Voltamperometría Cíclica en contextos reales. Lo anterior, genera relevancia a la investigación, ya que, los métodos electrométricos como la Voltamperometría Cíclica son de un amplio campo de investigación en química, pues la mayoría de sus aplicaciones abarcan una variedad de sectores y en ello radica la necesidad educativa para que los profesores en formación se aproximen al saber y conocimiento en este campo de investigación.

Con el fin de lograr lo mencionado, fue necesario aplicar diversas estrategias diferenciadas de las típicas para realizar una recolección de datos, como lo son las pruebas estandarizadas o pruebas tipo encuesta, por lo cual se optó por realizar entrevistas al inicio y al final de la implementación del trabajo. Dichas entrevistas se evaluaron bajo 3 ejes propuestos únicamente para este trabajo de grado: motivacional-actitudinal, reflexivo y disciplinar, con el objetivo de analizar actitudes y preconcepciones; los estudios de caso, los cuales se evalúan bajo 3 ejes igualmente propuestos para este documento, los cuales constan de: teórico-metodológico, procedimental y analítico, con el objetivo de analizar la

comprensión de los fundamentos teóricos de la técnica, la lectura de ciclovoltamperogramas y la aplicación en contextos reales.

Esta investigación se fundamentó en un proceso investigativo y de revisión exhaustivos: primero, una revisión de la literatura, cuyos aportes teóricos sustentan y orientan el propósito de este trabajo, el cual buscó generar un ambiente educativo con los recursos disponibles para facilitar la enseñanza de la voltamperometría cíclica y promover el estudio y análisis de ciclovoltamperogramas para caracterizar el comportamiento de especies redox. Después, se realizó la formulación de la pregunta de investigación en la cual se establecen algunos parámetros con relación a los objetivos del trabajo, enfocados en el análisis y caracterización de las siguientes cuestiones: las motivaciones-actitudes de los estudiantes al momento de ser partícipe de las intervenciones (evaluadas auténticamente por las entrevistas), la comprensión del tema (evaluada auténticamente por la resolución de los estudios de caso), y la capacidad de reflexión (evaluada igualmente por los estudios de caso y un experimento ilustrativo ejecutado por el potenciostato construido).

Posteriormente, se realizó la respectiva revisión bibliográfica que engloba a la elaboración de los antecedentes y referentes conceptuales en los que se presentan aproximaciones a los elementos disciplinares y didácticos que ayudaron a guiar el proceso de identificación y desarrollo de los conceptos que incorporan la evaluación auténtica, los estudios de caso, la experimentación ilustrativa y las voltamperometrías cíclicas.

La metodología de investigación fue de tipo cualitativa, con un enfoque descriptivo-exploratorio. La investigación constó de 3 etapas: la primera denominada etapa de fundamentación y gestión, las cuales dan referencia al levantamiento de elementos teóricos para comenzar a construir los instrumentos y rúbricas de evaluación más óptimas para este trabajo, además de la revisión de la teoría necesaria para diseñar la estrategia de enseñanza más adecuada para introducir el concepto de Voltamperometría Cíclica en el aula, para así poder esquematizar las sesiones de clase; la segunda, denominada etapa de diseño y aplicación, que comprende la elaboración del potenciostato de bajo

costo y de los instrumentos necesarios para la siguiente etapa, y las respectivas 4 intervenciones del proyecto en el aula con los estudiantes; tercera y última, denominada etapa de recolección de datos, la cual se enfoca en obtener la información y gestionarla de manera metódica, para así posteriormente, realizar el respectivo análisis de los resultados obtenidos.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

La incorporación de técnicas instrumentales innovadoras en el análisis químico en contextos académicos promueve el desarrollo investigativo del profesorado de química, las cuales contribuyen a profundizar y abordar los posibles problemas que se presentan hoy en día en el sistema educativo, como lo es la falta de experimentación por disponibilidad de recursos e infraestructura. Esto limita la capacidad de los estudiantes de relacionar ideas teóricas con experiencias prácticas que permiten analizar y comprender las múltiples situaciones que se presentan dentro de la investigación científica, por lo que inminentemente se genera una necesidad en el campo pedagógico aplicado a las ciencias: la capacidad de poder realizar prácticas de laboratorio con el propósito de enriquecer la educación en ciencias para que el estudiante pueda relacionar las temáticas del currículo de química dentro de un contexto real. En este sentido, el estudio de algunos métodos electrométricos, en particular las voltamperometrías cíclicas, requieren la incorporación de estrategias de enseñanza diferenciadas que relacionen la teoría con la práctica, que permitan vislumbrar la articulación entre la teoría y un contexto real de la cotidianidad, y que solventen la necesidad de la experimentación.

Por otro lado, otro reto que se busca resolver es evitar la propagación de los vacíos conceptuales a raíz de la falta de praxis mencionada anteriormente. Se evidencian profundas falencias en la comprensión e interpretación de las reacciones redox en profesores en formación (Owusu et al., 2024), esto podría tener origen en la dificultad de la comprensión de la fisicoquímica, por lo que en este proyecto se busca implícitamente fortalecer aquella comprensión mediante la voltamperometría cíclica. Para apoyar esta idea, aminorar los vacíos conceptuales representa un desafío significativo para los docentes de Química. Este desafío exige que los docentes en formación se mantengan actualizados

en los avances de química y desarrollen una perspectiva analítica para abordar estos temas (Gonzalez y Garcia, 2024). La comprensión de los conceptos fisicoquímicos y de los mecanismos redox no solo son fundamentales para la formación académica, sino que también motiva la búsqueda de metodologías para evaluar y analizar fenómenos fisicoquímicos de una manera integral.

En ese orden de ideas, es menester que se promueva una praxis en el campo del estudio de las reacciones redox aplicadas a la voltamperometría cíclica, pero eso implica que se debe tener en cuenta la disponibilidad de recursos, infraestructura y el acceso a instrumentos con una alta precisión y exactitud, sin embargo, el docente debe formular sus estrategias didácticas con base en las posibilidades y limitaciones que puede permitirse en su entorno educativo. Por consiguiente, elaborar equipos de análisis químico de bajo costo constituye una herramienta rápida y al alcance del docente para aplicar técnicas analíticas sin la necesidad de acudir a laboratorios especializados, por esta razón, la implementación de un potenciostato en las voltamperometrías permitirá familiarizarse con equipos de laboratorio y fomentar habilidades analíticas que son necesarias en el contexto de formación de profesores de química, para así preparar a los futuros docentes con el propósito de enfrentar desafíos asociados con la enseñanza y la investigación en química (Gonzalez y Garcia, 2024).

Con referencia a lo anterior, es vital que el docente posea la habilidad necesaria para superar estos retos, los cuales deben ser tenidos en cuenta incluso desde su formación académica como licenciado, en la universidad. El objetivo de revelar al docente en formación este escenario, es para que genere estrategias que atiendan a las necesidades que el sector educativo requiere, de tal modo que las universidades deben servir como puente entre las teorías pedagógicas y estrategias didácticas, en el contexto del aula, por lo que, si se realiza esta concienciación en la formación docente, se mitigaría uno de muchos factores que influyen no solo en las aulas, sino en el aprendizaje de los estudiantes, específicamente de aquellos que poseen problemas al enfrentarse con asignaturas de alta complejidad, como son los espacios académicos de Fisicoquímica, de la Universidad Pedagógica Nacional, que se caracterizan por tener una tasa alta de reprobación.

Paralelamente, uno de esos factores que influyen en el aprendizaje es la evaluación. Actualmente, el panorama educativo hace ver al proceso evaluativo como importante y a su vez tortuoso, pues una nota con desempeño sobresaliente puede llevar a generar ciertas actitudes en el estudiante, generalmente positivas, y si, por el contrario, hay una nota con desempeño insuficiente o bajo, genera actitudes negativas como frustración, preocupación o enojo. Las actitudes hacia la evaluación son más intensas cuando dicho resultado influye de gran manera en la definitiva de una asignatura, por consiguiente, se necesita de una nueva orientación al modelo de evaluar, respetando las individualidades de cada sujeto, sin perder la rigurosidad integral que conlleva la acción de evaluar, y produciendo mejores resultados. En este trabajo de investigación se plantea la evaluación como una situación de aprendizaje, o más conocida como la evaluación auténtica, donde se cuestiona que hay más aspectos evaluativos relacionados con la naturaleza compleja en un proceso de aprendizaje, que van más allá que un corto quiz o una sustentación oral, (Ahumada, 2005). Esto promueve que los profesores en formación cambien su perspectiva sobre la evaluación, permitiéndoles conocer nuevos modelos de evaluación bajo nuevas perspectivas para que ellos comprendan que una nota es más una etapa complementaria para su proceso educativo, que un método para saber sus conocimientos sobre un tema.

Con respecto a lo anteriormente mencionado, es importante incursionar en modelos que mejoren el proceso de aprendizaje de los estudiantes utilizando recursos didácticos con el objetivo de evitar que los mismos sujetos piensen que están siguiendo una lista de pasos sin sentido, he ahí la aplicación de los casos de estudio como metodología de enseñanza de las voltamperometrías cíclicas, en los que se incorpora la respectiva lectura e interpretación de los ciclovoltamperogramas, ya que con el uso de esta metodología se espera evitar un conocimiento a corto plazo y poder permitir un acercamiento a estas técnicas experimentales fisicoquímicas.

En este contexto, el presente trabajo tiene como finalidad principal evaluar auténticamente la comprensión, reflexión y motivación al abordar estudios de caso relacionados con la Voltamperometría Cíclica, mediante la construcción de

un potencioestado de bajo costo que permita realizar la técnica. El prototipo de potencioestado es llevado al aula mediante la experimentación ilustrativa, una línea emergente de los trabajos prácticos de laboratorio (TPL), que busca ilustrar en un experimento la relación y proporcionalidad entre dos variables, que en este caso, son el potencial y la corriente, que, en conjunto, demuestran un mecanismo redox importante para caracterizar pares redox y materiales. Esta línea emergente reúne todos los componentes didácticos y disciplinares para poder enseñar el funcionamiento del prototipo de potencioestado a los estudiantes, con el fin de fomentar la investigación en la construcción de equipos de bajo costo, además de explicar intrínsecamente las voltamperometrías y sus fundamentos teóricos.

En consecuencia, la pregunta de investigación que orientó este trabajo de grado corresponde a: ¿Cómo la integración de los estudios de caso y la experimentación ilustrativa contribuyen en la capacidad de comprensión, reflexión y motivación de un grupo de profesores en formación de Química al abordar la técnica de Voltamperometría Cíclica mediante la evaluación auténtica?

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar mediante la evaluación auténtica la evolución en la capacidad de comprensión, reflexión y motivación de un grupo de profesores en formación de Sistemas Fisicoquímicos II, al abordar los fundamentos de la técnica de Voltamperometría Cíclica mediante estudios de caso y la experimentación ilustrativa ligada a la construcción de un potenciostato de bajo costo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar las actitudes y motivaciones de un grupo de profesores en formación del espacio académico de Sistemas Fisicoquímicos II frente a los fundamentos de la técnica de Voltamperometría Cíclica.
- Caracterizar las variables fisicoquímicas y electrónicas necesarias para el diseño de un prototipo de potenciostato para comprender su funcionamiento mediante la experimentación ilustrativa.
- Determinar el nivel de comprensión conceptual de un grupo de profesores en formación para la descripción e interpretación de los ciclovoltamperogramas a través de estudios de caso.

4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la investigación promueve constantemente el desarrollo de la ciencia, por lo que el área de la química enfrenta el desafío de integrar de manera efectiva sus dimensiones teórica, procedimental y experimental. Los estudiantes se encuentran con lenguajes técnicos, conceptos abstractos y procedimientos matemáticos que pueden demandar un esfuerzo cognitivo. Se ha visto que los métodos de enseñanza resultan insuficientes para promover un aprendizaje profundo (Ordaz y Mostur, 2019, p.2). Esta limitación evidencia la necesidad de reconceptualizar las estrategias didácticas, particularmente en áreas que requieren una parte experimental como las voltamperometrías, donde la exposición teórica no desarrolla completamente las competencias para la comprensión de fenómenos redox, entre otros. (Sosa y Díaz, 2021).

La mayoría de los docentes de química buscan desarrollar prácticas de laboratorio como eje principal en la enseñanza en química, ideando estrategias para que los estudiantes logren analizar e interpretar un fundamento químico bajo sus propias observaciones, perpetuando el pensamiento que señala que las actividades de laboratorio son instrumentos básicos para el aprendizaje y la evaluación del conocimiento en las clases de ciencias (Caballer y Oñorbe, 1997), que, aunque, es en parte cierto, no hay un abordaje más profundo en los trabajos prácticos de laboratorio; si bien, lo que se busca vincular es la fundamentación de la actividad científica en un contexto específico y poder fomentar una reflexión detallada acerca del significado y su aplicación. Este problema se complica de manera exuberante cuando el laboratorio gira en torno a ramas de la química más rigurosas, como la electroquímica, que a pesar de que ha ido presentando una gran popularidad en el campo de la investigación, muchos de los estudiantes en sus estudios de pregrado o educación formal no han tenido acercamiento previo a estas técnicas. Por este motivo se necesita una innovación en la didáctica de la química, para superar las barreras que los estudiantes encuentran al momento de relacionar algún concepto químico con un caso de la vida real.

En la enseñanza de las ciencias se reconoce que los laboratorios juegan un papel importante, los docentes enfrenten dificultades para implementar prácticas de laboratorio debido a la escasez de recursos, precariedad en infraestructura y mala utilización de fondos (Mangarin & Macayana, 2024), esta limitación impide la realización de actividades experimentales y análisis de resultados de laboratorio que complementen la teoría, afectando la comprensión de los fenómenos fisicoquímicos por parte de los estudiantes, generando vacíos conceptuales y errores posinstruccionales (Rojas, 2024)

Por otro lado, los potenciostatos son instrumentos esenciales en el estudio de procesos electroquímicos, como voltamperometrías cíclicas. No obstante, el elevado costo de los potenciostatos comerciales dificulta su adquisición en instituciones educativas con recursos limitados, lo que restringe la posibilidad de que los docentes en formación comprendan y analicen prácticas en el campo de la electroquímica (Rodríguez et al., 2017). La construcción de potenciostatos de bajo costo representa una solución viable para superar estas barreras.

En este orden de ideas, los experimentos ilustrativos suplen esta necesidad al tener como enfoque demostrar e ilustrar principios o variables donde el estudiante se familiarice con los fenómenos que se buscan enseñar, generando una mejor comprensión y análisis de los temas (Hernández et al., 2012). Con dicho enfoque, se espera que el estudiante pueda llegar a comprender de una manera ilustrada lo que es una voltamperometría cíclica, cómo se aplica y analizar qué parámetros se pueden obtener de un ciclovoltamperograma.

Con relación a lo anteriormente mencionado, este trabajo investigativo plantea como idea fundamental la implementación de entrevistas para caracterizar, evaluar y/o diagnosticar continuamente y de una manera auténtica a los estudiantes del espacio académico de Sistemas Fisicoquímicos II; dos estudios de caso que relacionan aplicaciones reales sobre las voltamperometrías cíclicas tomando como eje principal el análisis y la comprensión del ciclovoltamperograma obtenido por el prototipo de potenciostato, identificando las variables que afectan su forma y estructura. Además, se planteó realizar la

explicación del funcionamiento de este equipo, a través del enfoque de experimentación ilustrativa.

Bajo esta estrategia, evaluada auténticamente, y soportándolo mediante rúbricas de evaluación, se pueden abarcar más dimensiones evaluativas que no se basan en la evaluación cuantitativa tradicional, dando cuenta de que también existen ítems inmersos en dicho proceso de aprendizaje que también precisan ser evaluados, generando una hipótesis que articula y propone este trabajo de investigación, donde el proceso también se evalúa, no solamente el resultado final.

5. ANTECEDENTES

En el presente trabajo de grado la revisión de antecedentes se organizó en torno a cuatro ejes temáticos fundamentales para la investigación: voltamperometrías cíclicas, los estudios de caso, la experimentación ilustrativa y la evaluación auténtica. La selección de estos se realizó considerando su contribución específica a esta investigación. Cabe resaltar que no se encontraron registros de investigaciones que contengan todas las temáticas tratadas, sin embargo, se hará referencia a los artículos que se acercan lo más posible a los ejes investigativos ya mencionados anteriormente, a continuación, se presentan los referentes más significativos organizados según su eje temático.

Con respecto a los estudios de caso:

Para Stake (1998), los estudios de caso permiten clasificar de cierta manera un conjunto de habilidades y concepciones con el objetivo de mejorar la comprensión. Esto facilita al investigador generar un mayor análisis, teniendo como finalidad comprender los acontecimientos sucedidos.

El documento planteado por, Stake (1998) denominado Investigación con estudio de casos, se aproxima a una definición de estudio de caso, donde lo expresa como:

“el estudio de la particularidad y de la complejidad de un caso singular, para llegar a comprender su actividad en circunstancias importantes” (p .11)

Además de esto, Stake define 3 tipos de estudios de casos: El intrínseco, el instrumental y el colectivo, explicando el instrumental como un estudio de caso enfocado en la indagación y cómo ello puede aportar elementos de análisis para comprender mejor una problemática que no solo involucra el estudio de caso específico que se desarrolla. Así mismo el autor Yin (1983) expone los estudios de caso como una forma de hacer investigación, aunque el autor se enfoca en las ciencias sociales este expresa como pueden ser estrategias para abordar preguntas de investigación y clasifica los estudios de caso como: descriptivos, exploratorios y explicativos, en donde cada uno de ellos debe seguir una serie de estrategias y a su vez define:

“su propósito es establecer un marco de trabajo para la discusión y debate en medio de estudiantes.” Yin (1983)

Por otro lado, John Elliot en “Estudio de la enseñanza y del aprendizaje” (2010) recalca como Lawrence Stenhouse (1960) menciona la investigación educativa como un eje principal en la educación, siendo un maestro investigador y fomentando esto en el aula, así mismo recalca una investigación educativa basada en estudios de caso para comprender los procesos de aprendizaje y enseñanza, cabe resaltar que los estudios de casos se desenvuelven varias líneas de investigación educativa siendo otro ejemplo, el aprendizaje basado en problemas (ABP), según Barrows y Tamblyn (1971) el ABP fomenta la autonomía y pensamiento crítico presentando situaciones reales o simulado a los estudiantes. En este orden de ideas en este proyecto es importante incorporar los casos de estudio.

La investigación por parte de Sanabria-Totaitive y Arango-Martínez (2021) abarca los casos de estudio desde las ciencias naturales, siendo para los autores importante enseñar integrando el contexto y los casos de estudio ya que fomentan la investigación y fortalecen habilidades en los estudiantes.

En este orden de ideas, y centrando los estudios de caso en la ciencia y específicamente en la química, el artículo de investigación: El método de estudio de casos como alternativa pedagógica para el aprendizaje de Química General en estudiantes de Educación Superior por Basantes Vaca et al. (2024),

comprende que por medio de los estudios de caso se puede promover habilidades analíticas, críticas y reflexivas en los estudiantes a la hora de enseñar química, los autores sostienen que esta metodología fomenta un desarrollo integral en los estudiantes, potenciando tanto sus capacidades cognitivas como sus habilidades actitudinales. Además de ello, las autoras Sanabria-Totaitive y Arango-Martínez (2021) afirman por medio de su trabajo de investigación que la implementación de estudios de caso o, del MEC (Método de estudio de casos) en la enseñanza de las ciencias promueve la transversalidad entre las distintas áreas de las ciencias, asimismo este enfoque potencia en los estudiantes la capacidad de análisis en la temática abordada. En este sentido, y considerando lo anteriormente mencionado, se vuelve relevante implementar este tipo de metodologías con el fin de desarrollar habilidades de comprensión y análisis, especialmente al momento de describir e interpretar voltamperogramas.

En relación con la experimentación ilustrativa:

El trabajo investigativo de Hernández, G et al. (2012) denominado ¿Cómo diversificar los trabajos prácticos? Un experimento ilustrativo y un ejercicio práctico como ejemplos. Los autores citan a Gil et al. (1999) que afirma que es necesario reorientar las metodologías del trabajo práctico que los docentes actualmente implementan, pues las investigaciones realizadas al respecto dejan en evidencia el vacío conceptual que ocurre si se enfoca el aula de ciencias más a nivel experimental que a nivel teórico sin que haya relación. En este artículo, plantean cuatro estrategias que pueden los docentes en ciencias implementar en sus clases en el cual se prioriza el componente experimental, entre estos la experimentación ilustrativa, la cual tiene como objetivo la interpretación y visibilidad de la relación entre variables en un contexto práctico. El artículo manifiesta que el uso de esta estrategia didáctica daría una nueva dirección en el cómo se planean las actividades prácticas y cómo el aprendizaje de los estudiantes se ve potenciado por medio de la aplicación de este campo emergente de la línea de investigación de los trabajos prácticos de laboratorio.

En vista de lo anterior, es menester resaltar los experimentos ilustrativos para poder explicar a los docentes en formación el funcionamiento del potenciómetro

de bajo costo, para que ellos puedan comprender cómo funciona y puedan relacionar variables como el potencial y la corriente en el laboratorio. Para familiarizar a los participantes a los que va dirigida esta investigación, se ilustra el mecanismo de dicho potenciómetro por medio de una clase en laboratorio, para que sea más amigable con el aprendizaje y para que los estudiantes puedan visualizar cómo funciona y hace la lectura el potenciómetro en tiempo real, involucrando además la programación necesaria para graficar un ciclo voltamperograma. Este trabajo da una mirada más completa a cómo podría ser utilizada la experimentación ilustrativa en las aulas, además de indicar la facilidad de análisis de gráficos mediante softwares de programación.

Sobre la evaluación auténtica:

Como es mencionado por Vallejo Ruiz & Molina Saorín (2014), la educación sufre una continua transformación potenciada por los cambios sociales, políticos y económicos; los cuales influyen en reformas educativas, estos acontecimientos hacen que la labor docente busque nuevas metodologías, recursos y formas de evaluar. Wiggins, G (1998) hace referencia a la educación con un enfoque principal y es mejorar el desempeño estudiantil, en lugar de vigilar el rendimiento de los estudiantes por medio de la evaluación, por su parte, Wiggins fue uno de los pioneros en citar la evaluación auténtica y referirse a ella como un área que permite el aprendizaje por medio de rúbricas, planteamiento de situaciones problema reales y retroalimentación constante.

Salcedo Torres y Villarreal Hernández (1999) por medio de su estudio sobre las concepciones que tienen sobre la evaluación, permiten dar cuenta que la idea que se tiene de esa herramienta es de ser un paso final en el proceso de aprendizaje, en su trabajo realizan una caracterización a docentes y estudiantes de la Universidad Pedagógica Nacional, en la Licenciatura en Química; en este trabajo los autores concluyen que hay una gran tendencia a ver la evaluación como una medición del aprendizaje, más no como un instrumento para aprender, es por ello que los docentes proponen que la evaluación debe considerarse como un medio para aprender y transformar, impulsando la relación aprendizaje-

evaluación, ya que en áreas como la química lograría potenciar un aprendizaje más significativo.

El término “auténtica” fue popularizado en la década de 1980 por Wiggins y otros autores, quienes comenzaron a cuestionar los métodos de evaluación tradicionales y el papel de la educación. Como alternativa, propusieron un modelo de evaluación opuesta a la convencional, al que categorizaron como “no auténtica”. Frente a este tipo de evaluación se adoptó el nombre de evaluación auténtica como alternativa, real, contextualizada y significativa (Bravo Arteaga & Fernández Del Valle, 2000). En vista de lo anteriormente mencionado, este tipo de evaluación marca una gran diferencia con la tradicional cuantitativa. Donde pasa a construirse como una que trata de evidenciar el proceso de los estudiantes y no solo mide su nivel de conocimiento. Cardona Arango, V. (2016).

Con respecto a las voltamperometrías:

La voltamperometría es una técnica electroquímica fundamental para el análisis de procesos redox y diversas aplicaciones, su origen se remonta a 1920 con el científico ganador de un premio nobel Jaroslav Heyrosky, quien introdujo el concepto de polarografía, una técnica que usa un electrodo de gota de mercurio, este avance dio lugar a lo que se cataloga en la actualidad como voltamperometría. (Zuman, 2001). Sin embargo, la técnica experimentó un periodo de inactividad debido a las complicaciones relacionadas con el diseño de las celdas electroquímicas y electrodos que funcionan para el método, no obstante, en 1960 el área de la electroquímica instrumental resurgió con ayuda de los avances tecnológicos. (Gonzáles-Hernández & García- Céspedes, 2004)

Posteriormente, con la evolución de instrumentos de control de potencial y corriente esta técnica empezó incorporando electrodos sólidos como el carbón vítreo, ampliando sus aplicaciones. Esta técnica permite observar el comportamiento de las especies químicas en solución, analizando los procesos de oxidación y reducción mediante un barrido de potencial en ciclos repetidos (Bard y Faulkner, 2001). Finalmente, las voltamperometrías cíclicas, se consolidarán como una de las técnicas más versátiles para el estudio de mecanismos redox, debido a su capacidad de ofrecer información detallada

sobre la reversibilidad de las reacciones, la estabilidad de los productos intermedios y la eficacia de transferencia electrónica (Compton y Banks, 2010)

En el contexto educativo, algunos autores han propuesto la incorporación de la voltamperometría cíclica como una estrategia de aprendizaje activo y de la comprensión de fenómenos electroquímicos. Ramos Mejía y Hernández-Martínez (2022) en el uso de equipos electroquímicos basados en Arduino, permiten ver la aplicabilidad de técnicas como potenciometría y cronoamperometrías y voltamperometrías, mediante la construcción de sus propios equipos. A través de asesorías y simulaciones los estudiantes comprendieron los fundamentos teóricos y también lograron aplicar estos conocimientos diseñando y realizando su propio equipo con materiales caseros. Los resultados de este proyecto fueron óptimos, ya que evidenciaron una clara aplicación y comprensión de las técnicas, el proyecto reflejó un alto grado de participación, integrando de manera efectiva la teoría con la construcción de equipos electroanalíticos. El uso de herramientas interactivas en la enseñanza de la Voltamperometría facilita considerablemente el aprendizaje de conceptos como lo enuncia Chen, Hu y Lu quienes desarrollaron FreeSim, un recurso didáctico que permite simular experimentos electroquímicos en tiempo real, brindando a los estudiantes visualizar parámetros como el potencial aplicado, a la respuesta de la corriente entre otros sin necesitar de equipos de laboratorio costosos (Chen, Hu, & Lu, 2025). Este tipo de iniciativas contribuye no solo a potencializar el acceso a educación científica, sino de integrar técnicas percibidas como complejas en contextos educativos aplicando el aprendizaje teórico y relacionándolo con la práctica de diversas formas.

6. MARCO REFERENCIAL

En este apartado se presentan los fundamentos teóricos que sustentan la elaboración del presente trabajo. El propósito principal es contextualizar conceptualmente los ejes temáticos de investigación que guían el estudio. Los componentes fundamentales que conforman este marco son: los estudios de caso, la experimentación ilustrativa, las voltamperometrías cíclicas, voltamperogramas cíclicos junto con el potencióstato como instrumento utilizado y la evaluación auténtica.

6.1. Estudios de caso y la experimentación ilustrativa

Los estudios de caso son un método y /o estrategia de enseñanza, los cuales tiene como objetivo generar mejor comprensión, análisis y exploración de una temática en específico, como lo explica Wasserman, S (1994) la terminología de “casos” hace referencia en que ellos debe contener información, recopilación de datos, ilustraciones y/o imágenes que aporten información; Wasserman en su libro (El estudio de casos como método de enseñanza, 1994), recalca también la importancia del uso de un caso real.

“Un buen caso es el vehículo por medio del cual se lleva al aula un trozo de realidad” p20

En el momento de construir los estudios de caso, es importante que estén definidos correctamente y tengan sentido dentro los objetivos de investigación es por ello por lo que deben tener significado y estar delimitados (Codina, 2023). La construcción de estos casos implica seguir una serie de pasos. Coller (2005) propone una taxonomía a la hora de construir un caso de estudio, la cual se puede apreciar en la tabla 1.

Categoría del estudio de caso	Tipo de estudio de caso
Según lo que se estudia	Proceso / objeto
Según el alcance del caso	Genérico (instrumental, ejemplar) Específico
Según la naturaleza del caso	Ejemplar, polar, típico, único, teóricamente decisivo.
Según el tipo de acontecimiento	Histórico, contemporáneo, híbrido
Según el uso del caso	Exploratorio (descriptivo) Analítico: – Con hipótesis – Sin hipótesis
Según el número de casos	Único, múltiple

Tabla 1: Clasificación de los tipos de caso. Adaptado de Coller (2005)

Según el alcance del caso y según la naturaleza del caso, los estudios de caso instrumentales o ejemplares sirven para ilustrar una teoría o conjunto de proposiciones sobre el funcionamiento de un fenómeno (Coller, 2005). Este tipo de caso de estudio podría funcionar en el ámbito de la química, ya que las teorías, hipótesis y afirmaciones con respecto a un fenómeno físico y/o químico son recurrentes en las reflexiones que se hacen en un campo científico.

Por otra parte, Yin (2018) citado en Coller, (2005) plantea un enfoque riguroso y sistemático para la creación del caso, donde enriqueciendo la taxonomía de Coller (2005), Yin enfatiza en la creación de un marco referencial y revisión bibliográfica, (revisar figura 2); aportando con ello una construcción adecuada del caso.

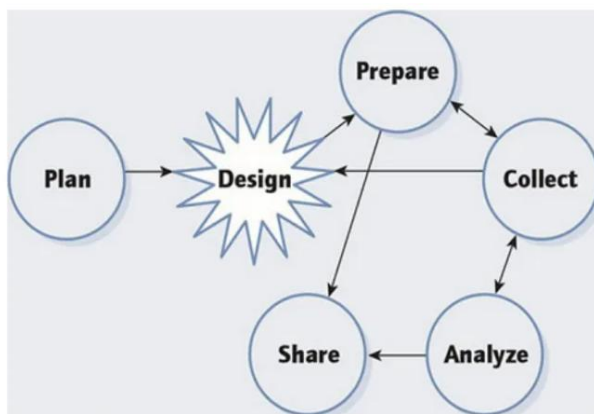


Figura 1: Diagrama de fases de un estudio de caso, tomado de Yin (2018)

Por otra parte, la experimentación ilustrativa es una línea emergente correspondiente a los trabajos prácticos. Caamaño (2004) afirma que la experimentación ilustrativa tiene como objetivo principal ilustrar o vislumbrar una relación de dos o más variables en un ejercicio práctico, permitiendo que el estudiante se familiarice con el fenómeno y pueda interpretarlo. Hay que entender que este concepto es meramente trabajado y entendido por el docente como demostración, y no como trabajo experimental que realizan los estudiantes, que, por cierto, dichas demostraciones pueden ser un apoyo teórico-práctico y una gran ayuda para diversificar la didáctica de las prácticas de laboratorio. Un ejemplo claro de esta línea es la aplicación de la ley de gases de Boyle, la cual mediante un experimento ilustrativo con aire y globos se puede

comprender la relación entre la presión y la relación con el volumen ocupado del gas. Otro ejemplo sería la relación entre las variables de intensidad y corriente previstas en la ley de Ohm, Caamaño, (2004).

Caamaño en su análisis cita a Pintó, (2002) el cual afirma que dicha relación de variables puede ser vista más fácilmente a través un gráfico producido por un ordenador o un software donde las coordenadas X y Y pueden representar dichas variables, y así el experimento ilustrativo y la relación sería más fácil de comprender por los estudiantes. El apoyo de estos autores da cuenta de que, como la ley de Ohm y la ley de Boyle pueden ser efectivamente representadas en un gráfico, otros parámetros científicos pueden ser evaluados bajo esta línea emergente en ciencias, soportando que la experimentación ilustrativa requiere en cierta parte análisis e interpretación de gráficos.

En coherencia con lo anterior, se quiere adoptar un enfoque de estudio de caso propuesto por Yin (2018), el cual será desarrollado bajo una estructura rigurosa que contempla la formulación de preguntas orientadoras y la revisión bibliográfica pertinente; y articulado con la taxonomía de Coller, (2005), el tipo de estudio de caso utilizado será de carácter ejemplar o instrumental. El segundo estudio de caso se articulará directamente con la experimentación ilustrativa, centrada en la comprensión del funcionamiento del prototipo de potencióstato, observando ventajas y desventajas del mismo, además de la capacidad de interpretación del ciclo voltamperograma obtenido mediante el análisis de la reacción redox de ferricianuro de potasio. La integración de los estudios de caso y de la experimentación ilustrativa se realiza con la intención de contextualizar la técnica desde un escenario real o simulado cercano a la práctica científica y así mismo favorecer el desarrollo de habilidades de observación, análisis y reflexión crítica.

Finalmente, los estudios de caso instrumentales servirán como medio para poder explicar, mediante una serie de problemáticas científicas y tecnológicas, el funcionamiento del potencióstato construido, además de problematizar el cómo está constituido y cómo la técnica de la Voltamperometría Cíclica se puede implementar en diversos campos de estudio como lo puede ser la caracterización

de materiales y la implementación del mismo en la industria actual. El medio por el cuál se explica el funcionamiento del prototipo de potencióstato se realiza a través de la experimentación ilustrativa, donde, además de ilustrar cómo funciona el equipo a los estudiantes, se utilizarán dos softwares, como sugieren los autores que han investigado sobre este enfoque: uno para graficar el ciclovoltagemperograma donde el eje X corresponde a la corriente generada, y el eje Y corresponde al voltaje aplicado. El otro software se utiliza para reportar la lectura de potencial y corriente por medio de una tabla, para así poder constatar los valores para futuras revisiones.

A continuación, se explicarán los conceptos fundamentales que constituyen el modelo de evaluación que permea en su totalidad este trabajo: la evaluación auténtica, que permitirá evaluar las respuestas de los estudiantes no únicamente desde un punto de vista cuantitativo y memorístico.

6.2. La evaluación auténtica

Brown, (2015) define la evaluación auténtica como una herramienta que brinda a los estudiantes la posibilidad de aprender mientras participan activamente en el mismo proceso evaluativo, por lo que resulta importante entrar en el paradigma de la relación evaluación-aprendizaje. La evaluación cuantitativa tradicional suele estar enfocada en la obtención de resultados y procedimientos que sean correctos a la temática enseñada, la evaluación auténtica por otro lado sería más flexible y catalogada como una propuesta alternativa de evaluación que busca darle sentido y valor formativo al acto de evaluar, dejando de lado las percepciones de evaluar sea una actividad final, sino más bien sea una experiencia de aprendizaje (Álvarez Valdivia, 2005). No obstante, la implementación de la evaluación auténtica puede implicar mayor tiempo y dedicación por parte del docente, como lo expresa Wiggins, (1998).

Para solventar estas dificultades, se han planteado varias estrategias en el mundo contemporáneo. Una estrategia de aplicación de una evaluación auténtica sería mediante el uso de rúbricas de calificación, para abarcar más aspectos evaluativos que no son percibidos por una evaluación tradicional, Newmann et. al., (2007). Además, los autores señalan algunos ejemplos en los

cuales se podrían aplicar la evaluación auténtica son los estudios de casos, creación de diagramas, ilustraciones, solucionar problemas o planificar posibles soluciones a problemas reales.

Por otro lado Brown, (2015) propone que para conseguir realizar una evaluación auténtica el profesorado debe preguntarse la finalidad y que busca evaluar, además de resaltar la importancia de la retroalimentación en este tipo de evaluación, debido a que una retroalimentación temprana y efectiva es una pieza importante y diferencial de la educación tradicional, esto se debe a que permite que el estudiante avance en su proceso de aprendizaje al recibir observaciones oportunas, no obstante el autor señala que para que sea efectiva la retroalimentación debe ser aplicada de forma individual y personalizada.

La construcción de la evaluación auténtica es mencionada por Ahumada, A (2005) como una evaluación hecha con el fin de mejorar la calidad y los niveles de aprendizaje, reforzando la relación enseñanza- aprendizaje. En la figura 3, se puede visualizar cuáles son las condiciones y conceptos para tener en cuenta si se desea plantear alguna actividad fundamentada en este tipo de evaluación: Factores claves como los conocimientos previos del estudiante, la motivación, la pluralidad de maneras de pensar, y los diferentes ritmos de aprendizaje hacen que esta herramienta se deslinda de una evaluación tradicional, que solo se enfoca en plasmar los conocimientos adquiridos en una prueba o test evaluado cuantitativamente.

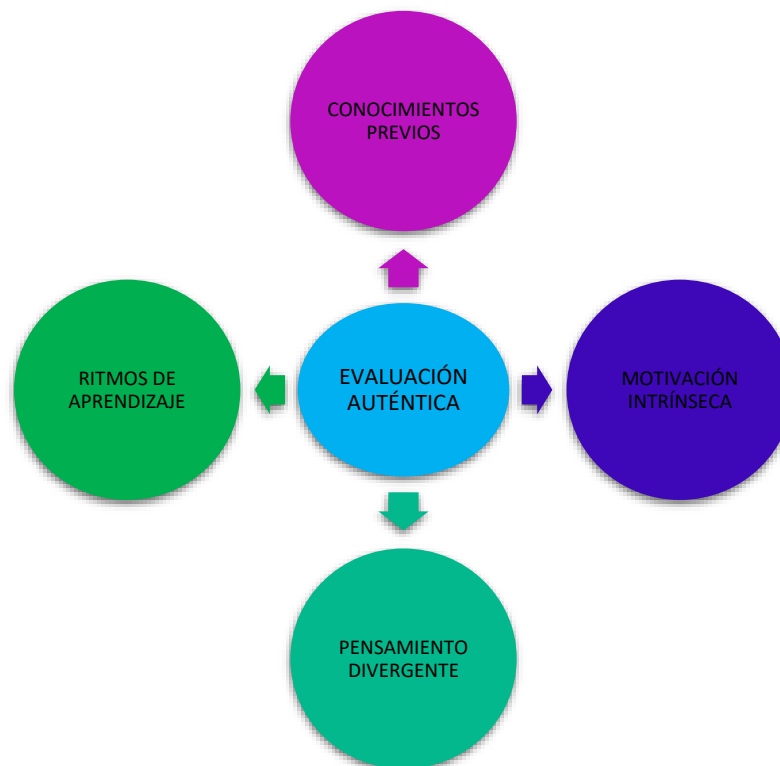


Figura 2. Condiciones y supuestos de una evaluación auténtica, adaptado de Ahumada, P.A (2005)

Sobre el proceso de aprendizaje, Moretta (2016) ofrece un análisis detallado de las etapas importantes que componen el proceso de aprendizaje, identificando fases fundamentales en las etapas del aprendizaje que se son: Motivación, interés, comprensión, aplicación, transferencia y la evaluación siendo una etapa final en el proceso de aprendizaje, el autor señala que las diversas formas de evaluación han permitido que esta herramienta valore aspectos como la comprensión, las destrezas y la actitud frente a las temáticas. Por ende, la producción de conocimiento puede darse por medio de una evaluación auténtica, pero ya no vista como etapa final, sino como etapa transversal. Como mencionan Darlingy Adamson (2014).

“La evaluación auténtica no solo mide el aprendizaje, sino que también lo potencia, al obligar a los estudiantes a pensar críticamente y transferir conocimientos” (Darling-Hammond y Adamson, 2014, p63).

En este sentido, la evaluación auténtica se presenta como una estrategia clave para fortalecer y acompañar el proceso de aprendizaje, al permitir que los estudiantes participen activamente y construyan conocimiento de forma

significativa lejos de ser un acto final, donde evaluar se convierte en una oportunidad de aprendizaje que enriquece la enseñanza y promueve una formación integral.

En el marco de la evaluación auténtica, trabajar temas como las técnicas analíticas electroquímicas puede transformarse en una experiencia significativa al integrar estrategias diferenciadas como estudios de caso y los espacios de clase como escenarios de aprendizaje activo. Al abordar casos relacionados con procesos redox en diversos campos de estudio, los estudiantes desarrollan habilidades de interpretación de información. La fisicoquímica y sus técnicas de análisis, al ser una rama de estudio de la química que requiere análisis y rigurosidad, se convierte en un lugar ideal para evaluar desempeños complejos mediante rúbricas que valoren diversos campos no solamente el disciplinar. Así, la evaluación deja de ser una etapa final del proceso, y se convierte en un proceso transversal que potencia el aprendizaje, fomenta la autonomía y vincula la química con la resolución de problemas de la vida real.

En el siguiente apartado, se ahondará más a profundidad en aquellas técnicas analíticas relacionadas con el análisis fisicoquímico de materiales y de especies químicas, ya que es el concepto macro y de gran importancia en este trabajo: las técnicas analíticas electroquímicas, que engloban la Voltamperometría Cíclica.

6.3 Técnicas analíticas electroquímicas

Las técnicas analíticas electroquímicas hacen parte de la química analítica instrumental, y determinan las propiedades eléctricas de una solución en una célula electroquímica (Gómez y Soria, 2002). Una de las características de este conjunto de técnicas es su alta sensibilidad y su análisis a concentraciones muy bajas, y otra característica fundamental es la medición de actividad del analito, no de la concentración de este. A veces suele ocurrir que la actividad de una especie es aproximadamente igual a la concentración de esta, por lo que suele simplificarse y reemplazarse matemática e indistinguiblemente tanto la actividad como la concentración, pero esto solo ocurre en soluciones muy diluidas, y no siempre ocurre de esa manera.

Las técnicas analíticas electroquímicas se clasifican dependiendo de la variable a estudiar. Gómez y Soria, (2002) proponen 3 subcategorías las cuales son:

Métodos potenciométricos: aquellos que miden y estudian la relación entre la fuerza electromotriz (aquella diferencia de potencial que genera un movimiento de electrones) y la actividad del analito por medio de la ecuación de Nernst. En este tipo de métodos se usan 2 electrodos: uno de referencia y uno indicador, además de un voltímetro. Algunas de las aplicaciones de los métodos potenciométricos son las mediciones de pH utilizando un electrodo de vidrio, o la determinación de un potencial de oxidorreducción de una solución.

Métodos coulombimétricos y electrogravimétricos: aquellos que miden y estudian la relación entre la carga involucrada en el circuito y la concentración del analito. Estos métodos están basados bajo una electrólisis que se efectúa para producir un solo producto de concentración conocida producto de la oxidación o reducción del analito, (Gómez y Soria, 2002). También afirma que la principal diferencia entre un método y el otro es que el electrogravimétrico mide la masa depositada sobre el electrodo de trabajo, y el coulombimétrico mide la corriente de este. Durante la realización de los métodos, se requiere realizar una curva de corriente vs tiempo, y se calcula la carga mediante integrales definidas bajo dicha curva.

6.4. Métodos voltamperométricos.

Son aquellos que miden y estudian la relación entre intensidad de corriente y el voltaje aplicado en la celda electroquímica, (Gómez y Soria, 2002). Los autores enuncian que existen diferentes técnicas para este mismo método, las cuales se enuncian a continuación:

6.4.1. Voltamperometría de barrido lineal:

Consta de una celda con 3 electrodos sumergidos en el analito. En este método se requiere el uso de un electrolito soporte para minimizar la interacción iónica descontrolada y para mantener una conductividad constante. Se denomina barrido lineal pues el potencial del microelectrodo va aumentando progresivamente de manera lineal.

6.4.2. Voltamperometría de impulso diferencial:

Es una técnica que implementa excitación de impulsos en el sistema. La medida de intensidad se mide antes y después del impulso o excitación. La diferencia de intensidad por impulso se registra en función del potencial que aumenta linealmente. El voltamperograma consta de un pico notorio el cual su altura máxima es directamente proporcional a la concentración del analito. (Gómez y Soria, 2002).

6.4.3. Voltamperometría de redisolución:

Este método se centra en el análisis de trazas mediante deposiciones en el electrodo y redisolución de trazas. Hay dos momentos de lectura de intensidad, antes de la redisolución y después de esta. El tipo de voltamperometría de redisolución depende de los analitos: es redisolución anódica para metales que se oxidan al disolverse; catódica para especies que se reducen en el mismo proceso.

6.4.4. Voltamperometría cíclica **(CV)**:

La voltamperometría cíclica se define como una técnica electroanalítica en la que el potencial aplicado a un electrodo va variar de manera lineal y cíclica con el tiempo, en este se registran simultáneamente la corriente y el potencial. Este barrido de potencial se realiza en ambos sentidos (catódico y anódico) permitiendo observar el proceso de oxidación y reducción de las especies, esto ha permitido que sea aplicada en caracterización de electrodos, estudio de procesos de adsorción entre otros, (Climent, y Feliu, 2015).

Gracias a la CV, se puede tanto cuantificar la concentración de algún analito en solución, mediante el uso de curvas de calibración utilizando

arreglos matemáticos y regresión lineal, o incluso se puede determinar procesos como la difusión y migración, fenómenos relacionados con el transporte de masa (González y García, 2024). Estos fenómenos pueden ser estudiados cinéticamente, indicando procesos intrínsecos de reversibilidad, irreversibilidad o cuasirreversibilidad de la reacción redox a estudiar.

Actualmente, esta técnica está siendo ampliamente usada para caracterizar materiales como polímeros biocompatibles para la detección de analitos orgánicos o inorgánicos, o para evaluar la efectividad de materiales creados en laboratorio, que van a ser destinados para otros procesos fisicoquímicos en otras prácticas de laboratorio, como lo pueden ser electrodos modificados o electrodos selectivos a iones o moléculas.

6.5. Ciclovoltamperograma

Es un esquema gráfico, el cual posee una forma con picos definidos los cuales pueden indicar procesos de oxidación y reducción. Esos picos son graficados a medida que se varía el potencial, y sirven para indicar el comportamiento químico y físico del analito y las reacciones que ocurren en los electrodos. Para poder comprender los ciclovoltamperogramas es importante contextualizar los siguientes términos:

6.5.1 Barrido de potencial:

Producto de la perturbación del potencial que genera el potenciostato, se puede graficar cómo es el comportamiento del barrido de potencial. La siguiente imagen que se presenta en la figura 3, ilustra cómo ocurre este proceso en una voltamperometría cíclica donde se analiza una reacción química reversible:

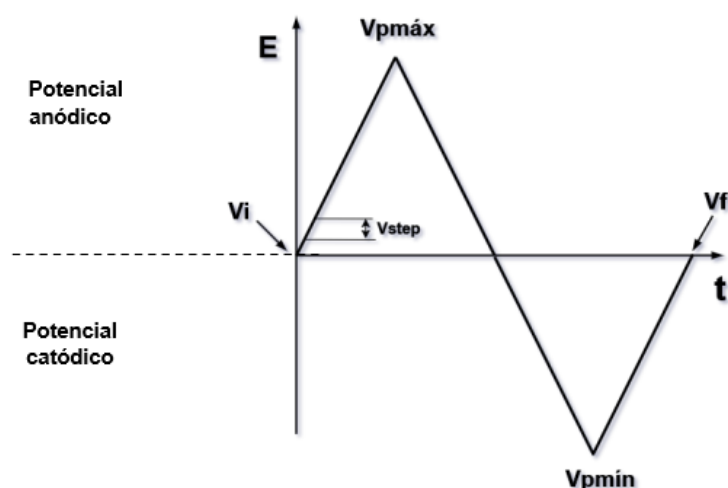


Figura 3. Proceso de variación de potencial en un barrido voltamperométrico cíclico. Tomado y adaptado de Rábago, S. (2017)

Las variables presentadas en el gráfico son: V_i (Potencial inicial), V_{pmax} (Potencial de pico máximo), V_{step} (Paso de potencial), V_{pmin} (Potencial de pico mínimo) y V_f (Potencial final), (Rábago, 2017). Con este proceso es fundamental controlar la velocidad de barrido, dependiendo de la variable fisicoquímica a analizar y el tipo de reacción: si es una reacción irreversible posiblemente la variación de potencial abarque solamente una región anódica o catódica del barrido, y dependiendo si el proceso es únicamente de reducción o de oxidación.

6.5.2. Variables del ciclovoltamperograma o voltamperograma cíclico:

A continuación, en la figura 4 se muestra cómo es la estructura de un ciclovoltamperograma, mostrando incluso las etapas del método analítico donde una reacción es reversible:

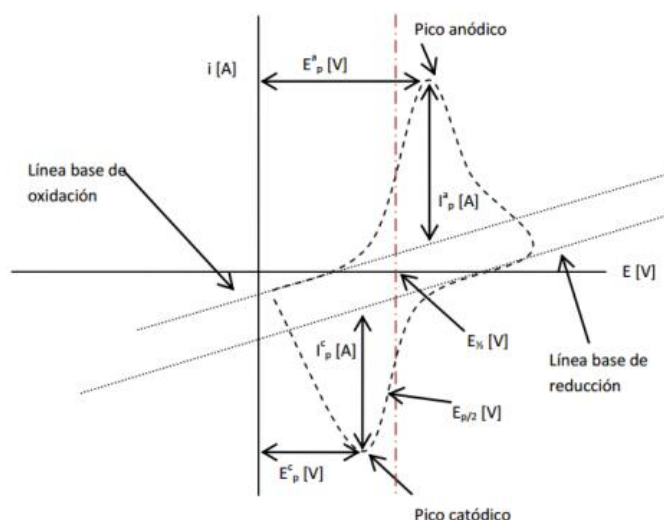


Figura 4. Ciclo voltamperograma estándar. Tomado de Rábago, S. (2017)

Las variables de la figura anterior son: E_p^c (Potencial de pico catódico), I_p^c (Corriente de pico catódico), E_p^a (Potencial de pico anódico), I_p^a (Corriente de pico anódico), variables de interés para leer estos gráficos de manera detallada (Rábago, 2017). El proceso de voltamperometría comienza en la línea base de oxidación. En este momento se comienza a variar el potencial (E) y va formándose un pico anódico. Antes de este pico ocurre una oxidación de analito en el electrodo de trabajo. Cuando se llega al pico máximo ocurre un descenso de corriente, que indica que se oxidó todo el analito disponible, y se comienza a estabilizar el sistema. Es en este punto que se vuelve a variar el potencial de manera inversa, partiendo de la línea denominada línea base de reducción, generando otro pico denominado pico catódico. Antes de llegar al pico, ocurre un proceso de reducción donde la especie oxidada vuelve a reducirse formando el analito inicial. Hay que tener cierta precaución al momento de la lectura de estos gráficos, pues se tiende a confundir el pico catódico y el anódico. El potencial positivo o negativo es el que determinará el orden de los picos. Se realiza esta observación pues no hay referencias fijas para leer un voltamperograma cíclico, y algunos gráficos poseen ejes que pueden variar en escalas.

6.5.3. Celda electroquímica:

Una celda electroquímica es el sistema donde ocurren las reacciones redox que permiten el estudio voltamperométrico. Está compuesta por tres orificios donde estarán los electrodos, estos electrodos están inmersos en una solución electrolítica que permite el movimiento de iones y todo el conjunto es conectado a un potencióstato. (Elgrishi et al., 2017)

6.5.4. Electrodos:

Normalmente hay varios tipos de electrodos, entre ellos de material de grafito, platino, cobre, entre otros. Existen tres tipos de electrodos que sirven al potencióstato: el electrodo de trabajo, el contraelectrodo o electrodo auxiliar, y el electrodo de referencia. Cada uno de estos va a explicarse a continuación, siguiendo la explicación que realiza Rábago, (2017):

- Electrodo de trabajo: Es donde se realizan todas las mediciones. En este electrodo se realiza la perturbación de potencial y la medición de corriente.
- Contraelectrodo o electrodo auxiliar: Sirve de puente para facilitar el paso de corriente al electrodo de trabajo a través del analito.
- Electrodo de referencia: Mantiene el potencial constante para que toda la corriente pase desde el contraelectrodo hasta el electrodo de trabajo.

6.5.7. Potencióstato:

Es un dispositivo que regula el potencial presente entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. El funcionamiento de este dispositivo consiste en la aplicación de un potencial que se manifiesta en corriente que fluye desde el contraelectrodo hacia el electrodo de trabajo. Producto de este paso de corriente se generan, regulan y miden potenciales en voltios (V) o milivoltios (mV), y corriente eléctrica en amperios (A) o miliamperios (mA), (González, 2024). El potencióstato se caracteriza por su gran importancia en los laboratorios electroquímicos, este instrumento incluye en sus partes tres electrodos los cuales tiene la finalidad de

permitir el estudio de reacciones redox (Gonzales, 2010), lo cual es ideal para la realización de voltamperogramas.

Los potencióstatos de bajo costo como lo expresan los autores Alfaro y Alfaro (2017), se componen por una fuente de poder, un potenciómetro, resistencias, voltímetros y tres electrodos. La figura 5 permite comprender el modelo de potencióstato de bajo costo a construir en ese trabajo; es importante mencionar que esta investigación abre caminos para comprender mejor las partes del equipo y facilita la construcción y replicación de este para futuras clases.

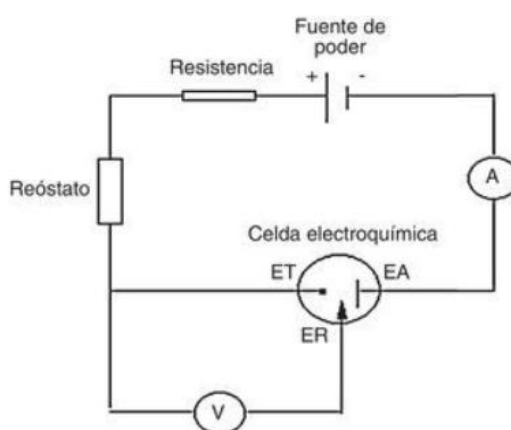


Figura 5. Montaje de potencióstato de bajo costo, figura tomada de Alfaro y Alfaro (2017)

En la industria de la química analítica, la mayoría de los potencióstatos que se encuentran a nivel comercial, incorporan en sí mismos un circuito compuesto por 3 amplificadores operacionales (*op-amps*) que son los que realizan la medición y traducción de datos analógicos como parte de su sistema de adquisición de datos. A continuación, en la figura 6 se muestra cómo se encuentra estructurado el circuito electrónico de un potencióstato comercial.

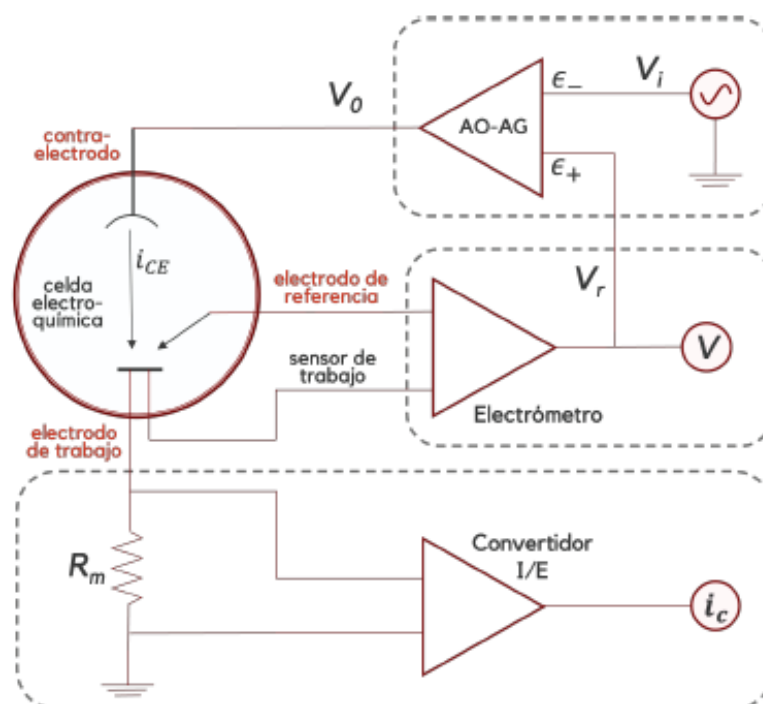


Figura 6. Representación esquemática del circuito de un potenciostato comercial. Tomado de (González y García, 2024)

Las partes de la figura 6 serán explicadas según González y García, (2024), y según Bard y Faulkner, (2001), puesto que tienen gran similitud en conceptos.

La celda electroquímica se encuentra representada por el círculo rojo. Dicha celda está compuesta por una conexión de 3 electrodos: electrodo de trabajo (WE), electrodo de referencia (RE) y contraelectrodo (CE). El CE está controlado por el amplificador operacional AO-AG (González y García, 2024) o en otros términos, es un amplificador que actúa como seguidor de voltaje (Bard y Faulkner, 2001). El propósito de este seguidor de voltaje es igualar bajo una configuración de lazo abierto, el potencial de la celda o potencial de salida (V_0) con el potencial de entrada (V_i). Se denomina seguidor de voltaje pues el voltaje de entrada (input V) es el mismo que el voltaje de salida (output V), y su objetivo es adaptar las impedancias, puesto que la impedancia de entrada es muy alta, a comparación de la impedancia de salida, razón por lo cual permite que el Voltaje de salida esté controlado por un material que pueda brindar poca corriente (Bard

y Faulkner, 2001). Este op-amp modifica el voltaje de salida en el CE para regular la corriente que circula en la celda electroquímica, de esta manera, el potencial se ajusta tal y como el op-amp lo indique, (González y García, 2024). Este amplificador operacional es un intermediario que permite la medición de voltaje (o potencial) sin perturbarlo de gran manera, (Bard y Faulkner, 2001).

El segundo amplificador operacional se denomina electrómetro. Está conectado a las señales que el WE manifiesta, y al mismo tiempo, está directamente relacionado con el RE. Posee una alta impedancia, lo que permite que, en esta parte del circuito, no circule la corriente, para así poder evitar ruidos de señal y una incorrecta medida del potencial (González y García, 2024). En el WE al circular corriente, este se ve obligado a alterar su potencial eléctrico, mientras que, al mismo tiempo, el RE no posee alteraciones. Esto es fundamental, debido a que todas las mediciones de voltaje se hacen con base en la diferencia de potencial, realizando la diferente entre el voltaje de RE y el voltaje de WE, y este voltaje no debe ser perturbado por corrientes parásitas. El Voltaje de retroalimentación (V_r) es el potencial de salida del op-amp, y reporta la diferencia de potencial resultante entre el potencial del WE y el potencial de RE. Esta diferencia de potencial está conectada con la entrada inversora del seguidor de voltaje explicado en el apartado anterior, para que se iguale el potencial de V_i con el de V_r , y ajustar con base en esa igualación, el potencial de V_o . (González y García, 2024). Así, la señal de la entrada inversora y no inversora del seguidor de voltaje es la misma, esto debido a que existe un cortocircuito virtual entre ellas, eso quiere decir que, el voltaje de la entrada inversora y la no inversora es prácticamente el mismo, a pesar de no estar físicamente conectadas entre sí, como si estuvieran en “cortocircuito”, sin embargo esto no es un problema en el circuito del equipo, sino que es crucial para poder realizar las mediciones adecuadas. Finalmente, para simplificar el circuito y combinar los potenciales V_i y V_o , se sugiere retroalimentar mediante lazo cerrado, y de la misma manera, que el WE esté referenciado virtualmente a tierra, en relación con el RE, que deberían ser 0 V. (González y García, 2024).

En la tercera parte del circuito, la corriente no debe medirse directamente en el WE, sino que debe ser interpretada por ley de Ohm, utilizando una resistencia

conocida, produciendo una caída de voltaje. En esta parte, quien realiza esta conversión es el tercer amplificador operacional denominado seguidor de corriente (Bard y Faulkner, 2001), o Convertidor de corriente a voltaje I/E (González y García, 2024). En la ecuación 1, se observa matemáticamente cómo la corriente es medida por el potencióstato:

$$i = \frac{\text{Voltaje de retroalimentación } (V_r)}{\text{Valor de la resistencia } (R_m)}$$

Ecuación 1. Determinación matemática de la corriente en un circuito de un potencióstato. Tomado y adaptado de González y García, (2024)

Con base en los 3 op-amps explicados anteriormente, se puede realizar la lectura de potencial y corriente en un circuito de potencióstato. Estos tres op-amps deben estar anclados a tierra. La siguiente figura ilustra cómo cada amplificador debe estar anclado:

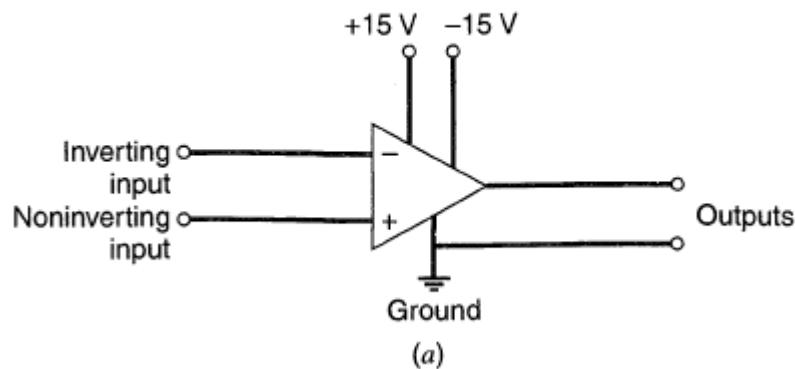


Figura 7. Diagrama de conexión a tierra para los tres amplificadores operacionales del potencióstato comercial. Tomado de Bard y Faulkner, (2001).

Generalmente, los op-amps deben estar anclados a fuentes de voltaje, relativas a un punto en común (tierra o GND) y opuestas entre sí. En la figura 7, las fuentes son de 15V y -15V respectivamente, pero pueden variar dependiendo del modelo de potencióstato. Muchas mediciones se hacen en la conexión a tierra o GND, especialmente para definir una referencia de 0V. Es por eso que el anclaje a tierra puede ser físico o virtual. (Bard y Faulkner, 2001). Sin un anclaje a tierra, habría fluctuaciones o ruido de señal que se traduce en ciclovoltamperogramas irregulares.

Con base en lo anterior, el prototipo de potencióstato que se construye en este trabajo debe contener los 3 amplificadores operacionales que un potencióstato comercial incluye en su circuito integrado, y debe tener la misma configuración de lazo cerrado, además de conectarse a fuentes de alimentación de aproximadamente +15V y -15V respectivamente. El seguidor de voltaje, en conjunto con el electrómetro y el convertidor I/E debe estar implícito en el prototipo. Esto sirve de base para la construcción del equipo y poder evitar errores en la lectura precisa del ciclovoltamperograma.

7. METODOLOGÍA

7.1 Tipo de investigación

La metodología propuesta para este trabajo es con base a una investigación de tipo cualitativa, donde según Sampieri y Mendoza (2018), afirman que este tipo de investigación es conveniente para comprender fenómenos buscando patrones y diferencias. Esto es clave, puesto que, para comprender cuáles son las motivaciones, niveles de comprensión de la CV y la capacidad de análisis de los estudiantes, se necesita deducir de qué manera los participantes razonan, generan hipótesis y las comparten entre ellos. Sampieri y Mendoza (2018) también señalan las características de la investigación cualitativa, que soportan y encajan perfectamente con este trabajo, las cuales son:

- Los planteamientos del problema no son tan delimitados como una investigación cuantitativa.
- Predomina el razonamiento inductivo, partiendo de lo particular a lo general.
- No se prueban hipótesis ya establecidas, sino que se generan en el proceso.
- Se estudian los casos, los contextos y los hechos tal cual como suceden
- Es de carácter interpretativo
- Se basa en métodos de recolección no estandarizados.

7.2 Participantes

Este trabajo investigativo se implementó con estudiantes de séptimo semestre que pertenecen al programa de Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, el espacio académico Sistemas Fisicoquímicos II. Este espacio académico fue seleccionado ya que pertenece a la fase de profundización y las áreas temáticas del programa analítico son acordes a los objetivos y tema que guía este trabajo.

7.3. Etapas de la investigación

7.3.1. Etapa de fundamentación y gestión

En esta etapa se permitió indagar y discutir toda la fundamentación teórica en torno a las estrategias de enseñanza que podrían permitir la

comprensión de la técnica de voltamperometría cíclica, por ello se estableció en el marco referencial, que se abordaría esta temática por medio de los estudios de casos, la experimentación ilustrativa y la evaluación auténtica como eje centrales, asimismo se efectuó una revisión bibliográfica detallada sobre los fundamentos conceptuales y metodológicos de la voltamperometría cíclica y se recopiló información sobre la construcción del potencióstato de bajo costo.

- Revisión del estado del arte

Durante esta etapa, se planteó la pregunta de investigación que orientó la investigación. Acto seguido se delimitaron y establecieron los referentes principales que guían la investigación como lo son los estudios de caso, la experimentación ilustrativa, la evaluación auténtica, la voltamperometría cíclica y su lectura e interpretación de su respectivo voltamperograma, y la construcción de un potencióstato de bajo costo. Se realiza una revisión exhaustiva del estado del arte sobre dichos referentes, compilando diversos antecedentes que contribuyeron a delimitar la investigación. Adicionalmente, se realizó una revisión bibliográfica que posibilitó la construcción del potencióstato de bajo costo mediante un sistema de circuitos integrados.

- Revisión de fundamentos de construcción del potencióstato de bajo costo

Se empezó a construir el potencióstato de bajo costo, para poder poner en práctica la técnica voltamperometría cíclica y obtener el ciclo voltamperograma. Se compiló información basada en algunas investigaciones relacionadas a material de construcción de equipos de bajo costo para la construcción del prototipo, sin embargo, no se siguió un referente en específico, incluso, se hicieron modificaciones propias para poder simplificar el circuito integrado. A continuación, se mencionan algunos de los materiales que se utilizaron para el mismo fin, en la literatura disponible:

- Una protoboard

- Una tarjeta
- Amplificadores operacionales
- Convertidor analógico-digital
- Resistencia de 1 k Ω
- Electrodo (Carbono vítreo, Ag/AgCl, alambre de platino o grafito)
- Fuente de voltaje estable
- Potenciómetro
- Celda electroquímica
- Multímetro

Siguiendo estos referentes, se llevó a cabo el diseño de estructura convencional formada por tres amplificadores operacionales en esencia. Estos amplificadores interactúan de forma coordinada para lograr una correcta regulación del potencial aplicado a la celda electroquímica y obtener una lectura precisa de la corriente resultante.

El circuito del prototipo está denotado en la figura 8 donde VCC y VEE son las tensiones de alimentación del circuito integrado TL084ACD, el cual integra 4 amplificadores operacionales en un solo chip. VCC corresponde a la alimentación positiva de +12V y VEE es la alimentación negativa -12V, que permiten al amplificador operacional procesar señales tanto positivas como negativas. El circuito integrado, a pesar de que contiene 4 amplificadores operacionales independientes, 3 se usan para realizar las mediciones. Dichos amplificadores constan de una alta impedancia de entrada y capacidad de operar con alimentación dual. U1A, U2A y U3A son identificadores donde “U” designa un circuito integrado y “A” indica el primer amplificador operacional. ESP32 es el microcontrolador central, responsable del procesamiento digital de señales. GPIO34 es un pin específico de entrada analógica del ESP32. VDD es la tensión de alimentación principal para la sección digital del circuito, ya que alimenta al ESP32 y R1 que corresponde a la resistencia 1k Ω

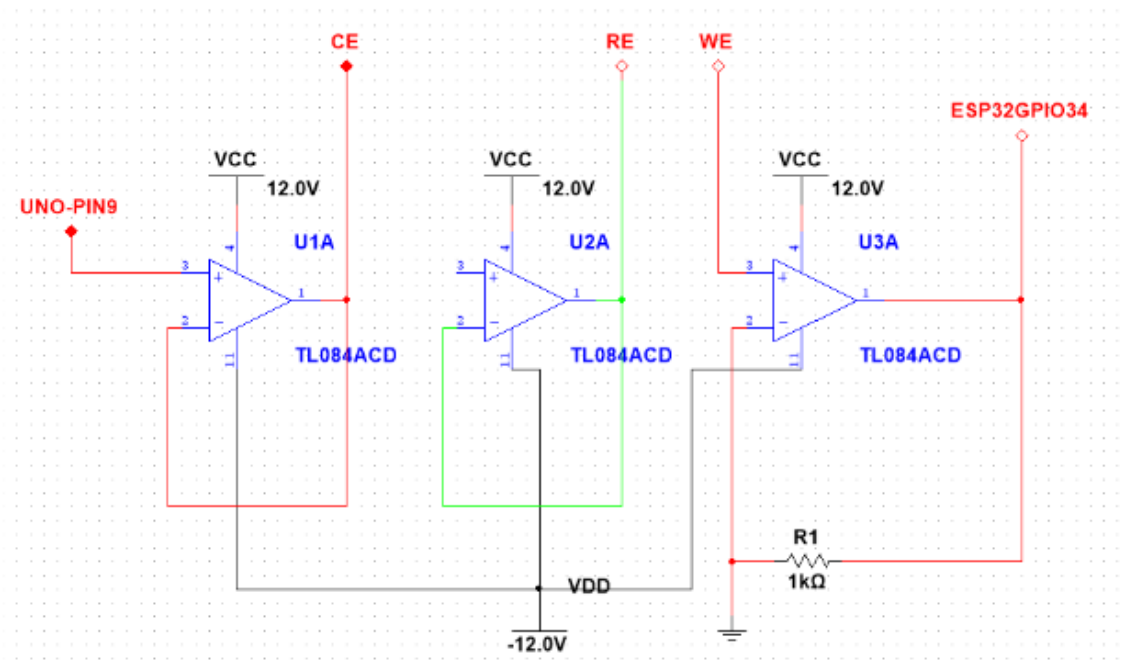


Figura 8. Esquema de circuito de potencióstato con Control de Tierra Virtual

Primera Etapa del circuito: Amplificador operacional A1 (seguidor de voltaje)

Durante esta primera etapa, se utiliza un amplificador operacional teniendo como propósito proporcionar el mismo valor de voltaje aplicado tanto en la entrada inversora como la no inversora. Este proceso eléctrico se denomina Buffer, generando un voltaje aplicado constante el cual lo caracteriza por no obtener una ganancia en voltaje, pero si una ganancia de corriente. En esta configuración, el amplificador operacional no genera una ampliación de señal proveniente de la placa de desarrollo. Delimitando que tiene una única salida, haciendo referencia que el voltaje de entrada es el mismo voltaje de salida.

Como se aprecia en la figura 9, la operación del amplificador consiste en una conexión directa a la salida de este amplificador a su entrada inversora, esto establece una retroalimentación negativa del 100%: Generando un tipo de sistema de control en lazo cerrado llevando al amplificador operacional a realizar un ajuste de forma constante la salida para así mantener el voltaje igual al aplicado en la entrada no inversora.

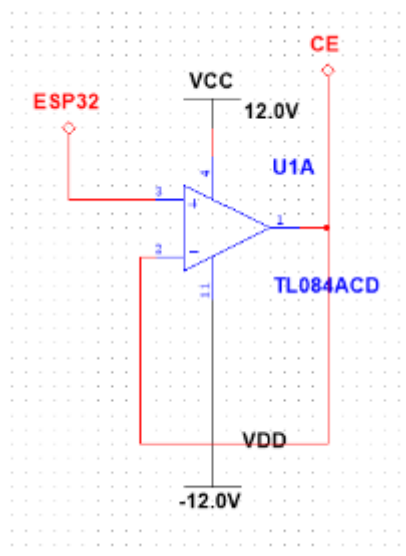


Figura 9. Circuito respectivo del amplificador operacional A1 - seguidor de voltaje

La salida del amplificador A1 va conectada al electrodo auxiliar (CE), siendo su propósito permitir que fluya la corriente suficiente como para que se ejecute la reacción de cambio electroquímico en la interfase del electrodo de trabajo (WE) que mantiene el potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia (RE) coincidente con el potencial comandado por la fuente de control. Al ejecutarse el Buffer, la impedancia de salida de la fuente de señal podría ser demasiado elevada como para que la celda electroquímica pueda generar fugas de corriente de modo correcto, lo que implicaría una mala aplicación del potencial y una mala medición de la corriente.

Segunda etapa del circuito: Amplificador operacional A2 (electrómetro)

Este segundo amplificador operacional tiene como función principal medir la diferencia de potencial del electrodo de referencia (RE) sin alterar su estado aprovechando la alta impedancia de entrada del componente. Para ello, el amplificador opera igualmente como un seguidor de voltaje, manteniendo un potencial estable y conocido que sirve como punto de referencia para el control del electrodo de trabajo. La diferencia de potencial es replicada de manera igual en la salida del amplificador A2,

siendo favorecido por la retroalimentación negativa. Esta salida de voltaje obtenida representa el potencial real del electrodo de referencia, siendo controlado y monitoreado por medio de los pines ADC de la placa de desarrollo ESP32. Esta medición permite verificar que el potencial aplicado sea el correcto y que el RE se mantenga estable durante el proceso. La baja impedancia de salida del amplificador A2 permite que esta señal de medición sea enviada al ADC sin degradación. La diferencia o señal de error entre los dos potenciales se alimenta mediante el amplificador de control, cuya señal resultante varía la salida del amplificador de potencia, utilizando cuanta corriente sea necesaria a través del contraelectrodo (CE), para mantener el potencial de la celda igual a la señal de control. El circuito correspondiente a este segundo amplificador operacional se ilustra en la figura 10.

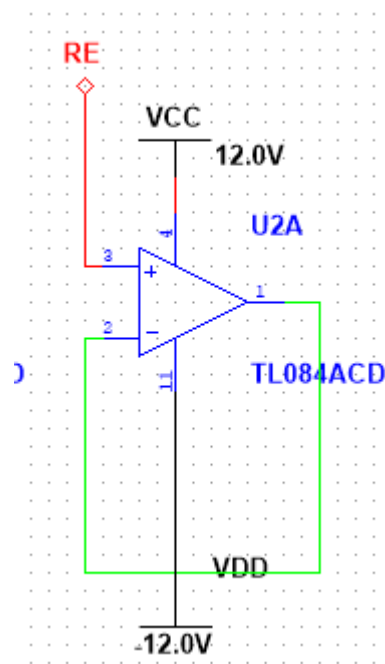


Figura 10. Circuito respectivo del amplificador operacional A2 - electrómetro

Tercera etapa del circuito: Amplificador operacional A3 (convertidor I/E)

En esta etapa, el amplificador operacional se configura como un convertidor de corriente a voltaje, denominado amplificador de transimpedancia, constituyendo un bloque fundamental para transformar

la corriente de entrada en una señal de voltaje proporcional. Esta configuración permite amplificar corrientes de muy baja intensidad, siendo particularmente crucial para medir la corriente faradaica que circula desde el electrodo de trabajo (WE) como resultado de las reacciones electroquímicas (Gupta, 2019).

El electrodo de trabajo se conecta directamente a la entrada inversora del amplificador operacional, mientras que la entrada no inversora se conecta a tierra (GND), estableciendo así el potencial de referencia del circuito. La retroalimentación negativa se implementa mediante una resistencia de retroalimentación (R_f) conectada entre la salida y entrada inversora, proporcionando estabilidad al sistema al contrarrestar variaciones no deseadas.

El principio de operación se basa en el concepto de tierra virtual: el amplificador ajusta continuamente su voltaje de salida para mantener ambas entradas al mismo potencial, dado que la entrada no inversora está conectada a tierra (0V), la entrada no inversora se mantiene efectivamente en 0 V, creando un nodo de tierra virtual.

Toda la corriente proveniente de la celda electroquímica (I_{cell}) no puede fluir hacia la entrada del amplificador debido a su alta impedancia; en consecuencia, es dirigida forzosamente a través de la resistencia (R_f), esto genera una caída de voltaje que sigue la ley de Ohm. La figura 11 ilustra el circuito necesario para que el amplificador operacional realice esta conversión.

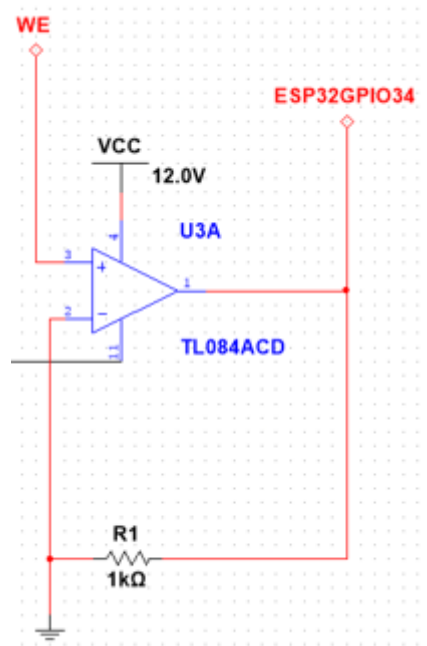


Figura 11. Circuito respectivo del amplificador operacional A3 - convertidor I/E

Esta configuración no solo convierte la corriente en un voltaje medible, sino que también mantiene el electrodo de trabajo en potencial de tierra virtual, aspecto fundamental en el esquema de control del potencióstato. El potencial real del electrodo de trabajo (WE) se establece como la diferencia entre el voltaje aplicado al electrodo auxiliar (CE) a través del amplificador A1 y el potencial del electrodo de referencia (RE) controlado por el amplificador A2. Mantener el WE en tierra virtual simplifica significativamente el lazo de control del sistema (Morales, Lopez y Otalora, 2009; Smith, 2022).

Generador de Señales (Onda triangular)

Durante la construcción de este dispositivo propuesto se hace uso de un generador de señales, el cual es un dispositivo que genera señales electromagnéticas, con una amplitud, frecuencia y forma de onda fija (Kumar, 2022) para lo que se hace el desarrollo de la placa la cual usa el microcontrolador ATmega328p. El papel que desempeña en este

prototipo es fundamental debido al voltaje de trabajo programado quién lo controla en la técnica de la Voltamperometría cíclica.

Su función se fundamenta en un circuito integrador alimentado por fuentes de corriente superiores e inferiores que, al cargar y descargar un capacitor de manera controlada y lineal, produce una señal triangular perfecta que barre sistemáticamente el potencial aplicado a la celda electroquímica (Kumar, 2022).

Primeramente, se genera un incremento lineal de 0 V a 5 V (Barrido anódico de oxidación) y luego se produce una disminución lineal de 5 V a 0 V (Barrido catódico de reducción) esto permite realizar un barrido sistemático de voltaje, creando una curva característica que muestra los picos correspondientes a los procesos de transferencia de electrones.

Este generador de señal también realiza la implementación de un filtro RC, que se ilustra en la figura 12, que permite transformar la señal PWM digital en una señal analógica limpia y suave. Este proceso se realiza mediante la eliminación de componentes de alta frecuencia lo que permite tener un gráfico de onda triangular.

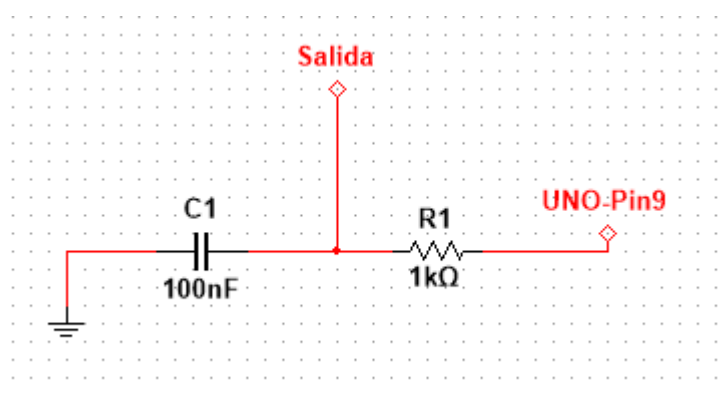


Figura 12. Filtro RC

Proceso de medición de Corriente vs Voltaje

La placa ESP32 realiza el proceso de medición similar al de un osciloscopio. Esta medición se hace de manera continua de dos señales,

en este caso el voltaje aplicado y la corriente resultante; La corriente es obtenida mediante el cálculo utilizando la ley de Ohm, ya que se conoce el valor de la resistencia (RF) que se encuentra a la salida del circuito que tiene el valor de 1 kOhm y se calcula a partir de este valor. Al obtenerse estos datos se procede a generar el ciclo voltamperograma con base en los resultados obtenidos. Al graficar estos datos se establece como eje X el voltaje y en el eje Y, la corriente, permitiendo así identificar los picos anódico y catódico (en el caso de una reacción reversible) que revelen el mecanismo redox y el análisis cinético de la interfase electrodo-solución.

Programación para la medición de Voltaje

```
int adcVoltage = analogRead(VOLTAGE_APPLIED_PIN);
```

Lee valor ADC (0-1023), el cual corresponde a los valores digitales que serán transformador a voltios

```
float voltageApplied = (adcVoltage * VREF) / ADC_RESOLUTION;
```

Convierte a voltaje (0-5V)

Programación para la medición de corriente

```
int adcCurrent = analogRead(CURRENT_MEASURE_PIN);
```

Realiza la lectura de caída en Rf 1k Ohmio, que hace referencia al voltaje que circula sobre la resistencia.

```
float voltageDropRF = (adcCurrent * VREF) / ADC_RESOLUTION;
```

Voltaje en resistencia

```
float cellCurrent = (voltageDropRF / RF_RESISTOR) * 1000;
```

Se aplica la Ley de Ohm para la lectura de corriente: $I = V/R$ (en mA)

7.3.2. Etapa de diseño y aplicación

Para el correcto desarrollo de este trabajo de investigación y garantizar el debido tratamiento de datos, se diseñó un formulario de consentimiento

informado. Este documento es presentado como Anexo #1. Dicho documento fue distribuido a todos los estudiantes del espacio académico de Sistemas Físicoquímicos II, donde su propósito fue informar detalladamente sobre los objetivos, procedimientos y el correcto manejo de los datos de la investigación, asegurando así su participación voluntaria.

En el marco del desarrollo metodológico de la investigación, se llevó a cabo la elaboración secuencial de una serie de actividades detalladas, destinadas a facilitar la comprensión de la técnica de voltamperometría cíclica mediante la evaluación auténtica y la experimentación ilustrativa como enfoque pedagógico central. Las actividades se organizaron en un total de 4 sesiones de trabajo progresivas, cada una con objetivos y material específico, como es presentado en la Figura 13 la cual detalla el cronograma de actividades. Es importante precisar, que además de los materiales creados para las sesiones también se creó material didáctico para mejorar su comprensión y fortalecer sus competencias, los cuales están anexados al final de este trabajo.

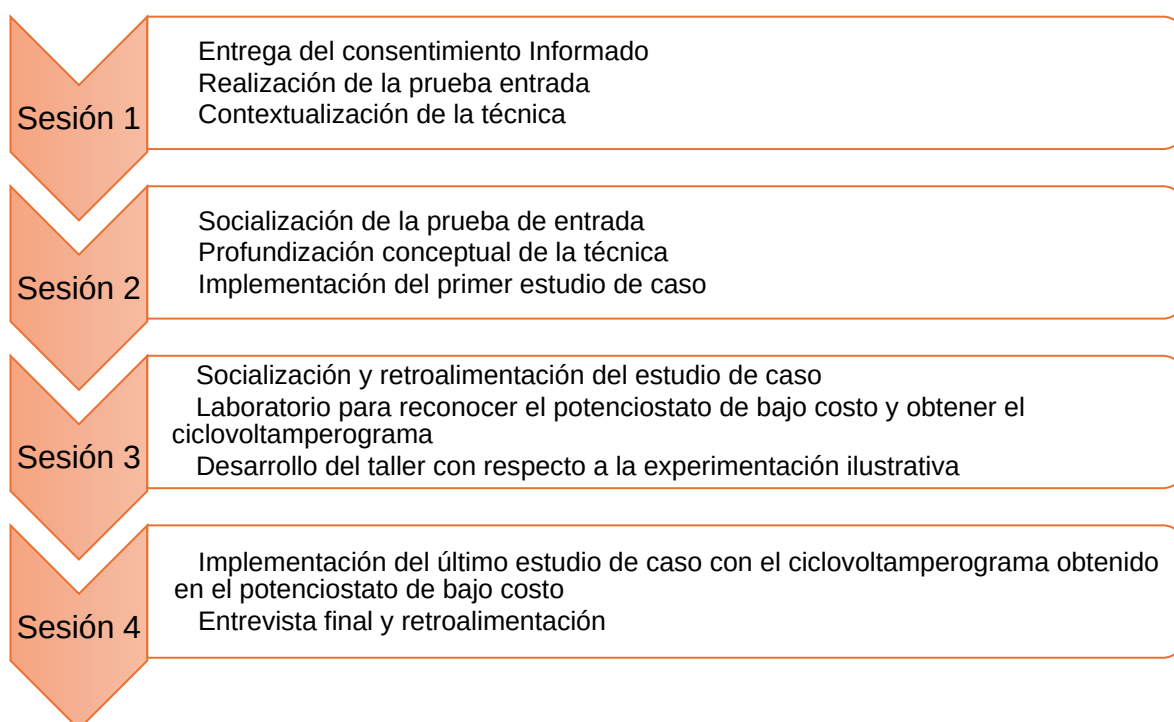


Figura 13. Fases del proyecto de investigación

- **Sesión 1: Aplicación de entrevista inicial e intervención educativa.**

Antes de comenzar las intervenciones, es fundamental conocer los conceptos previos, las dificultades y las actitudes del estudiante con respecto al trabajo y el bagaje que posee con respecto a temáticas del campo de estudio de la fisicoquímica, especialmente las técnicas analíticas electroquímicas, para así adecuar el lenguaje y el vocabulario en las sesiones posteriores. Además, es un indicador inicial de cómo estaban constituidas las ideas previas y conceptos del proceso de cada estudiante, para así luego comparar y evaluar la efectividad de cada sesión y explicación. Este proceso se realizó por medio de una entrevista inicial que funcione como prueba de entrada. El objetivo de esta entrevista (de tipo semiestructurada) es analizar y clasificar elementos claves del discurso de cada estudiante, y evaluarlos desde 3 ejes fundamentales, que se explicarán a continuación:

La entrevista siguió los parámetros de 3 ejes: el eje disciplinar, el eje reflexivo y el eje motivacional y actitudinal. El eje disciplinar consta de preguntas sobre los conceptos previos asimilados hasta este momento de su carrera, como lo pueden ser los conceptos de potencial redox, los equipos usados en electroquímica y demás. En segunda instancia, el eje reflexivo consta de preguntas sobre cómo el estudiante enseñaría técnicas electroquímicas a estudiantes universitarios, y cómo aplicaría esas técnicas en contextos industriales o prácticos. Y como última instancia, el tercer eje, el eje motivacional y actitudinal consta de preguntas sobre la motivación de los estudiantes al momento de participar en este trabajo de grado, sus expectativas y su actitud hacia el mismo. La tabla 2 ilustra correctamente y de manera más generalizada cuáles son los ejes y su intencionalidad:

Eje evaluativo	Intencionalidad
Disciplinar	● Aplicación de conceptos y lenguaje científico a su discurso.
Reflexivo	● Asimilación de la teoría ● Visión de interdisciplinariedad sobre los conceptos y su aplicación. ● Indagación sobre su propia labor docente. ● Reconocimientos de posibles campos de acción en Química
Motivacional y actitudinal	● Reconocimiento de deseos por aprender ● Visibilización de la curiosidad intrínseca del estudiante. ● Calidad de apoyo y colaboración en proyectos.

Tabla 2. Ejes evaluativos propuestos y su intencionalidad y propósito al momento de aplicar entrevistas. Elaboración propia (2025).

A partir de estos 3 ejes se procedió a construir una rúbrica de evaluación específica y detallada, diseñada bajo los principios de la taxonomía de Bloom (Anderson & Krathwohl, 2001). La estructura evaluativa implementada en esta investigación se fundamentó en un marco teórico-pedagógico sólido, específicamente en las etapas del aprendizaje descritas por Moretta (2016), las cuales priorizan la motivación, la comprensión y la reflexión como pilares del proceso educativo, permitiendo una evaluación auténtica que trasciende la mera medición de contenidos y valora el desarrollo integral de los estudiantes. Este diseño no fue arbitrario, sino que fue sometido a revisión y validación por el Grupo de Investigación Didáctica y sus Ciencias, el cual avaló su coherencia con los principios de la evaluación auténtica y su pertinencia para los objetivos de la investigación. Esta rúbrica sirvió como herramienta fundamental para medir de forma objetiva y estandarizada el proceso de los estudiantes. Esta rúbrica se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Rúbrica para la determinación de los 3 ejes fundamentados en la evaluación auténtica con respecto a la entrevista inicial.

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Motivación y compromiso con el proyecto (Eje motivacional y actitudinal)	Expresa de forma clara y coherente sus expectativas, siendo detallado sobre su motivación personal y da ejemplos de cómo le podría ayudar en su formación.	Describe expectativas generales sobre el proyecto y muestra interés en participar.	Expresa expectativas básicas sobre el aprendizaje, y su motivación es incierta.	No logra articular expectativas concretas y se limita a cumplimientos académicos.
Dominio conceptual sobre las técnicas electroquímicas (Eje disciplinar)	Demuestra conocimientos de varias técnicas electroquímicas, explicando de forma detallada fundamentos y aplicaciones.	Reconoce algunas técnicas, y logra articular algunos ejemplos o descripciones de forma general.	Identifica algunas técnicas, pero no explica su utilidad y no da ejemplos	Nombra una o dos técnicas sin capacidad de explicarlas, muestra baja comprensión.
Conocimiento instrumental y su aplicación (Eje disciplinar)	Identifica correctamente los equipos principales y es explícito sobre su función electroquímica y sus especificaciones técnicas.	Detalla el funcionamiento de los componentes principales y reconoce algunas partes de los equipos.	Nombra equipos principales, pero con descripciones limitadas.	Menciona algunos equipos, pero sin explicar su uso.
Reflexión sobre su labor docente y la enseñanza de la teoría (Eje reflexivo)	Elabora estrategias didácticas acertadas para enseñar electroquímica reconociendo limitaciones y propone mejoras del contexto educativo.	Reflexiona sobre la enseñanza de la electroquímica identificando fortalezas, y propone propuestas didácticas concretas a un contexto educativo.	Reconoce aspectos generales de la pedagogía y la didáctica al momento de enseñar electroquímica, pero no reflexiona sobre el campo o no lo articula con un contexto real.	Menciona sus estrategias sin realizar un análisis más profundo. La reflexión que realiza es descriptiva o anecdótica.
Comprensión de conceptos fisicoquímicos (Eje disciplinar)	Comprende el concepto de oxidación y reducción proponiendo sus diferentes reacciones iónicas y lo ejemplifica correctamente	Entiende el concepto de oxidación y reducción, pero no es detallado al ejemplificar.	Menciona la diferencia entre lo que es oxidación y reducción, pero con imprecisiones o falta de ejemplos.	Confunde los términos o da una definición incompleta del concepto de reducción y oxidación.

Integración entre teoría y práctica (Eje disciplinar)	Describe con precisión y detalle qué son los potenciales Redox, reconoce y aplica los diferentes métodos para determinarlos experimentalmente.	Define correctamente los potenciales Redox y logra identificar algunas aplicaciones técnicas.	Reconoce el concepto de potenciales redox y su importancia en el campo de la electroquímica, pero no detalla métodos específicos para medir dicha variable.	Menciona el término de los potenciales Redox, pero no conoce cómo medirlos.
Aplicaciones de técnicas electroquímicas y su relación con su proyección profesional a nivel disciplinar (Eje reflexivo y eje motivacional-actitudinal)	Relaciona la electroquímica con problemas reales en industrias o ciencia, mostrando motivación y visualiza su uso en el ámbito profesional.	Identifica aplicaciones relevantes de la electroquímica en contextos reales y expresa interés en su uso a nivel disciplinar, pero no profundiza en contextos específicos.	Reconoce que la técnica tiene aplicaciones en el mundo real, pero no logra vincularlas con su desarrollo profesional o intereses en particular.	Menciona aplicaciones de la técnica a nivel general, pero no las vincula con su futuro profesional.

La taxonomía de Bloom propone 6 niveles los cuales permitieron formular los niveles de desempeño. Los niveles propuestos (vistos de menor prioridad a mayor prioridad) son: Recordar, como nivel Insuficiente, Comprender, como nivel Básico, Aplicar, como nivel Intermedio, Analizar, como nivel Avanzado, Evaluar, como nivel Excelente, y Crear.

Cada criterio de la rúbrica está enfocado en cada pregunta de la entrevista, pues cada una tiene una intencionalidad mediada bajo los 3 ejes. Sin embargo, no se incluyó un nivel de desempeño correspondiente a “Crear” y “Recordar” en la Taxonomía, pues “Crear” es una categoría nueva en la historia según la literatura, y es un criterio que se prevé que no se puede alcanzar a corto plazo, y “Recordar” en esta rúbrica fue unificado con “comprender”, para facilitar el proceso de evaluación y reducir los criterios, evitando la clasificación tradicional de “conocimiento o habilidades insuficientes.

Acto seguido, se realizó una intervención educativa donde se abordaron de manera detallada qué son las voltamperometrías cíclicas y cómo se interpretan los ciclovoltamperogramas (identificación de picos anódicos y catódicos, corrientes de picos, procesos reversibles, cuasirreversibles o irreversibles, entre otros). Esta intervención fue interactiva, permitiendo a los estudiantes formular preguntas y participar activamente.

- **Sesión 2: Profundización de conceptos sobre la técnica e implementación del primer estudio de caso**

Posteriormente, se realiza una pequeña retroalimentación de las respuestas de las entrevistas, y después, una segunda sesión de intervención, en la cual se realizó una aproximación conceptual y metodológica sobre la técnica de Voltamperometría Cíclica. Terminando la explicación teórica, los estudiantes trabajaron en un primer estudio de caso diseñado para aplicar los conocimientos adquiridos en la primera clase. Se les proporcionó en el documento, un ciclovoltamperograma para analizar e interpretar, siguiendo una guía de preguntas específicas. En este estudio se integraron diversos contextos relacionados a las voltamperometrías cíclicas. Los estudiantes debieron identificar la problemática abordada, comprender cómo el uso de los voltamperogramas puede verse afectado en dicha problemática y determinar cómo ellos logran interpretar la lectura de los voltamperogramas dentro del contexto del estudio de caso.

El primer estudio de caso relaciona las especies de cobalto $\text{CoO}/\text{Co}_3\text{O}_4$, (óxido de cobalto II y mezcla de óxidos de cobalto II y III) y su relación con el tratamiento de aguas por contaminantes metálicos. Este estudio tiene el objetivo de conocer cómo los docentes en formación resuelven problemas llevados a la vida real. Se realizaron preguntas ligadas a la electroquímica, especialmente a la técnica de voltamperometría cíclica y las variables que acompañan esta técnica. Hay preguntas que deben solucionar de manera autónoma, lo cual fortalece los conceptos principales que involucran el montaje y uso del potencióstato y un

ciclovoltamperograma de práctica, para identificar variables, errores experimentales e importancia de la técnica. La elección de este estudio de caso se fundamenta en su capacidad de explorar fenómenos complejos en profundidad en un contexto real, es por ello que este estudio de caso fue elaborado siguiendo las pautas de Yin (2018) y de Wiggins (1998).

Para la correcta implementación y evaluación de esta actividad, se presenta la rúbrica que se encuentra en la tabla 5 que se configura siguiendo la taxonomía de Bloom, dado a que su estructura en esta instancia permitió disgregar el conocimiento global en componentes específicos. Esta rúbrica analítica se articula en torno a 3 ejes, siendo el primer eje el teórico-metodológico, donde el estudiante tuvo preguntas en las que se refleje la identificación y reconocimiento de la técnica de CV. Como segundo eje se tiene el Procedimental, en el cual se evaluó el conocimiento sobre el montaje experimental y el control de variables, el tercer eje corresponde a un eje Analítico en el que se enfrentaron a preguntas donde deben comprender y analizar la técnica y sus particularidades. En la tabla 4 se reúnen los 3 ejes de una manera más general, ilustrando la intencionalidad de cada uno de ellos.

Eje evaluativo	Intencionalidad
Teórico-metodológico	● Reconocimiento de la técnica de la Voltamperometría Cíclica - Identificación y asimilación de los fundamentos de la técnica
Procedimental	● Identificación de la función y aplicación de los componentes del montaje experimental ● Realizar hipótesis y supuestos sobre las variables que afectan la lectura del equipo
Analítico	● Ver la relación de variables y generar relaciones de proporcionalidad ● Proponer soluciones ante las hipótesis planteadas. ● Sustentar argumentos con base en la teoría

Tabla 4. Ejes evaluativos propuestos y su intencionalidad y propósito al momento de revisar estudios de caso. Elaboración propia (2025).

En función de lo anterior, se propone elaborar una rúbrica de evaluación que contemple los 3 ejes descritos. Cada criterio se establece con base en la misma taxonomía de Bloom descrita anteriormente, y siguiendo los mismos niveles como en la rúbrica anterior. Esta rúbrica está contemplada en la tabla 5.

Tabla 5. Rúbrica con respecto a los estudios de caso

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Importancia y reconocimiento del montaje de la Voltamperometría Cíclica (potenciostato, celda, electrodos) y su funcionamiento (Enfoque teórico-metodológico y procedimental)	Explica de manera integral el papel del montaje, identificando control preciso del potencial, qué y cómo se realiza la medición de corriente y potencial, vinculados directamente con la técnica.	Describe correctamente la función del potenciostato y su conexión con la celda electroquímica en conjunto con los electrodos para controlar el potencial y medir la corriente.	Menciona de forma genérica los puntos importantes para controlar el experimento o medir señales, identifica los electrodos usados, pero no precisa la función del montaje y sus partes.	Reconoce que el potenciostato es un equipo necesario, pero no logra explicar sus funciones o importancia específica.
Reconocimiento de los fundamentos de la voltamperometría cíclica (Enfoque teórico-metodológico)	Argumenta cómo la técnica permite estudiar los mecanismos de reacción redox y la estabilidad de especies, crucial en la caracterización del comportamiento del analito	Describe correctamente que la técnica sirve para identificar y caracterizar especies	Identifica que la CV se usa para analizar reacciones redox, pero sin profundizar en su carácter crítico	Confunde la técnica con otros métodos analíticos fisicoquímicos o da una respuesta vaga
Proceso de lectura del ciclovoltamperograma y sus variables (Enfoque procedimental y Analítico)	Sintetiza un procedimiento claro y preciso que incluye observar picos, identificar potenciales pico, corrientes pico, ventana de potencial, procesos catódicos y anódicos y aproximar sus valores, además de presentar e identificar la reacción redox.	Detalla los pasos para identificar el par redox y las variables principales (picos de corriente y potencial en sus partes anódica y catódica)	Señala los picos del gráfico, pero con dificultad para establecer la relación entre ellos como un par redox.	Menciona elementos del gráfico de forma desorganizada, sin caracterizar el par.

Aplicación de la Voltamperometría Cíclica en un campo de estudio (Enfoque procedimental y Analítico)	Valora críticamente ventajas de la CV, como la alta sensibilidad y la capacidad de proporcionar información sobre el estado de oxidación y la concentración del analito en la muestra, también denota alcances y desventajas de la técnica.	Fundamenta una razón principal, como la alta sensibilidad o la capacidad de identificar el analito y cuantificar su concentración, y da juicios de valor con base en lo anterior.	Indica de forma general que la técnica funciona sin especificar el porqué del uso en ese contexto.	Da una razón vaga, genérica o incorrecta
Identificación de variables que afectan la forma del ciclo voltamperograma (Enfoque analítico)	Extrae información cuantitativa/cualitativa sólida utilizando fórmulas y explicando la separación entre picos y su forma, denotando una relación con la reversibilidad y la cinética de la transferencia de masa, además de indicar variables que afectan la forma del gráfico.	Identifica correctamente que la forma y posición de los picos dan información sobre si la reacción es rápida o lenta (reversible, cuasi reversible o irreversible), analizando incluso la forma del pico y el porqué de su forma mediante variables que la afectan.	Menciona que las corrientes pico son directamente proporcionales a la concentración, sin embargo enuncia generalmente proposiciones sobre la cinética de la reacción redox y no enuncia pautas sobre la forma de los picos.	No logra extraer información precisa sobre la velocidad de la reacción, concentración y variables que afectan la lectura, y/o la interpreta incorrectamente

● **Sesión 3:** Intervención fundamentada en experimentación ilustrativa

Los estudiantes tuvieron la oportunidad de recibir orientación y retroalimentación de su primer estudio de caso por parte de los investigadores, involucrando los criterios planteados en la rúbrica destinada para tal fin (ver tabla 6) y los puntos a mejorar.

Luego, se explicó el funcionamiento del prototipo de potencióstato en el laboratorio. Se realizó una fundamentación teórica de cómo está programado, y se realizó una demostración de cómo se realizan las mediciones, utilizando un método patrón con ferricianuro de potasio en una solución de KCl. Después de la explicación y la visualización del experimento, los estudiantes realizaron de manera individual un taller fundamentado en la experimentación ilustrativa. El objetivo de este taller es comprobar si los estudiantes conservan los conocimientos y generan reflexiones coherentes sobre el equipo. Los estudiantes serán evaluados teniendo en cuenta los 3 ejes fundamentales utilizados en la entrevista inicial: disciplinar, reflexivo y motivacional-actitudinal. El taller se basa en reflexiones que giran en torno a la visualización y relación de variables como el potencial y corriente, cómo se grafican las variables, los equipos utilizados y la electrónica involucrada. La aplicación del taller sigue los lineamientos propuestos por Caamaño, (2004) y su cita a Pintó, (2002), en el cual, refieren que se debe ilustrar el fenómeno, visualizando la relación de variables, y utilizando un software con coordenadas X y Y.

Partiendo de lo anteriormente expuesto, se construyó finalmente una rúbrica de evaluación que sirve para evaluar las respuestas obtenidas en este taller. Dicha rúbrica sigue los parámetros de elaboración de rúbricas y el estilo de estas anteriores. La tabla 6 expone los criterios y los niveles en este caso.

Tabla 6. Con respecto al taller fundamentado en la experimentación ilustrativa

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Identificación y relación de variables físicas	Explica de manera integral y precisa, incluye claramente el potencial, la corriente, el tiempo, la velocidad de barrido y logra generar relaciones prediciendo así mismo como pueden ser afectadas.	Describe correctamente la relación entre las variables corriente y potencial, y propone su comportamiento.	Identifica las variables principales de manera aislada, pero con imprecisiones o sin profundizar.	Reconoce sólo una de las variables o presenta confusiones significativas entre los conceptos.
Comprensión del funcionamiento interno del prototipo	Evalúa la precisión del prototipo con base en las condiciones en las cuales fue construido y propone mejoras para un montaje óptimo.	Identifica los componentes más importantes y que son la base central del prototipo, y logra anticipar los errores de lectura si ocurre un fallo en los mismos.	Comprende cómo está ensamblado el prototipo y las funciones de cada componente.	Describe de forma sencilla cada parte del prototipo y algunas funciones del mismo
Formulación de hipótesis con base en el pensamiento científico	Genera hipótesis que ayudan al desarrollo y la comprensión del funcionamiento del equipo, proponiendo algunas situaciones en las cuales el equipo puede tener mayor precisión y robustez en los diferentes procesos y su importancia en la optimización en los diferentes campos.	Identifica el funcionamiento del equipo y precisa con afirmaciones de cómo puede ayudar el equipo en diferentes campos experimentales..	Logra acercarse a una idea sobre el uso del equipo en los diferentes campos, y explica de manera sencilla el funcionamiento y sus diferentes partes que lo componen.	Presenta dificultades a la hora de generar hipótesis con relación al equipo y sus aplicaciones o no logra asociar los componentes del equipo.
Proposición y reflexión sobre la viabilidad del	Evalúa de forma clara ,específica y coherente el prototipo y concluye porque sería viable la técnica	Identifica correctamente la viabilidad del equipo y la importancia en otras técnicas	Reconoce de manera superficial su viabilidad y funcionamiento, logra	Explica de forma confusa o contradictoria su postura sobre la viabilidad del equipo,

prototipo	proponiendo campos de estudio concretos.	fisicoquímicas, mencionando algunas aplicaciones..	mencionar algunas técnicas de forma general.	propone de forma ambigua otros campos de estudio.
Aplicación del prototipo como herramienta educativa para la enseñanza de la electroquímica	Reflexiona de manera integral su valor pedagógico y toma una postura clara sobre el uso o no de la herramienta con argumentos sólidos y contextualización a su labor docente.	Explica el valor educativo destacando la teoría y la herramienta, argumenta de forma sencilla su postura y posible aplicación en un entorno educativo.	Reconoce el valor educativo, pero tiene una postura indecisa o con justificaciones simples.	Menciona el aporte educativo de forma genérica, no logra tomar una postura clara.

Como trabajo autónomo, en esta misma sesión 3 se les envió un segundo estudio de caso a los estudiantes, para que trabajen al ritmo de cada uno. En este segundo estudio de caso, el objetivo del mismo fue reforzar los conceptos previamente tratados en las sesiones anteriores e indagar sobre la misma construcción del equipo: cuáles fueron las etapas de la construcción, cómo está construido y qué software se utiliza, cómo se realiza la lectura, cómo se grafica el ciclovoltamperograma y cuáles fueron los medios para crear la celda. Este instrumento se enlaza con la sesión y con el enfoque de Experimentación Ilustrativa, pues las discusiones y preguntas que se formularon en el momento de la explicación responden cuestiones del mismo estudio de caso.

Como primer paso, se facilitó en el instrumento el ciclovoltamperograma obtenido por el prototipo de potencióstato, donde se evaluaba el mecanismo redox del ferricianuro de potasio. Este análisis permitió valorar la efectividad y robustez del equipo, así como verificar la confiabilidad de futuros datos y lecturas con el equipo. La prueba de confiabilidad se realizó comparando el ciclovoltamperograma obtenido con un ciclovoltamperograma reportado en la literatura, a las mismas condiciones de concentración, temperatura, electrodos y tipo de electrolito soporte, observando similitudes y diferencias.

Después de analizar la robustez del prototipo, se propuso en segunda instancia, evaluar la efectividad del potencióstato construido por los investigadores, para cuantificar bacterias adsorbidas a microhilos recubiertos de polímeros (cabe aclarar que no se fabricaron los biosensores en laboratorio, solamente es una ejemplificación que sirve para ilustrar el uso del potencióstato construido a escala real).

Se evaluó a los estudiantes desde 3 ejes fundamentales: Teórico-metodológico, procedimental, y Analítico, siendo los mismos ejes que se expresaron en el primer estudio de caso. La rúbrica de evaluación que fue utilizada para el primer estudio de caso aplica y es funcional para evaluar este segundo estudio de caso, pues los criterios son básicamente los mismos y ambos estudios de caso siguen un mismo patrón de construcción.

- **Sesión 4: Socialización del segundo estudio de caso y aplicación de la entrevista final.**

Para determinar que los estudiantes comprendieron la técnica y sus aplicaciones, se realizó una entrevista que funcionó como cierre a la implementación del proyecto. La entrevista siguió los mismos lineamientos que la entrevista inicial, de tipo semiestructurada y utilizando los mismos recursos para su ejecución. Además, las preguntas formuladas siguen y respetan los 3 ejes planteados para evaluar las respuestas de manera auténtica (eje disciplinar, eje reflexivo y eje motivacional y actitudinal). Además de eso, la evaluación de la entrevista se evalúa por la misma rúbrica de evaluación descrita en la tabla 2.

El objetivo de la entrevista final es evaluar la percepción de los estudiantes sobre cada etapa de la metodología, la autorreflexión sobre su proceso de aprendizaje, la utilidad del contenido y las dinámicas implementadas. La entrevista incluyó cuestiones para valorar aspectos como la claridad de las explicaciones, la efectividad de la intervención docente, la pertinencia de los estudios de caso y la utilidad del prototipo construido aplicado a futuros proyectos, permitiendo así identificar oportunidades de innovación en el ámbito docente.

7.3.3. Etapa de recolección de datos

Con base en lo que refiere la evaluación auténtica, el proceso de recolección de datos se realizó permanentemente en todas las sesiones e intervenciones, pues se debe dar dé cuenta de cómo el estudiante aprende en cada momento.

Siguiendo las sesiones relatadas en la etapa anterior, la siguiente tabla ilustra cada sesión, los datos que se recolectan y las herramientas facilitadas que nos muestran el progreso de los estudiantes.

Sesión	Datos que se recolectaron	Instrumentos aplicados para la recolección
Aplicación de entrevista inicial y clase educativa	Percepciones ante el proyecto, ideas y conceptos previos, motivaciones.	Formato de entrevista (ver anexo 2)
Profundización de conceptos sobre la técnica e implementación del primer estudio de caso	Niveles de comprensión de la Voltamperometría Cíclica, inquietudes y dudas respecto al tema.	Primer estudio de caso (ver anexo 4)
Clase fundamentada en Experimentación Ilustrativa	Niveles de comprensión de la relación de corriente-potencial, la estructura del equipo y la lectura del ciclovoltamperograma	Taller fundamentado en la experimentación ilustrativa (ver anexo 5)
Sesión 4: Socialización del segundo estudio de caso y aplicación de la entrevista final	Niveles de comprensión de los fundamentos de la CV aplicados a un contexto real de laboratorio. Nuevas percepciones del proyecto, evaluación del mismo y autoevaluación del estudiante.	Segundo estudio de caso (ver anexo 6) Formato de entrevista (ver anexo 7)

Tabla 7. Instrumentos utilizados en el proyecto y el tipo de datos que recolectó cada uno de los mismos.

Dichos instrumentos y los datos recolectados fueron evaluados absolutamente todos por medio de rúbricas, la cual es una manera eficiente y diferente de evaluar, a comparación de una evaluación cuantitativa y tradicional, donde se visualizan criterios no solo disciplinares, sino actitudinales y de motivación. Tal uso de rúbricas está soportado por el pionero del concepto de Evaluación Auténtica, Wiggins, (1998), tal como se mencionó en el apartado del marco referencial.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. Prototipo de potencióstato

Con base en la teoría explicada anteriormente por González y García, (2024), Bard y Faulkner, (2001), y la información visible al público sobre los potencióstatos más usados en Colombia, de la marca Gamry®, se procederá a comparar las características de un potencióstato comercial y el prototipo de potencióstato que se construyó. La tabla 8 muestra la comparación entre sus especificaciones eléctricas, sus rangos y límites de lectura, las resistencias usadas en el circuito, los tipos de amplificadores y los microcontroladores usados.

Parámetros	Potencióstato de Bajo costo	Potencióstato Comercial
Rangos y límites de lectura	● Potencial de rango medido de 0 V hasta 5V ● Corriente de medición entre rangos de -1,8 mA hasta 1,9 mA. <i>(ambos parámetros pueden modificarse según las necesidades)</i>	● Potencial de rango medido entre -10V hasta 10 V. ● Corriente reportada entre -2A hasta 2A
Rangos de resolución	8 - 32 Bits	integrados entre 16 - 24 Bits y 32 Bits

Resistencias	1K Ohm	Múltiples resistencias automatizadas desde medidas en MicroOhmnio hasta MegaOhmnio
Configuración de sistema de amplificadores	TL084 usando 3 amplificadores operacionales JFET (seguidor de voltaje, electrómetro y convertidor I/E)	Terminales de 3 amplificadores. (seguidor de voltaje, electrómetro y convertidor I/E)
Microcontroladores	ESP32	No se especifica al público

Tabla 8. Contenido de diferencia de potencióstato de bajo costo vs Potencióstato comercial, Elaboración propia.

Con base en lo anterior, el prototipo de potencióstato construido sigue la misma configuración de amplificadores operacionales, tal cual como se constituye en un potencióstato comercial. Una ventaja que el prototipo posee, a comparación del equipo comercial, es que, utilizando el circuito integrado TL084, se simplifica el circuito, tornándose más práctico, lo cual disminuye costos, para así poder fomentar la aplicación y construcción para contextos educativos, no solamente de análisis en laboratorio, facilitando la accesibilidad a cualquier persona que se encuentre interesada en realizar prácticas de laboratorio accesibles.

Con respecto a los rangos y límites de lectura, el prototipo se encuentra en desventaja, pues la programación se fundamentó específicamente para que funcione para la aplicación de la Voltamperometría Cíclica, sin embargo, si se desea realizar otro tipo de técnica analítica electroquímica, habría que realizar ajustes en el código como en el circuito y la manera en cómo se realiza el montaje. Por ejemplo, si se desea realizar una voltamperometría de impulso diferencial, se necesita modificar la manera en cómo el generador de señales realiza el barrido de potencial, que, en este caso, no sería de manera cíclica, sino de manera escalonada, y la lectura de la corriente no es automática, sino que se debe realizar en dos momentos específicos de la técnica. No obstante, son cuestiones que se pueden ajustar fácilmente, sin necesidad de reformular la

construcción completa del equipo. La placa ESP32, aquella que funciona como un osciloscopio, y que registra la corriente, también debería ser configurada para realizar la medición de corriente respectiva, pues no todas las técnicas requieren una medición constante de esta variable, incluso, algunas requieren monitorear el voltaje o la corriente en función del tiempo, cosa que podría reformularse desde los componentes y la programación del equipo.

Además de lo anterior, otro factor que influye en los rangos y límites de lectura es la misma capacidad de los componentes del circuito en resistir valores altos de corriente y potencial, pues se debe evitar posibles fundiciones o quemados internos de los mismos, por eso, se debe reformular el circuito para evitar estos acontecimientos, sin embargo, como el equipo se utilizó para fines didácticos, y no se realizaron medidas extremas, esto no es una modificación urgente para este trabajo. Cabe aclarar que, para cada analito investigado por CV, existen ciertos límites mínimos y máximos que abarcan potenciales incluso negativos, por lo que, si se desea analizar otra especie química, se debe replantear la ventana de potencial y los límites de lectura, para una óptima ejecución de la técnica. Estos ajustes se realizan modificando de igual manera el código y algunos componentes del circuito si es necesario.

Para medir corrientes de orden de los nanoamperios y picoamperios, el prototipo se encuentra en desventaja, por lo que se sugiere aumentar la concentración del analito, para que las unidades de corrientes pico se acerquen a los microamperios, y así poder entrar en el rango aceptado del equipo para que pueda realizarse el ciclovoltamperograma adecuado. Para ventanas de potencial negativas, el equipo debe ser reprogramado, pues solamente pueden someter a lectura analitos cuyos ciclovoltamperogramas se encuentren en cuadrantes positivos que abarquen desde 0V a 5V, pero como se indicó antes, son modificaciones sencillas y no involucran una reformulación completa de la construcción del equipo, por lo que, para fines didácticos y fines prácticos, el equipo cumple con las condiciones necesarias para usarse.

Calibración y aplicación del equipo por medio de un analito patrón

Según Hernández, (s.f.) uno de los métodos usados para calibrar potenciostatos, sea comerciales o prototipos, es la aplicación de la CV al analito Ferricianuro de Potasio $K_3[Fe(CN)_6]$. El ferricianuro es una sal de color naranja intenso y soluble en agua. Cuando el ferricianuro se analiza por medio de una Voltamperometría Cíclica, el ion $Fe(III)$ se reduce a ion $Fe(II)$, transformándose químicamente a Ferrocianuro de Potasio $K_4[Fe(CN)_6]$. En la figura 14, se ilustra la reacción química redox involucrada en una CV donde el analito es el ferricianuro

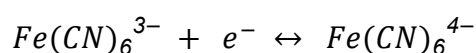


Figura 14. Reacción redox involucrada en el proceso de calibración del prototipo de potenciostato

Para la calibración y uso del equipo, se utilizó una concentración del analito $K_3[Fe(CN)_6]$ (pureza del 99,5%) de 10 mM, utilizando como electrolito soporte compatible KCl al 0,1 M, y el volumen total de la celda es de 25 mL. En la figura 15, se aprecia el ciclovoltamperograma obtenido por el prototipo de potenciostato:

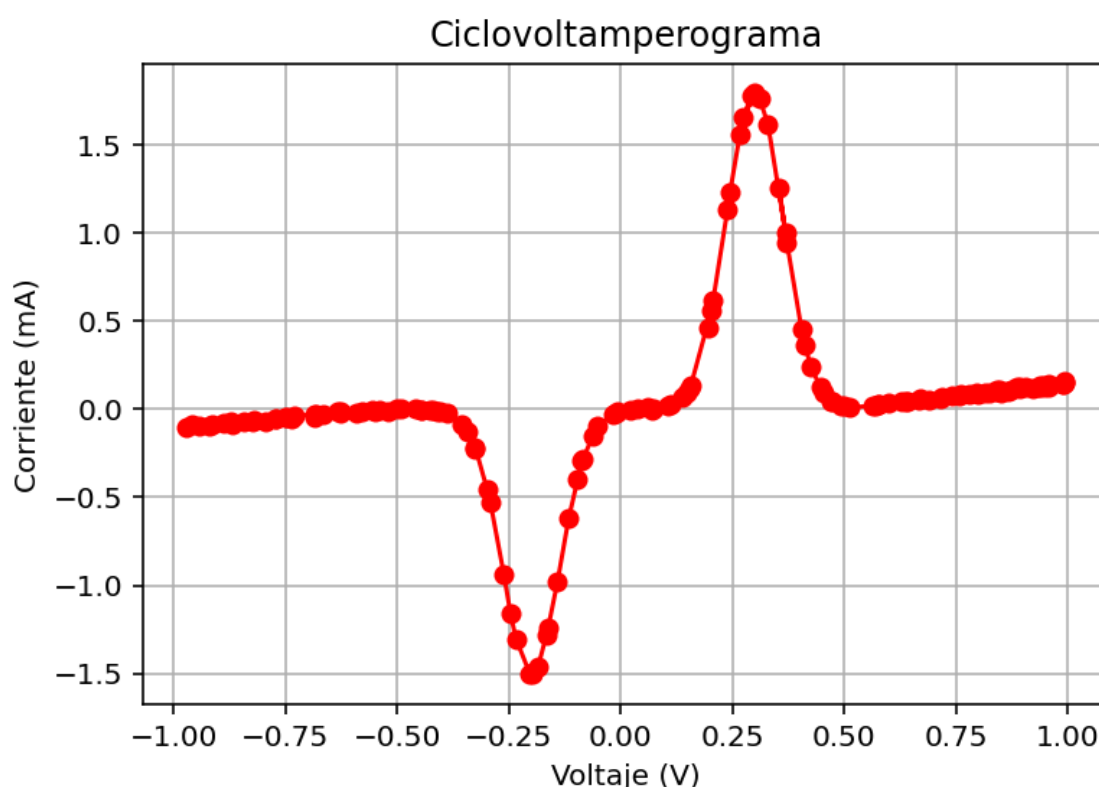


Figura 15. Ilustración de ciclovoltamperograma, Elaboración propia

Para verificar que el equipo está calibrado, el ciclovoltamperograma obtenido experimentalmente debe analizarse mediante la relación de corrientes pico y el parámetro de ΔEP , para poder evaluar la reversibilidad de la reacción redox. Incluso, las corrientes pico deben coincidir con un ciclovoltamperograma obtenido en las mismas condiciones.

- Identificación de los picos catódico y anódico

A simple vista, se observa un pico catódico de -1,5 mA, a un potencial aproximadamente de -0,20 V. En este punto ocurre la reducción de Fe (III) a Fe (II). El pico catódico se forma cuando el barrido de potencial se encuentra a potenciales negativos, o cuando $x < 0$.

El pico anódico de 1,8 mA, se encuentra a un potencial aproximadamente de 0,30 V. En este punto ocurre la oxidación de Fe (II) a Fe (III). El pico anódico se forma cuando el barrido de potencial se encuentra a potenciales positivos, o cuando $x > 0$.

Según Hernández, (s.f.), el pico anódico en este caso ocurriría entre 0,20 V a 0,30 V, respectivamente, y el pico catódico entre 0,10 V a 0,20 V. En la figura 16, se muestra el ciclovoltamperograma obtenido por el autor, utilizando un potenciostato comercial.

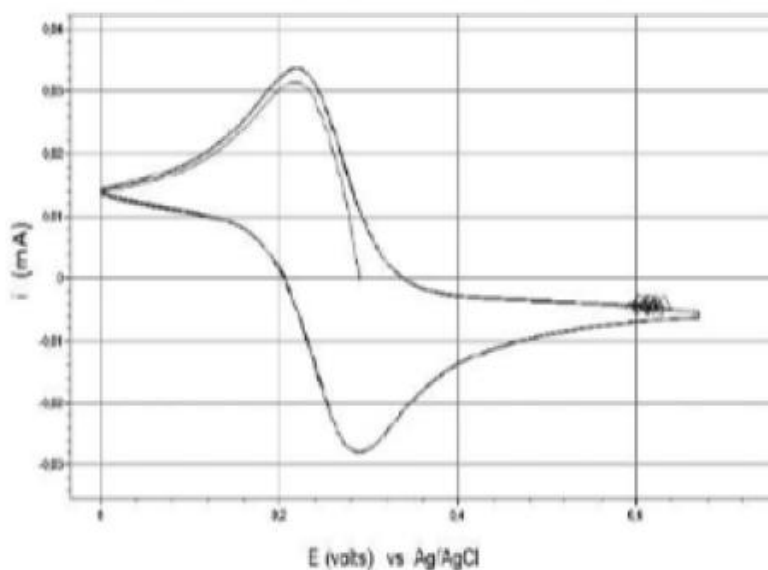


Figura 16. Ciclovoltamperograma de las especies ferricianuro/ferrocianuro utilizando un potenciostato comercial. Tomado de Hernández, (s.f.)

Se observa que, el pico anódico obtenido por el potenciostato construido en este trabajo encaja perfectamente con la teoría proporcionada por Hernández. Sin embargo, el pico catódico está ligeramente desplazado, ubicándose en -0,10 V, esto podría indicar procesos cinéticos lentos, mala calidad del analito, interferencias relacionadas con el circuito construido (como presencia de campos electromagnéticos o la temperatura de los componentes). La reacción experimental de este ensayo, hecho por los investigadores, da cuenta de que fue un proceso cuasirreversible, donde un sinnúmero de situaciones podría afectar la lectura y la cinética de transferencia electrónica, incluso, la misma temperatura del ambiente podría afectar la lectura, habría que realizar el mismo análisis variando y controlando las variables como la temperatura, concentración del analito o estado de los electrodos y su ubicación en la celda. No obstante, el potencial de los picos se encuentra en un rango aceptable, si se desea utilizar el equipo didácticamente, para poder identificar picos, su forma, y sus posibles desventajas al momento de ejecutar la técnica.

La manera en cómo la forma del ciclovoltamperograma obtenido por los investigadores difiere del ciclovoltamperograma obtenido por Hernández (de forma sinusoidal), es debido a que el programa encargado de la programación, utilizado por los investigadores, no soporta dos valores de y para un mismo valor de x en una gráfica. Para futuras investigaciones, se procura mejorar el código de programación para que estas barreras se solventen, y el ciclovoltamperograma sea similar en cuanto a forma sinusoidal. Sin embargo, los picos catódicos y anódicos se observan a primera vista.

- Análisis de la relación de las corrientes pico

Para que una reacción sea considerada reversible, la relación entre I_{pa}/I_{pc} debe ser aproximadamente igual a 1. A continuación, se realizará el cálculo expresado en la ecuación 2:

$$\frac{I_{pa}}{I_{pc}} = 1 \quad \frac{1,8 \text{ mA}}{|-1,5 \text{ mA}|} = 1,2$$

Ecuación 2. Determinación de relación de corrientes pico para el análisis por ferricianuro

Si $I_{pa} > I_{pc}$, la reacción redox es cuasirreversible, generalmente esta relación apoya la hipótesis de que la velocidad de barrido de potencial no es la indicada para esa concentración, por lo que se requiere someter a una velocidad de barrido menor. Otra hipótesis que va enlazada con la identificación de picos catódico y anódico es la calidad de los electrodos o la distancia entre ellos. Se sugiere acomodar el montaje de la celda electroquímica, para una lectura más fiable.

- Análisis de ΔEP

Si ΔEP a 25°C es igual a 60 mV, el sistema es reversible. En el Ecuación 3. se determinará el valor de esta relación

$$\Delta EP = E_{pa} - E_{pc} \qquad \Delta EP = 0,30V - (-0,20V) = 0,50V$$

Ecuación 3. Determinación de ΔEP para identificar reversibilidad experimental del ferricianuro.

0,50 V son 500 mV, muy alejado del valor teórico esperado de 60 mV para considerar una reacción totalmente reversible, lo que podría indicar cinética lenta de transferencia de electrones.

En términos generales, el analito ferricianuro de potasio, es una reacción reversible, sin embargo, según los resultados experimentales, arrojan más luces sobre una reacción cuasirreversible, esto debido a factores cinéticos y transferencia lenta de electrones, debido al estado de los electrodos, la temperatura del sistema, influencia de campos electromagnéticos externos que afecten el circuito, la distancia de los electrodos o la concentración del analito o del electrolito soporte. El pico catódico se encuentra dentro del rango esperado de potencial, sin embargo, el pico anódico se aleja del valor esperado, indicando una cinética lenta. Para términos didácticos, el potenciostato construido cumple con las características para realizar ejercicios de diagnóstico y formulación de hipótesis sobre fenómenos de transporte de masa, y precisamente los estudiantes debieron realizar esto en los estudios de

caso. Sin embargo, si se desea ser riguroso en un campo analítico, se requieren controlar variables para que la reacción deje de ser cuasirreversible, y someter a análisis el equipo mismo para descartar hipótesis que afecten la forma del ciclovoltamperograma. Es bastante complicado realizar una comparación de un ciclovoltamperograma con otro, pues las variables ya mencionadas anteriormente influyen de gran manera, la forma del mismo, en futuras investigaciones con este equipo, se tratarán de solventar las dificultades, que a grandes rasgos son más de carácter químico que de carácter electrónico.

8.2. Entrevista inicial

A continuación, se muestran los resultados de aplicar la rúbrica de evaluación a las respuestas de las entrevistas. El total de estudiantes del espacio de Sistemas Físicoquímicos II comprende un total de 6 estudiantes, de los cuales, 5 estudiantes estuvieron presentes al momento de aplicar la entrevista.

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Motivación y compromiso con el proyecto (Motivacional)	3	2		
Dominio conceptual sobre las técnicas electroquímicas (Disciplinar)			5	
Conocimiento instrumental y su aplicación (Disciplinar)			2	3
Reflexión sobre su labor docente y la enseñanza de la electroquímica (Reflexivo)		2	3	
Comprensión de conceptos físicoquímicos (Disciplinar)	1		4	
Integración entre teoría y práctica (Disciplinar)		1	4	
Aplicaciones de técnicas electroquímicas y su relación con su proyección profesional a nivel disciplinar (Reflexivo y motivacional-actitudinal)				5

Tabla 9. Resultados de la rúbrica aplicada a la entrevista inicial

Con respecto al eje motivacional y actitudinal, existen dos criterios de la rúbrica que evalúan el mismo: motivación y compromiso con el proyecto y por otro lado aplicaciones de técnicas electroquímicas y su relación con su proyección profesional a nivel disciplinar. Estos criterios están presentes en las dos siguientes preguntas formuladas en el guion de la entrevista semiestructurada (ver anexo 2):

- ¿Cuáles son sus expectativas con respecto al trabajo de grado?
- ¿Cuál sería tu motivación al aplicar una técnica electroquímica para intereses investigativos o laborales a nivel industrial y científico?

Referente a la primera pregunta, los estudiantes estuvieron prestos a colaborar en el proyecto, e incluso presentaron su completo interés en aprender los fundamentos de la Voltamperometría Cíclica, una técnica que no había sido trabajada antes en los syllabus de los espacios académicos de Fisicoquímica en la Licenciatura en Química, esto debido a los pocos recursos de laboratorio para formular prácticas de laboratorio significativas. Estas motivaciones e intereses se visualizan claramente en las siguientes respuestas de los estudiantes:

- *“Quiero aprender mucho, el objetivo de ustedes se ve claramente que desean enriquecer las prácticas de laboratorio de fisicoquímica en la universidad, pues es importante el componente experimental en esta materia, y vemos que no se ha hecho gran avance pues no se tienen los equipos para ello en la universidad”* (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)

Esta respuesta está clasificada en el nivel de desempeño excelente, puesto que, con base en la rúbrica correspondiente a las entrevistas, el estudiante expresa vehemente su interés y motivación de trabajar en el proyecto, además de ilustrar la necesidad que este quiere solventar con respecto a las prácticas de laboratorio de la Universidad Pedagógica Nacional, e incluso, menciona cómo podría servirle para su formación.

Por otro lado, tenemos otra respuesta de otro estudiante de la misma asignatura:

- *“No había escuchado el término Voltamperometrías Cíclicas, pero me motivaría aprender algo nuevo”.* (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)

Esta respuesta está clasificada en el nivel de desempeño Avanzado, no alcanza a satisfacer el nivel de desempeño Excelente, pues aunque no conozca aún el objetivo y el contenido del proyecto, manifestó de manera general participar y aprender de las explicaciones y las intervenciones. La razón de la categorización es debido a que no relaciona la motivación de participar con su ejercicio docente o su contexto universitario. Tal vez, si hubiese dado más detalles, se hubiera podido analizar mejor la información y lo que el estudiante piensa realmente.

En última instancia, se tiene otra respuesta de otro estudiante:

- *“Me motiva aprender estas técnicas que son importantes en la química, además de que estoy presto a colaborarles en este proyecto, para que exista un trabajo de calidad en ambas partes, tanto de nuestras respuestas como de la calidad de la información que nos darán.”* (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)

Esta respuesta se ubica en el nivel de desempeño Excelente, pues expresa de forma clara y coherente sus expectativas, dando detalles de su propia motivación personal e incluso es consciente de que su participación contribuiría a su ejercicio formativo en la docencia, encontrando significativo el proyecto de manera integral.

Por otro lado, la segunda pregunta tenía como intencionalidad analizar si los estudiantes relacionaban las técnicas electroquímicas con su proyección profesional a nivel disciplinar. En este criterio, todos los estudiantes se ubican en el nivel Básico, esto evidencia una falta de interés para aplicar técnicas electroquímicas en un contexto industrial o científico, lo que manifiesta que los estudiantes desean encaminarse a una vida laboral mayormente de docencia. Esto tiene lógica, pues el mayor campo de acción de la licenciatura es en un ámbito educativo, sin embargo, el objetivo de esta pregunta era cómo los

participantes deseaban incursionar en otros campos ajenos a la docencia ya a nivel laboral.

Las siguientes respuestas constatan lo anterior:

- *“Podría aplicar las técnicas electroquímicas a un campo biológico o médico observando cómo los iones entran a jugar en la celda” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)*
- *“Usaría las técnicas para ver cuáles materiales son más resistentes ante los factores ambientales como por ejemplo la humedad” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)*

Estas respuestas se justifican en posicionarse en nivel Básico, pues, aunque enuncian la importancia de las técnicas analíticas en contextos industriales como ciencia de materiales, ingeniería química o biomédica, en ningún momento algún estudiante manifestó querer trabajar en estos campos en su futuro, habrá que realizar más indagaciones al respecto sobre si la motivación de cada uno de ellos está ligada a otros campos de la electroquímica, no necesariamente los presentados en este trabajo de grado.

Ahora bien, con respecto al eje disciplinar existen 4 criterios que lo evalúan en la rúbrica: dominio conceptual sobre las técnicas electroquímicas, conocimiento instrumental y su aplicación, comprensión de conceptos fisicoquímicos, e integración entre teoría y práctica. Las preguntas que atienden a estos criterios están contempladas en el guión de la entrevista semiestructurada, las cuales son:

- ¿Qué técnicas electroquímicas conoce?
- ¿Qué equipos son usados para las técnicas electroquímicas?
- ¿Qué es la reducción y oxidación de una especie química?
- ¿Conoce qué son los potenciales Redox y sabe cómo medirlos?

El objetivo de estas preguntas era evaluar los conceptos previos de los estudiantes, además de observar qué conceptos teóricos han sido comprendidos, y los pueden ejemplificar, y cuáles no los pueden definir, para así comenzar a caracterizar a los participantes, y adecuar los materiales de estudio

y la clase educativa para que estas terminologías sean comprendidas al finalizar la intervención. Como segundo objetivo, aquellas preguntas funcionan como diagnóstico para así saber desde qué punto partir a explicar los fundamentos de la Voltamperometría Cíclica, pues todas estas definiciones se deben tener en cuenta para comprender de una manera óptima la temática.

Después de realizar las preguntas, la mayoría de los estudiantes se ubica en un nivel de desempeño intermedio, manifestando que hay dificultades en cuanto a la comprensión de conceptos fisicoquímicos como lo pueden ser los potenciales redox, un concepto fundamental para poder comprender cuestiones relacionadas a la Voltamperometría Cíclica, como lo son el potencial formal, que involucra incluso la ecuación de Nernst modificada. A pesar de que los estudiantes ya han cursado anteriormente el espacio académico de Sistemas Fisicoquímicos I, se puede observar que existen algunas dudas e inconsistencias con respecto al nivel de comprensión en conceptos fisicoquímicos básicos. Una posible hipótesis de este comportamiento sería la dificultad del campo de estudio para los estudiantes, lo cual se vio manifestado en sus respuestas acerca de las percepciones de la temática y al curso de Sistemas Fisicoquímicos II.

Con respecto al criterio denominado “Dominio conceptual sobre las técnicas electroquímicas”, la totalidad de los estudiantes entrevistados manifestó no haber conocido técnicas analíticas electroquímicas con certeza, las cuales se dividen en 2 grandes ramas: técnicas estáticas y técnicas dinámicas, Elgrishi et. al. (2017). Una de las grandes y más conocidas técnicas estáticas es la potenciometría, la cual se usa en el laboratorio de la Universidad Pedagógica Nacional para determinar el pH de un analito en específico, sin embargo, los estudiantes no relacionan que ese método de análisis corresponde a una técnica electroanalítica por sí misma, esto indicando un desconocimiento de las mismas. Esto se puede ilustrar en la siguiente respuesta:

- *“Hemos trabajado en la construcción de celdas galvánicas y electroquímicas con puentes salinos”.* (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).

La anterior respuesta, es muy vaga, lo cual manifiesta no conocer técnicas analíticas en este campo de estudio, por eso, se ubica en un nivel de desempeño intermedio, que, aunque manifiesta montajes y ejercicios prácticos de algunas mediciones eléctricas en una celda, no ejemplifica ni acierta en mencionar por lo menos una técnica en sí misma.

Por otra parte, la mayoría de los estudiantes mencionan la electrólisis como una técnica analítica. La siguiente respuesta relata lo anterior:

- *“Una de las técnicas usadas es la electrólisis, pues la aprendí, sin embargo es difícil recordar bien su funcionamiento, porque no se practica seguido”.* (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)

Sin embargo, esto es una equivocación y una preconcepción equívoca, pues la electrólisis solamente es un proceso para inducir reacciones químicas no espontáneas al ejercer un trabajo eléctrico externo, o un potencial al sistema, no significa que sea una técnica en sí. Las técnicas analíticas electroquímicas, como Gómez, S. y Soria, E (2002) afirman, determinan las propiedades eléctricas de una solución en una célula electroquímica incluso a bajas concentraciones con una excelente precisión, y la electrólisis, al no medir propiedades, ni las propiedades eléctricas de una solución, que, a pesar de que, utilice una celda electroquímica, esta no es usada como medio de análisis y cuantificación de alguna variable, sino que es solo usada para realizar una reacción que transforma sustancias, invalidando el concepto principal de los estudiantes.

Dicho desconocimiento de estas técnicas tan utilizadas va enlazado con los saberes que poseen los estudiantes con respecto a los montajes e instrumentos necesarios para aplicar dichas técnicas. En la mayoría de las técnicas interfaciales (o técnicas analíticas electroquímicas), el equipo más utilizado para la cuantificación y medición es el potenciostato/galvanostato. Se evidencia que los estudiantes desconocen los equipos utilizados en las técnicas electroquímicas. Esta situación se debe en gran parte, a la falta de abordaje adecuado de estos temas, lo cual representa una dificultad significativa al momento de familiarizarse con dichos instrumentos. Como consecuencia, persiste un desconocimiento general y una carencia de información que limita la

comprensión de los conceptos relacionados con la electroquímica. Para alcanzar una cultura científica acorde a la era en la que vivimos se requieren métodos de enseñanza que abran la puerta al alumno a formas de conocer distintas, que generen conocimiento, que acerquen al alumno a la vida cotidiana y que le aporte explicaciones acordes a la realidad en la que viven (Eurydice, 2011). Sin embargo 2 estudiantes se ubicaron en un nivel de desempeño Intermedio, son conscientes de que la celda electroquímica y los electrodos son de carácter fundamental en cualquier análisis fisicoquímico, idea que acercará a un concepto clave en la implementación de la Voltamperometría Cíclica: el uso y la importancia de los electrodos en contacto con una solución y las reacciones que ocurren en la interfase.

En general, el análisis de desempeño a nivel disciplinar revela que los estudiantes tienen un conocimiento previo o superficial de procesos en electroquímica, limitándose a una descripción general de componentes clave, como la utilización de electrodos y la clasificación según sus celdas electroquímicas. Se identifica una deficiencia significativa en la aplicación de técnicas electroquímicas dentro del marco disciplinar, atribuible a la escasa integración o dominio de metodologías experimentales avanzadas, y la falta de experimentación de la misma, al no estar fortalecido mediante el syllabus o las temáticas de los espacios académicos. Esta limitación compromete el desarrollo conceptual y procedimental en química, disciplina eminentemente experimental (De Pro Bueno, 1998). Por consiguiente, es fundamental implementar estrategias pedagógicas basadas en la experimentación activa, que potencien la motivación y el interés en los estudiantes, fomentando la mejora de conocimientos conceptuales, actitudinales y procedimentales mediante la simulación del rol científico en contextos de aprendizaje auténtico.

Lo anterior demuestra las dificultades para consolidar y profundizar en los temas relacionados con la electroquímica, lo que genera vacíos en el conocimiento y un aprendizaje insuficiente en aspectos específicos vinculados a los métodos electroanalíticos. La base de la ciencia radica en el desarrollo teórico y práctico profundo, lo cual constituye un fundamento esencial para el aprendizaje efectivo en los estudiantes. Esto indica que, habitualmente, las prácticas experimentales

orientadas a la apropiación de nuevo conocimiento fortalecen de manera objetiva el interés por continuar aprendiendo, además de mejorar las capacidades analíticas y actitudinales. En consecuencia, dichas prácticas se convierten en una fuente de motivación que contribuye a integrar estos procesos de enseñanza en la vida cotidiana (Rúa y Álzate, 2012).

Para finalizar, el eje reflexivo fue evaluado por medio de dos criterios en la rúbrica: Reflexión sobre su labor docente y la enseñanza de la electroquímica, y Aplicaciones de técnicas electroquímicas y su relación con su proyección profesional a nivel disciplinar. Estos criterios están anclados a las siguientes preguntas:

- ¿Qué estrategias usaría para la comprensión y aplicación de las técnicas electroquímicas en su futura labor docente?
- ¿Cuál sería tu motivación al aplicar una técnica electroquímica para intereses investigativos o laborales a nivel industrial y científico?

El objetivo de estas preguntas es indagar el bagaje pedagógico y didáctico de cada estudiante para enseñar, si puede crear estrategias para la enseñanza de la química, o si por otro lado, desea forjar su proyecto de vida enfocado más a campos industriales o de laboratorio.

Con respecto a la primera pregunta, se pueden observar dos tipos de respuesta: la primera con un nivel de desempeño avanzado, y la otra con un nivel intermedio. A continuación, se mostrará una respuesta correspondiente al nivel avanzado:

- *“Abordaría la electroquímica desde una práctica experimental con corrosión de metales. Se pueden trabajar varios tipos de reacciones químicas y se puede analizar cómo ocurre el proceso de corrosión mediante la electroquímica.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II)*
- *“Haría experimentaciones pues desde las materias de primeros semestres solo se enfocan en la teoría y en los modelos matemáticos entonces sería fundamental observar la fisicoquímica más a nivel experimental” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II)*

La primera respuesta se ubica en un nivel de desempeño avanzado pues plantea un contexto, una temática y propone una estrategia concreta para enseñar algún tema de electroquímica. Al mencionar la corrosión de metales, le da sentido y coherencia a la estrategia. A diferencia de la segunda, la cual enuncia una estrategia de enseñanza, pero no la acerca a un contexto real o específico, acabando en ser una idea general.

Con respecto a la segunda pregunta, al ser de un eje motivacional y reflexivo, se le dio respuesta y análisis en el apartado del eje motivacional de una manera más transversal, indicando que los estudiantes están encaminados a ser docentes en su futuro, sin contemplar otros campos laborales como los laboratorios, los análisis químicos o las industrias del país.

8.2 Primer Estudio de Caso

Resultados de la rúbrica aplicada para primer estudio de caso

Se implementa una segunda intervención hacia los 6 estudiantes que cursan el espacio de sistemas fisicoquímicos II, en el cual los estudiantes dieron respuesta al estudio de caso implementado. A continuación, los resultados obtenidos gracias a la rúbrica de evaluación

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Importancia y reconocimiento del montaje de la Voltamperometría Cíclica (potenciostato, celda, electrodos) y su funcionamiento	1	4	1	
Reconocimiento de los fundamentos de la voltamperometría cíclica	2	1	3	
Proceso de lectura del ciclo voltamperograma y sus variables		4	2	
Aplicación de la Voltamperometría Cíclica en un campo de estudio	2	4		
Identificación de variables que afectan la forma del		4	2	

Con respecto al eje teórico-metodológico mencionado anteriormente se establecieron las siguientes preguntas para el primer estudio de caso.

- ¿Por qué crees que el uso del potencióstato es importante para esta investigación?

Haciendo referencia a la primera pregunta, los estudiantes en gran mayoría se clasificaron en un nivel de desempeño avanzado, ya que logran identificar y entender que el potencióstato es un instrumento fundamental en la técnica de la voltamperometría cíclica, y que adicionalmente logra acercar a diversas técnicas electroquímicas, una de las respuestas claves en el reconocimiento del uso y manejo del potencióstato se logra visualizar en la siguiente respuesta.

- *“El potencióstato constituye un instrumento fundamental en la voltamperometría cíclica (CV) y en general en los experimentos electroquímicos, ya que permite estudiar con precisión las reacciones redox y otros fenómenos asociados. Este dispositivo se conecta a un ordenador con un software especializado que facilita la configuración del experimento, así como la visualización y el análisis de los resultados.*

El potencióstato genera y registra diagramas los diagramas de corriente frente a potencial conocidos como los ciclovoltamperogramas, a partir de parámetros que pueden configurarse como el potencial inicial y final, la velocidad de barrido, el número de ciclos, entre otros, además, posibilita capturar, procesar y analizar datos obtenidos de la relación corriente-potencial, lo que explica el carácter cíclico de la técnica” (Estudiante Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)

Esta respuesta se clasifica en un nivel de desempeño excelente, debido a que su respuesta explica de manera integral el montaje, identificando como el equipo permite la variación del potencial, qué y cómo se realiza la medición de corriente. Por otro lado el estudiante reconoce los principios añadiendo algunos parámetros e indicando que puede procesar, capturar y analizar los datos que

se obtienen al momento de aplicar un voltaje constante para la obtención de una corriente resultante.

Estos conceptos son claves a nivel teórico-metodológico para un estudiante, indicando que posee las bases claves para la utilización del equipo y demostrando que le interesa indagar y experimentar más con el equipo.

Por otro lado, se observa otra de las respuestas por parte de un estudiante que cursa el mismo espacio.

- *“Porque este instrumento permite medir la corriente que pasa a través de los electrodos, mientras que el potencial se mantiene constante o se puede ir variando para obtener un barrido en un gráfico llamado ciclo voltamperograma, el cual, permite observar el comportamiento químico de los electrodos o aún más concreto la reacción de oxidación-reducción (redox) que ocurre en los electrodos. Además esto también se debe a que el potenciostato cuenta en su interior con un amplificador electrónico, que permite ampliar la corriente generada en el electrodo de trabajo para lograr medirla. por lo anterior, es que considero que el potenciostato es fundamental en esta investigación” Estudiante sistemas Fisicoquimicos II (2025)*

Esta respuesta está catalogada en un nivel de desempeño avanzado. El estudiante describe correctamente la función del potenciostato y su conexión con la celda electroquímica en conjunto con los electrodos para controlar el potencial y medir la corriente, pero por otro lado esta respuesta es abordada de forma general y no especifica cómo el prototipo puede ayudar a esta investigación, por lo cual se clasifica en este nivel de desempeño.

Por último, se obtiene la siguiente respuesta:

- *“En esta investigación, el potenciostato es fundamental, pues permite regular y evaluar con exactitud el voltaje usado en la celda electroquímica, lo cual es esencial para generar los voltamperogramas cíclicos. Estos diagramas son valiosos para analizar la actividad redox (oxidación y reducción) del cobalto (CoO/Co₃O₄) presentes en aguas impuras,*

mediante el uso del potencióstato, se pueden lograr cálculos exactos de la corriente con respecto al voltaje, siendo esto clave para comprender las relaciones de las sustancias químicas en sistemas reversibles” Estudiante sistemas Fisicoquímicos (2025)

Al analizar esta respuesta se clasifica en un nivel de desempeño intermedio debido a que presenta errores conceptuales, se identifica que no logra reconocer completamente para que funciona o que uso tiene el potencióstato, esto queda en evidencia cuando el estudiante menciona que *“el potencióstato logra evaluar y regular el voltaje con exactitud”* siendo un concepto equívoco ya que el uso del potencióstato logra controlar el voltaje para la obtención de una corriente en una celda electroquímica, permitiendo medir el flujo de corriente entre el electrodo de trabajo y de referencia (Segura, Jimenez y Giraldo. 2016). Estas concepciones erróneas dejan en evidencia la falta de utilización de equipos de laboratorio, algo que fue evidenciado en las respuestas de la entrevista donde mencionan que no conocen o utilizan equipos para esta área de estudio.

Posteriormente en el eje procedimental se realizaron dos preguntas más orientadas a la técnica empleada y su relación con los electrodos que son:

- ¿Para qué utilizamos la técnica de la voltamperometría cíclica?
- ¿Qué función tienen los electrodos implementados en la celda electroquímica?

En general los estudiantes logran identificar correctamente los electrodos utilizados en la técnica y la función de cada uno de ellos detallando su función en la técnica y en el potencióstato esto se puede ilustrar en la siguiente respuesta.

- *Inicialmente, cabe aclarar que, el electrodo tiene la función de ser un conductor formando un punto de contacto entre el circuito y una solución como un electrolito con la finalidad de transmitir o recibir una corriente eléctrica. Por otra parte, en voltamperometría cíclica se utilizan tres electrodos: el de trabajo, el de referencia, el auxiliar o contraelectrodo (Flores, 1995). o Trabajo: En este electrodo se tiene lugar las reacciones*

de interés (oxidación y reducción) y está construido de un material que es inerte, particularmente de platino, también se puede utilizar oro o carbón. o Referencia: En este electrodo se tiene un potencial conocido y de este tipo de electrodos los más conocidos son los de calomel saturado (SCE) o de Ag/AgCl “El electrodo de referencia ideal tiene un potencial que se conoce con exactitud, que es constante y que es completamente insensible a la composición de la disolución del analito.. Auxiliar o contraelectrodo: Generalmente es de platino o un material inerte. De este modo, la corriente fluye entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo. En este estudio de caso se podría tener en cuenta que, durante la oxidación de Co (II) a Co (III) en el electrodo de trabajo, en el contraelectrodo ocurre una reacción complementaria que puede ser la reducción de los protones de agua con la finalidad de balancear la corriente. Estudiante sistemas Fisicoquímicos (2025)

Pero se pueden ver al menos 3 respuestas en nivel intermedio a la segunda pregunta que exponen la falta de conocimiento sobre esta técnica electroquímica y su campo de aplicación. A continuación, se tiene una de las respuestas establecidas por los estudiantes:

- *“Para conocer los parámetros electroquímicos a los cuales se da una reacción de oxidación-Reducción, es decir el potencial o voltaje bajo el cual una reacción química de este tipo se lleva a cabo. Además, permite analizar la reversibilidad de las reacciones redox, mostrando que si la especie que se ha oxidado se reduce de nuevo y la que se redujo se oxida” Estudiante sistemas Fisicoquímicos (2025)*

Esta respuesta es catalogada en un nivel de desempeño intermedio ya que el estudiante no logra profundizar más en la técnica y se limita a identificarla como un área que se usa para analizar reacciones redox. Esto deja en evidencia la dificultad a la hora de reconocer la técnica y describirla, este resultado es esperado pues como lo expresa (Jong y Traugust, 2002) existe gran dificultad de relacionar los componentes conceptuales y su aplicación en otras áreas, en este

caso lo sería comprender la técnica más allá de la reacción redox e indagar en diversas aplicaciones.

Con respecto al eje procedimental y analítico se realizaron las siguientes preguntas:

- En un párrafo, redacte el paso a paso para reconocer el comportamiento del par redox, identificando las variables del gráfico, señalando una aproximación numérica de las mismas
- ¿Qué parámetro del ciclovoltamperograma se relaciona con la concentración del Cobalto en la muestra del agua? ¿Qué nos puede decir dicho parámetro?
- ¿Qué información puede extraer del ciclovoltamperograma con respecto a la velocidad de reacción?
- ¿Qué información puede extraer del ciclovoltamperograma con respecto a la velocidad de reacción?

Los resultados indican que 4 de 6 estudiantes logran identificar un ciclo voltamperograma y sus variables, ya que logran detallar los pasos para identificar el par redox y señalar sus variables como lo son el potencial y el voltaje, además de mencionar cuál es el pico catiónico y anódico en el gráfico, dichos estudiantes fueron clasificados en un nivel de desempeño avanzado, a continuación, tenemos una respuesta por parte de un estudiante del espacio académico.

- *“Se analiza la gráfica de corriente (μA) frente al potencial (V). El eje X representa el potencial aplicado, mientras que el eje Y muestra la corriente generada por las reacciones electroquímica, para poder reconocer el comportamiento del par redox es importante identificar también los picos de la corriente que se visualizan en la gráfica del ciclovoltamperograma, un pico anódico (i_{pa}) y un pico catódico (i_{pc}), el pico anódico corresponde a la oxidación y el pico catódico corresponde a la reducción. Como principio de funcionamiento, el potencial del electrodo de trabajo se barre entre dos valores conocidos como valores límites a una velocidad constante, se identifica como un ciclo debido a que, tras alcanzar el primer*

vértice, el barrido se invierte y regresa al potencial inicial.” Estudiante sistemas Fisicoquímicos (2025)

Esta respuesta no logra el nivel de desempeño excelente debido a que no intenta aproximar sus valores y presentar los estados de oxidación del cobalto, por otro lado, dos estudiantes fueron categorizados en el nivel de desempeño intermedio, ya que señalan los picos en el gráfico, pero no hay una articulación rigurosa sobre los pares redox o especificar cuáles son los picos anódicos y catódicos.

A continuación veremos un ejemplo de respuesta a la pregunta :¿Cuál es una de las principales razones para utilizar la voltamperometría cíclica en el análisis de calidad de aguas con Cobalto?

- *“Teniendo en cuenta la funcionalidad de la voltamperometría cíclica “La voltamperometría cíclica (CV) es quizás la técnica electroquímica más versátil para el estudio de especies electroactivas de allí el uso se ha extendido en diferentes campos, actualmente se utiliza para investigaciones en química inorgánica, orgánica, bioquímica, entre otros” (Flores, 1995). De este modo, el cobalto es una especie electroactiva debido a que así se consideran a las especies que pueden ganar o perder electrones en la superficie de un electrodo bajo un potencial adecuado. El cobalto en soluciones se encuentra en Co (II) y puede oxidarse en Co (III) o reducirse dependiendo de las condiciones experimentales en las que se encuentre, también esta especie puede formar óxidos e hidróxidos que participan en procesos redox reversibles o quasi-reversibles que son detectables mediante la voltamperometría cíclica. Estos procesos redox se evidencian en los ciclovoltamperogramas como picos bien definidos, lo que confirma su carácter electroactivo. Cada especie presente un perfil electroquímico que lo caracteriza y que se refleja en la posición y en la forma de los picos del voltamperograma. Por otra parte, es fundamental agregar que, se puede cuantificar la concentración de estas especies por medio de la corriente pico. Así, en términos de la calidad de agua, es importante ya que la toxicidad y movilidad del cobalto dependen del*

estado de oxidación y de las condiciones del medio.” (Estudiante sistemas Fisicoquímicos (2025))

Esta respuesta demuestra un buen desempeño y categorizada en el nivel de desempeño avanzado, ya que el estudiante describe correctamente la naturaleza electroactiva del cobalto y la utilidad general de la técnica, sin embargo, no alcanza a cumplir plenamente los criterios avanzados ya que omite hablar de alcances posibles desventajas. En términos generales los estudiantes logran ver viabilidad de la técnica y ciertas ventajas, pero no cumplen con la rigurosidad o un análisis más extenso de la técnica aplicada en el tratamiento de agua.

Siguiendo con el eje disciplinar y práctico en el criterio identificación de variables que afectan el ciclo voltamperograma da resultados positivos ya que 4 de 6 estudiantes fueron clasificados en el nivel de desempeño avanzado y 2 en el nivel de desempeño intermedio, la pregunta realizada para este criterio fue la siguiente:

- ¿Qué información puede extraer del ciclo voltamperograma con respecto a la velocidad de reacción?

A esta pregunta analizaremos dos respuestas una clasificada en el nivel de desempeño avanzado y otra en intermedio:

- *“Los ciclo voltamperogramas pueden brindar información cinética analizando la forma de los picos y de su dependencia con la velocidad de barrido. Es decir, en un sistema reversible y controlado por difusión, la corriente de pico crece con la raíz cuadrada de la velocidad y la separación entre picos anódicos y catódicos que se deben mantener en un valor teórico de $59\text{mV}/n$ A 25°C para un electrón transferido. Esto indica que la transferencia electrónica es rápida y la velocidad de reacción está limitada únicamente por la difusión. Por otra parte, las bajas velocidades de barrido suelen manifestarse procesos químicos como reacciones secundarias o de adsorción, sin embargo, las altas velocidades de los*

picos son más definidos y separados.” Estudiante sistemas Fisicoquímicos (2025)

- *“La separación entre los picos de oxidación y reducción (ΔE_p) y la forma de la curva permiten evaluar la velocidad de reacción. Una ΔE_p pequeña y picos definidos indican una reacción rápida y reversible. En cambio, una gran separación sugiere lentitud o irreversibilidad. También se puede analizar la pendiente en la región de barrido para obtener información sobre la difusión y la transferencia electrónica.” (Estudiante sistemas Fisicoquímicos (2025))*

La primera respuesta es catalogada en el nivel de desempeño avanzado debido a que el estudiante identifica correctamente que la forma y posición de los picos dan información sobre si la reacción es rápida o lenta (reversible, cuasi reversible o irreversible), además logra analizar incluso la forma del pico y el porqué de su forma mencionando que variables lo pueden afectar, por otro lado vemos que la siguiente respuesta si bien, menciona que las corrientes pico podrían indicar la reversibilidad o irreversibilidad por otro lado enuncia generalmente proposiciones sobre la cinética de la reacción redox.

8.3. Taller fundamentado en la experimentación ilustrativa

A continuación, se muestran los resultados de aplicar la rúbrica de evaluación a las respuestas del taller:

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Identificación y relación de variables físicas	3	3		
Comprensión del funcionamiento interno del prototipo	2	3	2	
Formulación de hipótesis con base en el pensamiento científico	3	2	1	

Proposición y reflexión sobre la viabilidad del prototipo	2	4
Aplicación del prototipo como herramienta educativa para la enseñanza de la electroquímica	5	1

Tabla 11. Resultados de la rúbrica aplicada en el taller fundamentado en experimentación ilustrativa.

Desde el eje disciplinar, los datos revelan que al menos la mitad de los 6 estudiantes lograron identificar y relacionar correctamente variables, comprender el funcionamiento del prototipo y proponer o no la aplicación de este en un contexto educativo. Se puede observar que 4 de 6 estudiantes alcanzaron niveles de desempeño excelente y avanzado, esto sugiere que hubo una apropiación sólida de los contenidos y una adecuada integración entre teoría y práctica. Los estudiantes en este eje tuvieron que responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las variables físicas involucradas en la CV y cuál es la relación entre ellas?
- ¿Cómo se relaciona la programación, el código y los componentes electrónicos con la ejecución de una ciclovoltamperometría?
- ¿Qué componente o proceso de la demostración debe ser cambiado para optimizar la sensibilidad y robustez del equipo?

A continuación, vemos un ejemplo de una respuesta categorizada en el nivel de desempeño excelente y avanzado a la pregunta ¿Cuáles son las variables físicas involucradas en la CV y cuál es la relación entre ellas?

- *“Principalmente, en la voltamperometría cíclica las variables que se encuentran presentes para poder emplear este método electroquímico son: el potencial que es la magnitud que se encuentra controlada por el potencióstato (debido al potencial es el que controla el proceso de oxidación y de reducción). La corriente, ya que está es la variable que refleja los procesos redox que ocurren en el electrodo. La velocidad del*

barrido es importante también ya que determina la rapidez con la que cambia el potencial. La concentración del analito también es importante ya que afecta la magnitud de la corriente (como se había comentado en clase, la concentración del analito debe ser menor a la concentración del electrolito soporte KCl). Por otra parte, las variables como la temperatura, el pH, entre otras, influyen, por ejemplo, en la elaboración del ciclovoltamperograma (como se comentó en clase, es importante controlar estas variables). Estas variables se pueden relacionar también en la ecuación de Randles-Sevcik, en el cual se plasma que, la corriente del pico depende de la raíz cuadrada de la velocidad de barrido que ha sido planteada y de las variables físicas.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).

Esta respuesta corresponde a un nivel de desempeño excelente ya que el estudiante logra explicar de forma integral cuáles son las variables que corresponden al potencial, la corriente y la velocidad de barrido, además de ello el estudiante logra identificar y generar relaciones prediciendo como pueden ser afectadas estas variables.

Asimismo, podemos ver otra respuesta a la misma pregunta por parte de otro estudiante del espacio académico:

- *“Después de estar en el laboratorio con los tesisistas pude observar que las principales variables físicas en la voltamperometría cíclica serían el potencial y la corriente. El potencial se va modificando con el tiempo y esto genera una respuesta de corriente que cambia dependiendo de los procesos de oxidación y reducción que ocurren en el electrodo. La relación entre ambas variables nos muestra cómo el sistema responde electroquímicamente, es decir, desde qué punto una especie se reduce o se oxida, lo que pudimos ver en los picos de la gráfica al final del laboratorio.”(Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

Esta respuesta fue catalogada avanzada, teniendo en cuenta la rúbrica de evaluación construida previamente, esta respuesta demuestra una comprensión correcta al identificar las variables principales que corresponden al potencial y la

corriente, también logra asociar ambas variables al proceso de reducción y oxidación de la especie representada en el ciclovoltagramo, sin embargo la respuesta no logra alcanzar el nivel de desempeño excelente puesto, que aunque son respuestas son acordes no logra generar un análisis más profundo y tener en cuenta más variables como lo sería la velocidad de barrido, entre otras.

No obstante, se presentaron al menos 2 respuestas en niveles de desempeño “intermedio”, lo cual indica vacíos en la comprensión conceptual o en la transferencia de conocimiento durante el laboratorio. Esto es evidenciado en la respuesta a la pregunta ¿Qué componente o proceso de la demostración debe ser cambiado para optimizar la sensibilidad y robustez del equipo?. A continuación, tenemos una respuesta de nivel de desempeño intermedio:

- *“Posiblemente la cuba donde se mantienen los electrodos y la solución, esto debido a que estaba cubierta con cinta para evitar la entrada de oxígeno al sistema, sin embargo, es claro que hubo un ingreso y este no fue eliminado empleando otros gases dentro del sistema.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

La respuesta del estudiante si bien demuestra que identifica la celda electroquímica aunque la menciona como “la cuba” y un problema a la hora de realizar la implementación que correspondería a la entrada de oxígeno a la celda, su respuesta es situada en nivel de desempeño intermedio debido a que su análisis no profundiza en el porqué, y se limita a señalar la falla sin explicar cómo podría mejorarse, según Gómez y Lavín (2016) recalcan que el área de la electroquímica cuenta con problemas a la hora de ser enseñada, esto debido a factores como bajo interés o ver el área como difícil o abstracta. Estos resultados pueden también corresponder a perspectivas previas presentadas en la entrevista, por otro lado, en coherencia con lo anteriormente mencionado, los resultados en nivel excelente y avanzado reflejan que la experiencia práctica desarrollada favorece la consolidación conceptual, esto es exhibido en la respuesta de nivel excelente:

- *“Para optimizar la sensibilidad y la robustez del equipo en una demostración de ciclovoltagrametría, el componente que más influye y*

conviene modificar es el potencióstato o, más específicamente, su etapa de amplificación y medición de corriente. Usar amplificadores operacionales de mayor precisión y menor ruido mejora notablemente la detección de corrientes pequeñas, aumentando la sensibilidad del sistema. Por otro lado, una mejor fuente de alimentación y un aislamiento adecuado del circuito frente a ruidos eléctricos externos también contribuyen a que las señales sean más estables y confiables. A nivel químico, la sensibilidad y robustez del equipo en una ciclovoltamperometría pueden optimizarse controlando la composición y pureza de la disolución electroquímica. Es fundamental emplear un electrolito soporte adecuado, que tenga alta conductividad iónica y no participe en las reacciones redox, para minimizar la resistencia de la solución y el ruido de fondo. Además, la concentración del analito debe ajustarse para obtener una señal clara, pero sin saturar el electrodo. También es importante mantener el pH y la fuerza iónica constantes, ya que estos factores influyen en el potencial redox y en la estabilidad de las especies electroactivas. Otro aspecto clave es el pretratamiento del electrodo de trabajo (por ejemplo, pulido o limpieza electroquímica), ya que una superficie contaminada o irregular puede alterar la respuesta voltamperométrica.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).

En esta respuesta el estudiante desarrolla hipótesis que demuestran una comprensión del funcionamiento del equipo y vincula sus respuestas con propuestas de mejora a el equipo buscando mayor precisión y robustez. Según Caamaño (2002) esto podría indicar que la experimentación ilustrativa fortalece el desarrollo de destrezas prácticas, intelectuales y comunicativas, ya que el estudiante logra proponer planes de mejora al equipo y/o laboratorio.

Con respecto al eje reflexivo, podemos evidenciar que la mayoría de los estudiantes logró establecer relaciones entre la experiencia práctica y los fundamentos teóricos abordados en clase, demostrando una comprensión de los procedimientos realizados en el laboratorio. Los niveles de desempeño “Excelente” y “Avanzado” predominan en los criterios de formulación de hipótesis

y reflexión sobre la viabilidad del equipo, reconociendo sus limitaciones e implicaciones. Esto podría ser como menciona Moretta (2016) un indicador de que hubo una comprensión e interiorización debido a que la mayoría de los estudiantes lograron juzgar y articular el contenido con otras temáticas, la pregunta abordada en este eje corresponde a:

- ¿Qué tan viable es el equipo para su aplicación en otras técnicas electroquímicas?

A continuación, se evidencia una respuesta en un nivel de desempeño avanzado, donde el estudiante no solo identifica con precisión la viabilidad del equipo, sino que también contextualiza su relevancia al conectarlo con otras técnicas fisicoquímicas, al mencionarlas demuestra una comprensión integral del conocimiento adquirido en las sesiones anteriores.

- *“El potencióstato de bajo costo si puede ser viable para otras técnicas electroquímicas, siempre y cuando se realicen algunas adaptaciones en su diseño y programación. Este tipo de equipo se pueden utilizar no solo en voltamperometría cíclica (CV), sino también en otros métodos como la cronoamperometría, crono coulombimetría, voltamperometría de pulso diferencial o voltamperometría lineal, entre otros. Esta viabilidad depende principalmente de tres factores: primero rango de control de potencia y precisión del amplificador operacional, segunda resolución del convertidor analógico-digital (ADC), que determina la sensibilidad de la medición de corriente. flexibilidad del software, que permite programar distintos tipos de barridos o pulsos. Haciendo estas mejoras en estos tres aspectos, el equipo puede adaptarse fácilmente a otras aplicaciones electroquímicas tanto de investigación básica como de enseñanza experimental.”*
(Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).

En cuanto al eje motivacional-actitudinal, se observó una participación activa y un interés generalizado en el uso del prototipo en su labor docente o en contextos académicos. La mayoría de los estudiantes mostró disposición y curiosidad por utilizar o adaptar el equipo a otro tipo de técnicas electroquímicas, los resultados en los niveles “Excelente” y Avanzado”, con respecto a la pregunta: Desde su punto de vista ¿Como la construcción del potencióstato de bajo costo ayuda a

ilustrar el funcionamiento de la CV en un entorno educativo? ¿Lo usaría? evidencian como sugiere Morreta (2016) al existir motivación por parte del estudiante, este puede potencializar que aborde con mayor facilidad y comprensión las actividades, debido a que tiene su atención e intereses centrados en la temática, un ejemplo de ello es la respuesta daba por uno de los estudiantes del espacio académico:

- *“Me parece que la construcción de un potenciostato de bajo costo es una excelente herramienta para comprender de manera práctica el funcionamiento de la voltamperometría cíclica, ya que permite observar cómo cada componente interviene la medición electroquímica y cómo se relaciona la variación de potencial con la respuesta de corriente, este tipo de proyectos facilita el aprendizaje activo y hace más accesible el uso de técnicas electroquímicas que normalmente requieren equipos de alto costo. Personalmente si usaría este potenciostato en un entorno educativo ya que combina bajo costo funcionalidad y claridad conceptual permitiendo ilustrar de forma sencilla y didáctica los principios fundamentales de la electroquímica moderna.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

La respuesta de la estudiante evidencia una notable motivación y deseos por aprender, que se visibilizan en categorizar esta construcción como un aprendizaje activo, el estudiante además no solo demuestra motivación sino que fundamenta su postura con argumentos pedagógicos, de funcionalidad y de costos, demuestra valorar el potenciostato al hacer tangible la teoría con la práctica y contextualiza la herramienta tomando una posición clara sobre el uso en entornos educativos demostrando interés en la técnica y proyectando a futuro su aplicación.

8.4. Segundo Estudio de Caso

A continuación, se muestran los resultados de aplicar la rúbrica de evaluación a las respuestas del estudio de caso #2.

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Importancia y reconocimiento del montaje de la Voltamperometría Cíclica (potenciostato, celda, electrodos) y su funcionamiento	3	1	2	
Reconocimiento de los fundamentos de la voltamperometría cíclica	2	2	2	
identificación del ciclo voltamperogramas y sus variables	2	3	1	
Aplicación de la Voltamperometría Cíclica en un campo de estudio	1	3	2	
Identificación de variables que afectan la forma del ciclo voltamperograma		5	1	

Tabla 12. Resultados de la rúbrica aplicado en el segundo estudio de caso.

El objetivo de este segundo de caso tiene como objetivo aplicar todos los conceptos relacionados con la clase educativa de las sesiones 1 y 2, y la aplicación de la clase con enfoque de Experimentación Ilustrativa, todo para analizar y generar hipótesis sobre la aplicabilidad y la efectividad de un biosensor selectivo para bacterias, y creado por un electrodo de trabajo modificado. El estudio de caso se analiza por medio de estos 3 ejes que fueron contemplados en el primer estudio de caso.

A primera vista, no hay una tendencia general hacia un criterio, sino que hubo gran diversidad de respuestas, hipótesis y argumentos. Esto a grandes rasgos indica que el estudio de caso no fue comprendido en su totalidad o fue de alta complejidad, sin embargo, se procuró que este instrumento abarque todo lo trabajado en clase y en la clase específica de la experimentación ilustrativa.

Con respecto al eje teórico-metodológico, se planteó una situación en la cual el estudiante debe realizar todos los cálculos matemáticos que el equipo que dirige el trabajo de grado, precisó hacer para aplicar una Voltamperometría Cíclica con el potenciostato de bajo costo construido, utilizando toda la programación necesaria, los electrodos y los reactivos químicos, y más específicamente, el

estudiante debió determinar el coeficiente de difusión del ferricianuro de potasio. Con base en dicho coeficiente de difusión, el estudiante tuvo que verificar mediante la teoría y la literatura el porqué de dicho valor, también qué ocurre en la celda electroquímica, por qué se usa la Voltamperometría Cíclica en las pruebas de calidad de un biosensor, por qué se usa un potencióstato y qué información brinda con respecto a la cinética de reacción, y si ocurre o no un transporte de masa hacia la interfase del electrodo de manera lenta o rápida. Esto es coherente con los criterios de la rúbrica, pues debe analizar y reconocer el papel del potencióstato y las conexiones electrónicas, con respecto a toda la teoría de transporte de masa y de identificación de errores experimentales.

Las siguientes respuestas ilustran una respuesta clasificada en un nivel de desempeño excelente, con base en lo explicado anteriormente:

- *“Un biosensor trata de un dispositivo de análisis que convierte respuestas biológicas en señales eléctricas medibles, gracias a componentes como enzimas o anticuerpos que reconocen sustancias específicas. Un transductor químico recibe esta información y la transforma en señal eléctrica, siendo el electrodo una parte clave del sistema, ya que en su superficie ocurren las reacciones redox o cambios de potencial que permiten detectar y traducir la respuesta del analito biológico.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025)*
- *“Los valores reportados para el sistema redox $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-} / [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ están entre: $4.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $7.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. El coeficiente de difusión nos dio $5.44 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, que está dentro del rango, lo que nos indica que el potencióstato funciona correctamente, la calibración fue adecuada y el sistema redox es reversible. Si el valor del coeficiente de difusión estuviera fuera del rango. Podríamos considerar error en la concentración del analito (mal cálculo de moles o volumen), problemas de burbujeo (presencia de oxígeno disuelto en la celda), ruido, mala conexión de los electrodos, conducción no reversible (pH extremo) o interferencias.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

Dichas respuestas satisfacen correctamente el primer y segundo criterio de la rúbrica al reconocer las partes del montaje que se necesitan para poder modificar un electrodo para que se torne un biosensor, además de reconocer en efecto las variables que afectan la lectura de una voltamperometría cíclica, brindando posibles hipótesis de dicha afectación a nivel químico y electrónico. Sin embargo, al determinar el coeficiente de difusión, no se llegó al valor real, pues hubo problemas al momento de utilizar la ecuación de Randles-Sevcik, debido a que no hubo un tratamiento matemático adecuado. Cabe aclarar que el verdadero valor de D en este estudio de caso es de $5,54 * 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, alejándose de los valores teóricos reportados por la literatura (de $4.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $7.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$). Ahora, se va a comparar con una respuesta de nivel intermedio:

- *“Un biosensor es esencialmente una herramienta de análisis que fusiona un elemento biológico – ya sean enzimas, anticuerpos, bacterias o tejidos – con un transductor electroquímico. Este último se encarga de transformar la reacción biológica en una señal eléctrica cuantificable.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*
- *“El valor experimental es un orden de magnitud mayor, por tanto, no es coherente con la literatura. Posibles causas: Error en la unidad de área (mm^2 a cm^2), concentración no convertida a $\text{mol}\cdot\text{cm}^{-3}$, punto anómalo a $200 \text{ Mv}\cdot\text{s}^{-1}$ que aumenta la pendiente, mala desgasificación de la celda (O_2 genera corrientes extra) (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

Estas respuestas se ubican en nivel intermedio debido a que es una respuesta descriptiva, sin relacionar los conceptos entre sí, ni realizar un análisis más profundo de las hipótesis de la desviación del coeficiente de difusión, ni denotar un valor matemático de D adecuado, y omite detalles importantes para formular una hipótesis de la variación de los valores de dicho coeficiente.

En este apartado, los estudiantes pudieron hallar la cantidad de reactivos necesaria y certera para la práctica de laboratorio, mostrando gran habilidad para realizar cálculos de laboratorio con facilidad.

Con respecto al eje procedimental, el segundo estudio de caso tenía planteado cuestionarse cómo los amplificadores operacionales realizaban las lecturas de la corriente y el reporte del potencial, además de formular hipótesis sobre la efectividad del biosensor aplicado y qué modificaciones realizaría al potenciostato de bajo costo y al biosensor elaborado por medio de un electrodo modificado. Así como el eje anterior, las respuestas se ubican en un nivel excelente e intermedio.

A continuación, se analiza una respuesta catalogada en un nivel excelente:

- *“El biosensor para E. coli presentó señales con ruido eléctrico que dificultan la detección. Se observó que las señales electroquímicas presentaban corrientes excesivas o ruido eléctrico, lo que dificulta la detección precisa (este tipo de aspectos se pueden evidenciar en los ciclovoltamperogramas) Seguido a ello, después de revisar los diversos parámetros experimentales, se puede considerar que tal vez los principales problemas podrían ser como pH ácido, polímero incompatible y exceso de potencial aplicado. Se proponen ajustes en pH a neutro, uso de polímeros biocompatibles como PPy o PANI, y reducción de la ventana de potencial para mejorar sensibilidad, estabilidad y reproducibilidad”* (Estudiante de Sistemas Físicoquímicos II, 2025)

El estudiante pudo identificar las variables que afectaron la lectura, e incluso brindó soluciones para estos problemas, además de notarse haber comprendido los conceptos necesarios para poder resolver la cuestión, desde un punto de vista fundamentado. Ahora, se analiza una respuesta catalogada en un nivel intermedio:

- *“Para que funcione con E. coli se debería de disminuir la corriente aplicada para no destruir la bacteria por la existencia de un sobrepotencial, hacer un ajuste en el pH a valores neutros o fisiológicos (~7), posiblemente modificar el polímero para hacerlo más biocompatible y finalmente, usar condiciones de difusión más suaves y eliminar burbujas.”* (Estudiante de Sistemas Físicoquímicos II, 2025)

Dicha respuesta da soluciones a los problemas determinados en la efectividad del biosensor, sin embargo, la respuesta se limitó a una descripción general y no una introspección conceptual del mismo (esto se ve en el concepto del estudiante denominado “condiciones de difusión”, pues no se especifica cuáles son esas condiciones), ignorando las ventajas y desventajas del equipo y encajando perfectamente como menciona la rúbrica, específicamente en el criterio “Aplicación de la voltamperometría en un campo de estudio” e “Importancia y reconocimiento del montaje de la Voltamperometría Cíclica (potenciostato, celda, electrodos) y su funcionamiento”.

Con respecto al eje analítico, los estudiantes tuvieron acceso al ciclovoltamperograma obtenido por el potenciostato, además de comparar con un ciclovoltamperograma ideal para la misma especie redox. El propósito de esta actividad fue comparar y deducir el porqué de las diferencias en las gráficas, además de identificar pico catódico y anódico.

La totalidad de los estudiantes identificaron los picos anódico y catódico correctamente, además de justificar dónde ocurre la oxidación y la reducción, por lo cual en ese aspecto se encuentran en un nivel excelente parcialmente, quienes realmente fueron clasificados en un nivel excelente definitivamente fueron aquellos estudiantes que analizaron las diferencias entre la forma y desplazamiento de los picos, mencionando variables físicas, químicas y electrónicas, como el ruido de señal, la construcción de la celda electroquímica, la ausencia de burbujeo con gas inerte, la cinética lenta de transporte de masa, y la calidad de los electrodos, quienes no mencionaron estas respuestas con la suficiente calidad, se catalogaron con un nivel avanzado.

En términos generales, en este segundo estudio de caso se hallaron muchas dificultades al momento de resolverlo, esto incluso manifestado por los estudiantes sin haberlo leído por primera vez, reforzando la idea que propone Gómez y Lavín, (2016), que afirma que la electroquímica es considerada difícil y compleja para los estudiantes, cuyo aprendizaje es mediado por el gran esfuerzo que ellos realizan para comprender. La raíz de este comportamiento radica en la naturaleza misma de la química, la cual posee terminologías de difícil

comprensión, si no se es atento. Sin embargo, la misma creación del estudio de caso puede no haber sido el problema en su totalidad, pues se siguió una propuesta de evaluación auténtica según Wiggins (1998) y Newmann et. al, (2007) al aplicar problemas de la vida real, donde tengan que enfrentarse a resolver situaciones y tomar decisiones que enfrentarían en la vida profesional, y en este caso, el estudio de caso se fundamentó especialmente en los propios resultados experimentales del potencióstato construido, con el añadido de involucrar la electroquímica como campo de estudio analítico para generar teorías, reconstruir conceptos y reestructurar ideas o concepciones que incluso son incorrectas. Los estudiantes quizás se encontraron con vacíos conceptuales que llevaron desde su formación incluso antes de las asignaturas de fisicoquímica, y es ahí donde el desconocimiento de bases teóricas influye en la comodidad de ellos para resolver el estudio de caso.

Sin embargo, los estudiantes comprendieron conceptos de la CV, pues se identificó el concepto de pico catódico y anódico, las partes de un potencióstato, qué se debería hacer para hacer una práctica electroquímica relacionada, y las variables que afectan la forma de un ciclovoltamperograma, tanto que, si el grupo expondría sobre el tema, a pesar de la simplicidad de los conceptos, es posible argumentarlos desde su propia comprensión y sus propias palabras, y esto se vio en las respuestas de los estudios de caso e incluso en las propias afirmaciones que realizaban en las intervenciones, sustentando lo que Moretta (2016) afirma, al decir que la abstracción y comprensión de un tema se prueba cuando debe presentar el tema en un futuro, no de manera rígida, sino de manera precisa y clara.

En ese orden de ideas, se puede hipotetizar que la forma en el que se enseñó el tema fue más acercada a lo tradicional que a lo innovador, sin embargo, el objetivo del proyecto no es rechazar en su totalidad la implementación de estrategias tradicionales para enseñar temas, pues no se puede desconocer que incluso se puede fomentar el aprendizaje con ideales tradicionales como docentes. Para sustentar esto, Newmann et. al, (2007) enfatizan críticamente que el objetivo de una instrucción y evaluación auténtica no consiste en

reemplazar las estrategias didácticas y la manera de evaluar tradicionales, puesto que hay algunas habilidades que deben ser evaluadas como tal, dando a entender que es imposible abandonar los ideales tradicionales incluso con el docente más innovador y el grupo de estudiantes más auténtico, el punto es saber manejar un equilibrio y justificar cuáles actividades se mirarían desde una perspectiva auténtica y cuales desde lo tradicional.

Asimismo, el instrumento del segundo estudio de caso no puede catalogarse como tradicional, uniforme y poco innovador, pues como lo afirma Newmann et. al (2007) al evitar ser una actividad de memorización y sí de análisis con un contexto real, evitando contextos alejados a la experiencia de los estudiantes, se puede reafirmar que el estudio de caso no ha sido el causante de las respuestas catalogadas con nivel intermedio. Lo que sí pudo haber sido el origen de esas respuestas es la motivación y los imaginarios de los estudiantes al enfrentarse a un campo difícil de química como lo es la electroquímica, incluso la frustración al no comprender pudo haber jugado un papel clave en la resolución de este estudio de caso, o problemas de manejos de tiempos al solucionar el mismo. Para confirmar y justificar realmente si la motivación o la dificultad del tema influyó en las respuestas del estudio de caso, se confirmará con la entrevista final al retroalimentar el proceso de aprendizaje de cada estudiante.

8.4 Entrevista final

Como última intervención se implementa una entrevista final hacia los 6 estudiantes del espacio sistemas fisicoquímicos II, Siendo una entrevista semiestructurada aplicada de forma individual teniendo en cuenta tres pilares fundamentales previamente mencionados que corresponden a un eje Disciplinar, reflexivo y motivacional-actitudinal. A continuación, tenemos los resultados de la rúbrica de evaluación aplicada.

Criterio	Nivel de desempeño			
	Excelente	Avanzado	Intermedio	Básico
Motivación y compromiso con el proyecto (Motivacional)	2	2	2	
Dominio conceptual sobre las técnicas	1	2	3	

electroquímicas (Disciplinar)				
Conocimiento instrumental y su aplicación (Disciplinar)	2	2	1	1
Reflexión sobre su labor docente y la enseñanza de la electroquímica (Reflexivo)	2	2		1
Comprensión de conceptos fisicoquímicos (Disciplinar)	2	2	1	1
Integración entre teoría y práctica (Disciplinar)	3	2		1
Aplicaciones de técnicas electroquímicas y su relación con su proyección profesional a nivel disciplinar (Reflexivo y motivacional- actitudinal)	4	2		

Tabla 13. Resultados de la rúbrica aplicada a la entrevista final

El objetivo de esta entrevista semi estructurada es evaluar la retención de los conceptos trabajados en las intervenciones previas. Asimismo, se indaga nuevamente en las motivaciones de los estudiantes y sus perspectivas sobre la técnica, con el fin de evidenciar si hubo cambios en éstas. Finalmente se busca reflexionar sobre en qué medida el trabajo realizado ha contribuido a su desarrollo personal y profesional.

Con respecto al eje disciplinar la rúbrica de evaluación aplicada nos muestra que la mitad de los estudiantes estuvieron entre un nivel de desempeño excelente y avanzado y entre dos a un estudiante estuvieron en el nivel de desempeño intermedio y básico, en base a este eje se realizaron las siguientes preguntas a los estudiantes:

- Explique con sus palabras el funcionamiento del potencióstato en la ejecución de la CV
- ¿Cuáles son las variables que influyen en la forma o estructura del ciclo voltamperograma?
- Describa la función de cada uno de los electrodos del potencióstato de bajo costo, indicando su papel en la medición de variables físicas relacionadas a la CV.

- ¿En qué casos usaría la técnica de CV?

A continuación, veremos una comparación entre la respuesta de una estudiante catalogada en excelente y un estudiante con un tipo de respuesta intermedio a la pregunta: Explique con sus palabras el funcionamiento del potencioestado en la ejecución de la CV.

- *“De lo que recuerdo, es el dispositivo es más importante, ya que es el cerebro de la técnica, y va a permitir leer todas las señales, en este primeramente se construye la celda en la que estarán los electrodos: referencia, trabajo y contraelectrodo, ellos llevaran las señales al potencioestado, este tiene un amplificador operacional que envía y permite la lectura, para ello también se necesita dos software que retiene los datos y otro el que les permite graficar el ciclo voltamperogramas.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*
- *“El potencioestado controla el voltaje cuando se realiza el experimento, y la corriente que fluye sobre el electrodo, y el dispositivo está conectado a los electrodos, se conecta a un computador para poder hacer la gráfica.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

Podemos ver que la primera respuesta es clara y específica sobre el potencioestado y su importancia en la técnica, el estudiante logra reconocer cuál es su papel y como debe ser utilizado en un laboratorio, mencionando que debe estar conectado a los electrodos y debe tener dos software que le permita tratar los datos hasta obtener el gráfico, el estudiante logra oportunamente recordar la intervención de la sesión de laboratorio donde se realizó la experiencia ilustrativa, como lo explica Caamaño (2002), esta experimentación permite al estudiante interpretar un fenómeno, reconocer variables y aprender procedimientos. Por otro lado, el estudiante clasificado en el nivel de desempeño intermedio logra identificar el potencioestado y uno de sus roles principales (controlar el voltaje), mencionando adicionalmente otros elementos esenciales del montaje, como los electrodos y la conexión a un equipo donde lleguen los resultados de la lectura. Pese a que su explicación es general y no profundiza en los detalles, el estudiante logra relacionar la experiencia ilustrativa con la función del potencioestado en un laboratorio.

En la siguiente pregunta sobre las variables que influyen en la forma o estructura del Ciclovoltamperograma, se evidencia que la mitad de los estudiantes poseen una idea de los conceptos, pero lo expresan con inseguridad o duda. Sin embargo, los resultados de la rúbrica demuestran que la otra mitad de los estudiantes tiene un amplio dominio de la técnica, por lo cual estos fueron catalogados en un nivel excelente o avanzado según la rúbrica y la otra mitad se sitúa en un nivel intermedio.

Por consiguiente, analizaremos algunas de las respuestas proporcionadas por los estudiantes a esta pregunta para ilustrar estos distintos niveles de desempeño:

- *“Que me acuerde, la viscosidad del electrodo podría generar alteraciones al ciclovoltamperograma, mmm me acuerdo de que se mencionó las vibraciones por el sonido, interferencia, la temperatura, la concentración del analito y pH generan interferencias, no logro recordar más.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*
- *“Hay varias, una podría ser la concentración del analito, la viscosidad, el área del electrodo, el pH del sistema, la temperatura, la velocidad de barrido, y el estado del electrolito soporte y los electrodos, todos estos afectan la forma del CV por ejemplo, el área y el estado del electrodo influye en la reversibilidad del sistema al acumularse los productos de reacción, esta se ve afectada y se traduce en picos de corriente más altos, la variación de pH puede alterar las posiciones de los picos moviendo los picos a datos más negativos.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

Al comparar ambas respuestas, se observa un claro contraste en los niveles de desempeño. La primera que fue clasificada como un nivel de desempeño intermedio refleja un reconocimiento general de las variables que afectan el ciclo voltamperograma y con falta de articulación. En cambio, la segunda que corresponde a un nivel excelente se distingue por una explicación detallada y

creando ejemplificaciones, como el mencionar que el pH puede afectar o desplazar los picos.

Continuando con este eje, se formularon dos preguntas anteriormente mencionadas, la primera solicitaba describir la función de cada electrodo y su papel en la técnica, mientras que la segunda indagaba sobre la aplicación de la voltamperometría en diferentes contextos. Al analizar las respuestas se evidenciaron dificultades significativas en la descripción de los roles específicos de los electrodos, los resultados mostraron una clara división en el desempeño, aproximadamente la mitad de los estudiantes respondió de manera adecuada, mientras que la otra mitad presenta errores conceptuales importantes, esto se evidencia en las siguientes respuestas:

- *“El electrodo de trabajo, el auxiliar, el de referencia. Hay uno de carbono vítreo, el otro es de plata / cloruro de plata y el último era de platino”. (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*
- *“El electrodo de trabajo es el principal donde ocurre la reacción, el electrodo de referencia nos ayuda a mantener el potencial constante y el auxiliar que completa el circuito”. (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*
- *“Primeramente, esta técnica posee los 3 electrodos, el de trabajo, referencia y auxiliar. Ustedes tenían un electrodo de carbono vítreo, y el de platino, cloruro de plata. Los 3 deben estar en contacto en la solución el electrodo de referencia es quien permite medir el potencial aplicado al electrodo, el auxiliar es quien circule la corriente, y el de trabajo no recuerdo.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

Las respuestas obtenidas por parte de los estudiantes revelan una comprensión básica del componente, por un lado, la primera respuesta se limita en enumerar los electrodos y sus materiales, sin explicar sus funciones reflejando poca comprensión y que solo pudo memorizar el material pero no su rol, esta respuesta fue catalogada como básica, por otro lado la tercera respuesta tiene una comprensión fragmentada, por un lado el estudiante recuerda los 3 electrodos y su papel en la solución y sistema, sin embargo comete errores conceptuales, al afirmar que el electrodo de referencia permite medir el potencial,

por lo cual fue catalogada de nivel intermedio. Recordando a González-Hernández, J., & García-Céspedes, J. (2024) una celda electroquímica cuenta con 3 electrodos, el electrodo de trabajo (WE) es donde ocurre la reacción de interés, electrodo de referencia (ER) que mantiene un potencial constante para medir y controlar el potencial y por último el contraelectrodo (EC) que completa el circuito permitiendo el flujo de corriente. Según esta información vemos que la segunda respuesta es la única acertada y conceptualmente sólida, ya que el estudiante no sólo recuerda, sino que sintetiza correctamente su función en la técnica por lo que fue catalogada como avanzada.

Estas mismas dificultades conceptuales se manifestaron al responder la pregunta “¿En qué casos usaría la técnica de voltamperometría cíclica?” El objetivo de esta pregunta es evaluar la capacidad de los estudiantes de relacionar la técnica en diversas áreas del conocimiento y aplicaciones. A continuación, se presentan algunas de las respuestas proporcionadas por los estudiantes.

- *“Lo usaría para análisis de materiales, mecanismos de reacciones, transporte de masa, estudiar la cinética, también principales funciones determinar concentraciones estudiar reversibilidad”. (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*
- *“La aplicaría como les había comentado la usaría en un laboratorio y en mi formación docente y aprovecho a decir que es un tema bastante complejo, para mí, creo que es más fácil tener situaciones cotidianas y aplicarlos en ellas, por ejemplo, los estudios de caso presentados, la usaría para un tema analítico como el tratamiento aguas, determinar concentraciones, entre otros.” (Estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II, 2025).*

Estas respuestas evidencian un desempeño diferenciado en la capacidad de los estudiantes para contextualizar y aplicar el conocimiento electroquímico en escenarios educativos y experimentales. La primera respuesta enumera aplicaciones técnicas y demuestra dominio conceptual, pero se mantiene en un nivel descriptivo sin ser explícito y lo relaciona netamente a un campo investigativo, siendo una respuesta catalogada en nivel avanzado puesto que

logra reconocer diferentes aplicaciones. Por otro lado, la segunda respuesta si bien reconoce la complejidad del tema propone aplicaciones en contextos cotidianos recalcando el contexto del primer estudio de caso el cual fue tratamiento de agua, sin embargo, el estudiante no logra proponer más aplicaciones o ver viabilidad en otros contextos.

Desde la perspectiva del eje motivacional-actitudinal, se implementaron las siguientes preguntas con el propósito de evaluar, a nivel cualitativo, los aspectos que pueden consolidarse durante el proceso de enseñanza-aprendizaje. Es importante resaltar que, durante la primera intervención, la motivación y actitud de los estudiantes se caracterizó por tener interés por aprender sobre la técnica de la voltamperometría cíclica, debido a que para muchos este era un tema desconocido. Asimismo, ese primer instrumento dejó entrever que la gran mayoría de estudiantes desconoce la electroquímica y no veía probable su aplicación en un contexto profesional.

- Durante el proceso de aprendizaje de la técnica de ciclo voltamperometría ¿Esto lo ha incentivado a seguir aprendiendo o estudiando electroquímica?
- Los instrumentos aplicados como lo son: Los estudios de caso, la entrevista, el taller fundamentado en la experimentación ilustrativa, las intervenciones y socializaciones en clase ¿aportaron a su formación académica y profesional?

Con referencia a estas dos preguntas planteadas 4 estudiantes fueron clasificados en un nivel de desempeño entre excelente y avanzado, por otro lado de dos a una persona en nivel intermedio, por consiguiente, analizaremos algunas de las respuestas de los estudiantes a la primera pregunta y las compararemos con las respuestas obtenidas en la primera intervención:

- *“Quiero aprender mucho, particularmente se enfatiza en poder enriquecer las prácticas de la universidad y que básicamente no se han aplicado o enseñado durante la carrera, pienso que son fundamentales para el desarrollo y aprendizaje para uno como estudiante. Los temas analíticos son de mucha importancia para uno como estudiante de química y ayudan*

a enriquecer esa parte en el manejo de los equipos y conocimiento de las técnicas.” (Estudiante Sistemas Físicoquímicos II)

- *“Si me ha incentivado y digamos en la clase del profesor estamos viendo un tema similar, me ha incentivado más sobre los conceptos, ya que siento que el aprendizaje puede ser frenado debido a vacíos conceptuales o matemáticos ya que no hay conceptos claros, pero estuve estudiando bastante para esta temática”. (Estudiante Sistemas Fisicoquimicos II)*

Respuesta de otro estudiante que corresponden a la etapa inicial y la etapa final.

- *“Nunca he escuchado de eso, aprender algo nuevo puede motivarme pero la verdad soy muy malo en esta área, se me dificulta mucho, por la matemática y etc”. (Estudiante Sistemas Fisicoquimicos II)*
- *“Siendo muy sincero, la verdad no, no es feo el tema que enseñaron y me gusto como lo trabajaron pero es difícil para mí ya que no entiendo la electroquímica y no sería un campo en el que me enfocaría”. (Estudiante Sistemas Fisicoquimicos II)*

Al analizar las respuestas de los estudiantes se observan dos posturas diferentes con respecto a su motivación por aprender.

En el primer caso, el estudiante demuestra un alto nivel de compromiso e intereses desde la etapa inicial, este interés se manifiesta en su expectativa de enriquecer sus conocimientos y mejorar. Al comparar esta postura inicial con la final se evidencia una evolución positiva, ya que el estudiante afirma que lo ha incentivado a profundizar sus aprendizajes y subsanar vacíos conceptuales que se pueden presentar en el camino, por otro lado menciona que ha estudiado de forma autónoma y proactiva, centrándose en comprender los fundamentos para facilitar el aprendizaje, por la claridad y coherencia con las que expresa sus ideas esta respuesta es catalogada en el nivel de desempeño excelente.

Por otro lado, el segundo estudiante presenta una motivación incierta o baja desde la primera intervención. Expresa abiertamente sus limitaciones y falta de afinidad con la electroquímica, una actitud que se mantiene constante desde la primera entrevista hasta la última intervención.

La motivación, como lo explica Moretta (2016), es un requisito fundamental para el desarrollo del aprendizaje y el deseo de aprender, ya que está intrínsecamente

ligada a las necesidades individuales y las perspectivas futuras de los estudiantes. Este factor puede incentivar a un aprendizaje más efectivo; pero del mismo modo, su ausencia puede complicar significativamente el proceso, ambos casos se ven en las respuestas analizadas, la motivación es un sentimiento personal e individual, moldeado por la historia y experiencias previas de cada persona, podemos en nuestra labor docente tener estudiantes tal vez con un pasado marcado por fracasos continuos que dificultad el aprendizaje y que han afectado su autoestima, frente a esto se espera que los docentes adoptemos una actitud motivadora.

En este trabajo, se intentó motivar y reforzar positivamente a los estudiantes para mejorar su autoestima y fortalecer su aprendizaje. La estrategia utilizada fue utilizar diferentes herramientas como lo es la evaluación auténtica y los estudios de caso para motivar y avanzar progresivamente en las actividades. Cada una de las actividades planteadas en este trabajo fue diseñada con metas y objetivos específicos, buscando incentivar al estudiante a enfrentar nuevas tareas y aumentar el nivel de dichas actividades paulatinamente.

Si bien en el segundo caso no se logró motivar al estudiante, como educadores también debemos afrontar los fracasos como parte de la realidad humana en el proceso de enseñanza. Esta situación se evidencia en los resultados de esta actividad donde obtuvimos niveles de desempeño bajos o intermedios en el eje disciplinar, puede considerarse como lo que Moretta (2016) conceptualiza como un “eventual fracaso”, el cual debe ser afrontado como una experiencia más del proceso educativo.

La siguiente pregunta en el instrumento que corresponde: Los instrumentos aplicados como lo son: Los estudios de caso, la entrevista, el taller fundamentado en la experimentación ilustrativa, las intervenciones y socializaciones en clase ¿aportaron a su formación académica y profesional?. Tuvo como objetivo identificar y analizar la motivación de los estudiantes con un doble propósito, que corresponde a evaluar la utilidad de las estrategias e instrumentos utilizados en su proceso y segundo explorar su intención de implementar dichas estrategias en su futuro docente. A continuación, algunas de las respuestas a esta pregunta.

- *“Yo creo que sí, digamos el último estudio de caso, me pareció interesante y chévere, ya que es un área de la electroquímica de forma integral, ya que tenía química orgánica y eso me gusta mucho, me llama la atención, es motivante para aprender más electroquímica, y es motivante ya que es un tema no muy sencillo pero de cierta manera sí es difícil se crea un reto a entender el fenómeno y seguir consultando, realmente una herramienta podría ser coger la técnica y aplicarlo en un contexto, como los estudios de caso.” (Estudiante Sistemas Fisicoquímicos II)*
- *“Mmm, yo creería que sí, ya que el simple hecho de aplicar estudios de caso hace que sea más aplicable y realista, poner situaciones en contexto, me parece pertinente, son herramientas para cuando uno ejerce y aporta a la formación.” (Estudiante Sistemas Fisicoquímicos II)*

Las respuestas de los estudiantes evidencian una clara afinidad con la metodología de estudios de caso como instrumento de aprendizaje. Según sus respuestas, esta herramienta resulta motivadora por su carácter interdisciplinar y su vinculación con situaciones reales, lo que coincide con lo señalado por Basantes Vaca et al. (2024) respecto a que el abordaje de la química suele percibirse como complejo, pero, los estudios de caso representan una estrategia que promueve habilidades y fomenta el aprendizaje. Ambas respuestas destacan el valor de la metodología para generar motivación a través de la aplicación práctica y la resolución de problemas en contextos reales. Asimismo, los estudiantes manifiestan explícitamente su intención de utilizar esta metodología en su rol docente. Las respuestas a esta pregunta dan como resultado que 4 estudiantes relacionan la electroquímica con problemas reales en industrias o ciencia, mostrando motivación y visualizando su uso en el ámbito profesional mediante estudios de caso, y 2 de los estudiantes valoran la metodología usada como los estudios de caso, pero no profundizan en la explicación a lo cual se clasificaron en un nivel de desempeño avanzado. Para finalizar, el eje reflexivo fue evaluado por medio de dos criterios en la rúbrica, a lo cual se implementaron las siguientes preguntas:

- ¿Hubo retroalimentación constante de su proceso de aprendizaje?

- Asígnese una calificación con base en su participación, motivación, interés por aprender, de 1 a 5 (siendo 1 la calificación más baja, y 5 la más alta).
- Asigne una calificación a los tesisistas con base en el dominio del tema, los instrumentos aplicados, la metodología de trabajo y la didáctica implementada, de 1 a 5 (siendo 1 la calificación más baja, y 5 la más alta).

La primera pregunta de este eje buscó que los estudiantes manifestarán si recibieron retroalimentación constante durante su proceso de investigación. El propósito de esta no es evaluarlos a ellos, sino autoevaluar nuestra práctica docente, reconociendo que la retroalimentación constante es un indicador clave de una evaluación auténtica, orientada al crecimiento y no solo a la clasificación.

En este trabajo, el proceso evaluativo es fundamental, ya que se encuentra ligado a la enseñanza y el aprendizaje. a continuación, veremos algunas de las respuestas por parte de los estudiantes:

- *“Si, en todas las sesiones se retroalimentó los estudios de casos, me gustaron ya que no fueron retroalimentaciones comunes, sino que fue de forma grupal e individual, digamos hubo una retroalimentación activa y eso nos ayudó y facilitó a recordar los principios fundamentales.” (Estudiante Sistemas Fisicoquimicos II)*
- *“Particularmente si, ya que pregunto un montón y los 3 estuvieron al tanto de responder mis preguntas, recuerdo donde me respondieron una pregunta importante e incluso me enseñaron más de la temática debido a mi pregunta y también hubo la retroalimentación de los estudios de caso, también se corrigieron y además de eso me gusto que enfatizaron cosas buenas o respuestas buenas que di.” (Estudiante Sistemas Fisicoquimicos II)*
- *“Si y no, ya que no pude estar en la primera intervención y en las siguientes sesiones sentí que no nos pudimos ver de forma constante por tema de tiempo, pero siento que eso se salía de las manos de ustedes, después de la sesión del laboratorio si se logró una retroalimentación*

constante tanto en el aula como fuera de ella” (Estudiante Sistemas Físicoquímicos II)

Estas respuestas dejan en evidencia cómo fue el proceso retroalimentación en el aula, cabe resaltar que las 3 respuestas corresponden a un nivel de desempeño excelente, puesto que tomaron una posición y justificaron su respuesta. En este trabajo, el proceso evaluativo tiene gran importancia puesto que se encuentra intrínsecamente ligado a la enseñanza y aprendizaje. Como señala Ahumada (2005), la retroalimentación es fundamental en un modelo de evaluación que busca generar aprendizaje, esto exige al maestro mantenerse activo y atento al progreso, implicando identificar carencias, dudas y necesidades de corrección. Las dos primeras respuestas de los estudiantes confirman que hubo una retroalimentación constante de forma individual y grupal, preguntando varias veces si hay dudas y atendiendo cualquier tipo de pregunta generada, además de ello los estudiantes recibieron retroalimentaciones de todas las actividades realizadas de forma presencial y también vía correo, como lo señala una respuesta, se retroalimentó y a la vez también se destacaron aspectos positivos de cada una de sus intervenciones, siguiendo con lo mencionado por Ahumada (2005), la presencia de errores es una parte natural del aprendizaje, el rol docente no es solo señalarlos sino conducir a que el estudiante mejor, también destacando sus logros. Por otro lado, la tercera respuesta exhibe como la falta de constancia o de más intervenciones pudo afectar el proceso de retroalimentaciones, esto hace parte también de las limitaciones de esta investigación, pero de igual forma el estudiante recalca que en las actividades que estuvo hubo una retroalimentación constante.

Continuando con el componente reflexivo, se solicitó a los estudiantes que se autocalificaran en una escala de 1 a 5, según su nivel de participación, motivación e interés durante el proceso de aprendizaje. El propósito de esta actividad fue fomentar un ejercicio de autorreflexión y autoevaluación crítica que les permitiera analizar su propio desempeño, identificar áreas de mejora y reconocer sus logros. Es importante destacar que junto con la asignación numérica los estudiantes argumentaron su calificación. A continuación, algunas de sus respuestas.

- *“4.5 siento que desde el primer día de aplicación estuve muy pendiente preguntando, averiguando ya que era algo muy nuevo y no teníamos ni idea del tema, pero a pesar de que era un tema nuevo tuve mucho interés, estuve revisando y estudiando continuamente” (Estudiante Sistemas Fisicoquímicos II)*
- *“3.0 debido a que no pude asistir a todas las retroalimentaciones y no me esforcé tanto en aprender, entregue algunas cosas tarde y siento que me quede en lo básico y no me esforcé” (Estudiante Sistemas Fisicoquímicos II)*

Estos resultados resultan esenciales, ya que revelan no sólo el nivel de autoconciencia de su proceso, sino que también enriqueció la interpretación de los resultados al proporcionar contexto y profundidad sobre su proceso en este trabajo. El análisis de las autoevaluaciones revela dos posturas contrastantes respecto al compromiso con el proceso de aprendizaje, en la primera respuesta, el estudiante se otorga una calificación de 4,5 fundamentando que tuvo una participación activa y un estudio autónomo constante, como lo expresa al decir - “siento que desde el primer día de aplicación estuve muy pendiente preguntando” esta declaración refleja motivación y alto grado de conciencia sobre su propio esfuerzo y dedicación en el trabajo realizado. Por el contrario, el segundo estudiante adopta una postura más crítica hacia su desempeño, asignándose un 3.0, argumentando de forma autocrítica y reflexiva al reconocer explícitamente sus falencias “no me esforcé tanto por aprender”. Si bien esta respuesta evidencia bajo nivel de compromiso, resulta significativo puesto que estaría demostrando que un bajo rendimiento en el área disciplinar es afectado por la motivación y compromiso del estudiante al aprender esta área de conocimiento. Como señala Moretta (2016), existe una interdependencia entre los factores como lo serían la motivación y el interés en el proceso de aprendizaje, aunque esto puede variar, el autor enfatiza que para que un estudiante dedique tiempo y esfuerzo necesarios para dominar un área temática es crucial que desde la fase inicial del proceso se hayan desarrollado niveles suficientes de motivación e interés, puesto que estos elementos potencian que el estudiante sea comprometido y logre colaborar de forma favorable en su proceso.

Finalmente, como última pregunta, se solicitó a los estudiantes que evaluaran a los tesisistas mediante una calificación basada en cuatro criterios: dominio del tema, los instrumentos aplicados, la metodología de trabajo y la didáctica implementada. Este ejercicio tuvo como objetivo principal valorar la efectividad de la estrategia didáctica aplicada en el proyecto, y asimismo identificar y reflexionar sobre aspectos de mejora. en la tabla 14, algunas de las respuestas por parte de los estudiantes y el promedio ponderado de la calificación:

Nota de evaluación de los tesisistas:

Estudiante #1	Estudiante #2	Estudiante #3	Estudiante #4	Estudiante #5	Estudiante #6	Ponderado
4.9	5	4.7	5	4.6	4.7	4.8

Tabla 14. Ponderado de notas asignadas por los estudiantes a los tesisistas.

- *“5, de verdad los felicito, es un tema complicado, había información falsa, incluso falta de información para enseñar la temática y buscaron como poder enseñarla de buena forma, además invirtieron dinero para la construcción del equipo, hay parte didáctica importante a la hora de enseñar y las actividades que propusieron”. (Estudiante Sistemas Fisicoquimicos II)*
- *“4.6 , ya que me gusto mucho el trabajo, pero me hubiera gustado que nos viéramos más o sea más intervenciones, hay buen manejo del tema, me gusta que hayan traído una técnica nueva, los talleres me gustaron y las actividades pero el último fue muy disciplinar” (Estudiante Sistemas Fisicoquimicos II)*

De acuerdo con las respuestas y calificaciones asignadas por los estudiantes, es posible identificar tendencias significativas en su percepción. En primer lugar, varios estudiantes reconocen y valoran positivamente el compromiso de nuestro trabajo, así como la metodología y didáctica implementada. Por otra parte los estudiantes manifestaron que una de las mayores limitaciones es el tiempo, ya que según los estudiantes afectó el desarrollo óptimo de algunas actividades. No obstante, también los estudiantes destacan el dominio temático manifestando “hay buen manejo del tema” o “es un tema complicado, había información falsa, incluso falta de información para enseñar la temática y buscaron como poder

enseñarla de buena forma”. Un factor importante y que fue mencionado es con relación al último estudio de caso aplicado, calificado por varios estudiantes como “demasiado complejo”. Esta percepción coincide con las dificultades observadas durante su implementación, donde los estudiantes manifestaron tener complicaciones para resolverlo, posiblemente a que requería amplio conocimiento y compromiso para resolverlo.

Para finalizar este apartado, la comprensión de los fundamentos de la Voltamperometría cíclica experimentó una transición significativa, puesto que tuvo en ella la integración de estudios de caso y la experimentación ilustrativa con un potencióstato de bajo costo. Inicialmente los estudiantes percibían los conceptos teóricos como abstractos o desconectados de aplicaciones reales. Sin embargo, al enfrentarse a estudios de caso interdisciplinarios que vinculan la técnica con otras áreas los estudiantes comenzaron a construir una comprensión integral y contextualizada, donde la mayoría logra reconocer la técnica y al menos un campo de aplicación. La experimentación con el potencióstato por otro lado les permitió visualizar y reconocer variables clave, transformando principios teóricos con en experiencias tangibles, en lo cual se ven gratos resultados al taller con respecto a la experimentación ilustrativa donde los estudiantes recuerdan y reconocen el montaje de laboratorio y la importancia del equipo para la aplicación de la técnica. La motivación estudiantil evolucionó desde un interés inicial basado en la novedad del tema hacia un compromiso y rigurosidad que exige el dominio conceptual de la misma. Los instrumentos utilizados como los estudios de caso con escenarios realistas y el uso del equipo generaron al menos sobre más de la mitad de los estudiantes una motivación intrínseca. No obstante, la motivación mostró un carácter dinámico y sensible a factores externos, como la limitación de tiempo, la complejidad creciente de las actividades y falta de interés o afinidad a la técnica desde el principio hasta el final de las sesiones. Aquellos estudiantes que lograron superar estos obstáculos demostraron tener una motivación basada en la autonomía y el dominio de la técnica, mientras que una pequeña parte de los estudiantes experimentó falta de compromiso y dificultades a la hora de resolver los estudios de caso particularmente.

La reflexión se consolidó en este trabajo mediante la implementación de estrategias de evaluación auténtica, que promovieron la autocrítica, la aplicación y las planificaciones de aprendizaje, a través de retroalimentaciones continuas que permitieron a los estudiantes mejorar y fortalecer conceptos. Además, se aplicaron los estudios de caso que contenían una naturaleza reflexiva al poner a prueba sus conocimientos y vincular evaluación con aprendizaje. La evolución observada en este proceso sigue un patrón progresivo, donde la interacción entre los estudios de caso, experimentación ilustrativa y evaluación auténtica generó un ambiente de aprendizaje que transformó la comprensión conceptual de lo abstracto hacia lo aplicado, al tiempo que amplió las fuentes de motivación privilegiando el interés sobre la obligación, se desarrollaron capacidades reflexivas esenciales para la autoevaluación y mejora continua. Este proceso demostró cómo la interacción dinámica entre estos componentes crea las condiciones óptimas para la apropiación de conocimientos complejos facilitado por la evaluación auténtica.

CONCLUSIONES

La implementación de una evaluación auténtica, centrada en el desarrollo de la comprensión, la reflexión y la motivación en los estudiantes de Sistemas fisicoquímicos II, mediante estudios de caso y la experimentación ilustrativa vinculada a la construcción de un potencióstato de bajo costo, logró generar un ambiente educativo altamente efectivo. Este enfoque les permitió a los estudiantes abordar los fundamentos de la técnica Voltamperometría Cíclica, como se evidencia en su capacidad de reconocer la técnica, identificar variables, relacionarla con distintos contextos y comprender tanto sus principios como el rol del potencióstato. Los resultados demuestran que esta metodología fomenta no sólo una comprensión conceptual, sino una reflexión profunda sobre la aplicación y su proceso educativo.

El análisis de las entrevistas proporcionó información valiosa sobre las actitudes y motivaciones de los estudiantes, destacando la importancia crucial de estos factores en el aprendizaje de una técnica electroquímica. Si bien los estudiantes lograron abordar los fundamentos de la Voltamperometría Cíclica y sus elementos conceptuales, el estudio dejó en evidencia que la motivación actúa como un pilar fundamental. La información obtenida establece una correlación directa entre la disposición del estudiante y la capacidad para superar los desafíos de una temática compleja, reafirmando el papel central de la motivación en el proceso cognitivo.

La actividad de experimentación ilustrativa en el laboratorio resultó fundamental para la comprensión. A través de esta experiencia, los estudiantes lograron reconocer y caracterizar las variables fisicoquímicas y electrónicas esenciales para el funcionamiento y diseño de un prototipo de potenciostato. Este acercamiento práctico les permitiría explicar su funcionamiento tanto de forma general como específica y reconocer el montaje experimental requerido para la obtención de un ciclovoltamperograma, consolidando así el puente entre teoría y práctica.

La aplicación de estudios de caso permitió determinar el nivel de comprensión teórica del grupo, situando a la mayoría de los estudiantes en un nivel de descripción e interpretación general de los ciclovoltamperogramas, mediante esta herramienta los estudiantes lograron interpretar estos gráficos e identificar los factores que afectan su lectura. La exposición a problemáticas diversas generó reflexiones en los estudiantes dejando en evidencia que esta metodología es una herramienta importante para integrar técnicas complejas en contextos reales y significativos para el estudiante.

El prototipo de potenciostato fue de gran utilidad para identificar picos anódicos y catódicos de un ciclovoltamperograma, además de contribuir a la formulación de hipótesis relacionadas con el transporte de masa y la robustez del equipo. El potenciostato fue configurado para realizar Voltamperometrías cíclicas, sin embargo, para otro tipo de voltamperometrías, sería necesario reajustar variables y el propio circuito para llegar a otro tipo de resultados de interés. Si se

desea utilizar el equipo para monitorear analitos de manera analítica, se deben controlar variables como la concentración, el estado de los electrodos y la interferencia de campos electromagnéticos para aumentar la confiabilidad de los datos obtenidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahumada, A. (2005). La evaluación auténtica: Un sistema para la obtención de evidencias y vivencias de los aprendizajes. *Perspectiva Educacional, Formación de Profesores*, 45, 11-24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333329100002>
- Alfaro, M., y Alfaro, I. (2017). Construcción de un potenciostato de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: Determinación del potencial de corrosión y mediciones cronoamperométricas. *Electrochimica Quimica*, 53, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2017.05.006>
- Álvarez, I. (2005). Evaluación como situación de aprendizaje o evaluación auténtica. *Perspectiva Educacional: Formación de Profesores*, 45, 45–68. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Anaya Aranda, Jacinto (2019). *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Optimización, diseño y desarrollo hardware de un potenciostato para la adquisición de señales electroquímicas*. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/688824/anaya_aranda_jacinto_tfm.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bard, A. J., y Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons. https://www.academia.edu/15060550/Allen_J_Bard_Larry_R_Faulkner
- Bravo, A., y Fernández, J. (2000). La evaluación convencional frente a los nuevos modelos de evaluación auténtica. *Psicothema*. <https://www.psicothema.com/pi?pii=524>
- Brown, S. (2015). La evaluación auténtica: El uso de la evaluación para ayudar a los estudiantes a aprender. *RELIEVE*, 21. <http://dx.doi.org/10.7203/relieve.21.2.7674>
- Caamaño, A. (2004). Experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones: ¿Una clasificación útil de los trabajos prácticos? *Alambique*, 39. https://www.researchgate.net/profile/Aureli-Caamano/publication/39207515_Experiencias_experimentos_ilustrativos_ejercicios_practicos_e_investigaciones_una_clasificacion_util_en_los_trabajos_practicos/links/0046352e1460fbb218000000/Experiencias-experimentos-ilustrativos-ejercicios-practicos-e-investigaciones-una-clasificacion-util-en-los-trabajos-practicos.pdf
- Caballer, M. y Oñorbe, A. (1997) Resolución de problemas y actividades de laboratorio.
- Cardona, V. (2016). *Propuesta didáctica sustentada en un modelo de evaluación auténtica para mejorar las prácticas evaluativas de aprendizajes de biología de los estudiantes de la lic. en educación básica con énfasis en ciencias naturales y educación ambiental de la Universidad de Antioquia*.
- Chen, H., Hu, X., y Lu, Y. (2025). Advancing voltammetry education with FreeSim: An interactive toolkit for teaching electrochemical simulation. *Journal of Chemical Education*, 102(10). <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5c01092>

- Climent, V., y Feliu, J. (2015). Cyclic Voltammetry. In J. Reedijk (Ed.), *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.10764-4>
- Codina, L. (2023). *Estudios de caso: Características, tipología y bibliografía comentada*. Lluís Codina. <https://www.lluiscodina.com/estudios-de-caso/>
- Coller, X. (2005). *Estudio de casos*. Centro de Investigaciones Sociológicas.
- Compton, R. y Banks, C. (2011). *Understanding voltammetry* (2nd ed.). Imperial College Press. <https://www.sci epub.com/reference/126253>
- Darling, L., y Adamson, F. (2015). *Beyond the bubble test*. <https://doi.org/10.1002/9781119210863>
- Díaz, W. (2005). *Diseño y construcción de un sistema para voltamperometría potenciostática para análisis de sustancias químicas*. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/6905/Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20sistema%20para%20voltamperometr%C3%ADa%20potenciost%C3%A1tica%20para%20an%C3%A1lisis%20de%20sustancias%20qu%C3%ADmicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Elgrishi, N., Rountree, K., McCarthy, B., Rountree, E., Eisenhart, T., y Dempsey, J. (2017). A practical beginner's guide to cyclic voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 197–206. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>
- Elliott, J. (2010). El “estudio de la enseñanza y del aprendizaje”: una forma globalizadora de investigación del profesorado. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 24(2), 223–242. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=27419198011>
- Evaluación auténtica: Una práctica acorde a las necesidades actuales*. (s. f.). Centro Interuniversitario de Desarrollo. <https://cinda.cl/evaluacion-autentica-una-practica-acorde-a-las-necesidades-actuales/>
- Farid, W., Scarpetta, P., Fernando, J., Gutiérrez, V., Ramírez, A., & Kolosov, E. (s.f.). Síntesis y caracterización voltamperométrica de electrodos platinados dopados con cerio, empleados para la degradación de 4-clorofenol Synthesis and Voltammetric Characterization of Plated Electrodes Doped with Cerium, Used for Degradation of 4-Chlorophenol. *Revista Ciencia En Desarrollo*, 4(2), 49–61. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v4n2/v4n2a07.pdf>
- Galán, C. A., González, J. L., Morales, F., García, M., y Reyes, M. (2018). Desarrollo y evaluación de un potenciostato electrónico digital de bajo costo para la cuantificación de sustancias químicas mediante biosensores amperométricos. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 5(10), 1-6. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5952866032/>
- Gómez, B., Lavín, C. (2016). Enseñanza-aprendizaje de la electroquímica con analogías: una experiencia en el aula. *TABANQUE*. 29, p 189–206 [https://Dialnet-EnsenanzaaprendizajeDeLaElectroquimicaConAnalogias-5772486%20\(1\).pdf](https://Dialnet-EnsenanzaaprendizajeDeLaElectroquimicaConAnalogias-5772486%20(1).pdf)

- Gómez, S., Soria, E., y Vivó, M. (2002). Análisis electroquímico. *Revista de Diagnóstico Biológico*, 51(1), 18-27. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-79732002000100005&lng=es&tlng=es
- González, M. (2010, 22 de noviembre). *Potenciostato*. La Guía de Química. <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/potenciostato>
- González, J., y García, J. (2024). Voltamperometría: Fundamentos electroquímicos y aplicaciones. *Revista de Química*, 38(2), 2-17. <https://doi.org/10.18800/quimica.202402.001>
- Guadalupe, S., Lilia, A., y Rojas, B. (2022). Beneficios del uso de la rúbrica en la enseñanza-aprendizaje del diseño. *Zincografía*. <https://doi.org/10.32870/zcr.v6i11.136>
- Gupta, S. (2019). Transimpedance amplifier - Current to Voltage Converter. *circuitdigest*. <https://circuitdigest-com.translate.goog/tutorial/transimpedance-amplifier-design-working-and-applications? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc>
- Hernández, G., Irazoque, G., y López, N. (2012). ¿Cómo diversificar los trabajos prácticos? Un experimento ilustrativo y un ejercicio práctico como ejemplos. *Educación Química*, 23(1), 101-111. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2012000500003&lng=es&tlng=es
- Hernández, R. (s.f.). Construcción, implementación y calibración de Potenciostato aplicado a mediciones voltamétricas. Tecnológico de Monterrey.
- Kumar, V. (2022) Estalla Quinteros, B. L. (2024). *Diseño e implementación de un generador de señales de radiofrecuencia basado en FPGA SoC para la operación de un transmisor de radar ionosonda en el Radio Observatorio de Jicamarca*
- Mangarin, R. Á., & Macayana, L. B. (2024). *¿Por qué las escuelas carecen de laboratorios y equipos en ciencias? A través de la lente de los estudios de investigación*. RAMyeR Research Consultancy Services; Sto. Tomas National High School. <https://dx.doi.org/10.47772/IJRISS.2024.8100238>
- Martínez-Alonzo, J. M. (2022). *La estrategia de laboratorio como fundamento epistemológico y práctico en la enseñanza de la química básica*. Ciencias de la Educación.
- Mejía, A. R., & De Jesús Hernández-Martínez, A. (2022). Un equipo de electroanálisis base Arduino y su uso en laboratorios de bajo costo. *Educación Química*, 33(4), 14–26. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.4.0.82198>
- Menolasina, S., Campos, R., y Padilla, C. (s. f.). *Comportamiento electroquímico del Triptófano (TRP) en presencia de interferentes empleando un electrodo de carbón vítreo modificado con Tiourea (TIO) y nanopartículas de oro (AuNPs)*. Laboratorio de Investigaciones Electroquímicas, Facultad de Farmacia y Bioanálisis, Universidad de Los Andes.

- Morales, U., López, E., y Otálora, C. (2009). *Scielo*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532010000200002
- Moretta, P. Y. (2016). El proceso de aprendizaje: Fases y elementos fundamentales. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5585727>
- Newmann, F., Bruce King, M., Carmichael, Dana L., (2007). Authentic Instruction and Assessment.
- Owusu, M., Assem, H., Ossei-Anto, T., Ansah, F. y Darko, G. (2024) Desafíos en la comprensión del concepto de reacción redox entre estudiantes de nivel 200 en facultades de ciencias de la educación en Ghana. *Creative Education* , **15** , 2187-2211. doi: 10.4236/ce.2024.1510134 .
- PICTOLAB: Un juego didáctico empleado para la enseñanza y aprendizaje de los materiales y equipos de mayor uso en el laboratorio de ciencias.* (s. f.). <https://www.redalyc.org/journal/3761/376160247005/>
- Politécnica, U., Carrillo, S., Padilla, M., Rosero, J., Villagómez, T., & Sol, M. (2009.) La motivación y el aprendizaje <https://www.redalyc.org/pdf/4677/467746249004.pdf>
- Rábago, S. (2017). *Sistema portátil y reconfigurable para el análisis voltamperométrico cíclico* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio CINVESTAV. <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/2685/SSIT0014864.pdf?sequence=1>
- Ramos Mejía, A. D. los Á. (2020). Enseñar química en un mundo complejo. *Educación Química*, **31**(2), 91. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.2.70401>
- Ramos Mejía, y Alfredo. (2022). Un equipo de electroanálisis base Arduino y su uso en laboratorios de bajo costo. *Educación Química*, **33**(4), 14–26. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.4.0.82198>
- Salcedo, L. y Villarreal Hernández, M., (1999). Concepciones y acciones de los profesores de química sobre la evaluación. *Revista Educación y Pedagogía*, **11**(25), 175–207.
- Sanabria, I., y Arango-Martínez, A. (2021). El método de estudio de casos en la enseñanza de las ciencias naturales. *Praxis & Saber*, **12**(31), e11426. <https://doi.org/10.19053/22160159.v12.n31.2021.11426>
- Segura, F., Jiménez, L. y Giraldo, R. (2016). Prototipo de potencióstato con aplicaciones en procesos electroquímicos. *Entre Ciencia E Ingeniería*, **10**(19), 61–69.
- Smith, J. J. (2022). Low-Cost Potentiostat for Electrochemical Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1-9.
- Sosa, R. y Díaz, J. (2021). *Dificultades en la enseñanza de la electroquímica: una revisión de enfoques alternativos*. *Educación Química*, **32**(2), 45-58.
- Stake, R. E. (1998). *Investigación con estudio de casos*. Ediciones Morata.

- Vaca, C., Gavin, D., Enríquez, C. y Cando, L. (2024). El método de estudio de casos como alternativa pedagógica para en el aprendizaje de Química General en estudiantes de Educación Superior. *dominiodelasciencias.com*. <https://doi.org/10.23857/dc.v10i1.3739>
- Vallejo, M., y Molina, J. (2014). La evaluación auténtica de los procesos educativos. *Revista Brasileira de Educação*, 19(64).
- Vista de ASPECTOS BÁSICOS EN LA INTERPRETACIÓN DE DIAGRAMAS DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA | DYNA. (2025). Unal.edu.co. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/15671/16687>
- Vista de Estudio del circuito de control para un potencióstato con una sola fuente de alimentación | Ingeniería. (2025). <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr//index.php/ingenieria/article/view/59198/62884>
- Vista de Necesidades de formación en investigación de profesores en ejercicio. (2025). Usantotomas.edu.co. <https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/rriep/article/view/2863/2742>
- Wassermann, S. (1994). *El estudio de casos como método de enseñanza*. Amorrortu.
- Wiggins, G. (1998). Ensuring authentic performance. *Educative assessment: Designing assessments to inform and improve student performance* (Cap. 2).
- Yin, R. K. (2014). *Estudio de caso: Diseño y métodos*.
- Zuman, P. (2001). Electrolysis with a Dropping Mercury Electrode: J. Heyrovsky's Contribution to Electrochemistry. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 31(4), 281–289. <https://doi.org/10.1080/20014091076767>

ANEXOS

Anexo #1 Consentimiento informado

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

CONSENTIMIENTO INFORMADO DE PARTICIPACIÓN

Apreciados estudiantes, en aras de aprovechar el espacio académico Sistemas Físicoquímicos II , con toda atención nos permitimos invitarlos a participar en la investigación que se adelanta en el trabajo de grado titulado "**LAS VOLTAMPEROMETRÍAS CILICIAS ABORDADAS MEDIANTE ESTUDIOS DE CASO FUNDAMENTADOS EN LA EVALUACIÓN AUTÉNTICA Y LA EXPERIMENTACIÓN ILUSTRATIVA COMO EJE DE APRENDIZAJE EN QUÍMICA** " realizado por Sergio Esteban Patarroyo Hernández, Juliana Suárez Varela y Kevin Santiago Torralba Molano bajo la responsabilidad de la dirección del profesor Diego Alexander Blanco Martínez.

ACLARACIONES

- Su decisión de participar en el desarrollo de esta Intervención Educativa es completamente voluntaria.
- No habrá ninguna consecuencia desfavorable para usted, en caso de no aceptar la invitación.
- Si decide participar en el desarrollo de esta Intervención Educativa puede retirarse en el momento que lo desee, aun cuando los responsables de la intervención educativa no se lo soliciten, informando las razones de su decisión, la cual será respetada en su integridad.
- No tendrá que hacer gasto alguno durante el trabajo a desarrollar.
- No recibirá pago por su participación.
- En el transcurso del desarrollo de la Intervención Educativa usted podrá solicitar información actualizada sobre el mismo a los responsables de la investigación.
- Los datos personales del participante y la institución serán manejados con absoluta confidencialidad.

En el contexto anterior, indique si desea o no participar en esta investigación. SI ____, NO ____.

Si su respuesta es afirmativa, le solicitamos diligenciar el siguiente instrumento. Es pertinente recordar que, la información recolectada en este instrumento será utilizada única y exclusivamente para fines investigativos, por tal motivo esta no tendrá incidencia en la evaluación de algún espacio académico que usted curse. En caso de ser menor de edad, favor notificar a sus padres o acudientes de la participación en esta investigación.

Yo, _____, identificado con _____, No. _____ he leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria. He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el desarrollo de la Intervención Educativa pueden ser publicados o difundidos con fines académicos una vez que sea finalizada la Propuesta, de Intervención Educativa.

Nombre de Padre o acudiente en caso de ser menor de edad: _____.

Anexo #2 Formato entrevista semiestructurada

Tiempo estimado de duración 25 min (Instrumentos: formato de preguntas y consentimiento informado):

1. ¿Cuáles son sus expectativas con respecto al trabajo de grado? (*primer acercamiento y motivación hacia el tema CV*)
2. ¿Qué técnicas electroquímicas conoce? (*conceptos previos sobre fisicoquímica*)
3. ¿Qué equipos son usados para las técnicas electroquímicas? (*conceptos previos*)
4. ¿Qué estrategias usaría para la comprensión y aplicación de las técnicas electroquímicas en su futura labor docente? (*reflexionar sobre su labor docente*)
5. ¿Qué es la reducción y oxidación de una especie química? (*conceptos previos*)
6. ¿Conoce qué son los potenciales Redox y sabe cómo medirlos? (*conceptos previos*)
7. ¿Cuál sería tu motivación al aplicar una técnica electroquímica para intereses investigativos o laborales a nivel industrial y científico? (*ver la relación de la CV con el mundo real*)

Anexo #3 Material de apoyo

Voltamperometría Cíclica: Fundamentos e Interpretación del Ciclovoltamperograma

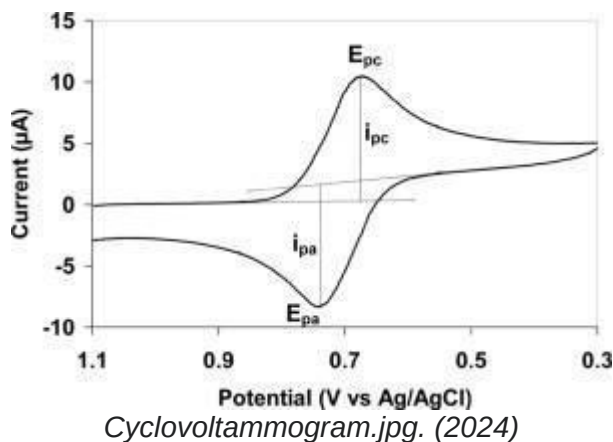
1. Introducción

La **voltamperometría cíclica (CV)** es una técnica electroquímica ampliamente utilizada para estudiar procesos redox, mecanismos de reacción y propiedades electroquímicas de especies en solución o adsorbidas en electrodos (Bard & Faulkner, 2000). Desarrollada a partir de los trabajos de Jaroslav Heyrovský (Premio Nobel de Química, 1959), la CV es una herramienta fundamental en química analítica, ciencia de materiales y electroquímica. Esta técnica se basa en aplicar un potencial que varía linealmente con el tiempo en forma de onda triangular y medir la corriente resultante en el electrodo de trabajo (Macias Sensors, s.f.).

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Principio de Funcionamiento

En la CV, el potencial del electrodo de trabajo se barre entre dos valores límite (vértices) a una velocidad constante (v en V/s). Tras alcanzar el primer vértice, el barrido se invierte y regresa al potencial inicial, completando un ciclo (Bard & Faulkner, 2000). La corriente medida se grafica frente al potencial aplicado, generando un **ciclovoltamperograma** (gráfica de i vs. E)



2.2. Sistema de Tres Electroodos

Un sistema típico de CV utiliza tres electrodos:

- **Electrodo de trabajo:** Superficie pequeña (ej. disco de Pt, Au o carbón vítreo de $\sim 1 \text{ mm}^2$) donde ocurre la reacción redox
- **Electrodo de referencia:** (ej. Ag/AgCl) mantiene un potencial estable para calibrar el sistema
- **Contraelectrodo:** (ej. Pt) completa el circuito eléctrico

2.3. Forma de Onda de Excitación

La onda de excitación es triangular, pero en la práctica se implementa como una escalera para facilitar el control digital (Bard & Faulkner, 2000). Los parámetros clave incluyen:

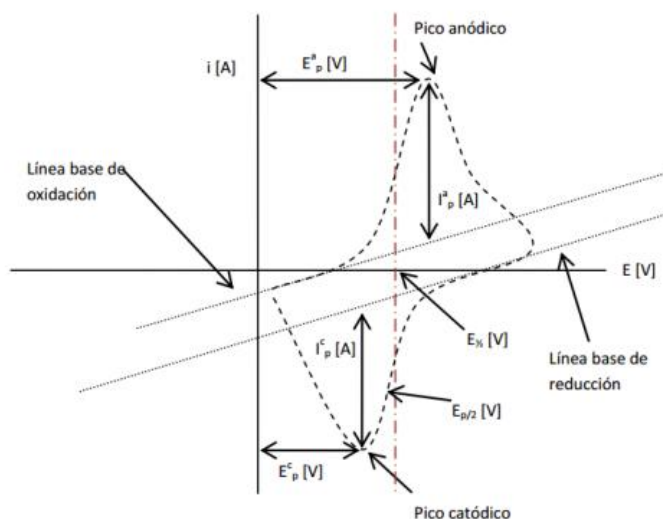
- Velocidad de barrido (v en V/s).
- Potenciales de vértice (E_1 y E_2).
- Número de ciclos

3. Elementos de un Ciclovoltamperograma

Un ciclovoltamperograma típico para un sistema reversible muestra picos de corriente correspondientes a procesos de oxidación y reducción (Bard & Faulkner, 2000).

La **Figura 2** ilustra un ejemplo con los siguientes elementos:

- **Barrido catódico** (hacia potenciales reductores): Reduce la especie oxidada.
- **Barrido anódico** (hacia potenciales oxidantes): Oxida la especie reducida.
- **Corriente catódica (i_{pp})**: Corriente de reducción (negativa por convención).
- **Corriente anódica (i_{pa})**: Corriente de oxidación (positiva).
- **Potencial pico catódico (E_{pc})**: Potencial donde i_{pc} es máxima.
- **Potencial pico anódico (E_{pa})**: Potencial donde i_{pa} es máxima.



. Ciclovoltamperograma estándar. Tomado de Rábago, S. (2017)

4. Interpretación de un Ciclovoltamperograma

Para interpretar un ciclovoltamperograma, primero observe la forma general de la curva que se asemeja a una figura con un par de picos opuestos. Al iniciar el barrido, imagine que sigue el camino de electrones mientras el potencial cambia.

Cuando la curva se desplaza hacia arriba (corriente positiva), indica oxidación (las moléculas están perdiendo electrones). Al desplazarse hacia abajo (corriente negativa), revela reducción (las moléculas están ganando electrones). Los picos representan los puntos donde estas reacciones ocurren con máxima intensidad. La simetría entre los picos de oxidación y reducción sugiere un sistema reversible, donde los productos pueden regenerarse fácilmente, mientras que picos asimétricos o ausentes indican reacciones irreversibles donde los productos se transforman en especies diferentes.

La separación entre picos da información sobre la facilidad con que ocurre la transferencia electrónica, y el área bajo los picos sugiere la cantidad de material que participa en las reacciones. Esta "huella digital electroquímica" permite reconocer procesos de transferencia de electrones, identificación de especies y su comportamiento redox sin necesidad de cálculos complejos.

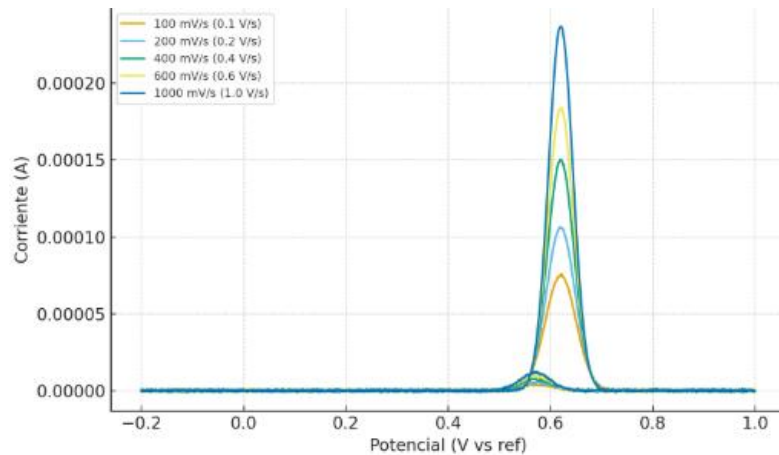
La voltamperometría cíclica es una técnica versátil para caracterizar reacciones electroquímicas. La interpretación correcta del ciclo voltamperograma incluyendo ΔE_p , i_{pa}/i_{pd} y la dependencia con v permite determinar reversibilidad, concentraciones y parámetros cinéticos. Para estudios cuantitativos, es esencial corregir la corriente residual y optimizar los parámetros experimentales.

5. Bloque de ejercicios

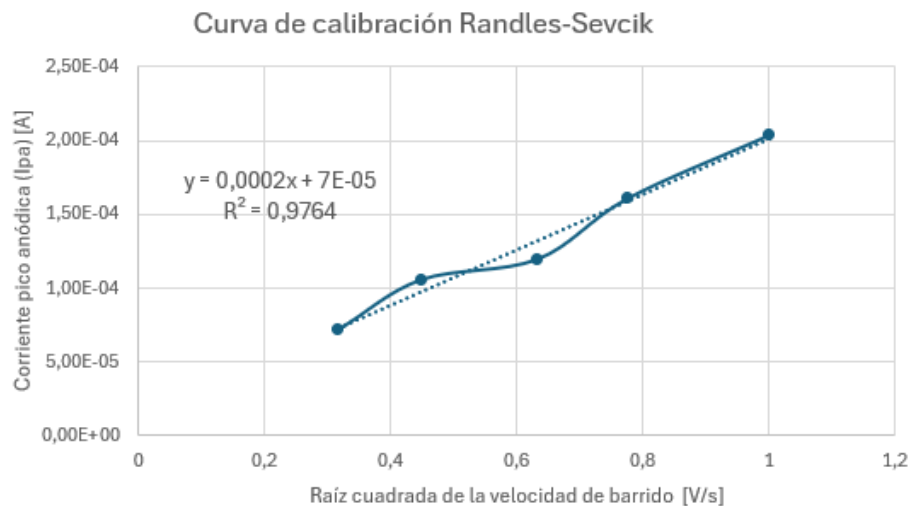
I. Un analista quiere determinar el coeficiente de difusión de Hidroxianisol butilado (BHA) para determinar reversibilidad del par redox. El BHA es altamente usado en alimentos y cosméticos como antioxidante sintético y previene la oxidación de lípidos y disminución de la rancidez, lo cual ayuda a preservar la frescura, mantener la actividad acuosa intacta y prolongar la vida útil de los productos, especialmente grasos o aceites. Cuando el BHA se oxida produce un radical fenólico (BHA/BHA $\cdot$). El analista somete a diferentes velocidades de barrido el analito en mezcla de acetonitrilo como medio (ventana de potencial 0,5 V a 0,8 V vs Ag/AgCl). Los resultados se consignan en la siguiente tabla:

Ciclo	Velocidad de Barrido en milivoltios [mV/s]	Ipa máxima en amperios [A]
1	100	$7,20 \times 10^{-5}$
2	200	$1,06 \times 10^{-4}$
3	400	$1,20 \times 10^{-4}$
4	600	$1,61 \times 10^{-4}$
5	1000	$2,40 \times 10^{-4}$

Al momento de usar el potencióstato, el analista guardó en Gamry® cada ciclo voltamperograma obtenido en cada velocidad de barrido y lo consignó en el siguiente gráfico:



Se observó que es una reacción irreversible. Luego, el analista genera una curva de Randles-Sevcik, graficando las corrientes pico (obligatoriamente en amperios) vs la raíz cuadrada de cada velocidad de barrido (obligatoriamente en V/s)



Determine el coeficiente de difusión por medio de la ecuación de Randles-Sevcik si el diámetro del electrodo de carbono vítreo es de 3 mm, la concentración del BHA es de 1,0 mM, la temperatura de la celda es de 23°C, y se realizó un ajuste lineal a la pendiente obteniéndose un valor de $\sim 2,3557 \times 10^{-4} \text{ A} * \left(\frac{\text{V}}{\text{s}}\right)^{-1/2}$

Resolución:

Datos:

- Área del electrodo (se debe reportar en cm^2 por convención:

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \left(\frac{0,3 \text{ cm}}{2}\right)^2 = 0,070 \text{ cm}^2$$

- Concentración del analito (se debe reportar en mol/cm^3 por convención:

$$1,0 \text{ mM} * \frac{1 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{1000 \text{ mM}} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3} = 1 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3}$$

- Temperatura de la celda (se debe reportar en Kelvin):

$$23 \text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15 = 296,15 \text{ K}$$

Despeje de la incógnita D de la ecuación de Randles-Sevcik ajustada a la ecuación $y=mx+b$

$$D = \frac{RT}{nF} \left(\frac{m}{0,4463nFAC} \right)^2$$

Reportar unidad R como $\frac{C*V}{\text{mol}*K}$ (gracias a que $J=C*V$), y la unidad de la pendiente como $\frac{C}{s} * \left(\frac{V}{s} \right)^{-\frac{1}{2}}$ (gracias a que $A=C*s^{-1}$)

$$D = \frac{8,314 \frac{C * V}{\text{mol} K} * 296,15 K}{1 * 96 485 \frac{C}{\text{mol}}} \left(\frac{2,3557 \times 10^{-4} \frac{C}{s} * \left(\frac{V}{s} \right)^{-1/2}}{0,4463 * 1 * 96 485 \frac{C}{\text{mol}} * 0,070 \text{ cm}^2 * 1 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3}} \right)^2$$

$$D = 1,53 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 * s^{-1}$$

II. Después de determinar el coeficiente de difusión, el analista desea comparar con los coeficientes de difusión reportados en la literatura. Realiza una revisión profunda y encuentra que Aflatoonian y Tajik (2025) en su artículo, reportan un coeficiente de difusión por cronoamperometría y determinado por la ecuación de Cottrell de $4,57 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 s^{-1}$ (cabe aclarar que modificaron el electrodo de trabajo, para más información ver bibliografía del documento).

- ¿El coeficiente de difusión calculado por el analista difiere del coeficiente reportado por Aflatoonian y Tajik (2025)?

$$\text{Desviación} = \frac{D_{\text{calculado}}}{D_{\text{literatura}}} = \frac{1,53 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 * s^{-1}}{4,57 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 s^{-1}} = 3,33$$

R: El D calculado por el analista es 3 veces mayor que el D reportado en literatura. Esto puede no ser malo, ya que las condiciones en las que se realizaron los montajes son diferentes, los electrodos y la concentración del analito varían en cada análisis, esto no significa que los dos coeficientes no sean confiables. Sería alarmante que la desviación arrojada nos reporte un valor 5-10 veces mayor. Se requiere comparar con otros artículos para realizar un análisis estadístico más riguroso.

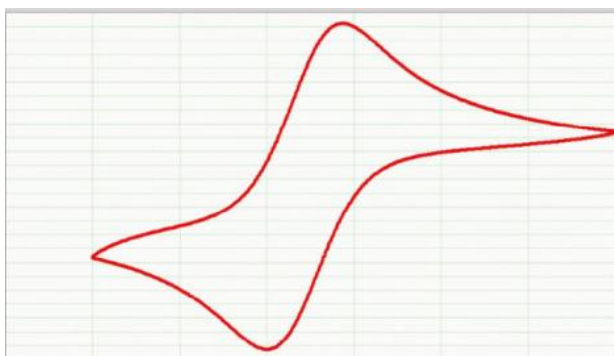
III. Teniendo en cuenta que la reacción es irreversible, y que la ecuación de Randles-Sevcik solo aplica para reversibilidad, ¿qué conclusiones puede llegar usted para que le aconseje al analista? Retome todo lo anteriormente consultado:

R: En condiciones de reversibilidad electroquímica, el coeficiente de difusión se determina con la ecuación de Randles–Ševčík, donde la corriente de pico depende únicamente de la movilidad molecular en solución. En este caso, el valor obtenido corresponde directamente al coeficiente de difusión real de la especie, ya que la cinética de transferencia electrónica es lo suficientemente rápida para que el transporte de masa sea el factor limitante. No obstante, en procesos irreversibles como el observado para el BHA, la ecuación se modifica porque la corriente de pico depende tanto de D como del coeficiente de simetría.

$$i_p = (0,4966) nFAC \left(\frac{\alpha n F v D}{RT} \right)^{1/2}$$

En este escenario, el D calculado no refleja únicamente la difusión, sino también la cinética del intercambio de electrones, por lo que debe interpretarse como un coeficiente de difusión aparente, útil para comparar condiciones, pero no como un valor intrínseco absoluto de la movilidad molecular. Se le recomienda al analista que realice de nuevo el ejercicio de voltamperometría cíclica teniendo en cuenta el coeficiente de simetría, y someter a barridos que respeten la ventana de potencial, pues el último barrido se sale de la misma. Independientemente del resultado, la ejecución de la técnica, la determinación de D, y la comparación con los valores de la literatura son las 3 cosas principales que cualquiera debe realizar en una CV.

IV. A un laboratorio ha llegado una muestra desconocida, la cual se analiza mediante la técnica de voltamperometría cíclica arrojando el siguiente gráfico:



Al obtenerse el voltamperograma, los valores de la corriente y el voltaje fueron los siguientes:

Voltaje (Voltios)	Corriente (Amperios)
-0,38	-0,30
-0,21	-0,12

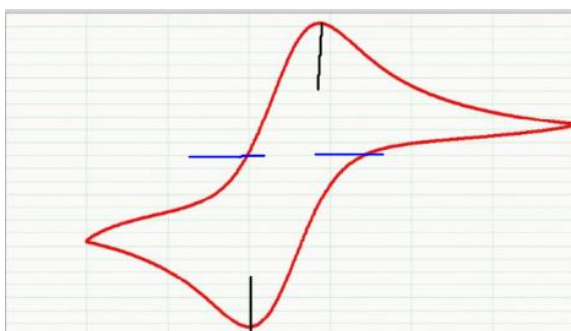
-0,11	-0,05
0,36	0
0,88	0,16
1,12	0,95

Al obtenerse estos valores, algunos de los laboratoristas dieron algunas opiniones conforme al ciclo voltamperograma obtenido y los datos obtenidos.

- A) La solución mostrada por el voltamperograma pertenecía al complejo de $K[CoCl_6]^{3-}$ debido a que el voltaje inicial fue de $-0,30\text{ V}$ lo que corresponde a los valores de oxidación y reducción del Cloro en sales y complejos.
- B) Los valores de voltaje son correspondientes a la reducción del $Cr_2O_7^{2-}$ (Dicromato de potasio) debido a que su I_{pa} es de $1,12\text{ V}$
- C) El voltamperograma es perteneciente a la oxidación y reducción del $K[Fe(CN)_6]^{2-}$ y $K[Fe(CN)_6]^{3-}$ esto es debido a que el voltaje para su potencial de reducción es equivalente a $0,36$, por ende, la corriente es 0
- D) No es perteneciente a ninguna de las especies implicadas anteriormente, contiene otros tipos de metales u otros compuestos.

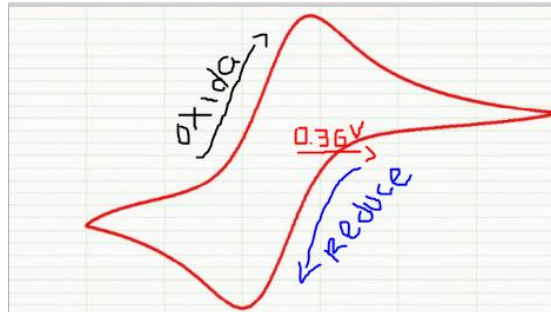
Solución

* Acorde al voltamperograma obtenido, se tiene primeramente que el gráfico es perteneciente a una de las reacciones reversibles, las especies químicas implicadas sufren una oxidación y reducción. Al obtenerse únicamente el gráfico también se puede observar que arroja dos picos en los cuales no son simétricos, indicando que uno de los valores es negativo o cercano al negativo y otro de los valores es positivo.



Las líneas obtenidas de color negro nos indican unos valores de pico de corriente anódica (I_{pa}) en la parte inferior y picos de corriente catódica (I_{pc}) en la parte superior, en estos picos son indispensables para la lectura del voltamperograma, ya que, estos nos dan el valor máximo y mínimo de corriente en el cual ha llegado la especie química, demostrando el proceso de oxidación y reducción respectivo.

Al obtenerse las tablas del voltaje y la corriente nos damos cuenta que el valor del potencial estándar es de 0,36 V, indicando que esta especie tiene un comportamiento electroquímico natural a este voltaje dado y su corriente por ende es equivalente a cero; Para esto observamos en las tablas de potenciales estándar que el valor para el ferrocianuro es igual a 0,36 V.



Observamos que el gráfico se obtiene mediante la oxidación y reducción del $K[Fe(CN)_6]^{3-}$. El inicio del ciclo comienza desde el valor de 0,36 V, para ello luego se lleva a un potencial de reposo de 0 V reduciendo la especie de $K[Fe(CN)_6]^{3-}$ a $K[Fe(CN)_6]^{4-}$



Respuesta correcta C.

6. Anexos

6.1. Análisis de cancelación de unidades de la ecuación de Randles-Sevcik para determinar el coeficiente de difusión (D)

$$D = \frac{\frac{C * V}{mol * K} * K}{\frac{C}{mol}} \left(\frac{\frac{C}{s} * \left(\frac{s}{V} \right)^{1/2}}{\frac{C}{mol} * cm^2 * \frac{mol}{cm^3}} \right)^2$$

Se cancelan las unidades más fáciles y se invierte la unidad $\left(\frac{V}{s} \right)^{-\frac{1}{2}}$ como $\left(\frac{s}{V} \right)^{\frac{1}{2}}$

$$D = V \left(\frac{\frac{1}{s} * \frac{1}{s^2} * V^{-\frac{1}{2}}}{cm^{-1}} \right)^2$$

Se reescribe la unidad $\left(\frac{s}{V} \right)^{\frac{1}{2}}$ como $s^{\frac{1}{2}} * V^{-\frac{1}{2}}$

$$D = V \left(\frac{s^{-1} * s^{\frac{1}{2}} * V^{-\frac{1}{2}}}{cm^{-1}} \right)^2 = V \left(\frac{s^{-1+\frac{1}{2}} * V^{-\frac{1}{2}}}{cm^{-1}} \right)^2 = V \left(\frac{s^{-\frac{1}{2}} * V^{-\frac{1}{2}}}{cm^{-1}} \right)^2$$

Se simplifican los exponentes de la variable s ya que posee la misma base, pero diferente exponente

$$D = V \left(\frac{s^{-\frac{1}{2}} * V^{-\frac{1}{2}}}{cm^{-1}} \right)^2 = V \left(\frac{cm}{s^{\frac{1}{2}} * V^{\frac{1}{2}}} \right)^2$$

Invertir el orden del factor del paréntesis para dejar de expresar exponentes negativos

$$D = V * \frac{cm^2}{(\sqrt{s})^2 * (\sqrt{V})^2}$$

Expresar las variables del denominador como raíces cuadradas, y repartir el exponente a cada término de la fracción

$$D = V * \frac{cm^2}{s * V} = \frac{cm^2}{s} = cm^2 s^{-1}$$

La unidad de coeficiente de difusión generalmente se expresa en $cm^2 s^{-1}$. Puede variar en unidades para ajustarse a las medidas del SI.

6. Referencias

Aflatoonian, M. R., & Tajik, S. (2025). Determination of butylated hydroxyanisole using nanostructure-based electrochemical sensor. *Journal of Environmental and Bioanalytical Electrochemistry*, 2(1), 15–22.

Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2000). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Wiley.

Cussler, E. L. (2009). *Diffusion: Mass transfer in fluid systems* (3rd ed.). Cambridge University Press.

LiberTexts. (s. f.). Voltamperometría cíclica. Recuperado el 22 de septiembre de 2025, de <https://espanol.libretexts.org/>

Macias Sensors. (s. f.). Voltamperometría cíclica: una herramienta de investigación inestimable. Recuperado el 22 de septiembre de 2025, de <https://maciassensors.com/es/voltamperometria-ciclica/>

Anexo # 4 primer estudio de caso.

Primer estudio de caso

Introducción de la técnica de Voltamperometría cíclica en laboratorios mediante la enseñanza de los ciclovoltamperogramas

Las reacciones electroquímicas están relacionadas con fenómenos químicos que generan efectos eléctricos, los cuales se miden entre la corriente y voltaje. A lo largo de la historia, la electroquímica ha adquirido relevancia, especialmente hacia la década de 1970, cuando se buscó fortalecer la ingeniería y resolver diversos problemas de la época. Este enfoque permitió mejorar la eficiencia de la reducción de la contaminación por metales pesados, así como el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales para la industria de la metalurgia. Además, contribuye a la evolución de procesos que minimizan el daño ambiental y los costos derivados de la sobreproducción. En este contexto, surge el concepto de electrodos de alta superficie, esenciales para facilitar el flujo de corriente eléctrica en materiales no conductores dentro de diferentes circuitos. Esta innovación se ha convertido en una herramienta clave en la industria y en la investigación científica, impulsando avances en materiales y mejorando el rendimiento de pilas, baterías y celdas electroquímicas. (Química General, Lic. María Irene Vera. 2007)

La electroquímica cuenta con múltiples técnicas, aunque la de mayor aplicación e investigación es la voltamperometría cíclica (CV) que estudia el cambio de corriente en el electrodo de trabajo mediado por un potencial aplicado; Para ello, se efectúa el análisis y lectura mediante el uso de un potencióstato, que permite evaluar y generar lecturas de diagramas de corriente frente a un potencial denominados ciclovoltamperogramas cíclicos.

El avance de la tecnología y la ciencia han hecho de esto un desarrollo hacia la implementación e innovación en la electroquímica, dando un papel crucial en la mejora de los campos como la salud, la energía, el medio ambiente y un aporte hacia la sociedad; Muchas de las grandes industrias buscan en poder avanzar a nivel tecnológico y que pueda reducir el impacto hacia el medio ambiente con el objetivo en poder aumentar su índice de rentabilidad y producción. Una de las aplicaciones más importantes en la electroquímica, consiste en depositar una fina capa en una superficie mediante una corriente eléctrica, este proceso es utilizado para el desarrollo de nuevos productos y el estudio de reacciones de oxido-reducción en los metales; Además del estudio de la corrosión en materiales metálicos en contacto con un electrolito. (Naciones Unidas 2025)

Análisis de $\text{CoO}/\text{Co}_3\text{O}_4$ como especies oxido-reductoras, presentes en las fuentes hídricas por medio de la técnica de Voltamperometría cíclica

En Colombia, se busca reducir el impacto de los agentes químicos que han llegado a afectar los cuerpos de agua, especialmente en las fuentes de agua. Según la Ley 9 de 1979, el gobierno ha adoptado medidas que priorizan la protección y el cuidado del medio ambiente y las fuentes hídricas. Estas acciones incluyen el control y monitoreo de las industrias para garantizar que la cantidad de residuos o agentes contaminantes

no cause contaminación en estos cuerpos de agua. (Ley 9 de 1979 - Gestor Normativo, 2022)

Uno de los contaminantes a analizar en este estudio de caso es uno de los metales pesados presentes en los cuerpos de agua dulce: el cobalto, ya que, debido a las actividades humanas generados por las industrias, la agricultura, aglomeraciones urbanas y explotación minera, han generado un crecimiento en las concentraciones de cobalto en los cuerpos de agua, este metal hace parte de nuestra vida diaria, pero sus altas concentraciones son un riesgo para la salud humana; El cobalto tiene la capacidad de formar complejos que son solubles y que fácilmente pueden ser depositados en el suelo, las plantas y el agua, para ello, esta exposición por este metal es bastante grave para la salud humana. (Benítez R.A, J, 2020)

Esta problemática puede ser resuelta por medio de las voltamperometrías cíclicas, Para ello se plantea la siguiente situación hipotética: un grupo de investigadores realizó un muestreo puntual en las zonas de los afluentes y se obtuvieron los siguientes resultados:

pH del agua	4,6
Conductividad Eléctrica	167 Us/cm
Concentración de Cobalto [CoO]	1 mol*L ⁻¹

Tabla #1 elaboración propia

Estas muestras fueron llevadas al laboratorio para luego ser analizadas detalladamente, haciendo uso del potencióstato y la técnica de voltamperometría cíclica, con el fin de conocer el mecanismo redox de las dos especies.

Es por ello que hemos solicitado reunir a una gran parte de químicos que nos puedan brindar su ayuda para poder determinar el potencial de reducción y oxidación para las especies químicas implicadas y las variables implicadas para sistemas reversibles bajo la técnica de Voltamperometría cíclica, para así, analizar como las concentraciones y las especies involucradas en los cuerpos de agua pueden afectar a nuestro medio ambiente y nuestras fuentes hídricas.

Objetivos

- * Reconocer las especies iónicas resultantes por contaminación de Cobalto en los cuerpos de agua
- * Determinar el comportamiento del Cobalto por medio de los ciclovoltamperogramas y las variables del mismo, para sistemas reversibles

Etapas 1

Como estudiante de licenciatura en química, este debe conocer el uso e implementación del potencióstato, haciendo el correcto montaje como se ve en la imagen #1, donde tenemos la respectiva celda electroquímica con los 3 electrodos y el analito en solución conectados al potencióstato para ya obtener nuestros datos.

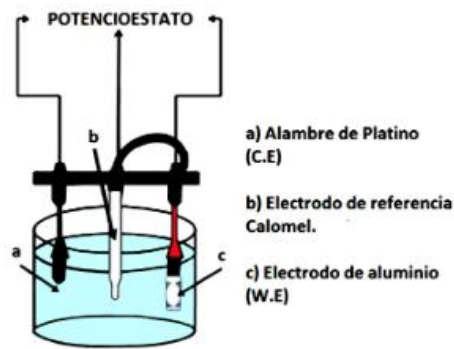


Imagen #1 tomada de (DESIGN and CONSTRUCTION of a POTENTIOSTAT for MATERIAL SYNTHESIS PROCESS USING CHEMICAL ELECTRODEPOSITION | MOMENTO, 2025)

Bajo tu análisis

1. ¿Por qué crees que el uso del potenciostato es importante para esta investigación?
2. ¿Para qué utilizamos la técnica de la voltamperometría cíclica?
3. ¿Qué función tienen los electrodos implementados en la celda electroquímica?

Etapas 2

Al llevar las muestras al laboratorio contaminadas con Cobalto se debe disponer primeramente de la preparación de las soluciones electrolíticas para realizar el respectivo barrido y su lectura en el potenciostato.



Figura #2 Elaboración propia: ejemplo de muestra

Etapas 3

Se ha colocado la solución de CoO en la celda electroquímica insertando los electrodos (1 electrodo de calomel, 1 de aluminio y 1 de alambre de platino) en cada solución y se genera la lectura de barrido en el potenciostato por medio de la técnica de la voltamperometría cíclica.

Se obtiene el siguiente voltamperograma:

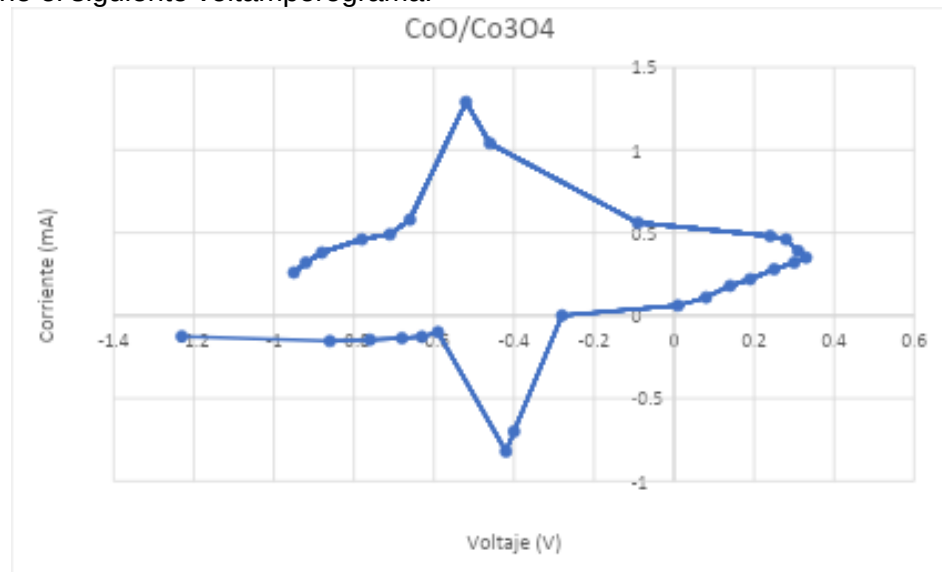


Diagrama #1 elaboración propia: ciclovoltamperograma

Bajo tu análisis

1. En un párrafo, redacte el paso a paso para reconocer el comportamiento del par redox, identificando las variables del gráfico, señalando una aproximación numérica de las mismas
2. ¿Cuál es una de las principales razones para utilizar la voltamperometría cíclica en el análisis de calidad de aguas con Cobalto?
3. ¿Qué parámetro del ciclovoltamperograma se relaciona con la concentración del Cobalto en la muestra del agua? ¿Qué nos puede decir dicho parámetro?
4. ¿Qué información puede extraer del ciclovoltamperograma con respecto a la velocidad de reacción?

Bibliografía

Design and Construction of a potentiostat for material synthesis process using chemical electrodeposition moment. (2025). Momento, Universidad Nacional de Colombia.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/34865/35140>

Maria, L., Vera, I., & Adjunto, P. (2007). Química general. Electroquímica. Universidad Nacional del Nordeste.

https://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas_parciales/unidad_10_Electroquimica2007.pdf

Nations, U. (2025). Sostenibilidad | Naciones Unidas. United Nations.

<https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/sostenibilidad>

Quadra, G. R., Paranaíba, R., Barros, N., Roland, F., & Amado, A. M. (2019).
Water pollution: One of the main limnology challenges in the Anthropocene. *Acta
Limnologica Brasiliensia*, 31. <https://doi.org/10.1590/s2179-975x5118>

Study of copper deposit on a porous electrode of carbon and stainless steel by
SEM-XRD and image analysis. (2025). *DYNA*, Universidad Nacional de
Colombia. https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/39924/pdf_34

Anexo#5 Taller fundamentado en la experimentación ilustrativa

Taller fundamentado en la experimentación ilustrativa.

Instrucciones: A continuación, encontrará una serie de preguntas diseñadas para evaluar su percepción, interpretación y capacidad de análisis sobre el funcionamiento del potencióstato y los fundamentos de la Voltamperometría Cíclica. Le solicitamos responder de forma individual y autónoma, ya que el valor de esta actividad reside en la honestidad de sus respuestas, que nos permitirán medir de forma precisa la asimilación de los conceptos.

- **Objetivo:** Realizar una evaluación individual sobre la comprensión y el análisis de los principios de operación del potencióstato y la técnica de Voltamperometría Cíclica.
1. ¿Cuáles son las variables físicas involucradas en la CV y cuál es la relación entre ellas?
 2. ¿Cómo se relaciona la programación, el código y los componentes electrónicos con la ejecución de una ciclovoltamperometría?
 3. ¿Qué componente o proceso de la demostración debe ser cambiado para optimizar la sensibilidad y robustez del equipo?
 4. ¿Qué tan viable es el equipo para su aplicación en otras técnicas electroquímicas?
 5. Desde su punto de vista ¿Como la construcción del potencióstato de bajo costo ayuda a ilustrar el funcionamiento de la CV en un entorno educativo? ¿Lo usaría?

Anexo#6 Segundo estudio de caso.

SEGUNDO ESTUDIO DE CASO

Profundización sobre los conceptos de la Voltamperometría Cíclica relacionados con la aplicación real en el laboratorio

Diversos métodos voltamétricos o voltamperométricos (en su definición más moderna) consisten en variar el potencial aplicado a una celda mientras se mide la corriente, producto de estas perturbaciones. La voltamperometría cíclica (CV) es la técnica más versátil para el estudio de especies redox electroactivas, la cual ha generado campos de estudio en la química orgánica, inorgánica, bioquímica, Pérez, (1995), e incluso temas interdisciplinarios y más recientes como son la química organometálica o química de polímeros. La CV es el primer método más rápido y confiable para caracterizar un compuesto químico hecho con materiales biológicos o sintéticos fabricados en laboratorio. El ciclo voltamperograma puede traducirse como la huella digital fisicoquímica de un material o de un compuesto de interés, y con base en ello, se pueden estudiar sus características, su porosidad, su capacidad para oxidarse o reducirse o su electroactividad y/o selectividad ante iones o moléculas. Sin embargo, esta técnica es poco visualizada por los estudiantes, debido a su poco conocimiento sobre el tema, y la preferencia por técnicas más estudiadas como la cromatografía o la espectroscopía, e incluso quienes optan por estudiar la CV, no comprenden en su totalidad su funcionalidad o fundamentos, Pérez, (1995).

Por otro lado, es fundamental comprender que la CV comprende varios fenómenos físicos de transporte de masa (*entiéndase transporte de masa como el movimiento de especies electroactivas a la interfase del electrodo*), Bard y Faulkner, (2001). El fenómeno de transporte de masa más relevante en una voltamperometría cíclica es la difusión, la cual se refiere al movimiento de especies por gradiente de concentración (de un ambiente de alta concentración a uno de baja concentración). La difusión del analito determina varias variables como el coeficiente de Difusión (D), la constante de transferencia de carga (k^0), y el coeficiente de transferencia o coeficiente de simetría (α), las cuales, en este proyecto solo se enfocó en la variable D. En ese orden de ideas, si se tiene una reacción redox reversible, fácilmente se puede determinar el coeficiente de difusión D, pues el transporte de masa es tan rápido que la cinética de la reacción redox no es perturbada por interacciones iónicas o favorabilidad de la reacción (para más información véase el Modelo de Butler-Volmer, bien utilizado para caracterizar polímeros o sensores). Para finalizar, la CV es utilizada para un sinnúmero de situaciones e investigaciones actuales, y para fortalecer habilidades investigativas de polímeros, electrodos modificados, o ver el comportamiento redox de moléculas orgánicas nuevas e innovadoras que los analistas, laboratoristas, investigadores, químicos o incluso los docentes en formación pueden crear en el laboratorio.

Análisis de la efectividad de un potenciostato de bajo costo utilizando el par redox $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$

Usted como estudiante de Sistemas Fisicoquímicos II decide crear un potenciostato de bajo costo, con el objetivo de analizar un biosensor de microhilos recubiertos con polímeros creado por usted, que detecta **únicamente** E. Coli.

1. ¿Qué es un biosensor y qué relación tiene con un electrodo?
2. ¿Cuál es la ley de Ohm y cual es su relación con este trabajo?

Antes de aplicar y analizar la efectividad del biosensor, decide poner a prueba el potenciostato creado con 3 amplificadores operacionales: uno para mantener el potencial (E) constante a la vez que garantiza que la corriente fluya desde el CE hasta el WE, otro para mantener el RE sin alteraciones de corriente, y otro para convertir el potencial de la celda a corriente por ley de Ohm y medir la corriente.

3. Según lo explicado anteriormente, ¿qué amplificador usaría?

Usted somete a calibración el prototipo, así que decide hacerlo con el ferricianuro de potasio $K_3[Fe(CN)_6]$. Esta sustancia es ampliamente utilizada para calibrar potenciostatos, y comparar con la literatura si el equipo realmente funciona. Decide preparar las siguientes muestras:

Electrolito soporte (KCl)	Analito $K_3[Fe(CN)_6]$.	Volumen de la celda
50 mL (balón aforado) de una solución 1M 99.5% de pureza	En la celda 10 mM	Máximo 25 mL

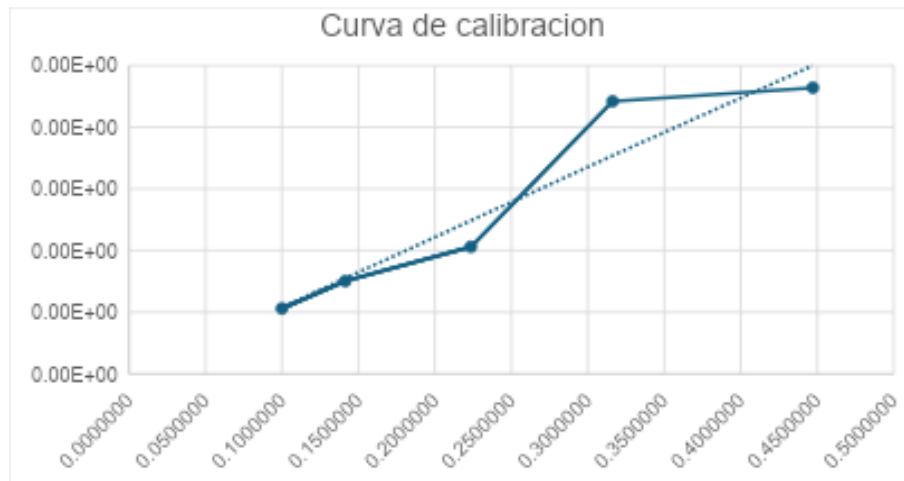
4. Calcule la masa de reactivos que debe pesar en la balanza para preparar esas muestras.

Después, introduce 25 mL de electrolito soporte a la celda y el analito en estado sólido para disolverse en la misma celda. Somete a burbujeo con un gas inerte (N_2 o Ar) para evitar que el oxígeno del agua destilada provoque oxidaciones. Cierra la celda y conecta los electrodos al potenciostato.

Luego, Realiza la lectura a diferentes barridos de potencial para realizar una curva de "calibración" de Randles Sevcik (ventana de potencial de -1,0 V a 1,0 V). Los datos que usted reportó en cada ensayo son los siguientes:

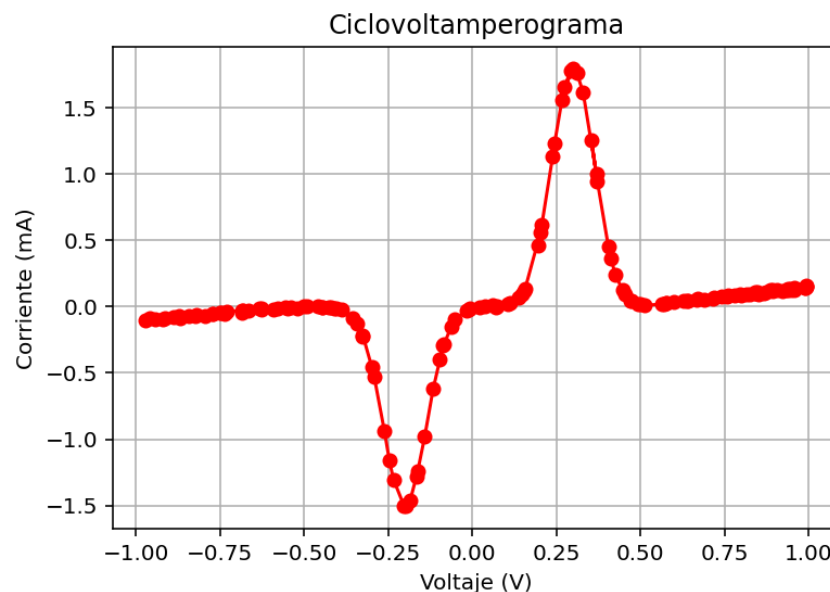
Ciclo	Velocidad de barrido (mV/s)	Ipa máxima (A)
1	10	$5,30 \times 10^{-5}$
2	20	$7,51 \times 10^{-5}$
3	50	$1,03 \times 10^{-4}$
4	100	$2,21 \times 10^{-4}$
5	200	$2,32 \times 10^{-3}$

5. Determine el coeficiente de difusión graficando la raíz cuadrada de la velocidad de barrido vs Ipa máxima, determinando la pendiente y utilizando la ecuación de Randles-Sevcik. (Temperatura: 25°C, Área electroactiva del electrodo de carbono vítreo: 3,0 mm,



6. El valor de la literatura de D para el par redox $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$ se encuentra desde $4 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ a $7,6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. ¿El valor de D es coherente con el valor de la literatura? Si no, ¿Qué posible error cometió usted como analista? ¿Cómo puede verificar sus hipótesis?

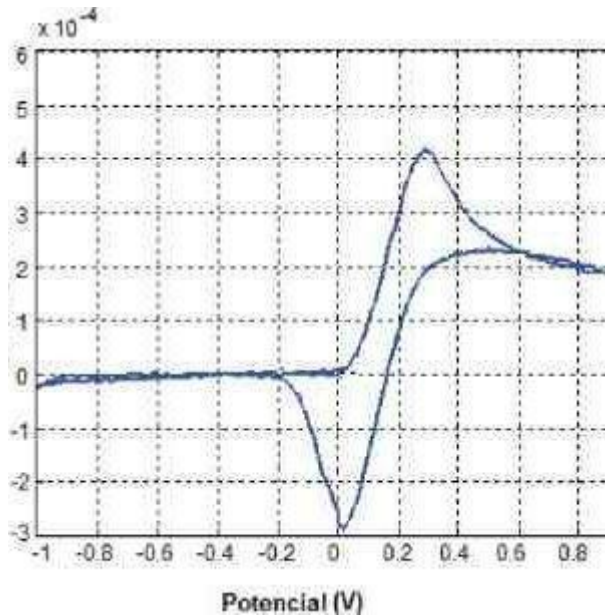
Después de determinar el coeficiente de difusión, realiza un barrido de potencial



cualquiera y mediante los dos softwares se obtiene la siguiente gráfica:

7. Señale en la gráfica cuales son los picos anódicos y catódicos y explique cómo puede identificarlos.
8. ¿Qué información extra puede obtener del gráfico? Ejemplo simetría de picos, distancia entre cada pico y valores de corriente y voltaje.

Usted decide comparar el ciclovoltamperograma que obtuvo con un ciclovoltamperograma reportado en la literatura:



9. ¿El pico catódico y anódico coinciden en las dos gráficas? Si no, haga un diagnóstico del porqué de la asimetría de las gráficas.
10. ¿Especifique si los ciclo voltamperogramas son reversibles, cuasi reversible o irreversibles?

Acto seguido, decide implementar el prototipo de potenciostato al biosensor que fabricó. El objetivo de aplicar la voltamperometría al biosensor es para identificar si los microhilos con polímero son los más adecuados para captar y cuantificar las bacterias de E. Coli. Al final determina que los microhilos no son los más adecuados, pues las bacterias pueden no ser compatibles al recubrimiento polimérico, generando ruido de señal, esto debido a que:

- **La concentración de bacterias es proporcional a la I_p . Mientras más corriente pico, más cantidad de bacterias.** Sin embargo, las corrientes pico están separadas y son iguales a las corrientes que obtuvo por análisis de ferricianuro/ferrocianuro: unos picos altos y bien definidos.
 - La corriente que usted aplicó es extrema e impide que las bacterias de E. Coli lleguen por transporte de masa al biosensor.
 - El pHc de la celda es excesivamente ácido
11. ¿Cómo podría solucionar el problema para que el biosensor funcione para cuantificar E. Coli?
 12. Usted identificó que la bacteria E. Coli no es la más compatible con los microhilos, sin embargo, las bacterias de Listeria generan una I_p de baja magnitud, generando picos casi irregulares y poco altos. ¿Qué significa esto? ¿El biosensor funciona para Listeria? ¿Por qué?

Referencias.

Bard, A. y Faulkner, L. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications*

Pérez, M. (1995). *Fundamentos de Voltametría Cíclica*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. UNAM Dirección general de Bibliotecas.

Arrieta-Almario, Á. A., & Tarazona-Cáceres, R. L. (2013). *Sistema multipotenciostato basado en instrumentación virtual [Multipotentostat system based on virtual instrumentation]*. Universidad Pontificia

Anexo# 7 prueba de salida.

Prueba de salida: en formato de entrevista semiestructurada

- a. Explique con sus palabras el funcionamiento del potenciómetro en la ejecución de la CV *(si se aprendió o no a nivel disciplinar)*
- b. ¿Cuáles son las variables que influyen en la forma o estructura del ciclo voltamperograma? *(reconoce y utiliza los conceptos de la técnica)*
- c. Describa la función de cada uno de los electrodos del potenciómetro de bajo costo, indicando su papel en la medición de variables físicas relacionadas a la CV. *(reconoce y utiliza los conceptos de la técnica)*
- d. ¿En qué casos usaría la técnica de CV? *(reflexionar sobre sus habilidades experimentales)*
- e. ¿Hubo retroalimentación constante de su proceso de aprendizaje? *(indicio para saber si se evaluó auténticamente)*
- f. Durante el proceso de aprendizaje de la técnica de CV, ¿esto lo ha incentivado a seguir aprendiendo o estudiando electroquímica? *(indicio para saber si se motivó al estudiante - Evaluación auténtica)*
- g. Los instrumentos aplicados como: los estudios de caso, las rúbricas de evaluación, la entrevista, el taller fundamentado en la experimentación ilustrativa, las intervenciones y socializaciones realizadas en clase, ¿aportaron a su formación académica y profesional? ¿Los ve útiles para su labor docente? *(reflexionar sobre la utilidad de la metodología de la tesis en proyectos de los estudiantes y la implementación de estrategias en su futura labor docente)*
- h. Asígnese una calificación con base en su participación, motivación, interés por aprender, de 1 a 5 (siendo 1 la calificación más baja, y 5 la más alta). *(Herramienta de autoevaluación del estudiante y reflexión - Evaluación auténtica)*
- i. Asigna una calificación a los tesisistas con base en el dominio del tema, los instrumentos aplicados, la metodología de trabajo y la didáctica implementada, de 1 a 5 (siendo 1 la calificación más baja, y 5 la más alta). *(Herramienta de evaluación de la estrategia didáctica y reflexión)*