

Trabajos prácticos de laboratorio fundamentados en el aprendizaje basado en retos y en la síntesis y caracterización electroquímica del polipirrol para fortalecer las habilidades de inferencia y explicación.

Jose Miguel Melo Molina

Mayerly Rodríguez Hernández

Director. Mg. Diego Alexander Blanco Martínez.

Grupo Didáctica y sus ciencias.

Línea Incorporación de la educación ambiental al currículo de ciencias.

Codirectora Dra. María Teresa Cortes Montañez.

Grupo Electroquímica materiales poliméricos, Universidad de los Andes, Colombia.

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Química

Bogotá, D.C, Colombia

Mayo 2026

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1	7
FORMULACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	7
JUSTIFICACIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
CAPÍTULO 2	12
ANTECEDENTES.....	12
Antecedente 1: “Electrochemical Synthesis and Characterization of Electroactive Conducting Polypyrrole Polymers” (Ansari, 2004).....	12
Antecedente 2: “Polypyrrole Nanomaterials: Structure, Preparation and Application” (Hao, Dong, Zhang, Zhu, & Yu, 2022).....	13
Antecedente 3: “La integración de los trabajos prácticos en la enseñanza de la química como investigación dirigida” (Martinez, Doménech, Menargues, & Romo, 2012).....	14
Antecedente 4: “Aprendizaje Basado en Retos para la creación de TPL en química y electroquímica” (González et al., 2025).....	14
Antecedente 5: “Trabajo de laboratorio en física y química a través de un enfoque problematizador” (Labra & Arias, 2024).....	15
MARCO REFERENCIAL	16
CAPÍTULO 3	41
PARADIGMA, METODOLOGÍA Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	41
Fases de la investigación.....	42
Técnicas para el análisis de datos	53
Criterios de calidad de la investigación	56
CAPÍTULO 4	57
ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
CONCLUSIONES	91
REFERENCIAS.....	93
ANEXOS	95

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Conceptualización de habilidades cognitivas	22
Tabla 2. Electrodo utilizados para el sistema.	31
Tabla 3. Diagramas de las técnicas de síntesis del PPy.	34
Tabla 4. Parámetros para las técnicas de síntesis.....	45
Tabla 5. Parámetros para la estabilización en circuito abierto.....	47
Tabla 6. Parámetros para las técnicas de caracterización	48
Tabla 7. Matriz de evaluación para las habilidades de pensamiento crítico a desarrollar	55
Tabla 8. Consolidado de Masa de polipirrol calculada por síntesis cronopotenciométrica	57
Tabla 9. Caracterización por CV y GCD para el polímero sintetizado por cronopotenciometría a 800s	59
Tabla 10. Caracterización por CV y GCD para el polímero sintetizado por cronopotenciometría a 700s	60
Tabla 11. Caracterización por CV y GCD para el polímero sintetizado por cronopotenciometría a 1190s	60
Tabla 12. Películas PPy observadas bajo el microscopio óptico.	61
Tabla 13. Caracterización por CV y GCD para el primer ensayo de pulsos galvanostáticos .	63
Tabla 14. Caracterización por CV y GCD para el segundo ensayo de pulsos galvanostáticos	64
Tabla 15. Películas PPy observadas bajo el microscopio óptico.	65
Tabla 16. Espesor obtenido de las dos técnicas de síntesis implementadas.....	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Etapas del aprendizaje basado en retos (ABR).....	20
Figura 2 Estructuras químicas y aplicaciones de los polímeros conductores aromáticos comunes.	23
Figura 3 Polimerización electroquímica del polipirrol.	24
Figura 4 Voltamogramas PPy: a) dependencia con velocidad de barrido, b) comparación PPy dopado con PTS, c) PPy/ <i>ClO4</i> –en agua, d) comparación PPy dopado con <i>ClO4</i> –.....	25
Figura 5 Ciclo de carga/descarga galvanostática de películas de PPy con distintos aniones dopantes, en KCl 1M a una densidad de corriente de 2 mA/cm ²	26
Figura 6 (a) p-dopaje de un polímero y (b) n-dopaje de un polímero.....	27
Figura 7 Distorsiones de la deslocalización para la cadena de PPy (Polaron y Bipolaron)....	28
Figura 8 Desprotonación del ácido p-Toluenosulfónico.....	28
Figura 9 Montaje de una celda electroquímica.	30
Figura 10 Potenciostato autolab.....	32
Figura 11 Voltammogram of the reversible reduction of a 1mM Fc ⁺ solution to Fc, at a scan rate of 100mVs ⁻¹	33
Figura 12 Oxidación del monómero.	34
Figura 13 Dimerización y oligomerización.	35
Figura 14 Nucleación.....	35
Figura 15 Crecimiento y formación.....	36

Figura 16 (A) Caracterización GCD (B) Caracterización CV.	37
Figura 17 Fases Metodológicas de la investigación.	42
Figura 18 Limpieza del electrodo de trabajo.	44
Figura 19 Procedimiento para la síntesis de polipirrol.	46
Figura 20 Procedimiento para la estabilización del polipirrol en sulfato de sodio.	47
Figura 21 Cronopotenciograma a 800s obtenido del software NOVA2,1.	58
Figura 22 Gráfica de la síntesis por pulsos galvanostáticos, segundo ensayo, obtenida del software NOVA2,1.	63
Figura 23 Gráfica de CV de pulsos galvanostáticos segundo ensayo, obtenida del software NOVA2,1.	67
Figura 24 Gráfica de CV de cronopotenciometría a 800 s, obtenida del software NOVA2,1.	67
Figura 25 Gráfica de GCD de cronopotenciometría a 800 s, obtenida del software NOVA2,1.	68
Figura 26 Gráfica de GCD de pulsos galvanostáticos segundo ensayo, obtenida del software NOVA2,1.	69
Figura 27 Estructura de las guías de TPL con enfoque ABR.	72
Figura 28 Puente del pensamiento crítico.	74
Figura 29 Adaptación inferencia Grupo 3 al modelo Puente del pensamiento crítico.	76
Figura 30 Adaptación explicación Grupo 3 al modelo Puente del pensamiento crítico.	76
Figura 31 Adaptación inferencia Grupo 1 al modelo Puente del pensamiento crítico.	77
Figura 32 Adaptación explicación Grupo 1 al modelo Puente del pensamiento crítico.	78
Figura 33 Marcadores lingüísticos asociados a cada habilidad.	80
Figura 34 Red conceptual inferencias de los informes de los QF.	81
Figura 35 Red conceptual Explicaciones de los informes de los QF.	82
Figura 36 Red conceptual inferencias y explicaciones de los informes de los QF.	83
Figura 37 Resultados del análisis de la plataforma Atlas.ti para los informes 1, 2, 3 y 4 de los QF.	89

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado se desarrolló en el marco de la línea de investigación de incorporación de la educación ambiental al currículo de ciencias del Departamento de Química de la Universidad Pedagógica Nacional y se analizó el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, inferencia y explicación de un grupo de Químicos en formación (QF) de la Universidad de los Andes de Colombia, mediante la implementación de guías de Trabajos Prácticos de Laboratorio (TPL) diseñadas y fundamentadas en el Aprendizaje Basado en Retos (ABR) al sintetizar y caracterizar electroquímicamente polipirrol (PPy). Esta propuesta busca transformar las prácticas de laboratorio tradicionales, centradas en la ejecución mecánica de procedimientos, en experiencias investigativas que promuevan la inferencia y la explicación de los fenómenos químicos.

De acuerdo con lo anterior, el presente documento se estructura en cuatro capítulos que articulan los aspectos teóricos y metodológicos de la investigación. En el primer capítulo se aborda el problema de investigación, relacionado con la necesidad de repensar los TPL como espacios para el desarrollo de las habilidades de pensamiento crítico. Además, se formulan la pregunta de investigación, el objetivo general y los específicos, así como la justificación desde el aporte de las líneas de investigación.

En el segundo capítulo se describen los antecedentes del problema; donde se evidencia que no existen investigaciones que relacionen todas las variables de interés de esta investigación, sin embargo, se buscaron investigaciones relacionadas con el uso del ABR en contextos de enseñanza de la química, la formación del pensamiento crítico en ambientes experimentales y los estudios sobre la síntesis y caracterización del PPy. Por su parte, el marco referencial integra los fundamentos teóricos que orientan la investigación: los referentes químicos asociados a los polímeros conductores (PCs) y las técnicas electroquímicas para la síntesis del PPy, así como los referentes pedagógicos que sustentan el ABR y las habilidades del pensamiento crítico, inferencia y explicación.

El tercer capítulo describe el marco metodológico, es decir, el tipo y enfoque que orientó el proceso de investigación, además de las etapas y los instrumentos de recolección de información. Para el desarrollo de la presente investigación se propone un enfoque metodológico de tipo cualitativo y de corte descriptivo, que se llevó a cabo a través de cuatro fases de investigación: 1) fundamentación y experimentación, 2) planeación, 3) desarrollo y 4) evaluación. Dentro de los instrumentos de recolección se plantean las guías de los TPL con

enfoque en el ABR, que orientan la parte experimental y permiten observar el proceso de razonamiento de los QF; el informe de laboratorio, que evidencia su capacidad para inferir y explicar los resultados obtenidos; y la matriz de evaluación, elaborada a partir de los referentes teóricos sobre pensamiento crítico, que sirvió para analizar los desempeños alcanzados.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir de la implementación de las guías de TPL, articulando la información derivada de los informes de los QF, las redes conceptuales y la codificación de datos mediante Atlas.ti, con el fin de evidenciar el desarrollo de las habilidades de inferencia y explicación en coherencia con los objetivos de la investigación. Asimismo, se discuten los hallazgos a la luz de los referentes teóricos y se establecen las conclusiones, en las que se sintetizan los aportes de la propuesta didáctica al fortalecimiento del pensamiento crítico y se plantean posibles proyecciones para futuras investigaciones en el ámbito de la enseñanza de la química. Finalmente, se presentan los anexos, en los cuales se incluyen el consentimiento informado, la matriz diligenciada por los expertos para la evaluación de las guías construidas, un informe de laboratorio a modo de ejemplo, la guía de estudio y las tres guías de trabajo práctico de laboratorio.

CAPÍTULO 1

FORMULACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los PCs son compuestos macromoleculares formados por la repetición de unidades estructurales llamadas monómeros, los cuales en su mayoría corresponden a monómeros heterocíclicos de cinco miembros como el pirrol, el furano o el tiofeno que pueden ser oxidados y reducidos. Esta particularidad les permite, en estado oxidado, conducir la corriente eléctrica, a diferencia de los polímeros que actúan como aislantes. Las propiedades eléctricas de los PCs se atribuyen a su estructura conjugada y a la movilidad de electrones a lo largo de la cadena polimérica. Estos materiales han ampliado sus aplicaciones en campos como la electrónica, la energía y los sensores. Su conductividad se potencia mediante un proceso de dopaje, en el cual el polímero es sometido a reacciones controladas de oxidación o reducción que generan cargas libres como polarones y bipolarones capaces de desplazarse a través de la cadena polimérica, confiriéndole una conductividad comparable a la de los semiconductores e incluso, en algunos casos, a la de los metales (Otero, 2003).

Dentro de estos materiales, el PPy se destaca como uno de los PCs más investigados debido a su facilidad de síntesis, estabilidad química y propiedades electroquímicas. El PPy se puede obtener mediante procesos de oxidación electropolimérica, como la cronopotenciometría, en donde los monómeros de pirrol se polimerizan sobre un electrodo bajo condiciones controladas de corriente o mediante la técnica de pulsos galvanostáticos que consiste en la aplicación de secuencias controladas de corriente constante durante intervalos definidos de tiempo. Cuando se ha sintetizado el PPy, este puede ser caracterizado mediante técnicas electroquímicas, como los ensayos de carga y descarga (GCD) y voltamperometría cíclica (CV), que permiten analizar su comportamiento redox, su capacidad de almacenamiento de carga y su posible aplicación en supercapacitores. El PPy se ha caracterizado por ser un polímero conductor muy estudiado en el área de la electroquímica, puesto que ha demostrado ser un material de buena calidad en dispositivos de almacenamiento de energía, debido a que posee una gran capacidad de acumular y liberar carga de manera rápida, lo que lo convierte en el material ideal para la construcción de capacitores electroquímicos, utilizados en dispositivos portátiles y sistemas electrónicos avanzados.

Estas propiedades hacen que el PPy sea un excelente escenario didáctico y pedagógico para comprender la naturaleza química de los PCs, su síntesis y sus diversas aplicaciones, tales como

el uso del PPy como electrodo activo en supercapacitores. Por lo que el reto fue generar un ambiente educativo propicio que promovió las habilidades del pensamiento crítico, inferencia y explicación, en los QF de la Universidad de los Andes, para lo cual, se estructuró una estrategia centrada en los TPL para comprender las técnicas de síntesis y caracterización implicadas en estos procesos.

La presente investigación incluye el diseño de guías de TPL fundamentadas bajo el enfoque del ABR, ya que el laboratorio en la enseñanza de las ciencias es un espacio experimental, de reflexión e investigación, que fomentó la solución de problemas, la argumentación científica y la curiosidad por parte de los QF, en específico para este trabajo. Ahora bien, este enfoque que se incorpora en las guías de los TPL fomenta la apropiación de conceptos científicos del área de la electroquímica y se generó un entorno en el que los QF asumen un rol activo en la planificación de estrategias, la identificación de problemas y la interpretación de los datos obtenidos.

El objetivo fue analizar el fortalecimiento de las habilidades del pensamiento crítico, particularmente la inferencia y la explicación, teniendo en cuenta que la inferencia le permite a los QF interpretar los resultados experimentales y establecer conexiones entre los datos obtenidos y la teoría, mientras que la explicación se refiere al proceso en el que los QF fundamentan sus conclusiones a partir de las evidencias empíricas obtenidas.

Ahora bien, el proceso de síntesis y caracterización del PPy mediante técnicas como la cronopotenciometría, pulsos galvanostáticos, la CV y GCD, empleando electrodos de distinta naturaleza (Ag(s)/AgCl(s), platino y carbón vítreo), no solo se constituye como una investigación orientada desde un diseño experimental con un alto valor científico, sino también una oportunidad didáctica para que los QF fortalezcan su pensamiento crítico, dejando atrás la simple ejecución de protocolos hacia un aprendizaje significativo en el campo de la Química.

Desde esta perspectiva, la pregunta de investigación que orientó este trabajo de grado es: ¿Cómo el diseño e implementación de una serie de guías de trabajos prácticos de laboratorio relacionadas con las técnicas de síntesis y caracterización electroquímica del polipirrol fundamentadas en el enfoque del aprendizaje basado en retos contribuye al fortalecimiento de las habilidades de inferencia y explicación de un grupo de QF de la Universidad de los Andes?

JUSTIFICACIÓN

En el área de Química hoy es importante el desarrollo de propuestas educativas que cambien la enseñanza tradicional que se limita solo a la transmisión de conocimientos para formar profesionales que sean capaces de enfrentar retos científicos y tecnológicos. Desde esta perspectiva, estructurar los TPL fundamentados en el enfoque ABR constituye una estrategia didáctica que permite enfrentar los límites de la enseñanza tradicional, pues promueve la participación, el compromiso y la construcción activa del conocimiento al abordar retos y sub-retos contextualizados. La evidencia empírica en educación superior muestra que el ABR, al vincular retos auténticos con la formación académica, potencia significativamente el desarrollo de habilidades del pensamiento crítico, como la inferencia y la explicación, superando los enfoques tradicionales centrados en la exposición de contenidos que muchas veces limitan la participación del estudiante (Nieto & Hilt, 2025).

La implementación de TPL basados en ABR en el curso de Fisicoquímica Avanzada II de la Universidad de los Andes de Colombia ofrece un marco didáctico coherente para el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, dado que los QF no solo ejecutan procedimientos experimentales, sino que analizan, interpretan y justifican resultados a partir de datos reales, favoreciendo un aprendizaje significativo. Ahora bien, el proceso de síntesis y caracterización electroquímica de los PCs como el PPy para determinar y analizar su capacitancia y por ende su uso potencial como supercapacitor, se convierte en un escenario experimental que permite abordar estas habilidades cognitivas indispensables para interpretar fenómenos y fundamentar conclusiones con base en evidencias (Facione, 1990). Además, esta integración responde a la necesidad de fortalecer competencias del saber específico y disciplinar en los QF sobre electroquímica.

Durante la síntesis y caracterización electroquímica del PPy, los QF pulen y limpian electrodos, preparan soluciones, programan técnicas electroquímicas como la CV y la GCD, y analizan en tiempo real la respuesta del material. Esta etapa exige que los QF no solo argumenten por qué emplean determinados parámetros y cómo interpretan los voltamperogramas, sino que también establezcan relaciones entre los resultados experimentales y los fundamentos teóricos, identifiquen patrones en el comportamiento electroquímico del material y formulen conclusiones a partir de la evidencia obtenida. De esta manera, los QF explican por qué ciertas configuraciones experimentales producen películas más estables o capacitivas, al tiempo que infieren cómo las condiciones de síntesis influyen en las propiedades del material. El

laboratorio, estructurado como un reto, se convierte en un espacio donde el razonamiento científico emerge no solo de la ejecución técnica, sino de la reflexión sobre las decisiones experimentales.

De este modo, se estructuró una experiencia que no solo motivó a los QF a que conozcan un poco más sobre los PCs, un campo de relevancia tecnológica y científica en energías renovables y almacenamiento de carga, de acuerdo con Bose (2010), sino que también permita diseñar TPL en los que los QF asuman un rol activo frente a los fenómenos electroquímicos involucrados en este proceso, que por lo general son difíciles de enseñar e interpretar. De esta manera, los TPL dejan de ser actividades de repetición mecánica y se convierten en espacios de investigación y construcción de conocimiento, donde se relaciona la información teórica con la práctica experimental desde la reflexión crítica (Zorrilla, 2019). De esta manera, el enfoque del ABR fortalece el aprendizaje de los QF al ponerlos ante situaciones auténticas y reales que les exigen analizar información, proponer soluciones y justificar sus decisiones desde una perspectiva cercana al ejercicio científico (Observatorio de innovación educativa del tecnológico de Monterrey., 2016).

Es por esta razón que la construcción de guías de laboratorio con un enfoque pedagógico e investigativo enriquecen el conocimiento teórico en química y también promueven la reflexión sobre su enseñanza en contextos diversos y situados. Asimismo, cuando se relacionan este tipo de experiencias con la realidad social, se promueve un aprendizaje que trasciende el aula, contribuyendo a la formación de profesionales que sean capaces de investigar, innovar y aportar soluciones viables a problemáticas locales y globales (Johnson, Smith, Smythe, & Varon, 2009).

El pensamiento crítico es importante para que los futuros profesionales enfrenten los desafíos de un mundo en constante cambio, con responsabilidad y compromiso social. Aunque esta propuesta exige reconocer las limitaciones del estudio como el alcance del diseño experimental asociado a la síntesis y caracterización electroquímica del PPy, el tiempo de implementación y los recursos disponibles, esta iniciativa se presenta como una apuesta formativa, sustentada en una planificación realista que respalda su impacto académico y pedagógico.

OBJETIVOS

Objetivo general

Fortalecer las habilidades de pensamiento crítico, inferencia y explicación en un grupo de químicos en formación de la Universidad de los Andes a través del diseño e implementación de una serie de guías de trabajos prácticos de laboratorio fundamentadas en el enfoque del aprendizaje basado en retos y las técnicas de síntesis y caracterización electroquímica del polipirrol

Objetivos específicos

1. Determinar los elementos conceptuales y procedimentales que estructuran las guías de los TPL para definir las propiedades capacitivas del polipirrol, sintetizado por cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos, mediante la caracterización electroquímica por voltamperometría cíclica y carga-descarga galvanostática.
2. Estructurar una serie de guías de TPL fundamentadas en el aprendizaje basado en retos y en el estudio de las técnicas de síntesis y caracterización electroquímica del polipirrol para el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, inferencia y explicación.
3. Evaluar la contribución de la serie de guías de los TPL en el fortalecimiento de las habilidades de pensamiento crítico, inferencia y explicación de un grupo de químicos en formación.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES.

En el desarrollo de este trabajo de investigación se realizó una búsqueda documental en bases de datos nacionales e internacionales, con el propósito de identificar aportes, metodologías investigativas y experiencias que orienten la construcción de guías de TPL fundamentadas en el ABR y en la síntesis y caracterización electroquímica del PPy. Se encontraron estudios en donde se evalúa las habilidades del pensamiento crítico (inferencia y explicación) y se analizaron propuestas didácticas que integran los TPL, el enfoque del ABR, herramientas tecnológicas y de innovación en la enseñanza de la Química, que respaldan a nivel conceptual y experimental el enfoque de esta investigación.

Antecedente 1: “Electrochemical Synthesis and Characterization of Electroactive Conducting Polypyrrole Polymers” (Ansari, 2004).

La síntesis electroquímica del PPy ha sido foco de estudio en los últimos años, en este artículo la electrodeposición de este polímero se realiza en un electrodo de carbón vítreo variando electrolitos como agentes dopantes. En el cual se describe el efecto de la naturaleza y variación de los electrolitos en la estabilidad y la conductividad del polímero, todo ello a través de técnicas comunes como la voltamperometría cíclica y la espectroscopia de impedancia. Los resultados demostraron que en efecto el tipo de dopante, una de las condiciones de síntesis, tiene un impacto decisivo e importante en las propiedades electroactivas del polímero, lo que permitió optimizar su desempeño para su aplicación o uso en dispositivos electrónicos y/o de almacenamiento de energía.

Esta información se hace relevante en este trabajo, porque permite relacionar los parámetros de síntesis del PPy, objeto de estudio de esta investigación, con sus características electroquímicas y como dichos parámetros son importantes para estudiar el comportamiento de este material como supercapacitor. A su vez esta información es útil como base para la construcción de los TPL que no solo sean orientados a la síntesis y caracterización del material, sino que también se promueva a través de ellos la reflexión crítica y se fortalezcan las habilidades de pensamiento crítico de interés en esta investigación, con el fin de que los QF reconozcan como las variables experimentales pueden afectar en el resultado final de las propiedades electroquímicas del polímero.

Antecedente 2: “Polypyrrole Nanomaterials: Structure, Preparation and Application” (Hao, Dong, Zhang, Zhu, & Yu, 2022).

Según la literatura la síntesis del PPy se describe mediante diversos métodos, como la polimerización química oxidativa y los métodos electroquímicos (potenciostático, galvanostático y cronopotenciométrico). En este se menciona que una de las técnicas más recurrentes es la polimerización química oxidativa, en donde el monómero pirrol se hace reaccionar con un agente oxidante fuerte, en este caso el persulfato de amonio (APS), todo ello bajo condiciones de temperatura y concentración controladas. Además, realizan una síntesis electroquímica, en la que el PPy se deposita directamente sobre electrodos de platino, oro y acero inoxidable, aplicando una corriente o potencial definido, lo que permite controlar la morfología y el espesor de las películas adheridas a dichos electrodos. Estos tipos de síntesis se combinan en ocasiones con el uso de surfactantes o dopantes aniónicos (como p-toluenosulfonato, dodecibencenosulfonato, entre otros), para modular la porosidad, la conductividad y la estabilidad estructural del polímero utilizado.

En cuanto a la caracterización del PPy, según el artículo, la microscopía electrónica permite observar la morfología superficial y el tamaño de las nanoestructuras obtenidas, lo cual es esencial para relacionar la estructura con las propiedades electroquímicas. La espectroscopía por otro lado confirma la formación de los enlaces característicos del PPy y la presencia de dopantes en la matriz polimérica y la difracción de rayos X (XRD) aporta información sobre la cristalinidad. Desde el punto de vista electroquímico, se aplican la voltamperometría cíclica y los ensayos de carga-descarga galvanostática, técnicas que permiten evaluar la reversibilidad de los procesos redox, la capacitancia y capacitancia específica, parámetros muy importantes para aplicaciones en supercapacitores. Finalmente, pruebas de conductividad eléctrica y estabilidad térmica complementan la caracterización garantizando que el material cumpla con las condiciones de uso en dispositivos energéticos. Por lo que concluyen que el PPy presenta alta capacitancia específica, buena estabilidad y conductividad, consolidándose actualmente como un material prometedor para su estudio como supercapacitor.

Para esta investigación este artículo es un referente amplio para comprender qué parámetros de síntesis y qué técnicas son las más usadas, cuáles han dado mejores resultados de conductividad, estabilidad y propiedades electroquímicas. Además, fundamenta teóricamente las variables experimentales usadas en esta investigación (electrolito, tipo de dopante, morfológica). Sin embargo, a diferencia de los trabajos presentados en este antecedente, donde

la deposición del polímero se realiza sobre electrodos metálicos como oro y platino, en la presente investigación se propone evaluar la síntesis y deposición del PPy sobre un electrodo de carbón vítreo, lo cual aporta un elemento adicional al análisis de las condiciones de síntesis y caracterización del material dentro del contexto de esta investigación.

Antecedente 3: “La integración de los trabajos prácticos en la enseñanza de la química como investigación dirigida” (Martínez, Doménech, Menargues, & Romo, 2012).

Cuando se desarrollan prácticas de laboratorio en química bajo un enfoque tradicional, la experiencia se reduce a una “receta” que limita el pensamiento crítico de los estudiantes y no trasciende a la comprensión conceptual y teórica de los fenómenos. Es por esto que en este artículo se propone una transformación de estas prácticas, en donde se estructuran como secuencias problematizadas que motivan a los estudiantes a interpretar y reflexionar para construir explicaciones en lugar de mecanizar. A modo de ejemplo el artículo presenta una práctica sobre velocidad de reacción, que fue rediseñada con preguntas abiertas y actividades de análisis conceptual. Demostrando que es posible construir los TPL con un enfoque moderno de manera que se potencien el pensamiento crítico en especial las habilidades de inferencia y explicación.

Antecedente 4: “Aprendizaje Basado en Retos para la creación de TPL en química y electroquímica” (González et al., 2025).

El ABR es una de las estrategias pedagógicas más eficaces para el diseño de los TPL en el área de química cuando se quiere promover la participación activa de los estudiantes a la hora de solucionar problemas reales y desarrollar competencias científicas. En este artículo para un curso universitario de electroquímica se estructuraron actividades en torno a retos relacionados con el tratamiento de aguas residuales, donde los estudiantes debían no solo comprender los conceptos electroquímicos, sino también diseñar experimentos, analizar datos y proponer posibles soluciones fundamentadas, lo que les permite formular hipótesis, tomar decisiones metodológicas y aplicar técnicas electroquímicas en contextos específicos.

Esto es pertinente para este trabajo porque demuestra que el enfoque centrado en el ABR potencia las habilidades del pensamiento crítico inferencia y explicación que son parte de los criterios a tener en cuenta en el diseño de guías de TPL fundamentadas en la síntesis y caracterización electroquímica del PPy. Esta integración de retos reales en la práctica

experimental les permite a los estudiantes comprender la importancia de cada uno de los procedimientos y la influencia de estos en los resultados.

Antecedente 5: “Trabajo de laboratorio en física y química a través de un enfoque problematizador” (Labra & Arias, 2024).

Como se ha podido detallar en los artículos anteriores los laboratorios del área de química pueden convertirse en espacios de reflexión y de construcción de conocimiento cuando se desarrollan bajo un enfoque ABR. En este artículo un grupo de estudiantes se enfrenta a preguntas abiertas y a diseñar parte de los protocolos de una práctica de laboratorio, los resultados mostraron que desarrollaron un pensamiento más crítico, al identificar relaciones entre las variables del fenómeno y explicar con base en la teoría. Además, se resalta en el artículo la importancia de discutir errores experimentales y sus implicaciones porque se fortalece tanto la comprensión conceptual como la capacidad de argumentar. De esta manera se evidencia que la problematización en los TPL puede favorecer la inferencia y la explicación, que son competencias centrales para esta investigación, promoviendo la reflexión sobre el ¿por qué? y el ¿cómo? de lo que se observa experimentalmente, la validez y confiabilidad de los datos obtenidos y la relación de estos con lo que se espera teóricamente.

MARCO REFERENCIAL.

En el presente marco de referencia se agrupan los fundamentos conceptuales que sustentan esta investigación, en cuanto a los referentes químicos asociados con la síntesis y caracterización electroquímica del PPy y el enfoque pedagógico que fundamenta este trabajo. El PPy es un polímero conductor reconocido por su estructura conjugada y capacidad de dopaje, ofrece un escenario educativo para el abordaje de fenómenos electroquímicos tales como los procesos de oxidación-reducción, el transporte de carga y masa y el almacenamiento de energía. Este material se ha posicionado como un polímero conductor de interés científico y tecnológico, por lo que, ha sido utilizado también como un recurso didáctico pertinente para el diseño de experiencias que permitan a los QF comprender e interpretar los procesos electroquímicos en estos contextos experimentales.

En este marco se integran los referentes didácticos que orientan el diseño de las guías de los TPL, con el fin de generar espacios formativos donde se promueva el desarrollo de las habilidades de inferencia y explicación del pensamiento crítico, necesarias para analizar evidencias, establecer relaciones entre variables y construir conclusiones fundamentadas. Para la enseñanza de las ciencias, los TPL siempre han sido un componente esencial, debido a que permiten la articulación entre los conocimientos teóricos y la experiencia directa con los fenómenos estudiados en el laboratorio (Hofstein & Lunetta, 2004). Entonces, el laboratorio cumple una función instrumental, pero además se convierte en un ambiente de aprendizaje donde los QF puedan explorar y elaborar explicaciones a partir de la experimentación y el análisis de los fenómenos que observaron en el mismo. Sin embargo, algunos estudios sobre los TPL han mencionado que esta herramienta usualmente se diseña bajo un enfoque tradicional centrado en la ejecución de procedimientos previamente establecidos, lo que hace que la actividad se reduzca a una operación mecánica que limita la comprensión conceptual y la participación de los estudiantes a lo largo de su implementación (Domin, 1999).

Este tipo de prácticas promueve una visión empirista de la ciencia, en la que los resultados se establecen como evidencias incuestionables, sin propiciar procesos de interpretación, reflexión crítica o argumentación. Ahora bien, los enfoques contemporáneos en didáctica de las ciencias proponen que los TPL deben ser estructurados bajo modelos de indagación, en los que los QF y cualquier estudiante participe en la formulación de preguntas, la construcción de hipótesis, el diseño de estrategias experimentales y la interpretación de resultados (Hofstein & Lunetta, 2004).

Para los PCs como el PPy, los TPL se vuelven una herramienta importante, ya que, permiten abordar fenómenos que implican la interacción entre variables electroquímicas, estructurales y funcionales. Lo que implica que los QF además de ejecutar procedimientos, también comprendan las variables como la densidad de corriente, el tipo de dopante o que método de síntesis y caracterización influyen en las propiedades electroquímicas de dicho material. Por esta razón, los TPL se constituyen como un escenario propicio para el desarrollo de habilidades del pensamiento crítico, al permitir que los QF establezcan relaciones causales, comparen información y construyan explicaciones fundamentadas.

Es por esta razón que se hace necesario diseñar TPL que superen la lógica instrumental y que se oriente hacia la resolución de problemas contextualizados, en los que los estudiantes asuman un rol activo en la construcción del conocimiento. En ese sentido, para esta investigación el ABR surge como una estrategia didáctica pertinente para estructurar y elaborar estas experiencias, al proponer situaciones desafiantes que demandan la integración de conocimientos, la interpretación de evidencias o resultados y la construcción de soluciones argumentadas, favoreciendo así el desarrollo de habilidades del pensamiento crítico en el contexto de la enseñanza de la química.

Como ya se mencionó el ABR se constituye como un enfoque pedagógico que contextualiza a los QF frente a problemáticas auténticas que requieren de un análisis crítico, toma de decisiones fundamentadas y construcción de soluciones. Este enfoque, según el Observatorio de Innovación Educativa del Tecnológico de Monterrey (2016) establece que el aprendizaje se potencia cuando los estudiantes actúan como agentes activos capaces de interpretar información, investigar y relacionar conceptos teóricos con situaciones cercanas a la realidad profesional. En el campo de la educación científica o de la ciencia en general, esto se hace muy importante, pues permite que los QF no solo comprendan fenómenos, sino que desarrollen habilidades cognitivas, como la inferencia y la explicación.

Según Suárez (2019), el ABR se estructura en cuatro etapas fundamentales: inicial, intermedia, avanzada y final. En la etapa inicial los QF reconocen sus conocimientos previos, identifican sus vacíos conceptuales y lo que necesitan aprender y comprenden la relevancia del reto general. En este punto, los QF comienzan a plantear preguntas, delimitar la información que consideran pertinente, explorar posibles explicaciones inicial y establecer posibles rutas de abordaje del problema. De la misma forma, analizan la información disponible, relacionan los conceptos y empiezan a construir una comprensión de la situación planteada. Por otro lado, en

esta misma etapa el docente introduce el desafío, es decir, proporciona información clave y orienta la comprensión del contexto, promoviendo entonces espacios de discusión que favorezcan la organización de ideas, el cuestionamiento de supuestos y la construcción de planteamientos coherentes. Esta etapa es fundamental según el Observatorio de Innovación Educativa del Tecnológico de Monterrey (2016) porque determina las bases del proceso de aprendizaje, al propiciar que los QF formulen preguntas relevantes, identifiquen información significativa, establezcan relaciones entre los conceptos y comiencen a sustentar sus ideas a partir de argumentos iniciales que a su vez guiaran el desarrollo del reto general.

La etapa intermedia se orienta a la indagación y planificación, dando continuidad a los cuestionamientos y aproximaciones iniciales construidas en la fase anterior. En este momento, los QF profundizan en el fenómeno de estudio mediante la formulación de preguntas más específicas, el análisis de la información disponible en los materiales proporcionados y la revisión de literatura pertinente que les permita comprender con mayor rigor el problema planteado. A partir de este proceso, organizan la información recopilada, establecen relaciones entre conceptos, contrastan distintas fuentes y comienzan a estructurar estrategias de trabajo que orienten la resolución del reto. Asimismo, avanzan en la interpretación de los datos y en la construcción de posibles explicaciones que den sentido al fenómeno abordado. Por su parte, el docente acompaña este proceso guiando la búsqueda y selección de información, promoviendo la problematización y apoyando la organización de ideas para la planificación de las acciones a seguir. De acuerdo con el Observatorio de Innovación Educativa del Tecnológico de Monterrey (2016), esta etapa es fundamental porque favorece que los QF analicen la información, realicen interpretaciones para comprender el fenómeno, establezcan relaciones entre los datos disponibles y construyan planteamientos más elaborados que orienten de manera fundamentada el desarrollo del reto.

La etapa avanzada, según Suárez (2019), es el momento en el que los QF implementan las estrategias diseñadas, ponen a prueba sus decisiones y resuelven el reto mediante acciones concretas. En esta fase, el estudiante asume un rol activo como sujeto de aprendizaje al intentar aplicar sus conocimientos previos en situaciones experimentales, al analizar resultados y tomar decisiones fundamentadas a partir de la evidencia obtenida. Por otro lado, el rol del docente en esta etapa es orientar el proceso proporcionando acompañamiento, es decir, debe hacer una retroalimentación oportuna y promover la reflexión sobre las acciones realizadas dentro el laboratorio. Según el Observatorio de Innovación Educativa del Tecnológico de Monterrey

(2016), en esta etapa le permite a los QF formular hipótesis, cuestionen sus resultados o la evidencia, analicen los resultados obtenidos y elaboren conclusiones razonadas a partir de los datos; así como la capacidad de describir procedimientos, justificar decisiones y construir argumentos coherentes y fundamentados sobre los resultados alcanzados.

Por último, se habla de una etapa final que implica la evaluación, validación y comunicación de resultados. En esta etapa el estudiante analiza críticamente el proceso desarrollado, compara los resultados obtenidos durante la práctica con los referentes teóricos y experimentales, para de esta manera, construir explicaciones fundamentadas que expliquen el porqué de los hallazgos obtenidos. También, se espera que los estudiantes comuniquen sus resultados de manera rigurosa, clara y estructurada, de manera que se evidencie la apropiación del conocimiento construido. El docente por otro lado utiliza la evaluación formativa, es decir, acompaña al estudiante en el proceso, en la argumentación y la promoción de la reflexión crítica sobre el aprendizaje alcanzado o construido. De acuerdo con el Observatorio de Innovación Educativa del Tecnológico de Monterrey (2016), esta etapa favorece que los QF cuestionen la evidencia disponible, elaboren conclusiones coherentes a partir de los datos, formulen interpretaciones sustentadas, describan de manera organizada los procedimientos y resultados, justifiquen sus decisiones y construyan argumentos sólidos que respalden sus planteamientos.

Existen cuatro etapas del ABR que orientan la estructura de las guías de los TPL, como se observa en la Figura 1, de manera que los QF se contextualicen desde su proceso formativo que inicia con la comprensión del problema, continua con la indagación, se concreta con la práctica experimental y termina con la reflexión crítica sobre sus resultados y la comunicación fundamentada de los mismos. Este enfoque se hace importante y pertinente para esta investigación porque integra el rigor experimental con el desarrollo de competencias cognitivas. De manera que el laboratorio deja de ser un espacio de repetición mecánica y se transforma en un entorno activo en el que se movilizan los procesos del pensamiento crítico esenciales para la formación de los futuros profesionales en química.

Figura 1

Etapas del aprendizaje basado en retos (ABR).



Nota. Adaptado de: Suarez (2019)

Ahora bien, Facione menciona que “el pensamiento crítico se entiende como un proceso intencional, autorregulado y orientado, que implica interpretar, analizar evaluar, inferir y explicar” (1990), por ello, se configura como el eje transversal que articula las metodologías didácticas implementadas en este trabajo de investigación, específicamente los TPL diseñados bajo el enfoque del ABR. Este concepto trasciende la noción de razonamiento básico, al integrar un conjunto de habilidades cognitivas orientadas a la comprensión de los fenómenos, la toma de decisiones fundamentadas y la construcción de conocimiento a partir de la evidencia. En este marco, el pensamiento crítico incorpora habilidades de inferencia, entendida como la capacidad de interpretar datos, identificar patrones y establecer relaciones entre la teoría y la práctica, y de explicación, que implica justificar resultados, argumentar conclusiones y establecer relaciones causales sustentadas en principios científicos.

La concepción de experiencias experimentales desde el contexto de la enseñanza de la química requiere de una transformación, pues los TPL deben dejar de ser una serie de procedimientos que están orientados solo a la verificación de conceptos previamente abordados por los

estudiantes, para convertirse en herramientas en las que se promueva la indagación, en la que los QF analicen sus resultados, identifiquen errores experimentales y evalúen la coherencia entre la teoría y la práctica. Todo esto para que el estudiante ejecute procedimientos, pero simultáneamente sea capaz de reflexionar sobre sus acciones o resultados y que pueda reconocer las posibles fuentes de error y construir explicaciones fundamentadas sobre las variaciones observadas a lo largo de la práctica de laboratorio.

El pensamiento crítico se constituye como una competencia muy importante para la formación científica, debido a que por medio de esta los QF comprenden los conceptos propuestos, pero también los cuestionan, comparan y los aplican en diferentes contextos. En esta investigación se quiere fortalecer particularmente las habilidades de inferencia y la explicación que hacen parte del pensamiento crítico, debido a su papel central en la interpretación de resultados experimentales y en la construcción de argumentos científicos. Estas habilidades de eligieron ya que según Saxton, Bélanger y Becker (2012) y Facione (1990), ambas habilidades son el núcleo del razonamiento científico, la inferencia y la explicación son la evidencia de que el estudiante construye el conocimiento científico a partir de la experiencia experimental y los resultados obtenidos en la misma, mientras que las otras habilidades que menciona Facione se manifiestan en el proceso de manera transversal, estas son habilidades que le permiten a los QF extraer conclusiones válidas a partir de la evidencia, evaluar la pertinencia de la información disponible y justificar de manera coherente y fundamentada de los resultados.

Con el fin de entender las diferencias conceptuales de ambas habilidades del pensamiento crítico (inferencia y explicación), en la Tabla 1, se muestra la conceptualización que propone Facione (1990) de las habilidades de inferencia y explicación, las cuales orientan el diseño de las guías de TPL y los análisis de resultados obtenidos en el proceso de esta investigación.

Tabla 1.*Conceptualización de habilidades cognitivas*

Habilidades de Pensamiento Crítico	Consenso de expertos
Inferencia	Identificar y asegurar los elementos necesarios para sacar conclusiones razonables; formular conjeturas e hipótesis; considerar la información pertinente y sacar las consecuencias que se desprenden de los datos, enunciados, principios, evidencias, juicios, creencias, opiniones, conceptos, descripciones, preguntas u otras formas de representación. Las sub-habilidades de inferencia son: cuestionar la evidencia, proponer alternativas y sacar conclusiones.
Explicación	La capacidad de presentar los resultados del razonamiento propio de manera reflexiva y coherente. Se consideran como sub-habilidades de la explicación: la descripción de métodos y resultados, justificar procedimientos, proponer y defender, las explicaciones propias causales y conceptuales de eventos o puntos de vista y presentar argumentos completos y bien razonados en el contexto de buscar la mayor comprensión posible.

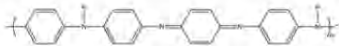
Nota: Adaptado de Facione (1990)

Las definiciones descritas por Facione no solo permiten orientar la construcción de las guías, sino que nos brinda una base conceptual para el análisis de los productos obtenidos al sintetizar y caracterizar electroquímicamente PCs, en particular el PPy.

Los PCs constituyen una clase especial de macromoléculas que, a diferencia de los polímeros convencionales aislantes, presentan sistemas de enlaces π conjugados a lo largo de su cadena, lo que permite la deslocalización de la carga al migrar los electrones y les confiere propiedades eléctricas semiconductoras o conductoras bajo determinadas condiciones. Esta característica ha despertado un gran interés en la investigación de materiales electroactivos, tal como se describe en la Figura 2, ya que estos polímeros pueden modificar su conductividad eléctrica mediante procesos de oxidación, reducción o dopaje, lo que los hace particularmente útiles en aplicaciones electroquímicas, sensores, dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía (Inzelt, 2012).

Figura 2

Estructuras químicas y aplicaciones de los polímeros conductores aromáticos comunes.

Polymer	Chemical Structure	Applications
Polypyrrole (PPy)		Fuel cells, corrosion protection, computer displays, microsurgical tools, biosensors
Polyaniline (PANI)		Biosensors, neural probes, drug delivery, tissue engineering
Polythiophene (PT)		Biosensors, solar cells, tissue engineering, photosensitizers, supercapacitors
Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT)		Neural electrodes, nerve grafts, heart muscle patches

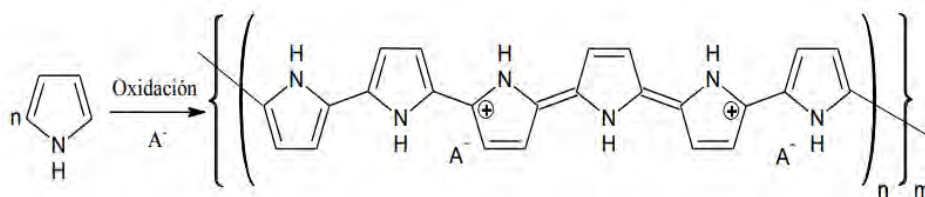
Nota. Tomado de Research Progress on Conducting Polymer-Based Biomedical Applications (Park, Jung, & Chang, 2019).

Entre los PCs más estudiados se encuentra el PPy, un material ampliamente investigado debido a su facilidad de síntesis electroquímica, estabilidad química relativamente alta y buen comportamiento electroquímico. El PPy se obtiene a partir de la polimerización del monómero pirrol, formando una cadena conjugada en la que los electrones π pueden desplazarse a lo largo de la estructura del polímero. Esta estructura conjugada favorece la movilidad de carga cuando el material es sometido a procesos de dopaje y oxidación, permitiendo que el polímero pase de un estado relativamente aislante a uno conductor (Inzelt, 2012).

Ansari (2004) describe la estructura conjugada del PPy, tal como se observa en la Figura 3, resaltando que la oxidación del polímero y la incorporación de aniones dopantes promueven la deslocalización de carga a lo largo de la cadena polimérica, favoreciendo así su conductividad eléctrica. Además, el autor señala que las variables como el tipo de dopante, la naturaleza del electrodo, el electrolito y las condiciones electroquímicas como la densidad de corriente y el tiempo de polimerización influyen directamente en la estabilidad térmica, la morfología de las películas obtenidas y el desempeño electroquímico del material. En este sentido, estudios posteriores han confirmado que las propiedades funcionales del PPy, como su capacitancia, estabilidad y eficiencia electroquímica, dependen en gran medida de las condiciones de síntesis empleadas.

Figura 3

Polimerización electroquímica del polipirrol.



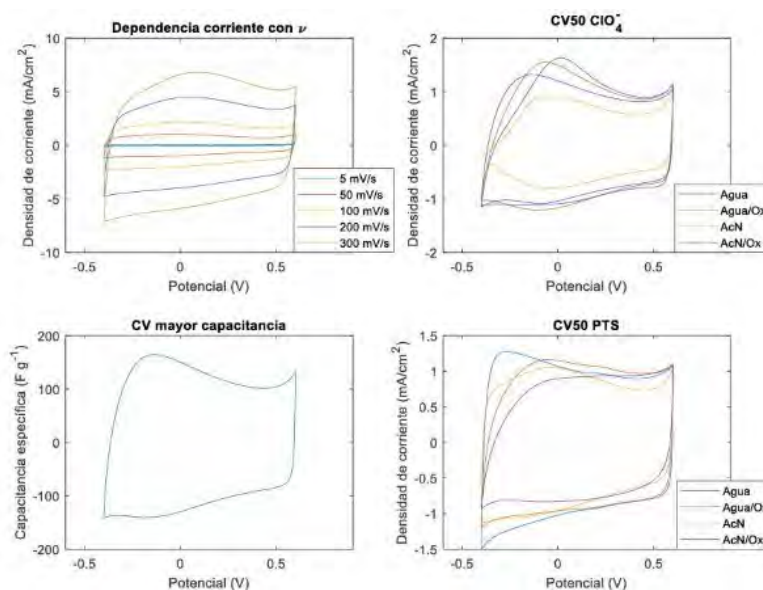
Nota. Tomado de Síntesis y caracterización de polipirrol dopado con poliestireno sulfonato de sodio (Bermudez, 2016).

Un ejemplo de ello se presenta en el estudio del efecto de algunos parámetros de síntesis en la pseudocapacitancia de películas de PPy, donde se sintetizaron electroquímicamente películas variando el dopante, el solvente y la corriente de post-oxidación, y posteriormente se evaluaron sus propiedades mediante voltamperometría cíclica, carga/descarga galvanostática, impedancia electroquímica y análisis estructural y morfológico (Pérez Torres & Córtes Montañez, 2017). Los autores encontraron, como se observa en la Figura 4, que la respuesta electroquímica del material depende fuertemente de estas condiciones de síntesis. En particular, los voltamperogramas muestran cómo la densidad de corriente aumenta con la velocidad de barrido, lo cual es característico de materiales con comportamiento pseudocapacitivo, mientras que la comparación entre diferentes medios de síntesis evidencia que el tipo de dopante y el solvente modifican la forma y el área del voltamperograma, parámetros directamente relacionados con la capacitancia del material.

Asimismo, al comparar sistemas sintetizados con el ion perclorato (ClO_4^-) y con el p-toluenosulfonato (PTS), se observa que el primero presenta una mayor área en los voltamperogramas cuando se emplea agua como solvente y sin corriente de post-oxidación, lo que indica una mayor acumulación de carga en la superficie del polímero. En contraste, otras combinaciones de solvente y condiciones de oxidación generan respuestas electroquímicas más limitadas, asociadas a diferencias en la morfología de la película y en la movilidad de los iones dentro de la matriz del polímero. De esta manera, el análisis comparativo de los voltamperogramas y de la capacitancia obtenida demuestra que ciertas combinaciones de condiciones de síntesis, como el uso del ion perclorato como dopante en medio acuoso y sin corriente de post-oxidación, generan valores más altos de capacitancia y un mejor rendimiento electroquímico, evidenciando que los parámetros de síntesis influyen directamente en la eficiencia y estabilidad del material.

Figura 4

Voltamogramas PPy: a) dependencia con velocidad de barrido, b) comparación PPy dopado con PTS, c) PPy/ ClO_4^- en agua, d) comparación PPy dopado con ClO_4^- .

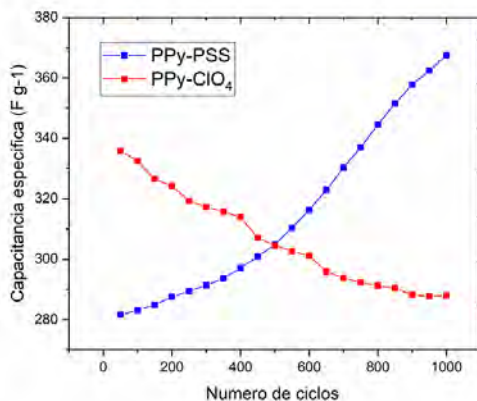


Nota. Tomado de Estudio del efecto de algunos parámetros de síntesis en la pseudocapacitancia de películas de polipirrol sintetizadas electroquímicamente (Pérez & Córtes, 2017).

De manera complementaria, en la tesis Síntesis electroquímica de películas de polipirrol/ $\text{La}(\text{OH})_3$ y estudio de sus propiedades como capacitor (Cortés Aguillón, 2020) se analizan variables relevantes del proceso, como el tipo de electrolito y el tamaño del ion dopante empleados durante la síntesis. En este trabajo se evalúa además la estabilidad del material mediante ciclos de carga y descarga, tal como se presenta en la Figura 5, en donde se comparan sistemas de PPy dopados con poliestirenosulfonato (PSS^-) y el ion perclorato (ClO_4^-). El dopante PSS^- , debido a su naturaleza polimérica y mayor tamaño, tiende a quedar más firmemente incorporado en la estructura del PPy, favoreciendo la estabilidad estructural del material y una mayor retención de capacitancia durante múltiples ciclos electroquímicos. En contraste, el anión ClO_4^- , al ser más pequeño y móvil, puede intercambiarse con mayor facilidad con la solución durante los procesos de carga y descarga, lo que puede provocar una disminución progresiva de la capacitancia específica con el número de ciclos.

Figura 5

Ciclo de carga/descarga galvanostática de películas de PPy con distintos aniones dopantes, en KCl 1M a una densidad de corriente de 2mA/cm².



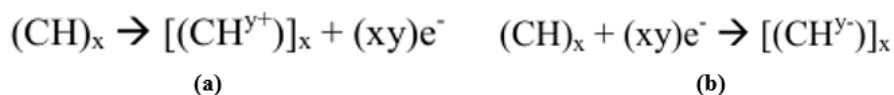
Nota. Tomado de (Cortés, 2020)

De esta manera, el estudio considera distintos electrolitos soporte como KCl, Na₂SO₄ y H₂SO₄, los cuales influyen en la conductividad iónica del medio y en la movilidad de las especies durante los procesos electroquímicos, afectando la eficiencia del transporte de carga y la estabilidad del sistema durante la caracterización. En este contexto, el dopante desempeña un papel fundamental en la síntesis electroquímica de PCs como el PPy, ya que estas especies iónicas se incorporan a la estructura del polímero durante el proceso de oxidación para mantener la neutralidad de carga de la cadena conjugada, mientras que el electrolito del medio controla la movilidad de los iones y el equilibrio iónico durante los procesos de carga y descarga, influyendo directamente en la estabilidad electroquímica y en el desempeño capacitivo del material.

Los procesos de dopaje en PCs pueden clasificarse principalmente en dopaje tipo p y dopaje tipo n. Como se observa en la Figura 6(a) el dopaje tipo p, el polímero se oxida generando cargas positivas en la cadena polimérica, las cuales son compensadas mediante la incorporación de aniones provenientes del electrolito. Este proceso implica la donación de electrones de la banda de valencia del polímero, lo que da lugar a la formación de agujeros o portadores de carga positivos que pueden desplazarse a lo largo de la estructura conjugada del material. La aparición de estas cargas provoca una reorganización electrónica en la cadena polimérica, generando nuevos estados energéticos dentro de la banda prohibida del material que facilitan el transporte de carga y, por lo tanto, aumentan su conductividad eléctrica.

Figura 6

(a) *p*-dopaje de un polímero y (b) *n*-dopaje de un polímero.



Nota. Tomado de síntesis y caracterización de polipirrol dopado con poliestireno sulfonato de sodio (Bermúdez, 2016)

Por el contrario, en el dopaje tipo *n*, que se presenta en la Figura 6(b) el polímero se reduce y se incorporan cationes para equilibrar las cargas negativas generadas en la estructura del material (Namsheer & Rout, 2021). En este caso, el proceso implica la transferencia de electrones hacia niveles energéticos cercanos a la banda de conducción, lo que genera portadores de carga negativos que también pueden desplazarse a través de la cadena conjugada del polímero. Sin embargo, este tipo de dopaje suele ser menos estable en muchos PCs debido a la reactividad de las especies reducidas frente al medio o al oxígeno disuelto. En el caso del PPy, el mecanismo predominante corresponde al dopaje tipo *p*, donde los aniones del electrolito se insertan en la matriz del polímero durante la polimerización electroquímica, lo que influye directamente en su conductividad eléctrica y en sus propiedades electroquímicas (Inzelt, 2012).

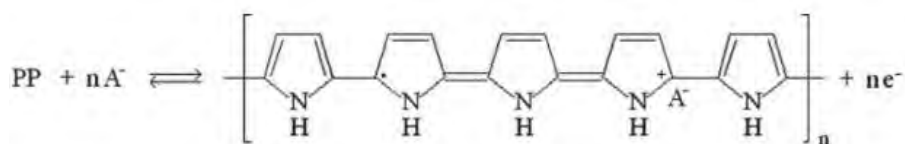
Durante el proceso de dopaje en PCs como el PPy, la oxidación de la cadena polimérica no solo implica la incorporación de contraiones del electrolito, sino también la formación de especies cargadas conocidas como polarones y bipolarones, que desempeñan un papel fundamental en el transporte de carga dentro del material. Cuando el polímero se oxida y cede un electrón, se genera un polaron, que corresponde a un radical catión localizado acompañado de una distorsión estructural en la cadena conjugada del polímero. Este estado introduce niveles energéticos dentro de la banda prohibida del material, que se refiere a la diferencia de energía que hay entre la banda de valencia y la de conducción, facilitando el movimiento de carga a lo largo de la cadena polimérica.

Si el proceso de oxidación continúa y se cede un segundo electrón cercano al primero, pueden formarse bipolarones, que corresponden a especies dicatiónicas más estables asociadas a la deslocalización de carga en segmentos más amplios del polímero. La formación y movilidad de polarones y bipolarones es uno de los mecanismos que explica la conductividad eléctrica en los polímeros conjugados dopados, ya que estas especies actúan como portadores de carga que pueden desplazarse a lo largo de la estructura del material bajo la influencia de un campo eléctrico (Skotheim & Reynolds, 2007; Inzelt, 2012). En el caso del PPy, estos procesos

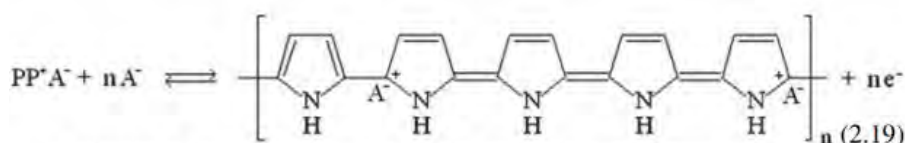
ocurren simultáneamente con la incorporación de aniones provenientes del electrolito como se observa en la Figura 7, los cuales compensan las cargas positivas generadas en la cadena polimérica y contribuyen a estabilizar estas especies cargadas.

Figura 7

Distorsiones de la deslocalización para la cadena de PPy (Polaron y Bipolaron).



Polaron (radical cation associated with a lattice distortion) (PP^+). (2.18)



Bipolaron (dication associated with a strong localized lattice distortion). (2.19)

Nota. Tomado de Conducting Polymers (Inzelt, 2012)

Entre los dopantes comúnmente utilizados para la síntesis de PPy se encuentra el ácido p-toluenosulfónico (p-TSA). En solución acuosa, este compuesto se comporta como un ácido fuerte y se disocia cediendo un protón (H^+) y formando el anión p-toluenosulfonato ($p-TS^-$), tal como se muestra en la Figura 8. Esta separación ocurre debido a la alta polaridad del ácido sulfónico ($-SO_3H$), el cual presenta enlaces altamente polarizados entre el azufre y los oxígenos; al disolverse en el medio, el protón se cede del ácido sulfónico y queda estabilizado en la solución, mientras que la carga negativa se deslocaliza entre los átomos de oxígeno del anión sulfonato ($-SO_3^-$), lo que confiere una gran estabilidad al anión formado (Clayden, Greeves, & Warren, 2001).

El anión p-toluenosulfonato posee un tamaño relativamente grande y una alta estabilidad química, características que favorecen su incorporación dentro de la estructura del polímero durante el proceso de oxidación. Esta incorporación contribuye a mejorar la conductividad eléctrica del material, la estabilidad de la película formada y su comportamiento electroquímico. Además, la presencia de aniones voluminosos puede favorecer la formación de películas más homogéneas y estables, lo cual resulta particularmente beneficioso en aplicaciones relacionadas con dispositivos de almacenamiento de energía como los supercapacitores (Conway, 1999).

Figura 8

Desprotonación del ácido p-Toluenosulfónico.



Nota. Tomado de Organic Chemistry (Clayden, Greeves, & Warren, 2001)

En este tipo de estudios electroquímicos, la síntesis y caracterización del PPy se realizan generalmente mediante un sistema electroquímico controlado, en el cual el material se deposita sobre la superficie de un electrodo mediante la aplicación de un potencial o una corriente definida. Para ello se emplea una celda electroquímica, que contiene la disolución electrolítica donde se encuentra disuelto el monómero de pirrol junto con el dopante previamente descrito, en este caso el ácido p-toluenosulfónico. Esta disolución permite tanto la oxidación del monómero como la incorporación de los contraiones durante el proceso de polimerización, facilitando la formación de la película conductora de PPy sobre el electrodo de trabajo.

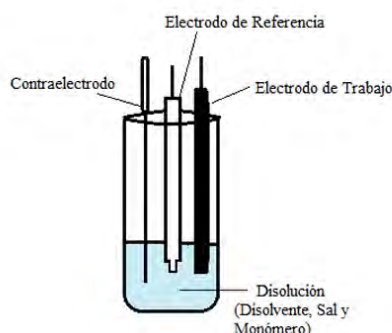
El montaje experimental de la celda electroquímica se basa en un sistema de tres electrodos, ampliamente utilizado en estudios electroanalíticos y de electrosíntesis debido a que permite controlar con mayor precisión el potencial aplicado al electrodo de trabajo. El sistema que se muestra en la Figura 9 está conformado por un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un contraelectrodo, cada uno con una función específica dentro del circuito electroquímico (Bard & Faulkner, 2001). En este montaje, el potencióstato controla el potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia, mientras que la corriente fluye entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, permitiendo separar el control del potencial del flujo de corriente en el sistema.

El electrodo de trabajo, en el cual ocurre el proceso de oxidación del monómero y la formación de la película polimérica, corresponde en este caso a un electrodo de carbón vítreo. Este material es ampliamente utilizado en electroquímica debido a su alta estabilidad química, buena conductividad eléctrica, baja reactividad superficial y amplia ventana de potencial, características que lo convierten en un sustrato adecuado para estudios de deposición electroquímica y caracterización de materiales electroactivos (Bard & Faulkner, 2001). Sobre la superficie de este electrodo se produce la oxidación del pirrol cuando se aplica el potencial

adecuado, generando radicales catiónicos que posteriormente reaccionan entre sí para formar la cadena polimérica de PPy que queda depositada sobre el electrodo.

Figura 9

Montaje de una celda electroquímica.



Nota. Tomado de síntesis y caracterización de polipirrol dopado con poliestireno sulfonato de sodio (Bermúdez, 2016)

El electrodo de referencia, generalmente de plata/cloruro de plata ($\text{Ag}_{(s)}/\text{AgCl}_{(s)}$), cumple la función de proporcionar un potencial estable y bien definido frente al cual se mide y controla el potencial del electrodo de trabajo. Este electrodo está constituido por un alambre de plata recubierto con una capa de cloruro de plata sólido, el cual se encuentra en contacto con una solución interna de cloruro de potasio generalmente saturada o de concentración 3 M contenida dentro del cuerpo del electrodo. La solución interna se conecta con la solución de la celda electroquímica mediante una unión porosa o frita, que permite el contacto iónico sin mezclar completamente ambas soluciones, manteniendo así el equilibrio electroquímico entre la plata metálica y el cloruro de plata en presencia de iones cloruro. Este electrodo no está diseñado para conducir corriente significativa durante el experimento, sino que actúa como un punto de referencia electroquímica que permite conocer con precisión el potencial real al que se encuentra sometido el electrodo de trabajo. Si este electrodo no estuviera presente o no fuera estable, el sistema no podría controlar adecuadamente el potencial aplicado, lo que dificultaría la interpretación de los procesos redox que ocurren durante la síntesis y caracterización del material (Bard & Faulkner, 2001).

Por su parte, el contraelectrodo, comúnmente fabricado de platino, tiene la función de cerrar el circuito eléctrico permitiendo el flujo de corriente a través de la celda electroquímica. Cuando el monómero de pirrol se oxida en el electrodo de trabajo, los electrones transferidos deben ser conducidos hacia el contraelectrodo para completar el circuito eléctrico. En este electrodo

ocurre una reacción electroquímica complementaria que permite mantener el equilibrio de carga en el sistema. El platino se emplea con frecuencia como contraelectrodo debido a su alta conductividad eléctrica, estabilidad química y resistencia a la corrosión, lo que minimiza la posibilidad de que participe en reacciones secundarias que puedan interferir con el proceso que ocurre en el electrodo de trabajo.

La interacción entre estos tres electrodos, Tabla 2 permite que el sistema electroquímico funcione de manera controlada. El potenciostato establece el potencial del electrodo de trabajo respecto al electrodo de referencia, mientras que la corriente generada por las reacciones electroquímicas fluye entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo. Si alguno de estos electrodos faltará, el sistema no podría operar correctamente: sin electrodo de referencia no sería posible controlar el potencial con precisión, y sin contraelectrodo no existiría un camino para el flujo de corriente, impidiendo que las reacciones electroquímicas se lleven a cabo. Por esta razón, el uso del sistema de tres electrodos es fundamental para estudiar con precisión los procesos electroquímicos asociados a la síntesis y caracterización de materiales como el PPy.

Tabla 2.

Electrodos utilizados para el sistema.

 Contraelectrodo Electrodo de platino	 Electrodo de trabajo (Carbón Vitreo)	 Electrodo de referencia (Ag_(s)/AgCl_(s))
---	---	--

El control de estos electrodos y de las condiciones experimentales se realiza mediante un potenciostato, equipo encargado de regular el potencial o la corriente aplicada al sistema electroquímico y registrar la respuesta eléctrica del mismo. En este estudio se emplea un potenciostato Autolab que se presenta en la Figura 10, instrumento ampliamente utilizado en investigación electroquímica que permite ejecutar técnicas como CV, cronopotenciometría y GCD (Bard & Faulkner, 2001)

Figura 10

Potenciostato autolab.

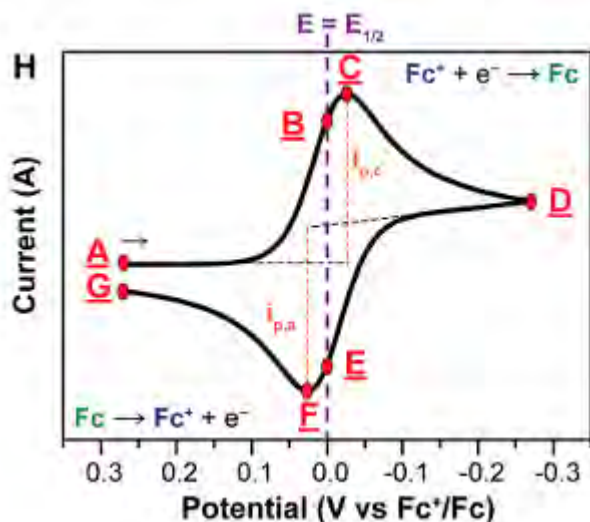


Nota. Tomada de: <https://www.metrohm-autolab.com/applications/electrolysis.html>

Sin embargo, antes de implementar las técnicas de síntesis electroquímica, es necesario verificar el correcto funcionamiento del sistema electroquímico y la condición superficial del electrodo de trabajo. Para ello se realiza una calibración del electrodo de carbón vítreo mediante CV en una solución de hexacianoferrato (III) de potasio, un sistema redox ampliamente utilizado como sonda electroquímica debido a su comportamiento reversible y bien caracterizado. Durante el voltamperograma se observa la aparición de picos de oxidación y reducción correspondientes al par redox de $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} / [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$; como se observa en la Figura 11, la presencia de estos picos con una forma definida y una separación de potencial característica indica que la superficie del electrodo se encuentra limpia y que el sistema electroquímico responde adecuadamente. Además, a partir de este tipo de mediciones es posible determinar parámetros electroquímicos relevantes, como el potencial del par redox, que corresponde al valor característico al cual ocurre el equilibrio entre las especies oxidada y reducida, y el coeficiente de difusión, que describe la velocidad con la que las especies electroactivas se desplazan en la solución hacia la superficie del electrodo. Estos parámetros permiten evaluar la calidad del sistema y la confiabilidad de las mediciones experimentales. Cuando el voltamperograma presenta picos simétricos y reproducibles, se considera que el electrodo de carbón vítreo está correctamente calibrado y listo para emplearse en los experimentos de síntesis y caracterización electroquímica posteriores (Wang, 2008).

Figura 11

Voltammogram of the reversible reduction of a 1mM Fc⁺ solution to Fc, at a scan rate of 100mVs⁻¹.

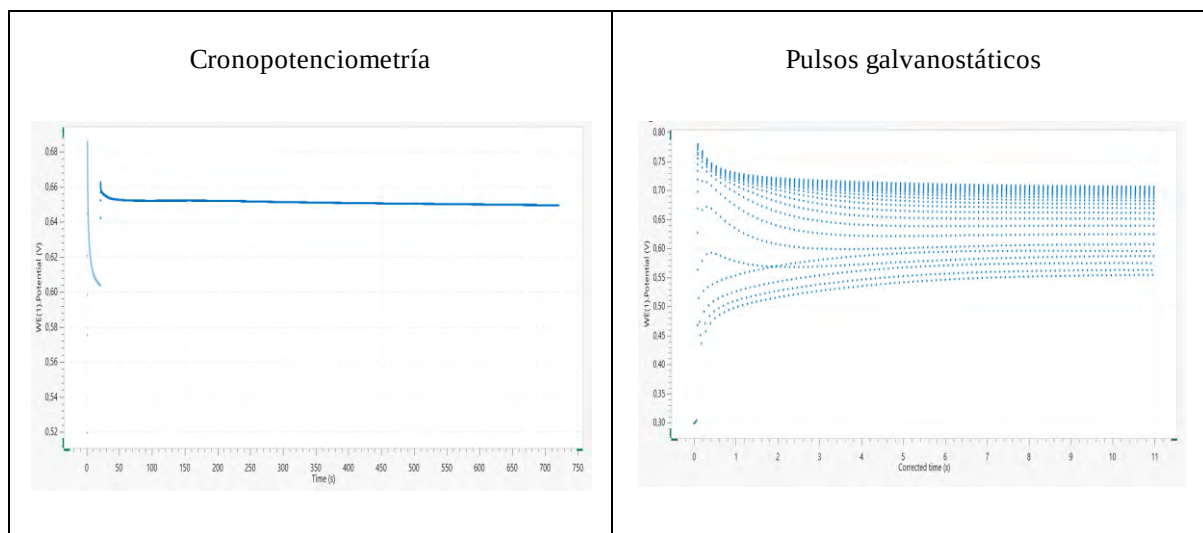


Nota. Tomado de A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry (Elgrishi et al., 2018)

En cuanto a las técnicas de síntesis electroquímicas que se describen en la Tabla 3, como la cronopotenciometría, la cual consiste en aplicar una corriente constante durante un intervalo de tiempo mientras se registra el potencial resultante (Bard & Faulkner, 2001). En esta técnica la corriente se mantiene fija, lo que permite estudiar la cinética de oxidación o polimerización en condiciones controladas, así como las variaciones del potencial con el tiempo y la formación de películas de polímero en función de la intensidad de corriente y el tiempo de deposición (Wang, 2006). Por otra parte, los pulsos galvanostáticos es otra técnica de síntesis, en la cual la corriente se aplica de forma intermitente a través de pulsos separados por intervalos de reposo. Esta permite modificar las condiciones de nucleación y crecimiento del polímero sobre la superficie del electrodo, favoreciendo en muchos casos la formación de películas más homogéneas y con mejor control morfológico, debido a la redistribución de especies electroactivas durante los periodos de relajación del sistema (Skotheim & Reynolds, 2007).

Tabla 3.

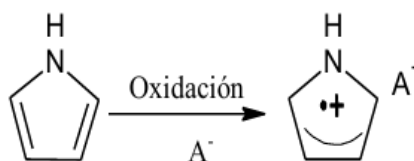
Diagramas de las técnicas de síntesis del PPy.



Durante la electropolimerización del pirrol, la formación de la película conductora ocurre a través de una serie de etapas sucesivas. En primer lugar, tiene lugar la oxidación del monómero como se presenta en la Figura 12, donde al aplicar un potencial anódico el monómero de pirrol se oxida en la superficie del electrodo formando un radical catión.

Figura 12

Oxidación del monómero.

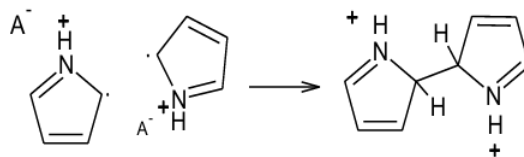


Nota. Tomado de síntesis y caracterización de polipirrol dopado con poliestireno sulfonato de sodio (Bermúdez, 2016)

Posteriormente ocurre la dimerización y oligomerización, tal como se observa en la Figura 13, proceso en el cual estos radicales catiónicos reaccionan entre sí mediante acoplamiento formando dímeros, trímeros y oligómeros de cadena corta.

Figura 13

Dimerización y oligomerización.

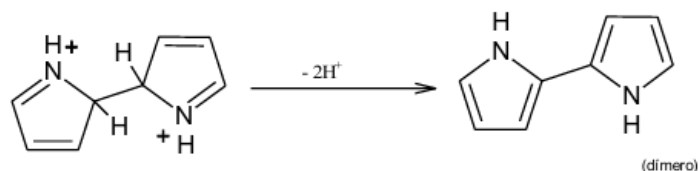


Nota. Tomado de síntesis y caracterización de polipirrol dopado con poliestireno sulfonato de sodio (Bermúdez, 2016)

A medida que estos oligómeros aumentan su tamaño y alcanzan una mayor masa o disminuyen su solubilidad, se produce la nucleación, como se muestra en la Figura 14 etapa en la que las especies oligoméricas se depositan sobre la superficie del electrodo formando los primeros núcleos de polímero.

Figura 14

Nucleación.

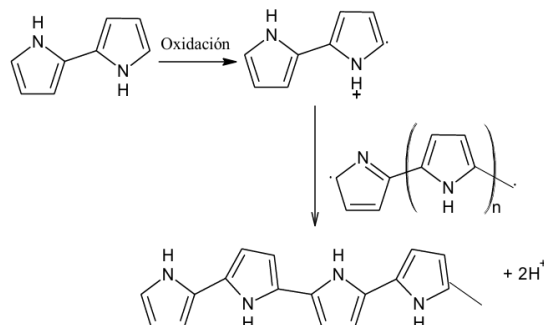


Nota. Tomado de síntesis y caracterización de polipirrol dopado con poliestireno sulfonato de sodio (Bermúdez, 2016)

Seguidamente tiene lugar el crecimiento, como se observa en la Figura 15, donde se presenta la polimerización y dopaje, donde las cadenas oligoméricas continúan creciendo para formar polímeros de mayor longitud mientras se incorporan simultáneamente contraiones provenientes del electrolito para mantener la neutralidad eléctrica del material. Finalmente se alcanza la formación y consolidación de la película, momento en el cual se detiene el proceso de síntesis una vez obtenido el espesor deseado, generando una película polimérica conductora adherida al electrodo (Bermudez, 2016).

Figura 15

Crecimiento y formación.



Nota. Tomado de síntesis y caracterización de polipirrol dopado con poliestireno sulfonato de sodio (Bermúdez, 2016)

Aunque no todos los estudios utilizan cronopotenciometría específicamente para el PPy, estas técnicas galvanostáticas son ampliamente reconocidas en electroquímica para estudiar procesos de crecimiento de película, difusión, acumulación de carga y efectos asociados a la resistencia interna del sistema. Por esta razón, su uso constituye un complemento valioso cuando posteriormente se aplican técnicas como la CV y la GCD para evaluar la estabilidad y la capacitancia de estos materiales (Wang, 2008).

En este contexto, durante la síntesis electroquímica del PPy, es posible estimar la masa del polímero depositado sobre el electrodo a partir de la carga eléctrica total transferida en el proceso de polimerización. Esta relación se fundamenta en la ley de Faraday, la cual establece que la cantidad de sustancia formada en una reacción electroquímica es directamente proporcional a la cantidad de carga que circula por el sistema. Para el caso del PPy, la masa depositada puede estimarse mediante la siguiente ecuación 1:

$$m = \frac{Q}{F} \cdot \frac{M_m + \gamma M_d}{2 + \gamma} \quad (1)$$

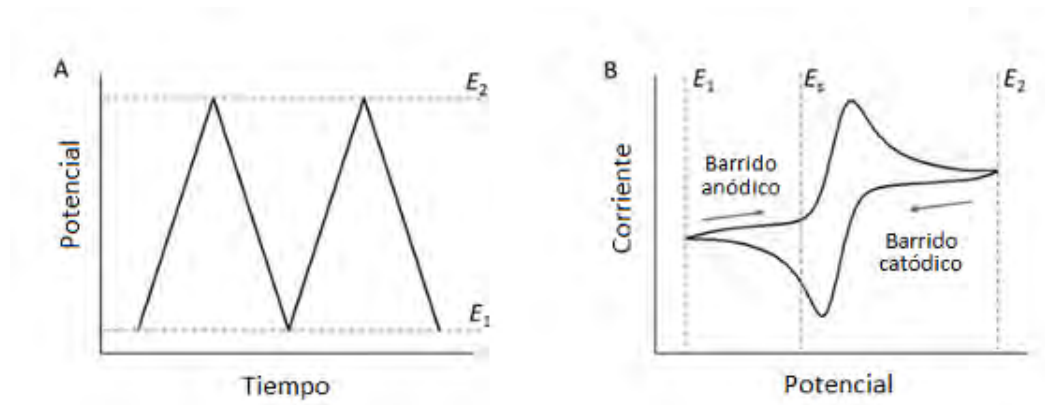
En donde m corresponde a la masa del PPy depositado (g), Q es la carga total transferida durante la polimerización (C), y F es la constante de Faraday ($96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$). El término M_m representa la masa molar de la unidad repetitiva del pirrol ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), mientras que M_d corresponde a la masa molar del ion dopante incorporado durante la síntesis, y γ es el grado de dopaje máximo reportado (0,33), que indica la proporción de aniones incorporados en la estructura del polímero. Esta relación tiene en cuenta que, durante la electropolimerización, no

solo se forma la cadena polimérica, sino que también se incorporan especies iónicas del electrolito para mantener la neutralidad de carga. De esta manera, la estimación de la masa permite relacionar la cantidad de material activo depositado con propiedades como el espesor de la película y su comportamiento electroquímico.

Como se observa en la Figura 16(B), la CV es un tipo de medición potenciodinámica ampliamente utilizada para estudiar procesos de óxido-reducción que se dan en la superficie del electrodo al aplicar una corriente a diferentes velocidades de barrido. En esta técnica el potencial se barre linealmente en el tiempo entre dos valores establecidos y, al alcanzar el potencial límite, el barrido se invierte para regresar al potencial inicial, pudiendo repetirse el ciclo varias veces (Pérez & Córtes, 2017). El voltamperograma resultante representa la corriente de respuesta del electrodo en función del potencial aplicado, donde las corrientes positivas corresponden a procesos anódicos de oxidación y las corrientes negativas a procesos catódicos de reducción. En el caso del PPy, la CV permite identificar los potenciales de oxidación y reducción del PPy, evaluar el grado de reversibilidad de los procesos redox, analizar la relación entre la corriente anódica y catódica y determinar cómo la corriente varía con la velocidad de barrido, lo que permite establecer si los procesos están controlados por difusión o por fenómenos de superficie. En el estudio de Pérez Torres et al. (2017), la comparación entre los resultados obtenidos mediante CV y GCD muestra coherencia en los valores de capacitancia bajo condiciones óptimas de síntesis y caracterización.

Figura 16

(A) Caracterización GCD (B) Caracterización CV.



Nota. Tomado de Estudio del efecto de algunos parámetros de síntesis en la pseudocapacitancia de películas de polipirrol sintetizadas electroquímicamente (Pérez & Córtes, 2017).

A partir de los voltamperogramas obtenidos mediante voltamperometría cíclica es posible estimar la capacitancia y capacitancia específica del material. Para determinar la capacitancia se utiliza la ecuación 2:

$$C = \frac{Q_a + Q_c}{2m\Delta V} \quad (2)$$

donde C corresponde a la capacitancia del material ($F \cdot g^{-1}$), Q_a es la carga asociada al proceso de oxidación (carga anódica), Q_c es la carga asociada al proceso de reducción (carga catódica), m representa la masa del material activo depositado en el electrodo (en gramos) y ΔV es la ventana de potencial empleada durante el barrido voltamperométrico (en voltios). Las cargas Q_a y Q_c se obtienen integrando el área bajo las curvas de corriente en las regiones anódica y catódica del voltamperograma. El promedio de ambas cargas permite estimar de manera más precisa la capacidad de almacenamiento de carga del material.

Ahora bien, para complementar la caracterización se realiza un ensayo de GCD tal como se observa en la Figura 16(A) el cual consiste en aplicar una corriente constante al electrodo mientras se registra la variación del potencial con el tiempo durante los procesos de carga y descarga del material. A partir de estas curvas es posible determinar parámetros relevantes como la capacitancia específica, la eficiencia coulombica, la resistencia interna y la estabilidad del material durante múltiples ciclos, parámetros fundamentales para evaluar su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía (Pérez & Córtes, 2017). En este caso, la capacitancia se determina a partir de la relación entre la corriente aplicada y el tiempo de descarga del sistema, utilizando la ecuación 3:

$$C = \frac{I \cdot t}{\Delta V} \quad (3)$$

donde C representa la capacitancia del electrodo (en faradios, F), I es la corriente constante aplicada durante el proceso de carga o descarga (en amperios, A), t corresponde al tiempo de descarga registrado durante el experimento (en segundos, s) y ΔV es la variación de potencial observada durante el proceso de descarga, generalmente corregida por la caída óhmica del sistema (en voltios, V). Esta ecuación se basa en el hecho de que, cuando se aplica una corriente constante, la cantidad de carga almacenada en el sistema es proporcional al producto de la corriente por el tiempo.

La capacitancia específica puede calcularse a partir de la porción lineal de descarga de la curva potencial–tiempo utilizando la ecuación 4.

$$C_{sp} = \frac{I \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta V} \quad (4)$$

donde I corresponde a la corriente de descarga aplicada (A), Δt es el tiempo de descarga registrado durante el proceso (s), m es la masa del material electroactivo depositado en el electrodo (g) y ΔV representa el intervalo de potencial durante la descarga (V), considerando generalmente la corrección por la caída óhmica inicial asociada a la resistencia interna del sistema electroquímico. En este sentido, Cortés Aguillón (2020) evidenció que la elección del dopante y del electrolito influye directamente en la retención de capacitancia tras numerosos ciclos de carga y descarga, lo que refleja la importancia de estas variables en el desempeño electroquímico del material para aplicaciones como supercapacitores.

Además de la evaluación de parámetros electroquímicos como la capacitancia y la estabilidad del material, también es posible estimar el espesor de la película de PPy formada sobre el electrodo, ya que esta propiedad influye directamente en los procesos de carga y descarga y en el rendimiento electroquímico del polímero. En los sistemas de PCs, el espesor de la película puede aproximarse a partir de la carga total transferida durante el proceso de electropolimerización, utilizando una relación derivada de la ley de Faraday, la cual relaciona la cantidad de sustancia depositada con la carga eléctrica suministrada al sistema (Bard & Faulkner, 2001; Skotheim & Reynolds, 2007). De acuerdo con esta aproximación, el espesor de la película (d_x) puede estimarse mediante la ecuación 5:

$$d_x = \frac{qM}{zF\rho} \quad (5)$$

donde q corresponde a la carga eléctrica transferida por unidad de área del electrodo ($C \cdot m^{-2}$), M es la masa molar del monómero, z representa el número de electrones transferidos en el proceso de oxidación, F es la constante de Faraday ($96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$) y ρ corresponde a la densidad del polímero reportada de 1500 kg/m^3 . Este tipo de estimaciones permite relacionar la cantidad de material depositado con la carga suministrada durante la síntesis electroquímica y comparar cómo diferentes condiciones experimentales o técnicas de síntesis influyen en el crecimiento de la película y, en consecuencia, en sus propiedades electroquímicas, como la capacitancia y la estabilidad durante los ciclos de carga y descarga (Cortés Aguillón, 2020). En

este contexto, el valor de $z = 2$ se emplea debido a que la formación efectiva de la cadena polimérica no depende únicamente de la oxidación individual de una molécula de pirrol, sino del acoplamiento de dos radicales catiónicos previamente generados en el electrodo. Cada molécula de pirrol cede un electrón para formar un radical catión, por lo que la formación de una unidad repetitiva del polímero implica la transferencia total de dos electrones.

CAPÍTULO 3

PARADIGMA, METODOLOGÍA Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación se fundamenta en un enfoque cualitativo, orientado a comprender cómo un grupo de QF de la Universidad de los Andes (Colombia) desarrollan habilidades de pensamiento crítico, específicamente la inferencia y la explicación, en el contexto de actividades experimentales de laboratorio. En este sentido, el interés no se centra en la medición o estandarización de resultados, sino en la interpretación de los significados, razonamientos y justificaciones que los QF construyen a partir de su interacción con fenómenos electroquímicos, particularmente durante la síntesis y caracterización del PPy. Este enfoque permite analizar los procesos cognitivos y argumentativos implicados en la construcción del conocimiento científico, fortaleciendo la relación entre teoría y el trabajo experimental.

La investigación se enmarca en el paradigma interpretativo, dado que busca comprender cómo los QF construyen significados a partir de experiencias situadas en el laboratorio, reconociendo que el conocimiento es una construcción dinámica que emerge de la interacción entre los sujetos, los fenómenos experimentales y el contexto educativo. Desde esta perspectiva, el análisis de las habilidades de inferencia y explicación se realiza a partir de las producciones de los QF, sus decisiones experimentales y las argumentaciones que elaboran con base en la evidencia obtenida, lo cual permite generar comprensiones sobre la enseñanza de la electroquímica en educación superior.

En coherencia con lo anterior, el método de investigación adoptado es la investigación-acción, ya que no solo se pretende comprender una realidad educativa, sino también transformarla mediante el diseño e implementación de una propuesta didáctica basada en TPL estructurados bajo el enfoque del ABR. Esta propuesta busca trascender la ejecución mecánica de protocolos, promoviendo un rol activo de los QF, quienes formulan hipótesis, toman decisiones durante el proceso experimental, interpretan resultados y construyen explicaciones fundamentadas. En este contexto, el ABR se configura como una estrategia pedagógica que sitúa a los QF frente a un reto concreto la síntesis y caracterización del PPy para analizar su comportamiento capacitivo y su posible aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía tipo supercapacitor, lo cual favorece procesos de indagación, análisis y argumentación científica.

De esta manera, la metodología se estructura como un proceso que integra la experimentación científica con la reflexión crítica, garantizando la coherencia entre el objeto de estudio, los

objetivos de investigación y la propuesta didáctica. El diseño de las guías de TPL se orientó a promover la resolución de retos y sub-retos conceptuales y experimentales, con el fin de que los QF no solo ejecuten procedimientos, sino que reflexionen sobre sus resultados, establezcan relaciones entre variables electroquímicas y argumenten sus conclusiones a partir de la evidencia.

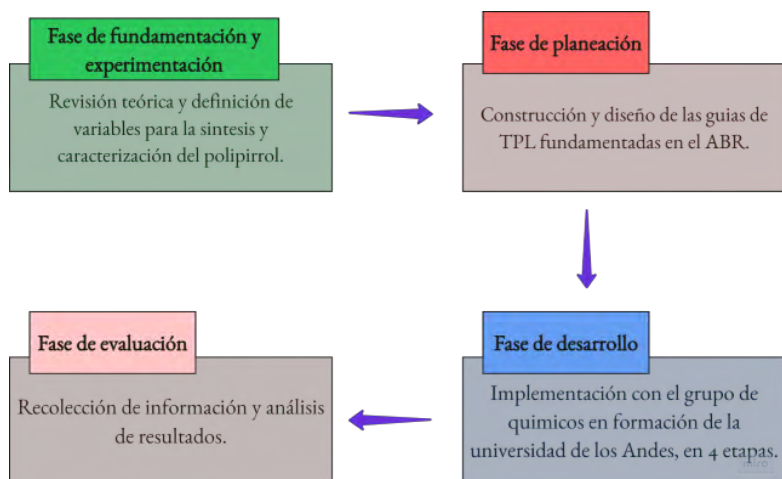
La muestra estuvo constituida por 16 participantes químicos en formación de la Universidad de los Andes (Colombia), quienes cursaban la asignatura de Fisicoquímica Avanzada II durante el primer semestre de 2026. El análisis documental estuvo constituido por los informes de laboratorio desarrollados por los QF durante la implementación de las guías diseñadas para la síntesis y caracterización electroquímica del PPy, los cuales fueron analizados como evidencia del desarrollo de las habilidades de inferencia y explicación en el marco de la investigación.

Fases de la investigación.

Para llevar a cabo esta investigación se formularon cuatro fases que se describen en la Figura 17, con el fin de lograr los objetivos y garantizar un estudio ordenado y riguroso que permita dar fiabilidad de los resultados.

Figura 17

Fases Metodológicas de la investigación.



Nota. Fuente autores

La primera fase de fundamentación y experimentación correspondió a un proceso previo desarrollado por los investigadores, en el cual durante aproximadamente cuatro meses se realizaron múltiples montajes de síntesis y caracterización electroquímica del PPy, con el fin

de definir las variables óptimas del proceso, consolidando así la base conceptual y experimental de la propuesta. La segunda fase, de planeación, estuvo orientada al diseño de los TPL bajo el enfoque ABR, en la cual se estructuraron cuatro guías (una guía de estudio y tres guías experimentales), se definió el reto general y se formularon los sub-retos conceptuales y experimentales que orientaron el proceso de aprendizaje. La tercera fase, de desarrollo, correspondió a la implementación de las guías en el curso de Fisicoquímica Avanzada II, en las cuales se establecieron las sesiones de trabajo, la introducción conceptual, la ejecución de las prácticas de laboratorio. Finalmente, la cuarta fase, de evaluación estuvo orientada al análisis de los resultados obtenidos por los QF, a partir del producto entregado, que reunía las respuestas a los sub-retos y los análisis de los resultados en un informe final, lo cual permitió interpretar la forma en que los participantes construyeron explicaciones, establecieron relaciones entre variables y desarrollaron las habilidades de inferencia y explicación en el marco de la propuesta didáctica.

Fase de fundamentación y experimentación

En esta etapa se definió el diseño experimental, fijando las variables que influyen en la síntesis electroquímica del PPy, tiempos de electropolimerización e intensidad de corriente, por lo que se seleccionaron dos técnicas de síntesis electroquímicas cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos para determinar las propiedades superficiales y electroquímicas de las películas sintetizadas, en términos de morfología, masa, carga y espesor, repetibilidad y adherencia al electrodo de trabajo. Además, se probaron diferentes variables como la corriente aplicada, las velocidades de barrido y el número de ciclos para la caracterización del PPy ya sintetizado a través de las técnicas de CV y GCD con el fin de evaluar su comportamiento capacitivo y analizar su posible aplicación como material activo en dispositivos de almacenamiento de energía tipo supercapacitor.

Como se mencionó anteriormente la deposición del PPy se realizó sobre un electrodo de carbón vítreo, este fue seleccionado por su alta estabilidad química, buena conductividad eléctrica, baja reactividad superficial y amplia ventana de potencial (Abdel-Aziz, El-Sayed & El-Hady, 2022). En este contexto, las técnicas de síntesis se eligieron porque permiten controlar directamente el crecimiento del polímero mediante la aplicación de señales eléctricas, favoreciendo así la formación de películas con espesores y morfologías ajustables.

En cuanto a las técnicas de caracterización electroquímica, estas se seleccionaron debido a que permiten evaluar directamente la capacidad de almacenamiento de carga del polímero conductor. La CV se empleó para analizar los procesos redox asociados al PPy y evaluar cualitativamente su comportamiento capacitivo mediante la respuesta de corriente frente a barridos de potencial; mientras que la técnica de GCD permite determinar la capacitancia del material a partir de la aplicación de corrientes constantes y el análisis de las curvas de carga y descarga.

Para llevar a cabo este estudio se utilizaron los siguientes reactivos y procedimientos:

Reactivos

Pirrol (0,1 M)

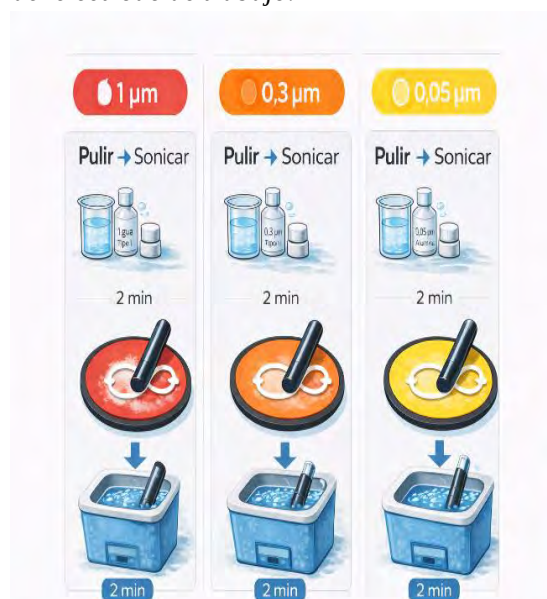
Ácido p-toluensulfónico (0,1 M) como electrolito dopante

Sulfato de sodio como electrolito para la caracterización

Limpieza del electrodo de carbón vítreo

Figura 18

Esquema representativo del proceso de la limpieza del electrodo de trabajo.



El electrodo de carbón vítreo se limpió utilizando un paño de pulido y alúmina de tamaño de partícula de 1 µm, 0,3 µm y 0,05 µm. Se añade alúmina al paño junto con agua tipo I y el electrodo se pule durante dos minutos realizando movimientos en forma de ocho. Posteriormente, el electrodo se introduce a sonicación durante dos minutos en agua tipo I para eliminar residuos de alúmina. El procedimiento se repite sucesivamente con cada tamaño de partícula, desde la alúmina de mayor hasta la de menor tamaño, como se observa en la Figura 18.

Nota. Fuente Open IA 2026

Síntesis electroquímica del PPy

La síntesis electroquímica del PPy se realizó utilizando una solución de pirrol destilado al 0,1 M y ácido p-toluensulfónico 0,1 M empleado como electrolito dopante, tal como se describe en la Tabla 4.

Tabla 4.

Parámetros para las técnicas de síntesis

	Cronopotenciometría	Pulsos galvanostáticos
Parámetros Los parámetros experimentales fueron configurados en el software Nova 2.1 para la operación del potencióstato autolab durante la síntesis electroquímica del PPy	-Densidad de corriente inicial: 0,2 mA/cm ² durante 20 s -Densidad de corriente principal: 0,5 mA/cm ² -Tiempos de síntesis evaluados: 700 s, 800 s, y 1190 s	-Número de pulsos: 100 pulsos -Densidad de corriente del pulso: 2,5 mA/cm ² -Tiempo del pulso: 10 ms -Tiempo de reposo: 100 ms (0 mA) Tiempo total de etapa pulsada: 11 s -Corriente constante posterior de crecimiento: 0,6 mA/cm ² Tiempo de crecimiento: 15 min

Procedimiento

Se empleó una celda electroquímica de tres electrodos compuesta por un electrodo de referencia Ag_(s)/AgCl_(s), un contraelectrodo de platino y un electrodo de trabajo de carbón vítreo. El sistema se dispuso en una celda electroquímica de 25 mL de capacidad y se sigue el procedimiento de la Figura 19, estableciendo los parámetros experimentales consignados en la Tabla 4 según la técnica que se implementó para realizar la síntesis

Figura 19

Procedimiento para la síntesis de polipirrol.



Nota. Fuente Open IA 2026

Estabilización y caracterización electroquímica de PPy

Posterior a la síntesis, el electrodo de carbón vítreo recubierto con PPy fue retirado, enjuagado con agua tipo I y observado microscópicamente para verificar la formación y uniformidad de la película. Seguidamente, se preparó la solución electrolítica de sulfato de sodio 0,5 M para la etapa de estabilización.

Tabla 5.

Parámetros para la estabilización en circuito abierto

	Estabilización en circuito abierto (OCP)
Parámetros Los parámetros fueron configurados en el software Nova 2.1 para la operación del potenciostato autolab durante la estabilización del PPy en el electrolito de sulfato de sodio	-Se realizó mediante voltamperometría cíclica Ventana de potencial: $-0,1\text{ V}$ a $0,7\text{ V}$ -Velocidad de barrido: 100 mV/s ($0,10\text{ V/s}$) -Número de ciclos: 15 ciclos

Procedimiento

Se prepara la respectiva solución y se realiza nuevamente el montaje del sistema electroquímico como se muestra en la Figura 20 para la estabilización en circuito abierto seguida de ciclos de CV, fijando los parámetros experimentales consignados en la Tabla 5.

Figura 20

Procedimiento para la estabilización del polipirrol en sulfato de sodio.



Nota. Fuente Open IA 2026

Luego de la estabilización, se mantiene la misma solución electrolítica de sulfato de sodio 0,5 M dentro de la celda electroquímica.

Procedimiento

Se realizó el mismo montaje empleado en el paso dos de la etapa de estabilización de la Figura 20 para aplicar las técnicas de CV y GCD. Los parámetros experimentales utilizados se establecieron de acuerdo con lo consignado en la Tabla 6, con el fin de evaluar el comportamiento electroquímico del material.

Tabla 6.

Parámetros para las técnicas de caracterización

	Voltamperometría cíclica	Carga-Descarga galvanostática
Parámetros Los parámetros fueron configurados en el software Nova 2.1 para la operación del potenciostato autolab durante la caracterización electroquímica del PPy	-Ventana de potencial: $-0,1\text{ V}$ a $0,5\text{ V}$ -Velocidades de barrido: 50, 100, 150, 200, 250 y 300 mV/s -Número de ciclos: 5 ciclos por cada velocidad	-Corrientes aplicadas: $0,1\text{ mA}$; $0,5\text{ mA}$; $1,0\text{ mA}$ -Ventana de potencial: $-0,1\text{ V}$ a $0,5\text{ V}$ -Número de ciclos: 3 ciclos por cada corriente aplicada

Fase de planeación

Luego de definir los parámetros y variables asociadas al diseño experimental para la síntesis y caracterización electroquímica del PPy durante la fase de fundamentación y experimentación, se procedió a la elaboración de las guías de TPL. Estas guías incluyeron un diseño didáctico fundamentado en el enfoque del ABR.

Las guías de los TPL se construyeron integrando los elementos teóricos y metodológicos característicos del ABR (Anexo A), diseñadas para que los QF asumieran un rol activo frente a la solución de unos retos, es así que se formuló un reto general y unos sub-retos para fortalecer las habilidades de pensamiento crítico, inferencia y explicación de manera intencionada a través de la formulación de preguntas, hipótesis, interpretación de los diagramas, reporte de

resultados y estrategias de análisis de los resultados obtenidos que les permitieron comprender las variables que intervienen en la síntesis y caracterización del PPy y su desempeño capacitivo.

Se diseñaron cuatro guías, una de estudio y tres experimentales, de conformidad con la selección de los elementos conceptuales y procedimentales fijados en la primera fase que se incorporaron en las guías referenciadas.

- Guía de estudio. Una introducción a las técnicas de síntesis y caracterización de Polipirrol: incluye las redes conceptuales fundamentales sobre polímeros conductores, estructura y estabilidad del pirrol y polipirrol, proceso de dopaje, fundamentos de las técnicas electroquímicas de síntesis y caracterización del polímero, y el funcionamiento de los supercapacitores. Esta guía incorporó preguntas orientadoras y retos conceptuales que permitieron caracterizar las habilidades objeto de estudio.

Por otro lado, cada guía de laboratorio se estructuró con una introducción, unos objetivos, la descripción detallada del procedimiento experimental que se articularon con preguntas orientadoras y sub-retos.

- Guía de laboratorio No 1. Calibración electroquímica del electrodo de trabajo mediante voltamperometría cíclica: En esta guía se describe el procedimiento para la calibración del electrodo de carbón vítreo, el electrodo de trabajo, mediante CV, empleando hexacianoferrato (III) de potasio, que incluye la adecuación de los electrodos, el montaje de la celda electroquímica y aspectos relacionados con la determinación del coeficiente de difusión y el potencial del par redox del $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ en función del electrodo de referencia, con el propósito de verificar el correcto funcionamiento del sistema electroquímico y asegurar la confiabilidad de los resultados experimentales posteriores así como también promover el desarrollo de las habilidades objeto de estudio.
- Guía de laboratorio No 2. Síntesis por cronopotenciometría y caracterización electroquímica del polipirrol: En esta guía se describe el procedimiento para la síntesis del PPy por cronopotenciometría y su caracterización por CV y GCD en la que se integraron los parámetros optimizados durante la fase de fundamentación y experimentación y aspectos relacionados con la determinación de la capacitancia, capacitancia específica y espesor del material.

- Guía de laboratorio No 3. Síntesis por pulsos galvanostáticos y caracterización electroquímica del polipirrol: En esta guía se describe el procedimiento para la síntesis del PPy por pulsos galvanostáticos y su caracterización por CV y GCD en la que se integraron los parámetros optimizados durante la fase de fundamentación y experimentación y aspectos relacionados con la determinación de la capacitancia, capacitancia específica y espesor del material.

El reto general a resolver es determinar, comparar y evaluar el espesor y comportamiento capacitivo de las películas sintetizadas por ambas técnicas y analizar su posible aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía tipo supercapacitor.

Fase de desarrollo

Esta fase correspondió a la implementación de las guías de los TPL diseñadas bajo el enfoque del ABR. Esta fase se describe y organiza de acuerdo con las etapas propuestas por el ABR, las cuales no solo orientaron la estructura metodológica de la intervención, sino que también guiaron el diseño de las guías y la planificación de las sesiones de clase y laboratorio. De este modo, la implementación de las guías se estructuró en tres etapas (inicial, intermedia y avanzada) que están alineadas al enfoque ABR propuesto por el Observatorio de Innovación Educativa (2016), permitiendo articular coherentemente la fundamentación conceptual, la profundización autónoma y la implementación experimental.

En esta fase, el laboratorio se configuró como un escenario de problematización disciplinar en el cual los QF enfrentaron un reto experimental orientado a la obtención, análisis y comparación de películas de PPy sintetizadas mediante diferentes métodos electroquímicos.

Etapas inicial:

Se desarrolló a través de dos sesiones de clase, cada una de tres horas, orientadas a la introducción de los fundamentos conceptuales necesarios para comprender los fenómenos electroquímicos implicados en la síntesis y caracterización del PPy. En la primera sesión se dio a conocer el proceso enseñanza-aprendizaje, en donde se explicó a los QF la manera en que se iban a desarrollar las sesiones, los sub-retos a los que se iban a enfrentar en cada una de las guías propuestas y a la resolución del reto general que orientó el diseño de las guías de TPL para la caracterización del PPy a partir de diferentes tipos de síntesis del polímero conductor. Posteriormente se entregó a cada uno de los QF un consentimiento informado (Anexo B) con

el propósito de garantizar su participación voluntaria y consciente en el desarrollo de este trabajo de grado, en este se explicaron los objetivos, el uso de la información recolectada y el respeto por la confidencialidad de los datos. Además, se inició con un eje temático en el que se abordaron conceptos como polímeros, PCs, electropolimerización, supercapacitor, dopaje y transporte iónico.

La segunda sesión se dividió en dos momentos, el primero fue enfocado en la explicación teórica de las técnicas electroquímicas de síntesis y caracterización, comportamiento pseudocapacitivo y parámetros experimentales que inciden en la formación del polímero conductor. Para el segundo momento se entregó la guía de estudio, diseñada con enfoque ABR a los QF, la cual orientó la indagación posterior, promovió la formulación de preguntas esenciales y proporcionó los elementos teóricos necesarios para que los QF comenzaran a estructurar su estrategia de resolución.

Etapas intermedia:

Esta etapa se inició con el desarrollo de la guía de estudios que fue entregada en el segundo momento de la segunda sesión, para la elaboración autónoma por parte de los QF. En esta etapa se dedicaron a reconocer y estudiar la información presentada para desenvolverse en el laboratorio fortaleciendo los fundamentos conceptuales necesarios mediante la revisión de la literatura propuesta en la guía y el acompañamiento de los docentes con el fin de orientarlos a la correcta resolución de los sub-retos y preguntas orientadoras presentes en la guía.

Para el desarrollo de esta etapa, los QF se organizaron en cuatro grupos de trabajo conformados por cuatro integrantes, los cuales se mantuvieron como grupos de laboratorio durante toda la implementación de las guías, favoreciendo la continuidad del trabajo colaborativo, la discusión de ideas y la construcción conjunta de interpretaciones frente a los fenómenos electroquímicos abordados. Durante este proceso, los QF debían plantear las interpretaciones sobre el comportamiento electroquímico del PPy, analizar la manera en la que las diferentes condiciones de síntesis podrían afectar sus propiedades y establecer relaciones entre los conceptos estudiados. Así, esta actividad no se limitó a ser netamente procedimental, sino que busca promover la comprensión del fenómeno y que los QF identifiquen sus conocimientos previos delimitando los aspectos que requieran mayor profundización para la experiencia experimental.

Etapla avanzada:

Esta etapa corresponde con la tercera y cuarta sesión, la cuales se desarrollaron de manera experimental en el laboratorio. La tercera sesión se dividió en dos momentos, el primero para resolver dudas o inquietudes presentadas en la resolución de la guía de estudios entregada la sesión anterior, y en el segundo momento se realizó la guía número uno experimental de Calibración electroquímica del electrodo de trabajo mediante CV. Para la cuarta sesión se entregó la segunda y tercera guía experimental: Síntesis por cronopotenciometría y caracterización electroquímica del polipirrol y Síntesis por pulsos galvanostáticos y caracterización electroquímica del polipirrol. Como se mencionó anteriormente cada una de las guías incluye sub-retos que los QF debían resolver aplicando los conocimientos adquiridos en las sesiones anteriores.

En esta fase, los QF desarrollaron las guías de los TPL, siguiendo los protocolos establecidos, es decir, acondicionaron los electrodos, prepararon soluciones, programaron el equipo (Potenciostato autolab) a través del software NOVA 2.1, ejecutaron los métodos correspondientes y registraron sus datos experimentales. Sin embargo, la actividad no se redujo a la ejecución mecánica e instrumental, sino que en coherencia con Suarez (2019), esta etapa implicó poner a prueba la hipótesis que los QF plantearon previamente.

Para finalizar esta etapa, se les solicitó a los QF la elaboración de un informe estructurado en el que analizaran los datos obtenidos, respondieran los retos planteados en las guías y defendieran sus conclusiones con argumentos teóricos y evidenciados experimentalmente. Esta actividad fue diseñada para obtener y analizar la formulación de inferencias a partir de los resultados experimentales obtenidos, en contraste con las hipótesis planteadas en la etapa intermedia. Todo ello, para la construcción de un discurso que explique el comportamiento electroquímico del PPy.

Fase de evaluación

La fase de evaluación se articuló con la etapa final del ABR propuesta por el Observatorio de Innovación Educativa (2016), en la que se inició con el proceso del análisis del material construido por los QF a partir de la evidencia experimental obtenida. Es en este punto donde se consolidan los aprendizajes desarrollados en las fases anteriores y se recopila la evidencia del proceso formativo a nivel conceptual, experimental y argumentativo.

Los QF entregaron un producto: Un informe estructurado que articulaba las respuestas de los sub-retos planteados en la guía de estudio y las guías de laboratorio, así como los resultados experimentales con el análisis del proceso realizado. Por lo que, el propósito de esta fase es validar la información recolectada y comunicar a los QF una solución de los retos propuestos, ya que según Suárez (2019), el cierre del reto implica no solo presentar una respuesta, sino examinar críticamente las decisiones tomadas y los resultados obtenidos. En este sentido, aunque las habilidades de inferencia y explicación corresponden a procesos cognitivos de carácter individual, su análisis se realizó de manera grupal, considerando que el trabajo experimental y la construcción de los informes se desarrollaron en cuatro grupos de laboratorio. De este modo, los resultados obtenidos se interpretaron a partir de las producciones colectivas, entendiendo que estas reflejan procesos de discusión, argumentación y construcción conjunta del conocimiento.

Técnicas para el análisis de datos

La información obtenida a partir de la implementación de los TPL, diseñados bajo el enfoque del ABR, fue analizada mediante un enfoque cualitativo, centrado en las producciones de los QF frente a los sub-retos conceptuales y experimentales, así como en los informes finales elaborados. Previo a su implementación, las guías de TPL fueron sometidas a un proceso de validación por juicio de expertos a través de una matriz, en el que participaron tres evaluadores con formación en química y didáctica de las ciencias, quienes revisaron la coherencia conceptual, la pertinencia didáctica y la claridad de los sub-retos propuestos, permitiendo ajustar y fortalecer el diseño del material; en el (Anexo C) se incluye un ejemplo de la matriz diligenciada por uno de los evaluadores.

Para el análisis, se definieron marcadores lingüísticos asociadas a las habilidades de pensamiento crítico priorizadas en la investigación, específicamente la inferencia y la explicación. Estos marcadores se identificaron a partir de la revisión detallada de las respuestas de los QF, atendiendo a la manera en que relacionan los datos experimentales con los fundamentos teóricos y sustentan sus conclusiones en el contexto de la síntesis y caracterización del PPy.

Posteriormente, los marcadores fueron codificados mediante un proceso de comparación constante, lo que permitió organizarlas en categorías que evidencian el desarrollo de dichas habilidades, también se codificaron algunas respuestas a través del aplicativo Atlas.ti para un

mejor análisis. Este proceso facilitó reconocer patrones en las respuestas, así como diferencias en la calidad de los razonamientos contruidos por los QF. De igual manera, se examinó la coherencia entre los resultados obtenidos y las decisiones tomadas durante el trabajo experimental, lo que permitió evidenciar la articulación entre la experiencia de laboratorio y la construcción de conocimiento.

En este sentido, los informes y las respuestas a las guías se analizaron con el fin de valorar la consistencia de los argumentos, las inferencias y la pertinencia de las explicaciones elaboradas por los QF en torno al comportamiento electroquímico del PPy. De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), este tipo de análisis cualitativo permite comprender los significados contruidos por los participantes y obtener una visión integral del fenómeno estudiado.

El proceso de análisis se desarrolló de manera iterativa, mediante el contraste continuo de las producciones de los QF con las categorías de análisis establecidas para identificar los distintos niveles de desarrollo en las habilidades de inferencia y explicación.

En coherencia con lo anterior, en la Tabla 7 se presenta la matriz de evaluación que orientó tanto la organización de las unidades de análisis como la interpretación de los resultados obtenidos.

Asimismo, como parte del diseño didáctico de las guías de TPL y en correspondencia con los niveles de desarrollo de las habilidades establecidos en la matriz se incorporó una estrategia de motivación basada en la asignación de medallas como reconocimiento al avance en la resolución de los sub-retos. De esta manera, el QF que resolvía satisfactoriamente la guía de estudio alcanzaba la medalla de bronce, asociada a la apropiación de los fundamentos conceptuales; posteriormente, al completar la primera guía experimental calibración electroquímica del electrodo de trabajo mediante CV obtenía la medalla de plata. En la segunda guía experimental síntesis por cronopotenciometría y caracterización electroquímica del polipirrol el QF alcanzaba la medalla de oro. Finalmente, al desarrollar la tercera guía experimental síntesis por pulsos galvanostáticos y caracterización electroquímica del polipirrol y resolver el reto general, se otorgaba la medalla de diamante, que representa la articulación de las habilidades de inferencia y explicación al analizar comparativamente las técnicas de síntesis y sustentar conclusiones sobre el desempeño electroquímico del polipirrol.

Tabla 7.

Matriz de evaluación para las habilidades de pensamiento crítico a desarrollar

Habilidad de pensamiento crítico a fortalecer	Guía TPL	Evidencias o productos esperados	Indicadores de análisis
Inferencia	Una introducción a las técnicas de síntesis y caracterización de Polipirrol	Resolución de sub-retos de tipo conceptual, al identificar las propiedades de los polímeros conductores, en particular para el PPy, reconocer las técnicas de síntesis y caracterización electroquímica de PCs y su uso potencial en los supercapacitores.	Los QF identifican los fundamentos electroquímicos implicados en el proceso de síntesis y caracterización del PPy. Propone hipótesis y alternativas de solución a los sub-retos, para la formulación de conclusiones sustentadas.
Inferencia	Calibración electroquímica del electrodo de trabajo mediante voltamperometría cíclica	Interpretación de voltamperogramas obtenidos durante la calibración del electrodo de carbón vítreo y determinación del coeficiente de difusión y el potencial del par redox.	Los QF reconocen los picos anódicos y catódicos característicos del sistema redox, interpreta la reversibilidad del proceso y deduce el correcto funcionamiento del sistema electroquímico a partir de los resultados experimentales.
Explicación	Síntesis por cronopotenciometría y caracterización electroquímica del polipirrol	Análisis de voltamperogramas, curvas de carga–descarga y determinación de la capacitancia y el espesor de la película.	Los QF explican la relación entre las condiciones de síntesis y el comportamiento electroquímico del PPy, justificando los resultados obtenidos con base en los fundamentos teóricos.
Explicación	Síntesis por pulsos galvanostáticos y caracterización electroquímica del polipirrol	Comparación entre los métodos de síntesis y su efecto en la capacitancia y estabilidad del material.	Los QF describen las diferencias entre las técnicas de síntesis, relaciona la morfología y espesor de las películas con su desempeño electroquímico y argumenta los resultados obtenidos.
Inferencia y explicación (articulación de habilidades)	Reto general del proyecto	Resolución del reto que integra los resultados de ambas técnicas de síntesis y su posterior caracterización.	Los QF establecen relaciones entre el espesor de las películas de PPy y su comportamiento capacitivo, compara los métodos de síntesis empleados y analiza su posible aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía tipo supercapacitor.
Explicación	Informe de laboratorio final	Documento escrito que integra el análisis de resultados experimentales obtenidos en la implementación de las guías de los TPL.	Los QF explican los resultados experimentales de forma argumentada, relacionando teoría y práctica, interpretando los datos electroquímicos y justificando las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de las actividades experimentales.

Criterios de calidad de la investigación

En la presente investigación se consideraron criterios de calidad propios del enfoque cualitativo. En primer lugar, la credibilidad, la cual se garantizó mediante el análisis riguroso de las producciones de los QF y la coherencia entre los datos recolectados y las interpretaciones realizadas, permitiendo una representación fiel del proceso de aprendizaje desarrollado (Castillo, 2003).

En segundo lugar, la confirmabilidad, asegurada a través del registro sistemático de la información, el análisis detallado de las respuestas y la contrastación de los resultados con referentes teóricos en electroquímica y didáctica de las ciencias, evitando interpretaciones sesgadas (Noreña et al., 2012).

Finalmente, se consideró la transferibilidad, en la medida en que la descripción del contexto, la estructura de las guías y las actividades implementadas permite que la propuesta pueda ser adaptada a otros escenarios educativos similares, particularmente en la enseñanza de la electroquímica en educación superior (Noreña, 2012).

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se estructura en correspondencia directa con los objetivos planteados en la investigación, permitiendo dar cuenta de manera progresiva del proceso desarrollado. En primer lugar, se presenta el análisis asociado al primer objetivo, centrado en la determinación de las condiciones experimentales más viables para la síntesis y caracterización electroquímica del polipirrol, a partir de la interpretación de los resultados obtenidos mediante cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos. En segundo lugar, se aborda el análisis del diseño de las guías de los TPL bajo el enfoque ABR, evidenciando la forma en que estas se estructuran para promover el desarrollo de las habilidades de inferencia y explicación. Finalmente, se presenta el análisis de las producciones de los QF, en el que, a partir del modelo del puente del pensamiento crítico propuesto en esta investigación, las redes conceptuales y el procesamiento en Atlas.ti, se examina cómo dichas habilidades se manifiestan en sus respuestas, permitiendo valorar el alcance de la propuesta en el fortalecimiento del pensamiento crítico en contextos de laboratorio.

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización electroquímica del PPy sintetizado por cronopotenciometría, mostrados en la Tabla 8 corresponden al promedio de varias repeticiones para cada tiempo de polimerización y evidencian una relación directa entre el tiempo de síntesis, la masa depositada y el desempeño capacitivo del material, lo cual permite establecer criterios claros para la selección de las condiciones experimentales más adecuadas.

Tabla 8.

Consolidado de Masa de polipirrol calculada por síntesis cronopotenciométrica

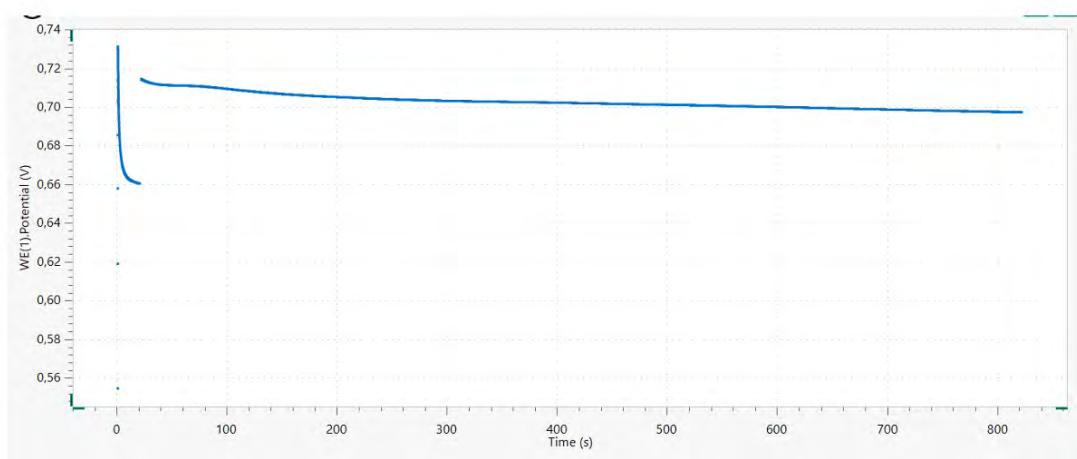
Síntesis por cronopotenciometría						
Tiempo de polimerización (s)	Carga total (C)	Constante de Faraday (C/mol)	Masa molar del pirrol (g/mol)	Masa molar del dopante (g/mol)	γ	Masa del PPy (g)
1190	6,79E-02	96485	67,09	172,2	0,33	3,74E-05
800	4,57E-02					2,52E-05
700	4,00E-02					2,21E-05

La síntesis se llevó a cabo mediante la aplicación de dos etapas de densidad de corriente: una primera de 0,2 mA/cm² durante 20 segundos, seguida de una segunda de 0,8 mA/cm², cuyo tiempo de aplicación se varió (700, 800 y 1190 s) para controlar el crecimiento de la película, el cronopotenciograma obtenido a partir del software NOVA 2.1 se observa en la Figura 21. A

partir de los cálculos realizados mediante la ley de Faraday utilizando la ecuación 1, se determinó que la masa del polímero aumenta progresivamente con el tiempo de síntesis, siendo menor a 700 s ($2,21 \times 10^{-5}$ g), intermedia a 800 s ($2,52 \times 10^{-5}$ g) y mayor a 1190 s ($3,74 \times 10^{-5}$ g). Estos resultados indican que tiempos prolongados de síntesis favorecen la formación de películas más gruesas, incrementando la cantidad de material depositado; sin embargo, esto no se traduce necesariamente en un mejor comportamiento electroquímico.

Figura 21

Cronopotenciograma a 800s obtenido del software NOVA2.1.



Nota. Fuente autores

En sistemas pseudocapacitivos, la capacitancia no depende únicamente de la cantidad total de material depositado, sino de la fracción electroquímicamente activa y de la accesibilidad de los sitios activos. Cuando el espesor de la película aumenta, pueden generarse limitaciones en la difusión iónica y en el transporte de carga, lo que reduce la participación efectiva del material en los procesos electroquímicos. En consecuencia, un incremento en la masa depositada no implica necesariamente un aumento proporcional de la capacitancia, ya que parte del material puede quedar electroquímicamente inactivo (Bard & Faulkner, 2001; Conway, 1999).

Para garantizar la comparabilidad entre los diferentes sistemas analizados, la CV se realizó siempre utilizando las mismas velocidades de barrido 50, 100, 150, 200, 250 y 300 $mV * s^{-1}$, mientras que la GCD se llevó a cabo a densidades de corrientes constantes de 0,1 0,5 y 1 mA. En este sentido, el PPy sintetizado a 800 s presentó el mejor desempeño global, alcanzando valores elevados y consistentes de capacitancia en CV como la capacitancia específica en GCD tal como se presenta en la Tabla 9. En GCD, los valores obtenidos fueron aproximadamente de

130,4 $F \cdot g^{-1}$ a 0,1 mA, 136,6 $F \cdot g^{-1}$ a 0,5 mA y de 130,4 $F \cdot g^{-1}$ a 1 mA, lo que evidencia que la capacitancia al incrementar la densidad de corriente no varía significativamente. Este comportamiento indica que, incluso cuando el sistema es sometido a las corrientes más altas, los procesos redox y el transporte iónico se mantienen eficientes, permitiendo una utilización efectiva del material activo. A 1 mA, aunque se observa una ligera disminución, la capacitancia se conserva en valores altos, lo que confirma la buena estabilidad electroquímica del sistema. A su vez, los resultados de CV muestran valores que aumentan ligeramente con la velocidad de barrido, pasando de 98,97 $F \cdot g^{-1}$ a 50 $mV \cdot s^{-1}$ hasta un máximo de 107,05 $F \cdot g^{-1}$ a 200 $mV \cdot s^{-1}$, manteniéndose posteriormente alrededor de 106,6 $F \cdot g^{-1}$ a 300 $mV \cdot s^{-1}$. Este comportamiento indica que, a 800 s, la película presenta un equilibrio adecuado entre espesor, homogeneidad y accesibilidad iónica, permitiendo una participación efectiva del material en los procesos redox incluso cuando se modifica la velocidad de barrido.

Tabla 9.

Caracterización por CV y GCD para el polímero sintetizado por cronopotenciometría a 800s

Polímero sintetizado a 800 s			
Velocidad de barrido (mV/s)	Capacitancia (F/g)	Densidad de corriente (mA)	Capacitancia específica (F/g)
50	98,97	0,1	130,4
100	104,38	0,5	136,6
150	106,39	1	130,4
200	107,05		
250	107,02		
300	106,60		

Por su parte, el sistema sintetizado a 700 s, aunque presenta una buena respuesta capacitiva tal como se observa en la Tabla 10 con un valor de capacitancia específica de 132,4 $F \cdot g^{-1}$ a la más baja densidad de corriente, posteriormente se evidencia una caída más pronunciada al aumentar la densidad de corriente, alcanzando valores cercanos a 104,5 $F \cdot g^{-1}$ a 0,5 mA y 89,9 $F \cdot g^{-1}$ a 1 mA. Esta disminución indica que, si bien la película es delgada y altamente accesible debido a su menor espesor, la cantidad de material activo es limitada y la capacidad de mantener procesos redox eficientes disminuye bajo condiciones de alta demanda de corriente. En CV, esto se refleja en valores que disminuyen progresivamente con la velocidad de barrido, pasando de hasta 77,24 $F \cdot g^{-1}$ a 50 $mV \cdot s^{-1}$ hasta 63,20 $F \cdot g^{-1}$ a 300 $mV \cdot s^{-1}$, lo que sugiere que, aunque el transporte de masa es favorable, la densidad de sitios electroactivos no es suficiente para mantener altos niveles de almacenamiento de carga.

Tabla 10.

Caracterización por CV y GCD para el polímero sintetizado por cronopotenciometría a 700s

polímero sintetizado a 700s			
Velocidad de barrido (mV/s)	Capacitancia (F/g)	Densidad de corriente (mA)	Capacitancia específica (F/g)
50	77,24	0,1	132,4
100	74,25	0,5	104,5
150	70,68	1	89,9
200	67,73		
250	65,29		
300	63,20		

Por otro lado, el PPy sintetizado a 1190 s presenta los valores más bajos de capacitancia, tal como se aprecia en la Tabla 11, con aproximadamente $88,7 F \cdot g^{-1}$ a $0,1 mA$, disminuyendo a $73,8 F \cdot g^{-1}$ a $0,5 mA$ y $63,6 F \cdot g^{-1}$ a $1 mA$, lo que evidencia una pérdida significativa de desempeño al incrementar la densidad de corriente. Este comportamiento es característico de sistemas en los que el transporte iónico se encuentra limitado, ya que el mayor espesor de la película genera regiones internas que no participan en los procesos redox. En la CV, esto se traduce en valores más bajos $45,34 F \cdot g^{-1}$ a $50 mV \cdot s^{-1}$ hasta $28,26 F \cdot g^{-1}$ a $300 mV \cdot s^{-1}$, confirmando que la respuesta electroquímica está dominada por procesos superficiales y que la mayor parte del material depositado no contribuye activamente al almacenamiento de carga

Tabla 11.

Caracterización por CV y GCD para el polímero sintetizado por cronopotenciometría a 1190s

Polímero sintetizado a 1190s			
Velocidad de barrido (mV/s)	Capacitancia (F/g)	Densidad de corriente (mA)	Capacitancia específica (F/g)
50	45,34	0,1	88,7
100	40,16	0,5	73,8
150	36,31	1	63,6
200	33,16		
250	30,52		
300	28,26		

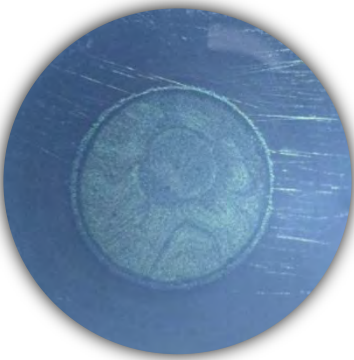
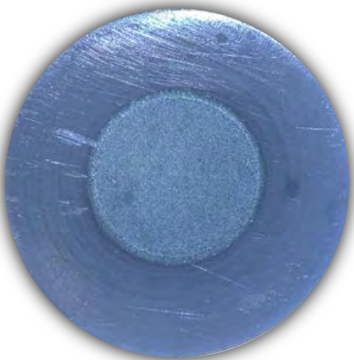
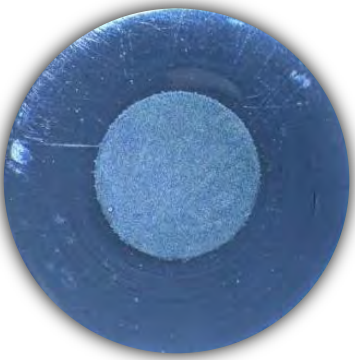
Desde el punto de vista teórico, este comportamiento se explica mediante el modelo de pseudocapacitancia descrito por Conway (1999), donde el almacenamiento de carga en PCs como el PPy ocurre a través de procesos redox rápidos asociados a la entrada y salida de iones dopantes en la cadena polimérica. Durante la electropolimerización, los aniones del electrolito (p-toluenosulfonato) se incorporan en la matriz del polímero para compensar la carga positiva generada en la cadena conjugada, formando especies como polarones y bipolarones

responsables de la conductividad (Otero, 2003). La eficiencia de estos procesos depende en gran medida de la distribución y movilidad de los iones dentro de la película, así como de la accesibilidad de los sitios electroquímicamente activos.

En condiciones óptimas, como las alcanzadas a 800 s, el material presenta una estructura relativamente homogénea y accesible que favorece tanto el transporte iónico como la reversibilidad de los procesos redox. En estas películas de espesor intermedio, los iones dopantes se distribuyen de manera más uniforme, lo que permite una mayor movilidad dentro de la matriz polimérica y una utilización más eficiente del material activo. Por el contrario, cuando el tiempo de síntesis es insuficiente 700 s, la cantidad de sitios activos disponibles es limitada, mientras que a tiempos excesivos 1190 s, el incremento del espesor genera regiones internas electroquímicamente inaccesibles y favorece el atrapamiento parcial del dopante, aumentando la resistencia interna y afectando la respuesta electroquímica. Estas películas fueron observadas mediante microscopía óptica, como se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12.

Películas PPy observadas bajo el microscopio óptico.

Películas de PPy obtenidas por cronopotenciometría		
700s	800s	1190s
		

Adicionalmente, la influencia de la densidad de corriente y la velocidad de barrido sobre la capacitancia confirma que el proceso está controlado por la difusión iónica. A bajas densidades de corriente (0,1 mA), los iones tienen suficiente tiempo para difundirse a través de la película, permitiendo una utilización más completa del material. Sin embargo, al aumentar la densidad de corriente (0,5 y 1 mA) o la velocidad de barrido, el tiempo disponible para la difusión disminuye, limitando el acceso de los iones a las regiones internas del polímero. Este

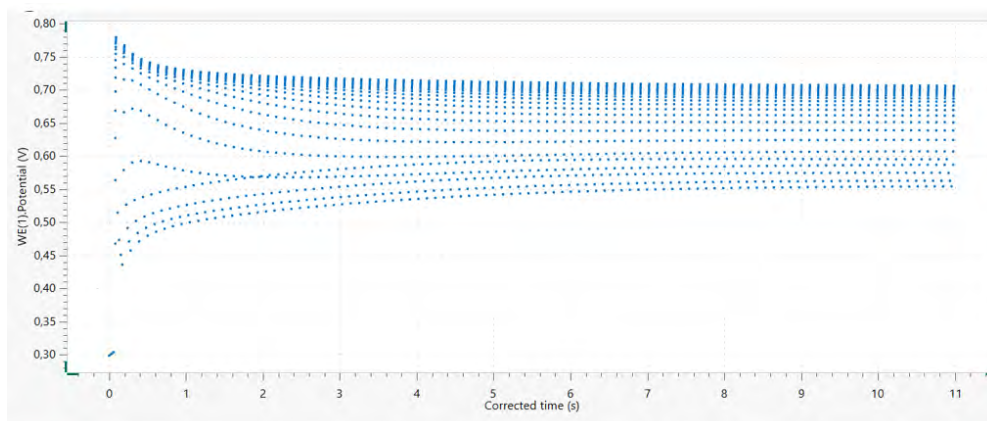
comportamiento es consistente con la teoría de transporte descrita por Fick (Bard & Faulkner, 2001) y resulta menos pronunciado en el sistema sintetizado a 800 s, lo que sugiere un equilibrio más favorable entre el transporte iónico y la accesibilidad de los sitios activos.

En conjunto, estos resultados permitieron determinar que el tiempo de síntesis de 800 s representa la condición óptima para la obtención de películas de PPy con alto desempeño capacitivo, no solo por los valores máximos alcanzados, sino por su capacidad de mantener un comportamiento estable frente a variaciones en la densidad de corriente. Bajo estas condiciones, se logra un equilibrio entre la masa depositada y la accesibilidad electroquímica, favoreciendo la movilidad del dopante, la participación de los sitios redox y la eficiencia en el transporte de carga. Por el contrario, tiempos menores limitan la cantidad de material activo, mientras que tiempos mayores generan restricciones difusionales y pérdidas de eficiencia, lo que evidencia que el comportamiento del PPy depende críticamente de su estructura, morfología y dinámica de transporte interno.

Ahora bien, con el análisis previo para la síntesis por cronopotenciometría, los resultados obtenidos mediante la técnica de pulsos galvanostáticos permiten profundizar en la relación entre las condiciones de síntesis, la estructura del PPy y su desempeño electroquímico, evidenciando diferencias importantes asociadas al modo de crecimiento de la película. En este caso, el protocolo de pulsos fue diseñado de manera que la carga total de polimerización fuera equivalente a la obtenida para la película sintetizada a 800 s la cual presentó el mejor desempeño electroquímico con el fin de realizar una comparación directa entre ambos métodos bajo condiciones de depósito similares. Para ello, se implementó una primera etapa compuesta por 100 pulsos, donde cada pulso consistió en la aplicación de 2,5 mA/cm² por 10 ms seguido de 0 mA por 100 ms, para un tiempo total de 11 s, favoreciendo la nucleación y crecimiento inicial del polímero. Posteriormente, se aplicó una segunda etapa de corriente constante de 0,6 mA/cm² durante 18 minutos, considerando un área de electrodo de 0,071 cm², lo que permitió el crecimiento controlado de la película, el diagrama obtenido a partir del software NOVA 2.1 se observa en la Figura 22. A partir de los cálculos realizados, se observa que la masa del polímero depositado se mantiene en el mismo orden de magnitud que en las síntesis anteriores ($2,64 \times 10^{-5}$ g), lo que permite establecer comparaciones directas en términos de eficiencia capacitiva sin que la cantidad de material sea el factor dominante.

Figura 22

Gráfica de la síntesis por pulsos galvanostáticos, segundo ensayo, obtenida del software NOVA2,1.



Nota. Fuente autores

Los resultados de la CV observados en la Tabla 13 para el primer ensayo muestran un comportamiento particular, en el cual la capacitancia aumenta con la velocidad de barrido, pasando de aproximadamente $69,0 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ a $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ hasta $84,5 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ a $300 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$. Este comportamiento contrasta con el observado en cronopotenciometría, donde la capacitancia disminuye con el incremento de la velocidad y puede explicarse por la naturaleza del crecimiento pulsado del polímero. En este caso, la aplicación intermitente de corriente favorece la formación de estructuras más porosas y menos compactas, lo que incrementa el área superficial accesible y reduce las limitaciones difusionales. Como consecuencia, a altas velocidades de barrido, el sistema responde principalmente a procesos superficiales rápidos que se ven favorecidos por esta morfología, dando lugar a un incremento de la capacitancia. Este tipo de comportamiento ha sido reportado en materiales con alta área activa, donde la contribución capacitiva superficial predomina sobre los procesos difusionales (Conway, 1999).

Tabla 13.

Caracterización por CV y GCD para el primer ensayo de pulsos galvanostáticos

Polímero sintetizado por pulsos galvanostáticos			
Velocidad de barrido (mV/s)	Capacitancia (F/g)	Densidad de corriente (mA)	Capacitancia específica (F/g)
50	69,0	0,5	84
100	80,3		
150	83,8		
200	84,7		
250	84,7		
300	84,5		

Para caracterización por GCD de esta síntesis solo se utilizó una densidad de corriente de 0,5 mA, en la que se obtiene una capacitancia específica de $84,0 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ reportada en la Tabla 13, lo que indica que, aunque el material presenta una buena respuesta electroquímica, su desempeño es inferior al observado en la condición óptima de cronopotenciometría (800 s). Esto sugiere que, aunque la estructura generada por pulsos mejora la accesibilidad superficial, no necesariamente optimiza la densidad de sitios redox activos en comparación con una película más homogénea obtenida por corriente constante.

Para el segundo ensayo, los resultados de CV presentados en la Tabla 14 muestran un comportamiento más estable, ya que la capacitancia se mantiene prácticamente constante en todo el rango de velocidades de barrido, variando solo de $94,4 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ a $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ a $101,6 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ a $300 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$. Esta baja variación indica que el material conserva su capacidad de almacenamiento de carga incluso cuando aumenta la velocidad de barrido, lo que sugiere que los procesos electroquímicos no están fuertemente limitados por la difusión de los iones. Este comportamiento indica que la estructura del material permite un buen acceso del electrolito a los sitios activos y un transporte de carga eficiente, favoreciendo tanto los procesos superficiales como las reacciones redox del polímero, lo que se traduce en una respuesta electroquímica más estable.

Los resultados de GCD presentados en la Tabla 14 para esta condición confirman esta tendencia, mostrando valores de capacitancia específica de $89,4 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, superiores a los del primer ensayo de pulsos, pero aún por debajo de los valores máximos alcanzados en la síntesis por cronopotenciometría a 800 s. Esto pone en evidencia que, aunque la técnica de pulsos galvanostáticos favorece la formación de estructuras más abiertas y con mayor área superficial, existe una relación entre porosidad, conectividad electrónica y eficiencia en la migración de los iones.

Tabla 14.

Caracterización por CV y GCD para el segundo ensayo de pulsos galvanostáticos

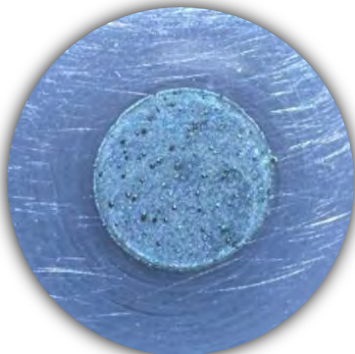
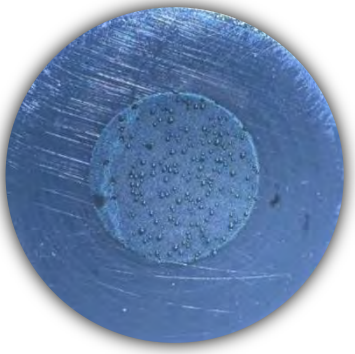
Polímero sintetizado por pulsos galvanostáticos			
Velocidad de barrido (mV/s)	Capacitancia (F/g)	Densidad de corriente (mA)	Capacitancia específica (F/g)
50	94,4	0,5	89,4
100	99,5		
150	101,4		
200	102,1		
250	102,0		

300	101,6		
-----	-------	--	--

Estos resultados pueden interpretarse considerando el mecanismo de electropolimerización bajo condiciones pulsadas. Durante los intervalos de corriente, se favorece la oxidación del monómero y la incorporación de aniones dopantes, mientras que en los intervalos de reposo se permite la redistribución de especies en la interfase electrodo–electrolito. Este proceso conduce a la formación de una película con una estructura menos compacta, con mayor rugosidad y porosidad, lo que mejora el acceso del electrolito a la superficie del polímero, las películas, obtenidas en los ensayos 1 y 2 mediante esta técnica de síntesis, fueron observadas a través un microscopio óptico, como se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15.

Películas PPy observadas bajo el microscopio óptico.

Películas de PPy obtenidas por pulsos galvanostáticos	
Ensayo 1	Ensayo 2
	

En coherencia con los resultados electroquímicos obtenidos, el análisis del espesor de las películas de PPy permite profundizar en la relación entre las condiciones de síntesis, la estructura del material y su desempeño capacitivo. Los valores de espesor calculados para las diferentes condiciones se presentan en la Tabla 16; sin embargo, para el análisis se tomaron en cuenta principalmente la película obtenida por cronopotenciometría a 800 s y la sintetizada mediante pulsos galvanostáticos en el segundo ensayo, debido a que estas presentaron los mejores resultados en términos de capacitancia y capacitancia específica. A partir de la ecuación 5 y utilizando los valores experimentales de carga obtenidos en cada técnica, se estimó un espesor aproximado de 1,49 μm para la cronopotenciometría a 800 s y de 1,57 μm para la síntesis por pulsos galvanostáticos.

Tabla 16.*Espesor obtenido de las dos técnicas de síntesis implementadas*

Tipo de síntesis	Condiciones	Constante de Faraday (C/mol)	Densidad de carga total (C/m ²)	Masa molar del pirrol (kg/mol)	Densidad del pirrol (kg/m ³)	Electrones transferidos (z)	Espesor (μm)
Cronopotenciometría	Polímero a 700 s	96485	5,64E+03	6,71E-02	1500	2	1,31
	Polímero a 800 s		6,44E+03				1,49
	Polímero a 1190 s		9,56E+03				2,22
Pulsos Galvanostáticos	Ensayo 1		6,76E+03				1,57
	Ensayo 2		6,76E+03				1,57

A pesar de que ambos valores de espesor son comparables, las diferencias en el desempeño electroquímico evidencian que no es únicamente el espesor el factor determinante, sino la forma en que este se estructura y se vuelve accesible electroquímicamente. En CV, los sistemas sintetizados por cronopotenciometría presentan valores de capacitancia superiores a los obtenidos por pulsos galvanostáticos, alcanzando valores cercanos a $106,6 F * g^{-1}$ frente a aproximadamente $101,6 F * g^{-1}$ en pulsos. Este comportamiento indica que, bajo estas condiciones, la película obtenida por cronopotenciometría no solo posee una cantidad adecuada de material activo, sino también una estructura que permite una participación electroquímica más eficiente del mismo, incluso a diferentes velocidades de barrido.

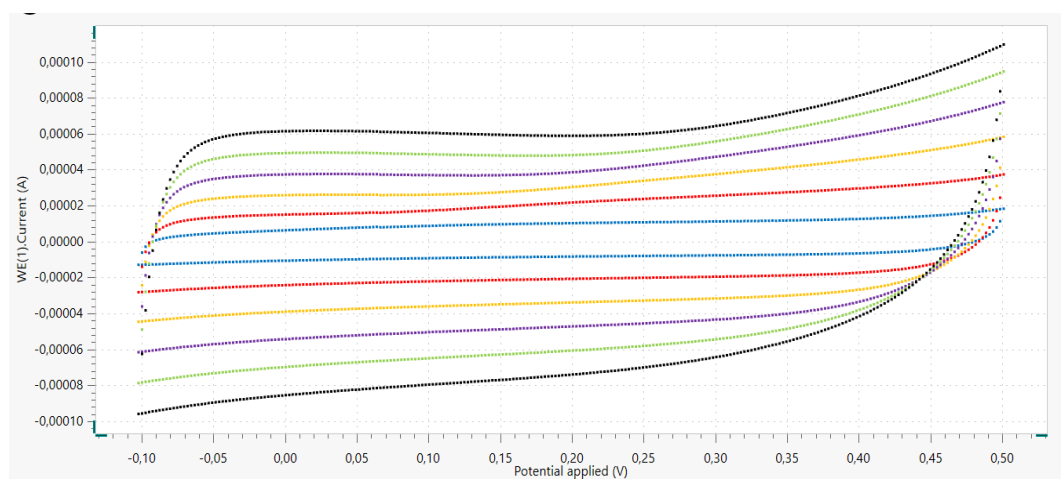
Por otro lado, en los ensayos de GCD, la cronopotenciometría también muestra valores más altos de capacitancia específica, lo que indica que, bajo condiciones de corriente constante, el material sintetizado por este método logra almacenar una mayor cantidad de carga por unidad de masa. Este resultado sugiere que la película generada a 800 s favorece tanto la accesibilidad iónica como la utilización efectiva del volumen del material, manteniendo un equilibrio adecuado entre espesor y transporte de carga.

La relación entre estos resultados permite inferir que existe una diferencia clave en el mecanismo de almacenamiento entre ambos métodos de síntesis. Aunque los pulsos galvanostáticos suelen favorecer estructuras más abiertas, en este caso particular la cronopotenciometría a 800 s logra una formación que optimiza simultáneamente la accesibilidad de los iones y la densidad de sitios electroactivos, superando a los pulsos tanto en procesos asociados a la respuesta electroquímica en CV, donde intervienen fenómenos de transferencia de carga y transporte de masa, como en el almacenamiento de carga evaluado mediante GCD.

Ahora bien, el análisis de las curvas de CV obtenidas para el PPy sintetizado por pulsos galvanostáticos en la Figura 23 y por cronopotenciometría en la Figura 24 permite evidenciar el comportamiento pseudocapacitivo del material y su relación directa con la capacidad de almacenamiento de carga. En ambas gráficas se observa una tendencia cercana a una forma rectangular, característica de sistemas pseudocapacitivos, esta forma indica que la corriente responde de manera relativamente constante frente al barrido de potencial, lo que refleja una cinética favorable de transferencia de carga.

Figura 23

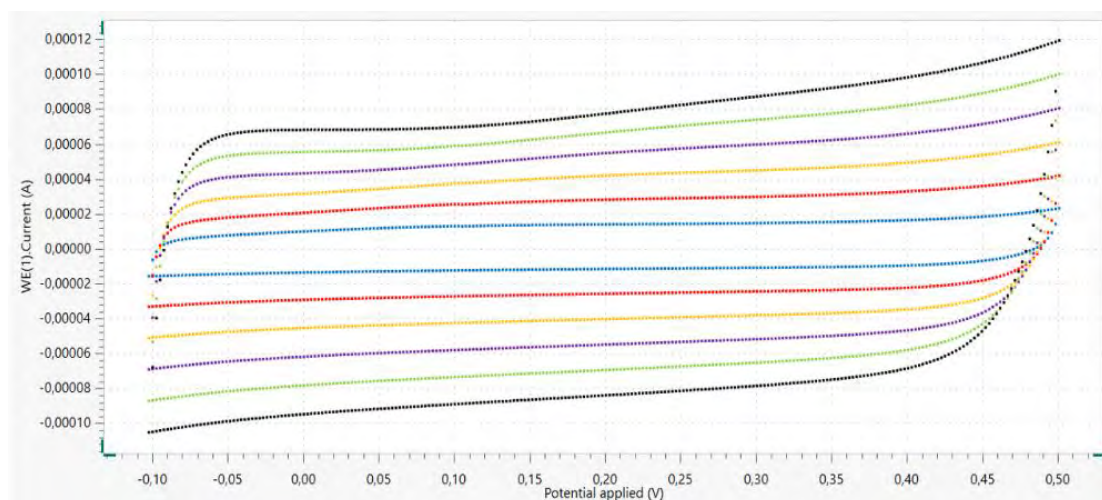
Gráfica de CV de pulsos galvanostáticos segundo ensayo, obtenida del software NOVA2,1.



Nota. Fuente autores

Figura 24

Gráfica de CV de cronopotenciometría a 800 s, obtenida del software NOVA2,1.



Nota. Fuente autores

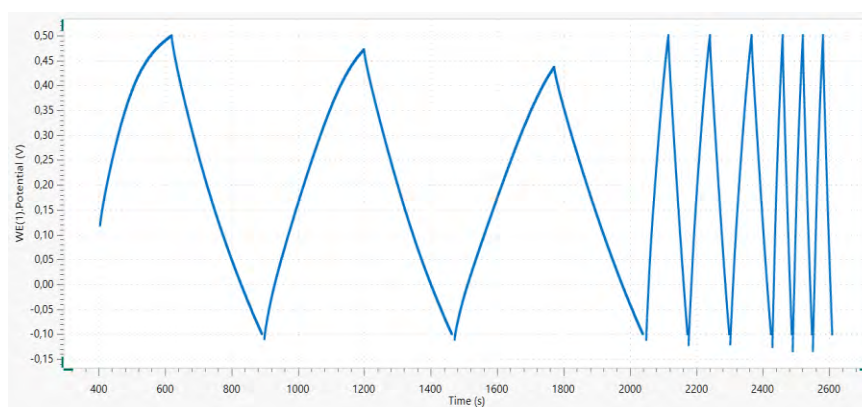
Al comparar ambas técnicas, se observa que la Figura 23 presenta curvas con una forma más rectangular y definida, lo cual sugiere una respuesta más ideal desde el punto de vista capacitivo y una mayor contribución de procesos superficiales rápidos. Sin embargo, esta apariencia no se traduce en un mejor desempeño, ya que la magnitud de la corriente es menor en comparación con la observada en la Figura 24. Este aspecto es fundamental, debido a que la capacitancia en CV es proporcional al área encerrada por la curva corriente–potencial. En este sentido, aunque la estructura generada por pulsos favorece la accesibilidad superficial, la menor corriente indica que la cantidad total de carga intercambiada es inferior, lo que sugiere que no todos los sitios activos contribuyen de manera eficiente al almacenamiento de carga. Por el contrario, las curvas correspondientes a la cronopotenciometría abarcan un área mayor, lo que se traduce en valores superiores de capacitancia.

De esta manera, en la Figura 24 se evidencia que, aunque la forma de las curvas presenta una ligera desviación de la rectangularidad, especialmente a altas velocidades de barrido, la corriente es considerablemente mayor en todo el rango de potencial. Esto indica una mayor cantidad de carga intercambiada durante el proceso electroquímico, lo cual es coherente con una mayor capacitancia. Esta respuesta puede atribuirse a la formación de una película más homogénea y con mejor conectividad electrónica, lo que permite una participación más efectiva de los sitios redox distribuidos en el volumen del material.

De la misma forma, el análisis de las curvas de GCD obtenidas para el PPy sintetizado por cronopotenciometría en la Figura 25 y por pulsos galvanostáticos en la Figura 26 permite evaluar directamente la capacidad de almacenamiento de carga del material.

Figura 25

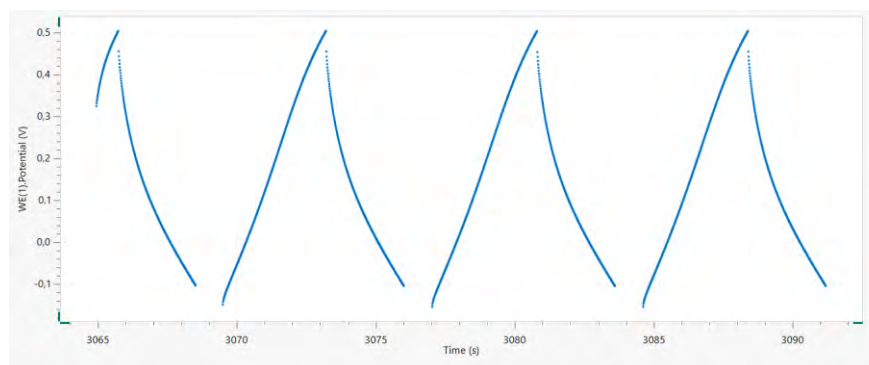
Gráfica de GCD de cronopotenciometría a 800 s, obtenida del software NOVA2.1.



Nota. Fuente autores

Figura 26

Gráfica de GCD de pulsos galvanostáticos segundo ensayo, obtenida del software NOVA2,1.



Nota. Fuente autores

En ambas gráficas se observan perfiles típicos de sistemas pseudocapacitivos, caracterizados por una respuesta aproximadamente triangular durante los procesos de GCD. Este comportamiento indica que el almacenamiento de energía ocurre mediante procesos redox reversibles, en los cuales la variación del potencial es casi lineal con el tiempo bajo condiciones de corriente constante. No obstante, la diferencia más relevante entre ambas curvas se encuentra en el tiempo de descarga asociado a cada ciclo, el cual es directamente proporcional a la cantidad de carga almacenada en el sistema. En este sentido, a mayor tiempo de descarga, mayor es la cantidad de carga liberada por el material, lo que se traduce en una mayor capacitancia específica (Conway, 1999; Wang, 2008).

En la Figura 25 se observa que los tiempos de descarga son considerablemente más largos en comparación con los obtenidos en la Figura 26, ya que cuando la carga llega a su punto máximo y comienza a descender, dicho descenso requiere más tiempo (eje x) para la gráfica de cronopotenciometría que para la de pulsos galvanostáticos. Este comportamiento indica que el material sintetizado por cronopotenciometría es capaz de almacenar una mayor cantidad de carga, ya que, bajo una misma corriente aplicada, un mayor tiempo de descarga implica que el sistema libera carga durante un periodo más prolongado. Además, la forma de las curvas en cronopotenciometría presenta una pendiente relativamente uniforme y continua, lo que sugiere una buena reversibilidad de los procesos electroquímicos y una distribución homogénea de los sitios activos en el material.

Por el contrario, en la Figura 26 se observa que los tiempos de descarga son más cortos y que los ciclos ocurren de manera más rápida. Aunque las curvas mantienen la forma triangular

característica, la menor duración de la descarga indica que la cantidad de carga almacenada es inferior. Esto sugiere que, a pesar de la posible mayor área superficial generada por la síntesis por pulsos, no todos los sitios activos contribuyen de manera efectiva al almacenamiento de energía, lo que limita la capacitancia del sistema.

Ahora bien, en la curva correspondiente a la cronopotenciometría se observa un cambio considerable entre los procesos de GCD, mientras que para la síntesis por pulsos galvanostáticos la variación en la pendiente se presenta de manera abrupta. Lo que puede estar asociado a una menor resistencia interna al reorganizarse la película por pulsos y una mejor conectividad electrónica en las películas obtenidas por cronopotenciometría, lo que favorece una respuesta más eficiente del material frente a la aplicación de corriente.

De esta manera, los ensayos electroquímicos realizados y el análisis detallado de los resultados obtenidos permitieron establecer criterios claros para la selección de condiciones de síntesis reproducibles y confiables tanto en cronopotenciometría como en pulsos galvanostáticos. A partir de la comparación entre masa depositada, espesor de las películas y desempeño capacitivo, se identificaron los parámetros experimentales que garantizan una película de PPy adecuada y una respuesta electroquímica consistente, para de esta manera, asegurar que los resultados pudieran ser replicados en el laboratorio por los QF de la Universidad de los Andes de Colombia. Este proceso de optimización permitió validar la viabilidad técnica de las metodologías empleadas y también proporcionó una base para el diseño de los TPL bajo el enfoque del ABR, garantizando que las actividades propuestas conduzcan a resultados significativos que favorezcan la interpretación, la argumentación y la construcción de explicaciones fundamentadas a partir de la evidencia experimental.

Como ya se ha mencionado, el diseño de las guías de los TPL se fundamentó intencionalmente en el enfoque ABR, que permitió articular los contenidos de las síntesis y caracterización electroquímica del PPy con el fortalecimiento de la habilidad de pensamiento crítico, particularmente la inferencia y la explicación, según el segundo objetivo planteado en este trabajo. Con relación a la formulación inicial del problema, se observa que las guías no son estructuradas como una secuencia tradicional de instrucciones experimentales, sino que parten de un contexto real y significativo, el almacenamiento de energía y la necesidad de producir materiales alternativos, por lo que se da origen a un reto central definido: Comprender como las técnicas de síntesis influyen en el espesor, comportamiento capacitivo del PPy, para su potencial aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía en supercapacitores.

Planteamiento que da respuesta a los principios del ABR, el cual dice que el aprendizaje se organiza alrededor de situaciones problemáticas complejas que requieren la movilización y constante estimulación del conocimiento, las habilidades y actitudes para su resolución. (Nichols et al., 2016; Larmer, Mergendoller & Boss, 2015).

El diseño de las guías incorpora explícitamente el rol del docente como orientador del proceso de construcción del reto, lo cual se evidencia en la forma en que se introducen los contextos problematizadores y se formulan las preguntas iniciales. En la guía de estudio, el docente no presenta preguntas cerradas, sino que plantea interrogantes que direccionan la atención de los QF hacia variables clave del sistema electroquímico, permitiendo que estos delimiten el problema, identifiquen relaciones entre conceptos y comiencen a formular hipótesis. De esta manera, el docente actúa como mediador dentro del diseño de la guía, facilitando la apropiación del reto y promoviendo el desarrollo de la inferencia desde las primeras etapas del proceso.

De acuerdo con lo anterior, en la fase de planeación se estructuraron una serie de guías que siguen una progresión cognitiva como se muestra en la Figura 27, en la cual se observa una transición desde la comprensión conceptual hasta la aplicación y el análisis experimental, lo que es característico del enfoque ABR. En la etapa inicial e intermedia de la fase de desarrollo se promueve la exploración de conceptos estructurantes mediante preguntas abiertas y situaciones problematizadoras (por ejemplo, la conducción en polímeros o el papel del dopaje), que invitan a los QF a formular hipótesis y establecer relaciones causales, dicha etapa se alinea con el desarrollo de la habilidad de inferencia, ya que el QF debe anticipar comportamientos a partir de la teoría. Posteriormente, en la etapa avanzada, los QF enfrentan sub-retos asociados a la síntesis y caracterización electroquímica donde deben interpretar datos reales, analizar gráficas y establecer conexiones entre variables experimentales y las propiedades características del material, es aquí donde se fortalece la habilidad de explicación, de modo que los QF no solo deben ejecutar procedimientos mecánicamente, sino que deben justificar los resultados obtenidos a partir de fundamentos teóricos, como se evidencia en las actividades que solicitan interpretar voltamperogramas, curvas de carga-descarga o la influencia de la velocidad de barrido, de la densidad de carga, de la masa del PPy sintetizado y el espesor de la película depositada.

Figura 27

Estructura de las guías de TPL con enfoque ABR.



Nota. Fuente Chat GTP, Open IA, 2026.

El rol del docente es un factor importante que se encuentra integrado en el diseño de las guías a través de los andamiajes conceptuales y procedimentales, ya que orientan la transición entre la teoría y la práctica. En la guía de estudio y en las guías experimentales, se evidencia cómo las indicaciones y sub-retos funcionan como un material educativo complementario que sustituye la intervención directa entre el docente y el estudiante, guiando a los QF en la toma de decisiones experimentales, la interpretación de resultados y la selección de parámetros. El diseño permite que el docente adopte un papel facilitador durante la implementación, es decir, acompaña el proceso sin dirigirlo completamente, favoreciendo así la autonomía de los QF y el desarrollo de habilidades del pensamiento crítico.

Uno de los aspectos clave en el diseño bajo el enfoque ABR es la organización de las actividades en torno a sub-retos progresivos, los cuales funcionan como redes cognitivas que

permiten descomponer el problema inicial en etapas abordables. En las guías, dichos sub-retos aparecen de manera recurrente a lo largo del documento, con el fin de promover procesos de análisis, comparación y toma de decisiones. Esta estructuración favorece el aprendizaje activo, ya que el estudiante construye el conocimiento a partir de la interacción con el problema, en concordancia con los enfoques constructivistas (Hmelo-Silver, 2004). Además, las medallas y niveles de progreso incluidas al final de cada guía introducen un componente de gamificación interesante que refuerza la motivación y el compromiso con la resolución del reto, aspecto que ha sido ampliamente documentado como potenciador del aprendizaje en contextos del ABR (Deterding, 2011).

Asimismo, el diseño de los sub-retos permite un rol docente enfocado en promover la argumentación científica, teniendo en cuenta que cada actividad está orientada a que los QF no solo obtengan resultados, sino que los explique y los sustenten. Por ello, las preguntas planteadas en las guías están diseñadas para guiar los procesos de razonamiento, en los cuales el docente a través de la estructura de la guía introduce la comparación entre resultados, la identificación de patrones y la construcción de explicaciones concretas fundamentadas, lo que resultan clave para el fortalecimiento de la habilidad de explicación, debido a que los QF deben justificar sus conclusiones a partir de evidencia experimental y teoría.

Ahora bien, en la fase de evaluación, se integra de manera formativa a lo largo de todo el proceso, es decir, las guías incorporan múltiples momentos de evaluación auténtica mediante preguntas abiertas, interpretación de resultados y resolución de problemas, lo que permite evidenciar el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico. Por ejemplo, al solicitar que los QF expliquen la relación que existe entre la carga transferida y la masa del polímero, que indiquen como creen que influye el tamaño del ion dopante, o que interprete la forma de las curvas electroquímicas, se está evaluando su capacidad de argumentación y comprensión, más allá de la simple ejecución mecánica de los procedimientos experimentales. Es importante mencionar que este tipo de evaluación esta alineado con los principios del ABR, donde el énfasis se encuentra en el proceso de aprendizaje y en la construcción del significado, mas que en la memorización de contenidos (Wiggins, 1998).

Esta fase de evaluación dentro de las guías refleja un rol del docente orientado a la retroalimentación formativa, es decir, se promueve la reflexión sobre el propio proceso de aprendizaje. De esta manera, los resultados finales y la elaboración de un informe de laboratorio funcionan como espacios en los cuales el docente a través de criterios implícitos en la guía

orienta a los QF a integrar resultados, contrastar hipótesis y consolidar explicaciones. Dicho enfoque permite que la evaluación no sea un momento aislado del proceso, sino una continuidad del aprendizaje, fortaleciendo la articulación entre la inferencia y la explicación.

Por otra parte, la articulación entre los análisis de resultados, la teoría y la práctica evidencia que los conceptos electroquímicos no se presentan de forma aislada, sino que se contextualizan dentro de un problema real y se validan a través de la experimentación, favoreciendo entonces el desarrollo del pensamiento crítico, ya que los QF deben interpretar los datos, reconocer patrones, identificar las limitaciones experimentales y proponer explicaciones fundamentadas, lo que se alinea con los niveles superiores de la taxonomía de Bloom (Anderson & Krathwohl, 2001).

El uso del enfoque ABR en el diseño de las guías permitió estructurar una herramienta didáctica coherente, progresiva y centrada en el estudiante, donde cada etapa desde la problemática inicialmente planteada hasta la evaluación de resultados contribuye al fortalecimiento de las habilidades del pensamiento crítico, especialmente la inferencia y la explicación. Por ello, las guías cumplen una función instrumental en la enseñanza de técnicas de síntesis y caracterización electroquímica del PPy, pero, además, se constituyen como un recurso pedagógico y didáctico que promueve la comprensión, la autonomía en el aprendizaje y la capacidad de explicar fenómenos científicos a partir de la evidencia experimental.

De esta manera, el análisis detallado de los cuatro informes proporcionados por los QF y una codificación de los mismos realizada en la plataforma Atlas.ti evidencia el desarrollo progresivo de las habilidades de inferencia y explicación, según la conceptualización de Facione (1990) y los indicadores definidos en la matriz de evaluación de los TPL. Ahora bien, con el propósito de fortalecer la interpretación pedagógica de estos hallazgos, se propuso una representación basada en la estructura de un puente, tal como se describe en la Figura 28, en la cual se representa la inferencia como el puente que une dos extremos, el dato experimental con la conclusión, mientras que la explicación se representa como la base estructural, columnas y vigas que le dan soporte a dicho puente. Desde esta perspectiva, la inferencia le permite a los QF transitar desde la observación de un resultado hacia la deducción o tendencia, estableciendo relaciones entre variables. Sin embargo, esta conexión solo puede sostenerse si está fundamentada en una explicación argumentada que incorpore teoría, justificación conceptual y argumento.

Figura 28

Puente del pensamiento crítico.



Nota. Adaptado de Chat GTP Open IA, 2026.

En este modelo, el punto de partida corresponde al dato u observación experimental. A partir de allí, la inferencia actúa como el arco superior del puente, es decir, como la relación que el QF construye entre los datos para llegar a una conclusión. No obstante, para que esta deducción no se limite a una simple asociación superficial, es necesario que se apoye sobre los pilares explicativos, representados en la Figura 28 por la teoría y la justificación. En otras palabras, la explicación constituye la estructura que le da consistencia al razonamiento inferencial, ya que permite sustentar científicamente la conclusión alcanzada. Esta representación no solo facilita la lectura de las respuestas de los QF, sino que permite visualizar el desarrollo progresivo del pensamiento crítico: primero se construye el puente de la inferencia y luego se fortalece con las bases explicativas que lo sostienen.

Como primer ejemplo de este modelo, se analiza una de las relaciones establecidas por los QF del grupo 3 durante el proceso de síntesis del PPy, en la cual se plantea que “*al aumentar el tiempo de síntesis, aumenta el espesor de la película*”. Desde la perspectiva del modelo propuesto, esta afirmación corresponde al puente de la inferencia, ya que conecta directamente dos variables experimentales: el tiempo de síntesis y el espesor del material obtenido. En este caso, los QF logran identificar una tendencia clara en los resultados, estableciendo una relación proporcional entre la cantidad de tiempo aplicada en el proceso electroquímico y el crecimiento de la película del PPy, como se presenta en la Figura 29. Este tipo de enunciado evidencia la habilidad de inferencia descrita por Facione (1990), particularmente en la capacidad de reconocer patrones y extraer conclusiones a partir de datos experimentales, lo que implica un nivel de comprensión que va más allá de la simple descripción de resultados.

Figura 29

Adaptación inferencia Grupo 3 al modelo Puente del pensamiento crítico.



Nota. Adaptado de Chat GTP Open IA, 2026.

Sin embargo, tal como lo plantea la representación del puente, esta inferencia requiere de una base que la sostenga para adquirir validez. Esta base se construye a partir de la explicación propuesta por los QF del mismo grupo, quienes señalan que “*el aumento del espesor se debe a procesos de polimerización electroquímica, transferencia de carga y depósito progresivo de material en el electrodo*” tal como se presenta en la Figura 30. En términos del modelo, esta afirmación representa las columnas y vigas que sostienen el puente, ya que introduce los fundamentos que justifican la relación inferida. Aquí se evidencia la habilidad de explicación, entendida como la capacidad de justificar un fenómeno mediante conceptos teóricos y relaciones causales, integrando elementos propios de la electroquímica del PPy.

Figura 30

Adaptación explicación Grupo 3 al modelo Puente del pensamiento crítico.



Nota. Adaptado de Chat GTP Open IA, 2026.

Desde el punto de vista teórico, esta explicación es consistente con los principios de la electropolimerización. Durante la síntesis, la aplicación de una corriente o potencial genera la oxidación del monómero, lo que da lugar a la formación de cadenas poliméricas que se depositan progresivamente sobre la superficie del electrodo. Este proceso implica la transferencia de carga, la generación de especies reactivas y su posterior crecimiento estructural, lo que se traduce en un incremento del espesor de la película a medida que aumenta el tiempo de síntesis. En este sentido, la explicación no solo respalda la inferencia, sino que la dota de un marco conceptual, permitiendo comprender el fenómeno en términos de mecanismos electroquímicos.

Otro ejemplo claro de este proceso se presenta en la Figura 31 en la que se evidencia una de las respuestas del informe del grupo 1 (Anexo D), donde los QF plantean que “*al aumentar la velocidad de barrido, disminuye la capacitancia*”. Desde el modelo propuesto, esta afirmación corresponde al puente de la inferencia, ya que conecta directamente dos datos experimentales: la velocidad de barrido y la capacitancia. Esta respuesta resulta fundamental porque evidencia que el QF ya no se limita a describir valores numéricos, sino que es capaz de extraer una conclusión razonable a partir de ellos.

Figura 31

Adaptación inferencia Grupo 1 al modelo Puente del pensamiento crítico.



Nota. Adaptado de Chat GTP Open IA, 2026.

Sin embargo, se observa que cuando esta inferencia es posteriormente sostenida por una explicación, como se muestra en la Figura 32, donde los QF del grupo 1 complementan la idea inicial indicando que “*La capacitancia disminuye con el aumento de la velocidad de barrido porque a altas velocidades los iones no alcanzan a penetrar completamente en la estructura del polímero, limitando la contribución de los sitios internos.*” En términos de la representación, la explicación se sustenta en tres pilares conceptuales claramente identificables:

difusión iónica, transporte iónico y acceso a sitios activos, los cuales permiten justificar la disminución de la capacitancia. Así, el razonamiento pasa de una simple relación empírica a una explicación causal basada en principios electroquímicos, lo que representa el fortalecimiento de las habilidades del pensamiento crítico objeto de estudio.

Figura 32

Adaptación explicación Grupo 1 al modelo Puente del pensamiento crítico.



Nota. Adaptado de Chat GTP Open IA, 2026.

Desde el punto de vista teórico, esta explicación es consistente con el comportamiento esperado en materiales pseudocapacitivos como el PPy. A altas velocidades de barrido, el tiempo disponible para la migración y difusión de los iones del electrolito disminuye considerablemente, por lo que solo las regiones más superficiales del polímero participan en el proceso redox, mientras que los sitios activos internos permanecen inaccesibles. Este fenómeno ha sido ampliamente descrito en la literatura electroquímica como una limitación difusional (Bard & Faulkner, 2001; Conway, 1999) y su identificación por parte de los QF demuestra que la habilidad de explicación no solo se está desarrollando en términos discursivos, sino también conceptuales.

En este sentido, la representación del puente permite interpretar el razonamiento de los QF como una progresión desde la inferencia hacia la explicación. La inferencia establece la conexión entre observación y conclusión, mientras que la explicación le otorga estabilidad conceptual y validez. Pedagógicamente, esta representación resulta valiosa porque permite evidenciar cómo las guías TPL diseñadas bajo el enfoque ABR favorecieron la construcción progresiva del pensamiento crítico: primero llevando al QF a identificar patrones y relaciones, y posteriormente a justificar dichos patrones mediante teoría y argumentación. Así, el puente

no solo conecta datos con conclusiones, sino que simboliza el tránsito del QF desde una lectura descriptiva de los resultados hacia una comprensión profunda del fenómeno científico.

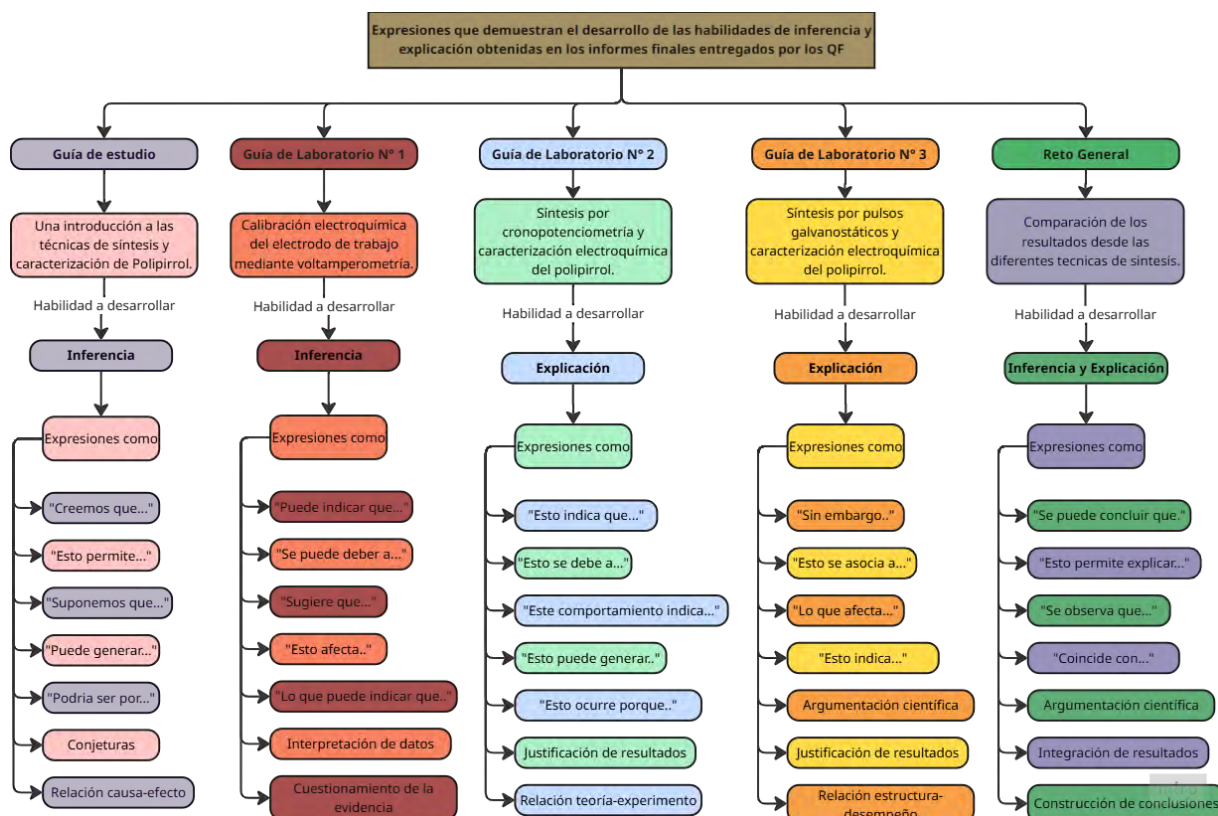
En coherencia con lo anterior, los ejemplos presentados evidencian cómo el pensamiento del QF transita desde una relación empírica hacia una comprensión fundamentada del fenómeno. De esta manera, ambas habilidades inferencia y explicación configuran un razonamiento coherente, evidenciando que el aprendizaje no se limita a identificar tendencias, sino que involucra la capacidad de explicar por qué estas ocurren, lo cual constituye uno de los principales objetivos del desarrollo del pensamiento crítico en el contexto de los TPL diseñados bajo el enfoque ABR.

A partir de la representación del puente del pensamiento crítico propuesto en esta investigación, se integró el análisis de las producciones de los QF con un mapa conceptual de expresiones y redes conceptuales construidas a partir de los informes de las habilidades objeto de estudio. Esta articulación permitió evidenciar cómo las habilidades de pensamiento crítico se manifiestan tanto en el contenido de las respuestas como en la forma en que los QF estructuran y comunican su razonamiento científico, particularmente en la relación que establecen entre los datos experimentales, las inferencias derivadas y las explicaciones que las sustentan.

En este sentido, el mapa conceptual de expresiones de la Figura 33 permitió identificar los marcadores lingüísticos asociados a cada habilidad, mostrando que expresiones como “puede indicar que...”, “sugiere que...” o “esto permite...” corresponden a procesos de inferencia, en tanto evidencian la capacidad de formular conjeturas, establecer relaciones y extraer conclusiones a partir de la información disponible, tal como lo plantea Facione (1990). Por su parte, expresiones como “esto se debe a...”, “esto ocurre porque...” o “esto se explica por...” se asocian con la habilidad de explicación, ya que implican la justificación de resultados mediante relaciones causales y fundamentos teóricos. De esta manera, el lenguaje se configura como una evidencia directa del desarrollo de las habilidades que representa el puente: desde la identificación de patrones hasta su sustentación conceptual.

Figura 33

Marcadores lingüísticos asociados a cada habilidad.



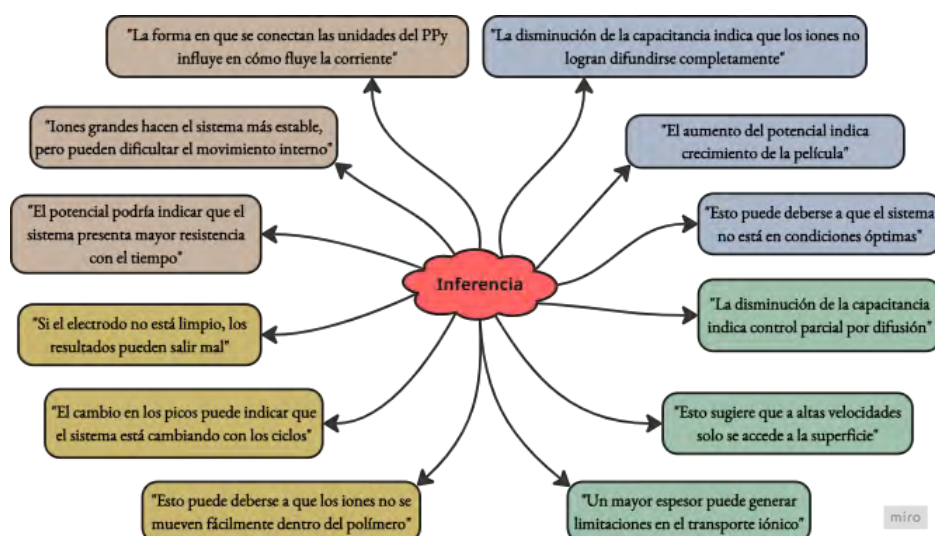
Nota. Fuente Autores

Este desarrollo se hace más evidente en las redes conceptuales derivadas de las respuestas de los QF. En la red de inferencia presentada en la Figura 34, en la que se observan afirmaciones como *“el aumento del potencial indica crecimiento de la película”*, *“la disminución de la capacitancia indica que los iones no logran difundirse completamente”* o *“esto sugiere que a altas velocidades solo se accede a la superficie”*. Estas expresiones evidencian la capacidad de los QF para identificar información pertinente, establecer relaciones entre variables y extraer conclusiones a partir de los datos, en coherencia con las sub-habilidades de inferencia definidas por Facione (1990), particularmente aquellas asociadas a la formulación de hipótesis y a la interpretación de resultados experimentales. No obstante, al compararlas, se observa que algunas inferencias se centran principalmente en la relación directa entre variables, como en el caso de *“el aumento del potencial indica crecimiento de la película”*, donde la conexión se establece a partir de la observación experimental, pero sin explicitar los procesos electroquímicos implicados. En contraste, otras afirmaciones, como *“la disminución de la capacitancia indica que los iones no logran difundirse completamente”* o *“esto sugiere que a altas velocidades solo se accede a la superficie”*, incorporan elementos conceptuales asociados

al transporte iónico, lo que permite articular la relación entre los datos y posibles mecanismos fisicoquímicos, en mayor coherencia con lo descrito en la literatura (Bard & Faulkner, 2001). Desde la analogía del puente del pensamiento crítico, estas diferencias no implican jerarquías, sino distintas formas en que los QF construyen la conexión inferencial: algunas se apoyan directamente en la observación de tendencias, mientras que otras integran de manera más explícita referentes teóricos. En este sentido, el análisis muestra que la inferencia se manifiesta como un proceso dinámico, en el que la relación entre datos y conclusiones puede enriquecerse progresivamente mediante la incorporación de elementos conceptuales que fortalecen la coherencia del razonamiento.

Figura 34

Red conceptual inferencias de los informes de los QF.



Nota. Fuente Autores

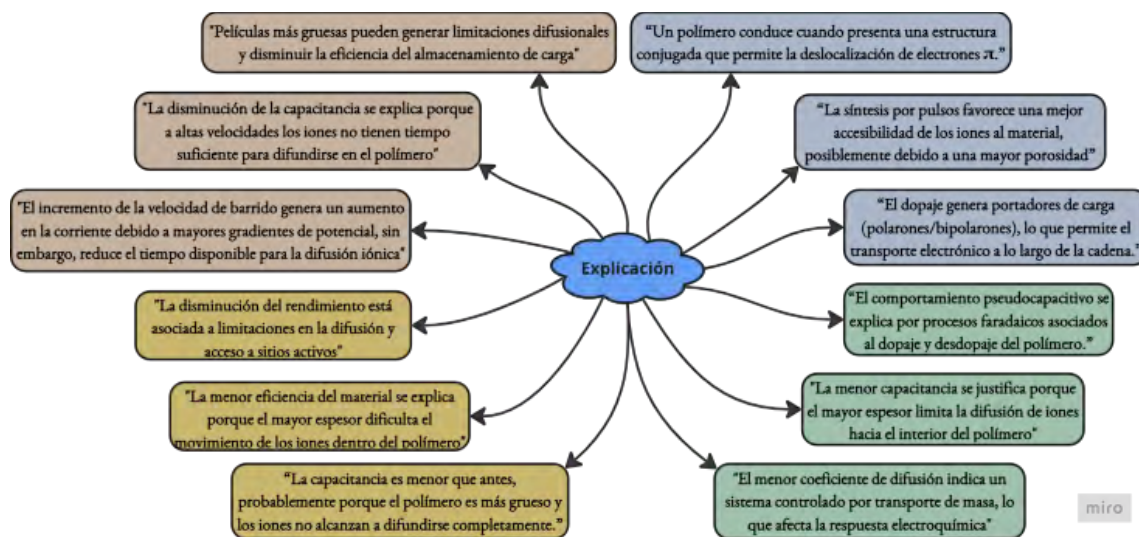
Por su parte, la red de explicación que se presenta en la Figura 35, permite evidenciar cómo las inferencias construidas por los QF son sustentadas mediante argumentos conceptuales que buscan dar sentido a los resultados experimentales. Afirmaciones como *“la menor capacitancia se justifica porque el mayor espesor limita la difusión de los iones hacia el interior del polímero”*, *“el comportamiento pseudocapacitivo se explica por procesos faradaicos asociados al dopaje y desdopaje”* o *“películas más gruesas pueden generar limitaciones difusionales y disminuir la eficiencia del almacenamiento de carga”* muestran que los QF no solo describen los fenómenos, sino que establecen relaciones causales apoyadas en principios electroquímicos. No obstante, al compararlas, se evidencian diferencias en la forma en que se construyen los soportes del puente. Por ejemplo, la afirmación *“películas más gruesas pueden generar limitaciones difusionales...”* presenta una explicación coherente

basada en la relación entre estructura y transporte, aunque se mantiene en un plano general sin detallar los mecanismos de difusión involucrados. En contraste, expresiones como “*la menor capacitancia se justifica porque el mayor espesor limita la difusión de los iones hacia el interior del polímero*” que establecen una conexión más directa entre una variable experimental, un proceso fisicoquímico y su consecuencia en el desempeño electroquímico, lo que permite sostener con mayor consistencia la inferencia previa. De manera similar, la afirmación “*el comportamiento pseudocapacitivo se explica por procesos faradaicos asociados al dopaje y desdopaje*” incorpora conceptos propios de la electroquímica de PCs, alineándose con lo descrito en la literatura (Conway, 1999), aunque podría fortalecerse si se explicita la relación entre estos procesos y la accesibilidad de los sitios activos o el transporte iónico.

Desde la representación del puente del pensamiento crítico, estas explicaciones constituyen los pilares que sostienen la conexión inferencial; en este sentido, aquellas que articulan de manera explícita la relación entre variable experimental, mecanismo y efecto observable configuran un soporte más consistente del razonamiento, ya que permiten comprender no solo qué ocurre, sino por qué ocurre. En cambio, las explicaciones más generales, aunque pertinentes, dejan espacios que podrían enriquecerse mediante una mayor integración entre teoría y evidencia. Así, el análisis muestra que la explicación se fortalece en la medida en que logran vincular de forma clara los conceptos electroquímicos con los resultados experimentales, en coherencia con la noción de explicación como justificación argumentada planteada por Facione (1990).

Figura 35

Red conceptual Explicaciones de los informes de los QF.

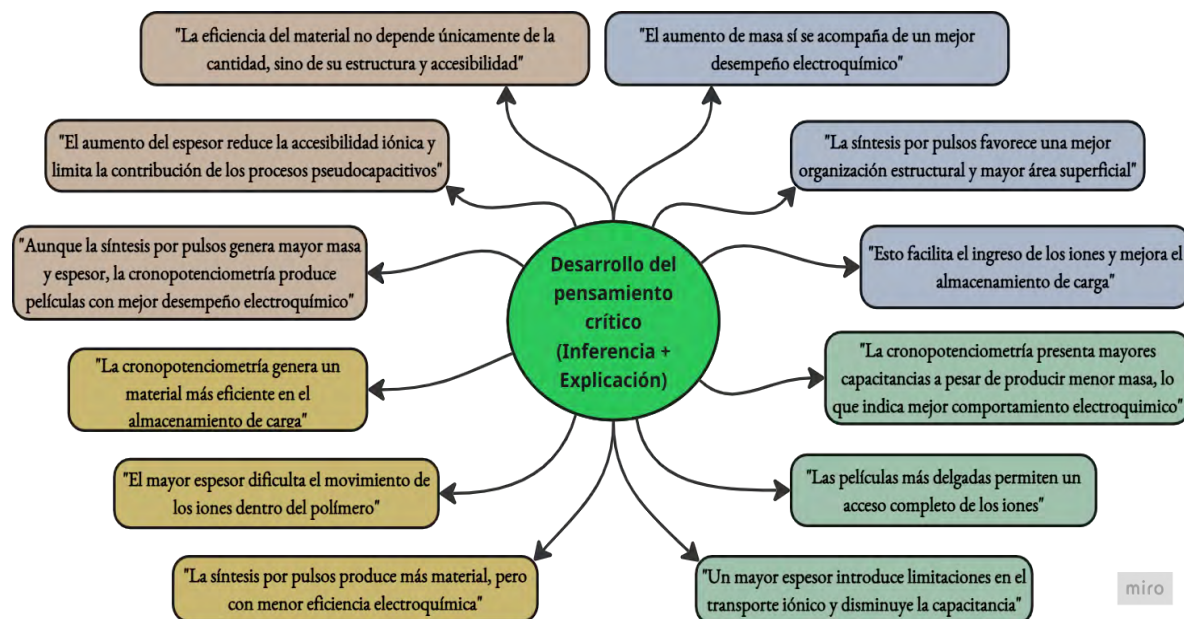


Nota. Fuente Autores

En la red de articulación del pensamiento crítico que se presenta en la Figura 36, se evidencia la integración de inferencia y explicación en la construcción de conclusiones que vinculan los resultados experimentales con fundamentos teóricos. Expresiones como “la cronopotenciometría genera un material más eficiente en el almacenamiento de carga” o “la eficiencia del material no depende únicamente de la cantidad, sino de su estructura y accesibilidad” muestran que los QF logran conectar datos y principios electroquímicos en un mismo enunciado. Sin embargo, al compararlas, se observan diferencias en la forma en que se consolida esta articulación. La afirmación “la cronopotenciometría genera un material más eficiente...” constituye una conclusión pertinente derivada de la comparación de resultados, pero no explicita completamente los factores que justifican dicha eficiencia, como la accesibilidad iónica o las limitaciones difusionales, lo que deja parte del puente implícito. En contraste, la expresión “la eficiencia del material no depende únicamente de la cantidad, sino de su estructura y accesibilidad” incorpora de manera más clara los elementos conceptuales que sustentan la conclusión, al reconocer que el desempeño electroquímico está condicionado por la relación entre morfología, transporte iónico y participación de los sitios activos, en coherencia con lo reportado en la literatura (Conway, 1999).

Figura 36

Red conceptual inferencias y explicaciones de los informes de los QF.



Nota. Fuente Autores

Ahora bien, estas conclusiones representan el punto en el que la estructura inferencial y sus soportes explicativos se encuentran plenamente articulados, haciendo referencia al puente del

pensamiento crítico. En este sentido, aquellas afirmaciones que integran explícitamente los datos experimentales con los mecanismos fisicoquímicos permiten consolidar un puente más consistente, ya que no solo establecen qué técnica resulta más eficiente, sino que justifican por qué ocurre este comportamiento. Por el contrario, las conclusiones que se mantienen en un plano comparativo, aunque válidas, pueden fortalecerse mediante la incorporación explícita de los procesos que sustentan dicha comparación. Así, el análisis evidencia que la articulación entre inferencia y explicación se expresa en la capacidad de construir conclusiones que integran evidencia, relaciones causales y fundamentos teóricos, en coherencia con los indicadores de la matriz asociados al reto general y al informe final.

Esta misma lógica se observa en el análisis del informe del grupo 1, donde las respuestas permiten identificar cómo se construye el puente del pensamiento crítico a partir de la relación entre inferencia y explicación. Por ejemplo, la afirmación *“los iones más grandes tienden a quedarse más fácilmente en el material, generando mayor estabilidad”* evidencia que los QF logran establecer una relación entre el tamaño del ion dopante y el comportamiento del sistema, lo cual corresponde a una inferencia en el sentido planteado por Facione (1990), al reconocer información pertinente y derivar una consecuencia a partir de ella. No obstante, al compararla con lo esperado desde la teoría electroquímica, se observa que esta relación se formula dando prioridad al concepto de estabilidad, pero sin considerar explícitamente el efecto del tamaño del ion sobre la movilidad iónica y la cinética de transporte, aspectos clave en los PCs (Conway, 1999). En términos del modelo del puente, esto implica que la conexión inferencial está presente, pero los soportes que la sostienen no incorporan todos los elementos conceptuales necesarios para explicar completamente el fenómeno.

Esta situación se hace más evidente al analizar expresiones como *“los datos serían poco confiables”*, donde los QF intentan justificar un resultado o una condición experimental. Aunque esta afirmación muestra la intención de construir una explicación, no se desarrollan las causas que permitirían entender por qué los datos pierden confiabilidad, por ejemplo, efectos asociados a la resistencia interna, a la estabilidad del electrodo o a la reproducibilidad del sistema. Al contrastar ambas respuestas, se observa que, mientras la primera logra establecer una relación entre variables (construyendo el arco del puente), la segunda intenta sostener dicha relación, pero sin explicitar los mecanismos que la fundamentan (columnas del puente). Desde la representación propuesta, esto no implica la ausencia de explicación, sino una forma de

construcción en la que los soportes aún no integran plenamente los fundamentos teóricos que permitirían consolidar el razonamiento.

En este sentido, el análisis del grupo 1 muestra cómo la inferencia se manifiesta de manera clara en la identificación de relaciones entre variables, mientras que la explicación aparece como un proceso en construcción, en el que los QF reconocen la necesidad de justificar sus afirmaciones, pero aún pueden enriquecer sus argumentos mediante una mayor integración entre teoría y evidencia experimental.

En el informe del grupo 2, se observa una articulación más explícita entre los componentes del puente del pensamiento crítico. Por ejemplo, la afirmación “*existe un balance entre estabilidad y transporte*” evidencia la capacidad de integrar múltiples variables como el tamaño del ion, la estructura del polímero y la movilidad iónica, en una misma relación, lo cual corresponde a las sub-habilidades de inferencia descritas por Facione (1990), particularmente a aquellas asociadas a la formulación de conjeturas y a la consideración de alternativas. En este caso, la inferencia no se limita a una relación directa entre dos variables, sino que incorpora una visión más amplia del sistema, en la que se reconoce que el comportamiento electroquímico depende de la interacción entre distintos factores.

Esta forma de inferencia adquiere mayor relevancia al contrastarse con los resultados experimentales de los otros grupos, donde la síntesis por pulsos galvanostáticos presentó un mejor desempeño en términos de capacitancia y almacenamiento de carga. En este sentido, la inferencia se articula con la evidencia empírica, ya que el planteamiento del “*balance entre estabilidad y transporte*” permite interpretar por qué, bajo ciertas condiciones de síntesis, el material presenta un comportamiento más eficiente. Desde el modelo del puente del pensamiento crítico, esto implica que el arco inferencial se construye a partir de la interpretación de los propios resultados experimentales, lo que fortalece su coherencia.

Por su parte, esta inferencia se encuentra sostenida por explicaciones como “*el sistema presenta almacenamiento tanto electrostático como faradaico*”, donde los QF integran conceptos propios de la pseudocapacitancia. Esta afirmación no solo justifica el comportamiento observado, sino que lo vincula con mecanismos electroquímicos ampliamente reportados en la literatura (Conway, 1999), lo que responde a los indicadores de la matriz relacionados con la justificación de resultados a partir de fundamentos teóricos. No obstante, al analizar esta explicación en relación con el comportamiento particular observado en la

síntesis por pulsos, se identifica que podría fortalecerse al explicitar con mayor detalle cómo las condiciones de esta técnica favorecen la accesibilidad iónica, la distribución del material o la formación de una estructura más homogénea, aspectos que permitirían conectar de manera más directa los resultados experimentales con los mecanismos propuestos.

En términos del puente del pensamiento crítico, las respuestas del grupo 2 muestran una construcción en la que la inferencia y la explicación se encuentran estrechamente vinculadas, esta articulación resulta especialmente significativa porque se encuentra directamente respaldada por la evidencia experimental obtenida por el grupo, lo que permite consolidar un razonamiento en el que los datos, las relaciones y los fundamentos teóricos se integran de manera coherente.

Con relación al informe del grupo 3, al igual que en los grupos anteriores, se evidencia la construcción del puente del pensamiento crítico a partir de la relación entre inferencia y explicación; sin embargo, en este caso, dicha articulación se manifiesta de manera más integrada en torno a los resultados experimentales obtenidos. Por ejemplo, la afirmación “*un mayor espesor puede generar limitaciones en la difusión de iones, afectando negativamente la capacitancia*” retoma la relación entre estructura y transporte iónico ya identificada en otros grupos, pero la sitúa directamente en el contexto de sus propios datos, estableciendo una conexión clara entre una variable experimental y su efecto en el desempeño electroquímico. Esta explicación se alinea con lo descrito en la literatura (Bard & Faulkner, 2001; Conway, 1999), donde se reconoce que el incremento del espesor puede restringir el acceso de los iones a los sitios activos del material.

De manera similar, la afirmación “*a altas velocidades solo se accede a la superficie*” evidencia, como en el grupo 2, la capacidad de interpretar tendencias en los voltamperogramas y relacionarlas con fenómenos de transporte, en este caso asociados al tiempo disponible para la difusión iónica. No obstante, lo que resulta relevante en este grupo es que ambas ideas, la limitación difusional por espesor y el acceso superficial a altas velocidades se presentan como partes de un mismo marco interpretativo, aunque no siempre se explicita de forma directa su interrelación. Es decir, las inferencias y explicaciones convergen en torno a un mismo fenómeno, pero podrían articularse con mayor claridad en un único argumento que integre simultáneamente las condiciones de síntesis, la morfología del material y las variables electroquímicas.

Esto implica que, al igual que en el grupo 2, tanto el arco inferencial como sus soportes explicativos están presentes y en correspondencia con los datos; sin embargo, la conexión entre ambos podría hacerse más explícita para mostrar con mayor claridad cómo las observaciones experimentales se traducen en una interpretación unificada del sistema. En este sentido, el grupo 3 evidencia una construcción del razonamiento en la que las relaciones entre variables y los fundamentos teóricos se encuentran estrechamente vinculados, particularmente en torno al papel del transporte iónico, lo que permite sostener las conclusiones a partir de una lectura coherente de la evidencia experimental.

Finalmente, en el informe del grupo 4, al igual que en los grupos 2 y 3, se evidencia una articulación entre inferencia y explicación, sin embargo, en este caso, dicha articulación se centra de manera explícita en la relación entre las técnicas de síntesis y el desempeño del material. La afirmación “*una técnica produce más material, mientras que la otra produce un material más eficiente*” muestra la capacidad de establecer relaciones comparativas entre variables experimentales, integrando tanto la cantidad de material depositado como su comportamiento electroquímico. Esta inferencia no se limita a identificar una diferencia, sino que sintetiza la información obtenida en una conclusión que conecta los resultados con la eficiencia del sistema.

En correspondencia con lo observado en los grupos anteriores, esta inferencia se encuentra acompañada por explicaciones que vinculan la estructura del material con el acceso iónico y la capacidad de almacenamiento de carga, en coherencia con los principios descritos en la literatura (Conway, 1999). En este sentido, el grupo reconoce que un mayor depósito de material no implica necesariamente un mejor desempeño, lo cual está asociado a limitaciones difusionales y a la accesibilidad de los sitios activos, aspectos que han sido discutidos previamente por los otros grupos desde distintas perspectivas. No obstante, lo particular de este caso es que la explicación se construye en función de una comparación entre técnicas, lo que permite relacionar directamente las condiciones de síntesis con las propiedades del material obtenido.

En este grupo, la construcción del puente se orienta hacia la integración de resultados en términos comparativos. Aun así, la explicación podría enriquecerse si se explicitarán con mayor detalle los mecanismos que diferencian ambas técnicas, como la distribución del material, la homogeneidad de la película o las condiciones de transporte iónico, lo que permitiría fortalecer la conexión entre los datos observados y los fundamentos electroquímicos.

En conjunto, el grupo 4 evidencia una comprensión en la que las conclusiones se construyen a partir de la comparación y la relación entre variables, articulando inferencia y explicación en función del análisis del comportamiento del material bajo distintas condiciones de síntesis.

De manera transversal, el análisis de los cuatro informes permite evidenciar que las habilidades de inferencia y explicación se manifiestan de forma articulada a lo largo de las guías, en coherencia con los indicadores definidos en la matriz de evaluación, aunque con distintas formas de construcción según el grupo. En el caso del grupo 1, la inferencia se hace evidente en la identificación de relaciones entre variables, mientras que la explicación aparece de manera más implícita, mostrando la necesidad de fortalecer los soportes conceptuales del puente. Por su parte, en el grupo 2, la articulación entre ambas habilidades se construye a partir de la integración de múltiples variables y su relación con los resultados experimentales, particularmente en la interpretación del comportamiento observado en la síntesis por pulsos, lo que permite establecer conexiones más directas entre evidencia y teoría. En el grupo 3, esta relación se expresa en la coherencia entre las inferencias derivadas de los datos y las explicaciones asociadas a procesos de transporte iónico, evidenciando una correspondencia clara entre observación y fundamentación conceptual. Finalmente, en el grupo 4, la articulación se orienta hacia la comparación entre técnicas de síntesis, donde la inferencia y la explicación se integran en conclusiones que relacionan cantidad de material, estructura y desempeño electroquímico.

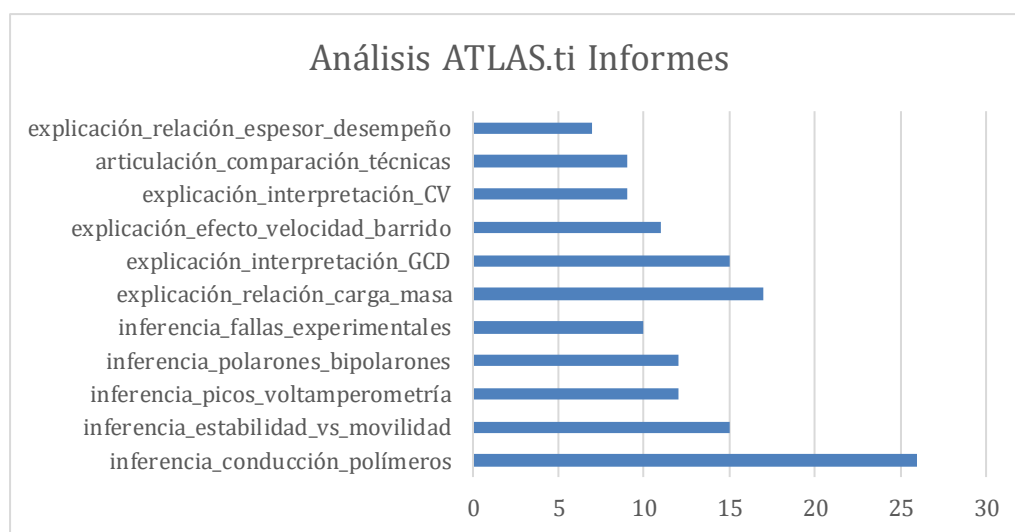
Desde el modelo del puente del pensamiento crítico, estas diferencias no implican jerarquías, sino distintas formas en que los QF construyen la conexión entre datos, relaciones y fundamentos teóricos. En todos los casos, se evidencia la presencia del puente, sin embargo, la forma en que estos componentes se articulan depende de cómo cada grupo integra la evidencia experimental con los conceptos electroquímicos. Así, el modelo del puente no solo funciona como una representación, sino como una herramienta analítica que permite comprender cómo los QF transitan desde la identificación de relaciones hasta la construcción de explicaciones fundamentadas, consolidando un razonamiento científico que se estructura a partir de la interacción entre datos, teoría y argumentación.

Como complemento al análisis cualitativo de los informes, los resultados obtenidos fueron codificados en Atlas.ti y se presentan en la Figura 37 en la cual se permiten evidenciar, desde una perspectiva más sistemática, las tendencias en el uso de las habilidades de inferencia y explicación a lo largo de las producciones de los QF. En este sentido, se observa una mayor

frecuencia de códigos asociados a la inferencia, particularmente en categorías como “inferencia_conducción_polímeros”, “inferencia_estabilidad_vs_movilidad” e “inferencia_picos_voltamperometría”, lo cual indica que los QF establecen relaciones entre variables al interpretar los datos experimentales y formular conjeturas a partir de la evidencia. Este comportamiento es coherente con lo observado en los informes, donde la inferencia se manifiesta de forma más inmediata al analizar resultados, constituyendo el primer tramo del puente del pensamiento crítico.

Figura 37

Resultados del análisis de la plataforma Atlas.ti para los informes 1, 2, 3 y 4 de los QF.



Nota. Fuente autores

Por otra parte, los códigos asociados a la explicación, como “explicación_relación_carga_masa”, “explicación_interpretación_GCD” o “explicación_efecto_velocidad_barrido”, aunque presentes, muestran una menor frecuencia relativa, lo que sugiere que, si bien los QF logran justificar sus afirmaciones, este proceso requiere una mayor elaboración conceptual. Este hallazgo se articula con los análisis previos, donde se evidenció que las explicaciones tienden a construirse a partir de las inferencias, pero no siempre integran de manera explícita todos los fundamentos teóricos necesarios para sostener completamente el razonamiento. En términos del modelo del puente, esto implica que, aunque los QF construyen el arco inferencial con relativa facilidad, la consolidación de sus bases, es decir, las explicaciones, demandan una mayor integración entre teoría y evidencia.

Asimismo, la presencia de códigos como “articulación_comparación_técnicas” refleja la capacidad de algunos grupos para integrar inferencia y explicación en la construcción de conclusiones más complejas, especialmente en el análisis comparativo entre cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos. Este resultado es consistente con lo observado en el grupo 4, donde las conclusiones no solo se basan en la comparación de resultados, sino que incorporan elementos estructurales y de transporte iónico para justificar las diferencias en el desempeño electroquímico. De igual manera, categorías como “inferencia_fallas_experimentales” evidencian que los QF no solo interpretan resultados esperados, sino que también reflexionan sobre posibles limitaciones del proceso experimental, lo que amplía el alcance de la inferencia hacia una comprensión más crítica del contexto de laboratorio.

Este análisis de Atlas.ti confirma y complementa los hallazgos derivados de la revisión de los informes, mostrando que las habilidades de pensamiento crítico se manifiestan de manera articulada, aunque con una mayor predominancia de la inferencia sobre la explicación. Esta relación no debe entenderse como una jerarquía, sino como parte del proceso natural de construcción del conocimiento en el contexto de los TPL, donde los QF inicialmente establecen relaciones entre los datos y, posteriormente, avanzan hacia la justificación de dichas relaciones mediante conceptos teóricos.

Finalmente, al integrar los resultados de Atlas.ti con el modelo del puente del pensamiento crítico, se reafirma que el desarrollo de estas habilidades no ocurre de manera aislada, sino como un proceso interdependiente en el que la inferencia y la explicación se fortalecen mutuamente. Así, los QF no solo logran interpretar los fenómenos electroquímicos asociados al PPy, sino que comienzan a construir un discurso científico en el que los datos experimentales, las relaciones entre variables y los fundamentos teóricos se articulan progresivamente, dando cierre a esta fase del análisis y evidenciando el aporte de las guías diseñadas al fortalecimiento del pensamiento crítico en el contexto de la enseñanza de la electroquímica.

CONCLUSIONES

Los resultados confirmaron que se depositaron películas de polipirrol (PPy) sobre el electrodo de carbón vítreo a través de las dos técnicas de síntesis electroquímicas (Cronopotenciometría y Pulsos Galvanostáticos) y se definieron las redes conceptuales y variables experimentales necesarias para el diseño de las guías de TPL. Se evidenció que el desempeño capacitivo y electroquímico del material depende del equilibrio entre el espesor de la película, su morfología y la accesibilidad iónica, más que de la cantidad de material depositado. Las condiciones intermedias de síntesis favorecieron una mejor transferencia de carga y transporte de masa, optimizando el comportamiento pseudocapacitivo del PPy y su potencial aplicación en supercapacitores de conformidad con los resultados obtenidos mediante las técnicas de caracterización electroquímica implementadas (CV y GCD). Por ello, se logró establecer que un aumento excesivo en la masa o el espesor de la película puede generar limitaciones difusionales que afectan la eficiencia del almacenamiento de carga, lo cual coincide con los fundamentos teóricos de la pseudocapacitancia en PCs.

Ahora bien, el diseño de las guías de TPL bajo el enfoque del ABR permitió estructurar una herramienta didáctica, en la cual se integraron de manera intencionada los conceptos teóricos, las actividades experimentales y el análisis de resultados para la caracterización de películas de PPy sintetizadas por cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos, para promover las habilidades de pensamiento crítico, inferencia y explicación. La estructura de un reto general, junto con la formulación de sub-retos progresivos, facilitó que los QF transitaran desde la formulación de inferencias hasta la construcción de explicaciones fundamentadas. Asimismo, la incorporación de elementos como la identidad visual de cada guía, el uso de medallas (bronce, plata, oro y diamante) y la inclusión de espacios para el análisis de datos y la argumentación, contribuyó a fortalecer la motivación y el compromiso de los QF con el proceso de aprendizaje, consolidando una propuesta didáctica centrada en la resolución de retos y la construcción activa del conocimiento.

Finalmente, el análisis de los informes de laboratorio, apoyado en la matriz de evaluación, las redes conceptuales y el procesamiento en Atlas.ti, permitió evidenciar que la implementación de las guías contribuyó al fortalecimiento de las habilidades de inferencia y explicación en los QF. Los estudiantes lograron establecer relaciones entre variables experimentales, interpretar datos electroquímicos y formular conjeturas coherentes con los resultados obtenidos, lo cual se reflejó en expresiones propias de la inferencia. De igual manera, se observó un avance en la

construcción de explicaciones, en las que los QF comenzaron a articular sus interpretaciones con conceptos teóricos como la difusión iónica, la transferencia de carga y el comportamiento pseudocapacitivo del material. Este proceso se comprende a partir de la representación del puente del pensamiento crítico propuesta en la investigación, donde los datos y observaciones constituyen el punto de partida, la inferencia funciona como el arco que permite establecer relaciones y tendencias entre variables, y la explicación actúa como los pilares que sostienen dicho puente mediante la justificación conceptual de los fenómenos. Así, las producciones estudiantiles evidencian cómo los QF no solo logran conectar resultados experimentales con conclusiones, sino que progresivamente fortalecen la base explicativa que da consistencia a su razonamiento científico.

De esta manera, se concluye que el diseño e implementación de una serie de guías de TPL fundamentadas en el enfoque de ABR, articuladas con las técnicas de síntesis y caracterización electroquímica del PPy, contribuye significativamente al fortalecimiento de las habilidades de inferencia y explicación en los QF. Este fortalecimiento permitió a los QF comprender que las técnicas de síntesis y caracterización influyen en el espesor, comportamiento capacitivo del PPy, para su potencial aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía como los supercapacitores al interpretar, relacionar y justificar fenómenos químicos a partir de la evidencia experimental. En este sentido, la propuesta didáctica construida no solo transforma la dinámica tradicional del laboratorio, sino que consolida este espacio como un escenario para la construcción de conocimiento científico y el fortalecimiento del pensamiento crítico, particularmente la inferencia y la explicación, aportando a la formación integral de los futuros profesionales en química.

REFERENCIAS

- Abdel-Aziz, A. M., El-Sayed, G. O., & El-Hady, D. A. (2022). Activated glassy carbon electrode as an electrochemical sensing platform. *ACS Omega*, 7(29), 25326–25335. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03427>
- Anderson, K. (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. New York: Logman.
- Ansari, R. (2004). Electrochemical Synthesis and Characterization of Electroactive Conducting Polypyrrole Polymers. *Russian Journal of Electrochemistry*, 41(9), 2-5.
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. *Russian Journal of Electrochemistry*, 1-2.
- Bermudez, M. C. (2016). SINTESIS Y CARACTERIZACION DE POLIPIRROL DOPADO CON POLIESTIRENO SULFONATO DE SODIO. *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*, 29.
- Bose, S., Kuila, T., Uddi, M. E., Kim, N. H., & Alan K.T. Lau, J. H. (2010). In-situ synthesis and characterization of electrically conductive polypyrrole/graphene nanocomposites. *Polymer*, 2-4.
- Castillo, E. &. (2003). El rigor metodológico en la investigación cualitativa. Colombia Médica. *Redalyc*, 34(3), 164-167.
- Clayden, J., Greeves, N., & Warren, S. (2001). ORGANIC CHEMISTRY SECOND EDITION. New York: Oxford Univeristy press.
- Conway, B. E. (1999). *Electrochemical Supercapacitors*. New York : Springer.
- Deterding, S. D. (2011). From game design elements to gamefulness: Defining “gamification”. *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference*, 9-15.
- Domin, D. S. (1999). A review of laboratory instruction styles. *Journal of chemical education*, 76(4), 543-547.
- Facione, P. A. (1990). Critical Thinking: A Statement of Expert Consensus for Purposes of Educational Assessment and Instruction. *Insight Assessment*, 11-15.
- González, J., Méndez, L., & Rodríguez, P. (2025). A problem-based learning electrochemistry course for undergraduate students to develop complex thinking. *Education Sciences*, 15(3), 320. <https://doi.org/10.3390/educsci15030320>

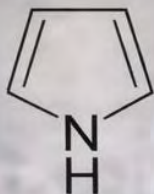
- Hao, L., Dong, C., Zhang, L., Zhu, K., & Yu, a. D. (2022). Polypyrrole Nanomaterials: Structure, Preparation and Application. *Polymers*, 14(23), 28.
doi:<https://doi.org/10.3390/polym14235139>
- Hernández-Sampieri, R. &. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. *McGraw-Hill Education*, 210-212.
- Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-based learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review*, 235-266.
- HOFSTEIN, & LUNETTA. (2003). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science education*, 12-27. doi:<https://doi.org/10.1002/sce.10106>
- Inzelt, G. (2012). *Conducting Polymers*. London New York: Springer.
- Johnson, L. F., Smith, R. S., Smythe, J. T., & Varon, R. K. (2009). Challenge-Based Learning: An Approach for Our Time. *New Media Consortium*, 12-16.
- Labra, C. B., & Arias, L. A. (2024). Trabajo de laboratorio en física y química a través de un enfoque roblematizado. *Revista de enseñanza de la física*, 36(1), 13-22.
doi:<https://doi.org/10.55767/2451.6007.v36.n1.45312>
- Martinez, J., Doménech, L., Menargues, A., & Romo, G. (2012). La integración de los trabajos prácticos en la enseñanza de la química como investigación dirigida. *Educación química.*, 32. doi:10.1016/S0187-893X(17)30143-X
- Namsheer, K., & Rout, C. S. (2021). Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC advances*, 9-11.
- Nieto, L. Á., & Hilt, J. A. (2025). Aprendizaje basado en retos (ABR) en estudiantes universitarios: una revisión sistemática. *UNACIENCIA*, 18 (35), 106-109.
doi:<https://doi.org/10.35997/unaciencia.v18i35.1230>
- Noreña, A. L.-M.-M. (2012). Aplicabilidad de los criterios de rigor y éticos en la investigación cualitativa. *Aquichan*, 263-274.
- Observatorio de innovación educativa del tecnológico de Monterrey. (2016). Aprendizaje Basado en Retos. *Edu Trends*, 5-7. Obtenido de https://cgcai.unicauca.edu.co/innovacioneducativa/sites/default/files/recursos/Aprendizaje%20Basado%20en%20Retos%20Edutrend_Monterey.pdf?utm_source=chatgpt.com

- Olivares, S., López Cabrera, M. V., & Valdez, J. E. (2018). Aprendizaje basado en retos: una experiencia de innovación para enfrentar problemas de salud pública. *Educación Médica*. <https://doi.org/10.1016/j.edumed.2017.10.001>
- Otero, T. F. (Diciembre de 2003). POLIMEROS CONDUCTORES: SINTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES ELECTROQUIMICAS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 4(4), 1-6.
- Park, Y., Jung, J., & Chang, M. (2019). Research Progress on Conducting Polymer-Based Biomedical Applications. *applied sciences*, 4.
- Saxton, E., Belanger, S., & Becker, W. (2012). The Critical Thinking Analytic Rubric (CTAR): Investigating intra-rater and inter-rater reliability of a scoring mechanism for critical thinking performance assessments. *Assessing Writing*, 17(4), 10-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asw.2012.07.002>
- Suarez, D. J. (2019). Aprendizaje basado en retos como estrategia metodológica para el área de tecnología. *Universidad Pedagógica Nacional*, 71-84.
- T. A. Skotheim, J. R. (2007). *Handbook of Conducting Polymers*. CRC Press.
- Wang, J. (2008). *Analytical Electrochemistry*. New York: ELSEVIER.
- Zorrilla, E. G. (2019). Análisis de trabajos prácticos de laboratorio elaborados por futuros docentes de ciencias naturales. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 14(2), 5-6. doi:<https://doi.org/10.14483/23464712.13750>

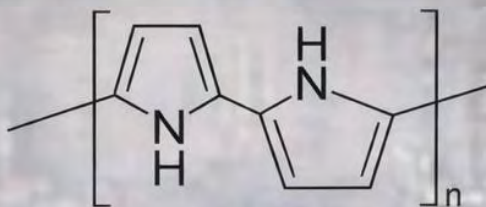
ANEXOS

Anexo A. Guías TPL construidas bajo el enfoque del ABR

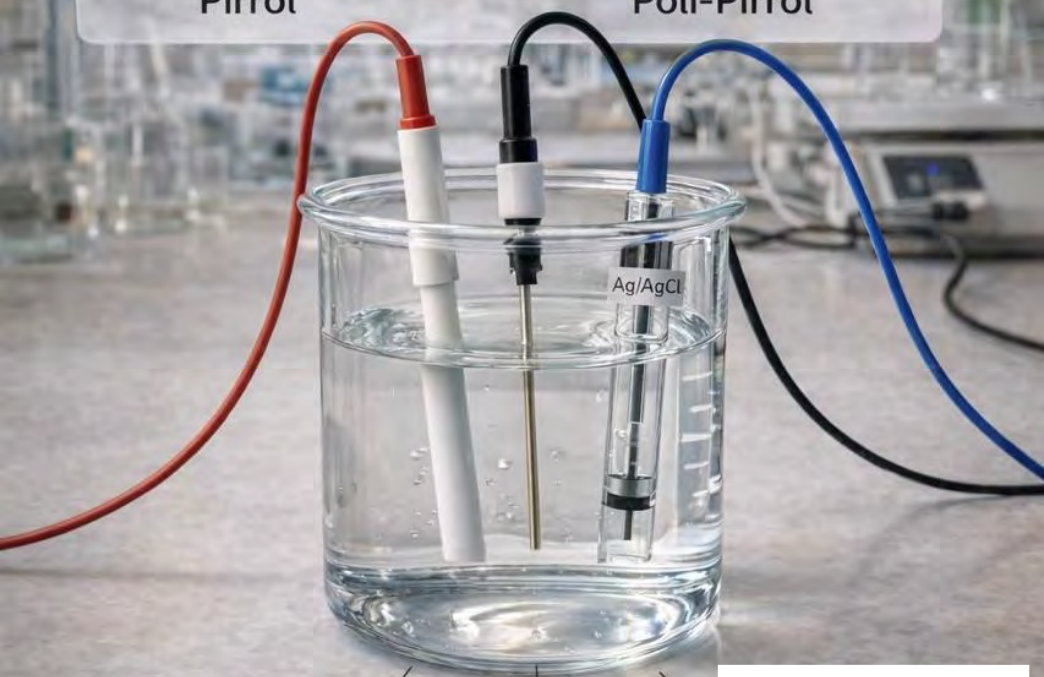
Síntesis y Caracterización del **Poli-Pirrol**



Pirrol



Poli-Pirrol



Electrodo de
carbón vítreo

Electrodo de
platino

Electrodo de referencia
 $\text{Ag(s)}/\text{AgCl(s)}$

Elaborado por: Jose Miguel Melo Molina
Mayerly Rodríguez Hernández



Un reto electroquímico: Del polipirrol a la capacitancia en dispositivos de almacenamiento de energía

Nombre: _____

Fecha: _____

El uso de dispositivos electrónicos y tecnologías de almacenamiento de energía ha incrementado la necesidad de desarrollar materiales capaces de almacenar carga de manera eficiente y sostenible. Sin embargo, muchas baterías convencionales dependen de la explotación intensiva de metales como litio, cobalto o níquel, lo que genera impactos ambientales y sociales. Frente a esta problemática, surge la necesidad de explorar alternativas más sostenibles y eficientes para el almacenamiento de energía, entre ellas los supercondensadores, dispositivos capaces de almacenar carga mediante procesos electroquímicos rápidos y reversibles.

En este contexto, los polímeros conductores, particularmente el polipirrol (PPy) ha sido ampliamente estudiado debido a su capacidad de conducir electricidad cuando se encuentra dopado y a su participación en procesos redox reversibles asociados al almacenamiento de energía. No obstante, su desempeño electroquímico depende de factores como la técnica de síntesis empleada y el espesor de la película formada, variables que influyen directamente en su comportamiento capacitivo.

Para entender esta problemática en particular, se han diseñado cuatro guías, estructuradas bajo el enfoque del aprendizaje basado en retos, con el fin de poder dar respuesta al siguiente reto general: ¿Cómo influyen las técnicas de síntesis electroquímica, cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos, en el espesor y el comportamiento capacitivo de películas de polipirrol, y qué implicaciones tiene esto para su posible aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía tipo supercondensador? Para responder a esta pregunta, a lo largo de las guías se plantearán sub-retos conceptuales y experimentales que permitirán analizar la estructura y propiedades de los polímeros conductores, comprender los procesos electroquímicos involucrados en su síntesis y caracterización, e interpretar resultados experimentales asociados a su comportamiento capacitivo.



A medida que avances en cada guía y superes los sub-retos propuestos, obtendrás medallas que reflejarán tu progreso y te permitirán ascender de rango en el dominio de las técnicas electroquímicas.



¡Atrévete a resolver cada sub-reto; cada uno revela una pista sobre el comportamiento del polipirrol!



Una introducción a las técnicas de síntesis y caracterización de polipirrol

Nombre: _____

Fecha: _____

Introducción

¿Alguna vez te has preguntado cómo los polímeros lograrían conducir electricidad y cómo podrían almacenar energía en dispositivos que se cargan en segundos? En esta guía exploraremos, desde un enfoque conceptual, los principios químicos y electroquímicos que dan el sustento teórico de la síntesis y caracterización de polímeros conductores como el polipirrol, materiales clave en tecnologías modernas de almacenamiento de energía. A lo largo del documento encontrarás explicaciones teóricas que te ayudarán a comprender lo que ocurre durante el trabajo experimental, junto con retos y espacios de análisis diseñados para cuestionar, interpretar y predecir resultados propios del laboratorio. Estos retos buscan fortalecer el pensamiento crítico especialmente la habilidad de inferencia, de modo que pueda relacionar la teoría con la práctica y comprender cómo cada etapa experimental influye en el comportamiento final del material obtenido.



Polímero y polímero conductor

Un polímero es una macromolécula formada por la unión repetitiva de unidades pequeñas llamadas monómeros, que se enlazan químicamente para formar largas cadenas o redes tridimensionales. Estos materiales pueden ser naturales, como la celulosa o las proteínas, o sintéticos, como el polietileno y el nylon. En la mayoría de los polímeros convencionales, los electrones se encuentran localizados en enlaces covalentes simples, lo que impide el movimiento libre de carga y hace que estos materiales sean normalmente aislantes eléctricos (Skotheim & Reynolds, 2007).

Sin embargo, existe una clase especial denominada polímeros conductores (Tabla 1, cuya estructura contiene sistemas de enlaces dobles y simples alternados que forman cadenas conjugadas, permitiendo la deslocalización de electrones π a lo largo de la macromolécula, esta conjugación genera caminos para el transporte electrónico. No obstante, la alta conductividad aparece cuando el polímero es sometido a un proceso de oxidación o reducción llamado dopaje, que genera portadores de carga móviles en la estructura (Heeger, 2001).



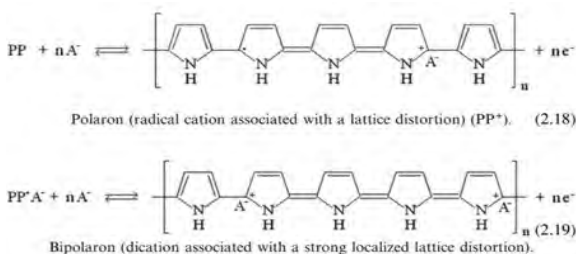
Tabla 1. Estructuras químicas, aplicaciones de los polímeros conductores aromáticos comunes. Tomado de Research Progress on Conducting Polymer-Based Biomedical Applications (Park, Jung, & Chang, 2019)

Polymer	Chemical Structure	Applications
Polypyrrole (PPy)		Fuel cells, corrosion protection, computer displays, microsurgical tools biosensors
Polyaniline (PANI)		Biosensors, neural probes, drug delivery, tissue engineering
Polythiophene (PT)		Biosensors, solar cells, tissue engineering, photosensitizers, supercapacitors
Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT)		Neural electrodes, nerve grafts, heart muscle patches

Sub-retro

Si la mayoría de los plásticos son aislantes eléctricos ¿Cómo cree que es posible que un polímero pueda conducir electricidad?
 Proponga una hipótesis sobre qué debe cambiar en la estructura molecular para permitir el movimiento de electrones

Durante este proceso se forman especies cargadas denominadas polarones y bipolarones Figura 1, que corresponden a distorsiones locales de la cadena conjugada asociadas a una o dos cargas eléctricas estabilizadas. Estas especies crean niveles energéticos dentro de la banda prohibida, permitiendo que las cargas se desplacen a lo largo del polímero y generen conductividad eléctrica. Además, para compensar la carga generada, ingresan iones del electrolito entre las cadenas poliméricas, facilitando simultáneamente el transporte electrónico e iónico (Brédas et al., 1985; Heinze et al., 2010).



Sub-retro

Realice un esquema que represente la capa de valencia, la de conducción y relacione la función del polaron y bipolaron respecto a la banda prohibida

Figura 1. Distorsiones de la deslocalización para la cadena de PPy (Polaron y Bipolaron). Tomado de Conducting Polymers (Inzelt, 2012)

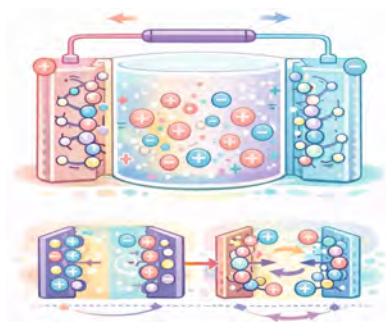
Realiza tu esquema aquí



Supercapacitores

Un supercapacitor basado en polímeros conductores se clasifica principalmente dentro de los pseudocapacitores, dispositivos de almacenamiento de energía que combinan la alta densidad de potencia de los capacitores electrostáticos con una mayor densidad de energía debido a procesos faradaicos reversibles. A diferencia de los capacitores de doble capa eléctrica, donde la carga se almacena solo por separación electrostática, en los pseudocapacitores la energía se almacena mediante reacciones redox rápidas y reversibles que ocurren en la superficie y en el volumen cercano del material activo.

En este contexto, los polímeros conductores actúan como electrodos electroactivos capaces de doparse y desdoparse iónicamente durante los procesos de carga y descarga, lo que permite un almacenamiento eficiente de carga con tiempos de respuesta cortos y buena ciclabilidad. Esta combinación de conducción electrónica en la cadena polimérica y transporte iónico en el electrolito es la base del comportamiento pseudocapacitivo de estos sistemas (Conway, 1999; Simon & Gogotsi, 2008; Snook, Kao & Best, 2011).



Sub-reto

Deduzca cómo la incorporación de iones del electrolito podría influir en el almacenamiento de carga en un supercapacitor.

Sustancia dopante, cómo el caso del (p-toluenosulfonato)

Durante la síntesis de polipirrol por oxidación electropolimérica, el monómero pirrol se oxida en la superficie del electrodo formando radicales catiónicos que posteriormente se acoplan entre sí, dando lugar al crecimiento de la cadena polimérica conjugada. Como consecuencia de este proceso de oxidación, el polímero en formación adquiere cargas positivas distribuidas a lo largo de su estructura, por lo que requiere la presencia de especies de carga opuesta que permitan mantener la electroneutralidad del sistema. Estas especies se denominan sustancias dopantes o contraiones dopantes, y su función principal es compensar electrostáticamente la carga del polímero oxidado, estabilizando su estructura y permitiendo la conservación de sus propiedades conductoras (Skotheim & Reynolds, 2007).

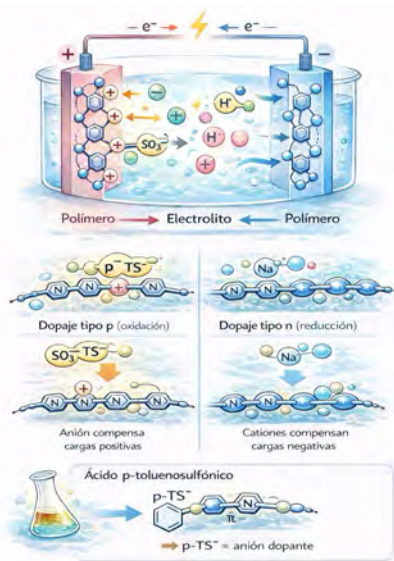
En los polímeros conductores pueden presentarse dos tipos principales de dopaje: dopaje tipo p y dopaje tipo n, los cuales dependen del proceso electroquímico que experimente la cadena polimérica. El dopaje tipo p ocurre cuando el polímero se oxida, es decir, cuando pierde electrones. Como resultado, se generan cargas positivas en la cadena conjugada, conocidas como polarones o bipolarones, que actúan como portadores de carga responsables de la conductividad eléctrica del material. Para mantener la neutralidad eléctrica del sistema, aniones provenientes del electrolito se incorporan o quedan asociados dentro de la matriz polimérica, equilibrando dichas cargas positivas.

Adicionalmente, algunos dopantes como el ácido p-toluenosulfónico, pueden presentar tamaños iónicos relativamente grandes, lo que puede favorecer su permanencia dentro de la matriz polimérica durante el crecimiento de la película. Esta característica puede influir en la movilidad de los iones dentro del material y en la forma en que permanecen asociados a la estructura del polímero durante procesos electroquímicos posteriores.

Por otra parte, ciertos dopantes poseen estructuras aromáticas, las cuales pueden favorecer interacciones de tipo $\pi-\pi$ con los anillos conjugados del polipirrol. Estas interacciones pueden contribuir a una mejor organización estructural de la cadena polimérica y afectar propiedades como la adherencia de la película al electrodo y la homogeneidad morfológica del recubrimiento. En conjunto, factores como el tamaño del ion dopante, su movilidad y su compatibilidad estructural con el polímero conductor pueden influir en las propiedades finales de las películas de polipirrol sintetizadas (Bredas & Street, 1985).

Por otro lado, el dopaje tipo n ocurre cuando el polímero se reduce, es decir, cuando gana electrones. En este caso, la cadena polimérica adquiere cargas negativas, por lo que es necesario que cationes del electrolito se inserten en la matriz del polímero para compensar estas cargas. Aunque este tipo de dopaje también puede incrementar la conductividad del material, suele ser menos estable electroquímicamente en muchos polímeros conductores, incluyendo el polipirrol, debido a limitaciones estructurales y a la estabilidad del estado reducido del polímero (Bredas & Street, 1985; Skotheim & Reynolds, 2007).

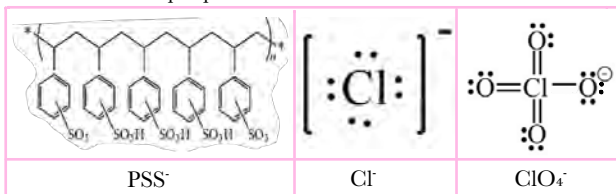
En el caso particular del polipirrol sintetizado en este trabajo, el mecanismo que predomina es el dopaje tipo p, ya que la electropolimerización ocurre mediante un proceso de oxidación del monómero pirrol. Durante este proceso, la cadena polimérica adquiere cargas positivas que son compensadas por la incorporación de aniones provenientes del electrolito, los cuales actúan como dopantes. En la síntesis realizada, se empleó el p-toluenosulfonato (p-TS) como sustancia dopante. Este anión, derivado del ácido p-toluenosulfónico, posee un grupo sulfonato (SO_3^-) cuya carga negativa se encuentra estabilizada por resonancia entre los átomos de oxígeno, lo que le permite compensar eficazmente las cargas positivas generadas en la cadena de polipirrol (Skotheim & Reynolds, 2007).



Sub-reto

¿Cómo influye el tamaño y la movilidad del ion dopante en la estabilidad estructural y electroquímica de una película de polipirrol durante su formación?

Considerando los siguientes aniones dopantes utilizados en la electrosíntesis de polipirrol:



Organícelos desde el ion que más favorece la estabilidad de la película de polipirrol hasta el que menos la favorece y justique

Pirrol

El pirrol es un compuesto orgánico heterocíclico con un anillo de cinco miembros con un átomo de nitrógeno, cuya fórmula molecular es C_4H_5N . Su estructura está constituida por un anillo plano formado por cuatro átomos de carbono y un átomo de nitrógeno, el cual forma parte del sistema conjugado del anillo, aportando densidad electrónica y estabilidad estructural característica de los compuestos aromáticos (Joule & Mills, 2010).

Un aspecto importante de su comportamiento químico es que el par de electrones libres del nitrógeno Figura 2, se encuentran deslocalizado dentro del sistema conjugado del anillo; por esta razón, no está disponible para protonarse fácilmente, lo que explica su baja basicidad en comparación con otras aminas (Carey & Sundberg, 2007). El pirrol es un líquido incoloro a ligeramente amarillento, sensible a la luz y al oxígeno, con tendencia a oxidarse y polimerizarse al exponerse al ambiente. Desde el punto de vista reactivo, participa principalmente en reacciones de sustitución electrofílica sobre el anillo, especialmente en posiciones cercanas al nitrógeno.

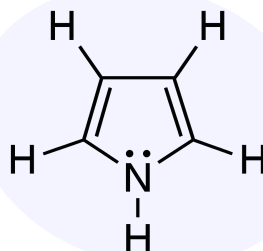


Figura 2. Estructura del pirrol

Sub-retro

El pirrol puro es incoloro, pero cuando se oxida por contacto de aire o luz puede volverse oscuro en pocos días. Si se usara el pirrol oxidado en la síntesis ¿Cómo podría afectar la calidad del polímero PPy obtenido?

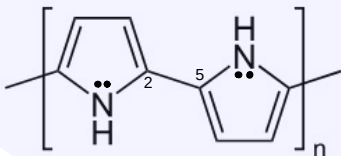


Figura 3. Estructura del polipirrol

Sub-retro

A partir de la estructura del polipirrol presentada en la figura 3, infiera porque la forma en que se conectan las unidades del monómero puede influir en la deslocalización de electrones y en la conductividad del polímero.

Polipirrol

El polipirrol (PPy) es un polímero conductor poliheterocíclico que se obtiene a partir de la polimerización del monómero pirrol, generalmente mediante procesos de oxidación química o electroquímica (Skotheim & Reynolds, 2007). Durante esta reacción, las unidades de pirrol se enlazan entre sí principalmente a través de las posiciones 2 y 5 del anillo (posiciones α - α') Figura 3, formando una cadena macromolecular conjugada (Bredas & Street, 1985).

La estructura resultante presenta una alternancia de enlaces simples y dobles a lo largo de la cadena polimérica, lo que favorece la deslocalización electrónica cuando el material se encuentra en estado dopado, confiriéndole propiedades de conductividad eléctrica. Debido a esta conjugación extendida, el polipirrol se clasifica dentro de los polímeros intrínsecamente conductores (Skotheim & Reynolds, 2007).

Montaje de la celda electroquímica

El montaje experimental de la celda electroquímica se basa en un sistema de tres electrodos, ampliamente utilizado en estudios electroanalíticos y de electrosíntesis porque permite controlar con precisión el potencial aplicado al electrodo de trabajo. Este sistema Figura 4 está conformado por un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un contraelectrodo, cada uno con una función específica dentro del circuito electroquímico (Bard & Faulkner, 2001). En este montaje, el potenciostato controla el potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia, mientras que la corriente fluye entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, lo que permite separar el control del potencial del flujo de corriente en el sistema.



Figura 4. Montaje de la celda electroquímica

El electrodo de trabajo, donde ocurren las reacciones de interés, corresponde en este caso a un electrodo de carbono vítreo, material ampliamente utilizado en electroquímica debido a su alta estabilidad química, buena conductividad eléctrica, baja reactividad superficial y amplia ventana de potencial. Estas propiedades lo convierten en un sustrato adecuado para estudios de deposición electroquímica y caracterización de materiales. Sobre su superficie ocurre la oxidación del monómero de pirrol y la posterior formación de la película de polipirrol (PPy).

El electrodo de referencia, generalmente de $\text{Ag(s)}/\text{AgCl(s)}$, proporciona un potencial estable frente al cual se mide y controla el potencial del electrodo de trabajo. Este electrodo no conduce corriente significativa durante el experimento, sino que actúa como un punto de referencia que permite determinar con precisión el potencial al que se encuentra sometido el sistema electroquímico.

Por su parte, el contraelectrodo, comúnmente de platino, permite cerrar el circuito eléctrico y facilitar el flujo de corriente en la celda. Cuando ocurre la oxidación del monómero en el electrodo de trabajo, los electrones liberados se dirigen hacia el contraelectrodo, donde tiene lugar una reacción complementaria que mantiene el equilibrio de carga en el sistema. El platino se utiliza debido a su alta conductividad, estabilidad química y resistencia a la corrosión.

El control del sistema se realiza mediante un potenciostato, instrumento encargado de regular el potencial o la corriente aplicada y registrar la respuesta electroquímica del sistema. En este trabajo se emplea un potenciostato Autolab Figura 5 que permite aplicar técnicas como voltamperometría cíclica, cronopotenciometría y carga-descarga galvanostática (Bard & Faulkner, 2001).



Figura 5. Montaje electroquímico

Sub-retro

Observe el montaje de la Figura 5. Si durante el experimento el electrodo de referencia se desconecta o se conecta incorrectamente, ¿Qué cree que ocurriría con el control del potencial aplicado al electrodo de trabajo y con la confiabilidad de las mediciones electroquímicas?

Oxidación electropolimérica (cronopotenciometría)

La síntesis de polipirrol por oxidación electropolimérica es un método electroquímico ampliamente utilizado para obtener películas conductoras directamente sobre la superficie de un electrodo. Este proceso se basa en la oxidación anódica del monómero pirrol disuelto en una solución electrolítica que contiene un agente dopante. La electropolimerización permite controlar el crecimiento del polímero, su espesor y sus propiedades electroquímicas mediante parámetros experimentales como la corriente aplicada, el tiempo de síntesis y la composición del medio (Skotheim & Reynolds, 2007).

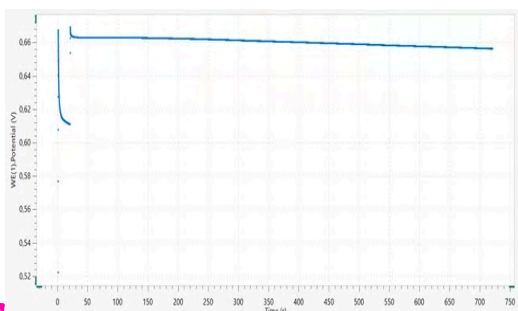


Figura 6. Cronopotenciograma obtenido en la síntesis del polipirrol

El registro cronopotenciométrico Figura 6 permite observar distintas etapas del proceso. Inicialmente, se evidencia un aumento rápido del potencial asociado a la oxidación del monómero. Posteriormente, el potencial tiende a estabilizarse cuando comienza el crecimiento sostenido de la película polimérica sobre el electrodo. Finalmente, cambios en la pendiente del potencial pueden relacionarse con variaciones en la velocidad de deposición, el espesor de la película o limitaciones de transporte de masa en la solución.

Sub-reto

Observe la gráfica de potencial vs. tiempo Figura 6 obtenida durante la síntesis de polipirrol por cronopotenciometría. Si el potencial aumenta gradualmente a medida que avanza el tiempo de síntesis, ¿qué podría estar ocurriendo con la formación y el crecimiento de la película sobre el electrodo?

En la técnica de cronopotenciometría, se aplica una corriente constante al sistema electroquímico durante un tiempo determinado, mientras se registra la variación del potencial en función del tiempo. Bajo estas condiciones, el pirrol se oxida en la superficie del electrodo de trabajo cuando el potencial alcanza valores suficientes para extraer electrones del monómero. Esta oxidación inicial genera radicales catiónicos de pirrol, especies altamente reactivas que constituyen la etapa clave para el inicio de la polimerización.

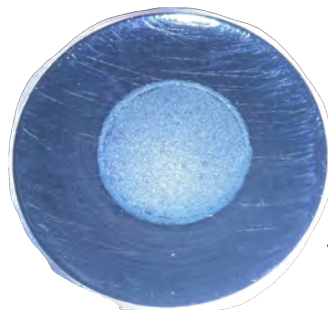


Figura 7. Película de polipirrol sintetizada en el electrodo de trabajo

La electropolimerización por cronopotenciometría presenta varias ventajas, entre ellas el control preciso del espesor de la película Figura 7 mediante el tiempo de aplicación de la corriente, la obtención de recubrimientos homogéneos y la posibilidad de sintetizar el polímero directamente sobre el sustrato donde será utilizado. Por estas razones, esta técnica es ampliamente empleada en la fabricación de sensores electroquímicos, dispositivos de almacenamiento de energía y recubrimientos funcionales basados en polipirrol.

Pulsos galvanostáticos

La síntesis por pulsos galvanostáticos introduce periodos alternados de corriente y reposo Figura 8. En lugar de aplicar corriente de forma continua, se aplican pulsos de corriente durante intervalos cortos, seguidos de tiempos en los que la corriente se reduce o se detiene. Durante el pulso ocurre la oxidación del pirrol y el crecimiento del polímero, mientras que en el tiempo de reposo el sistema se reorganiza: el monómero vuelve a difundirse hacia la superficie del electrodo, los iones dopantes se redistribuyen y las tensiones locales de la película disminuyen. Esto permite que cada nuevo pulso continúe el crecimiento bajo condiciones químicas más equilibradas.

Desde el punto de vista químico y electroquímico, los periodos de reposo permiten que el sistema recupere concentración de monómero y que los aniones dopantes puedan incorporarse de manera más uniforme en la estructura del polímero. Como resultado, el crecimiento suele producir películas más homogéneas, porosas y con mayor área superficial, características fundamentales para materiales usados en supercapacitores, ya que facilitan la entrada y salida de iones durante los procesos de carga y descarga.

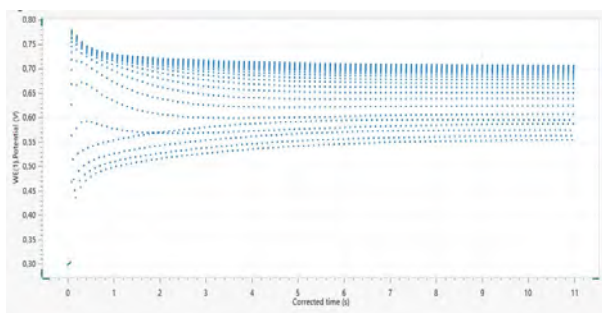


Figura 8. Electrodposición galvanostática por pulsos obtenida en la síntesis del polipirrol

Sub-retro

Aplicar pulsos de corriente permite que el material se reorganice entre cada etapa de crecimiento, reduciendo tensiones internas.

¿Por qué una síntesis más lenta podría favorecer la obtención de un material con mejores propiedades electroquímicas y conductoras?

La diferencia clave entre ambas técnicas radica entonces en el control del crecimiento del polímero. La cronopotenciometría busca un crecimiento continuo y rápido de la película, útil cuando se desea obtener recubrimientos conductores de manera sencilla y reproducible. En cambio, la síntesis por pulsos busca optimizar la microestructura del polímero, permitiendo obtener películas con mejor transporte iónico y electrónico, mayor estabilidad mecánica y mejor desempeño capacitivo.

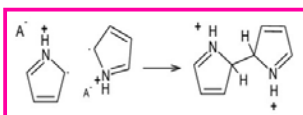
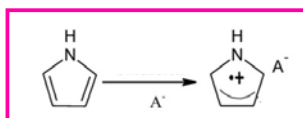
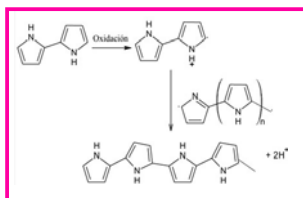
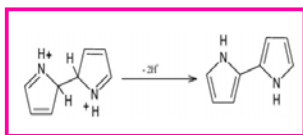
Etapas de las síntesis electroquímicas

Sub-retro

Una cada proceso con la etapa correspondiente y organizarlos en el orden en que ocurren durante la formación de la película. Justifique la secuencia propuesta, explicando brevemente el significado de cada etapa dentro del proceso de síntesis.

Durante la síntesis electroquímica de una película polimérica sobre la superficie de un electrodo, tienen lugar una serie de transformaciones que ocurren de manera progresiva en la interfaz electrodo-electrolito. Estos procesos involucran cambios en las especies presentes en la solución, interacciones entre ellas y modificaciones que conducen gradualmente a la formación de una estructura polimérica sobre el electrodo. Aunque estas transformaciones forman parte de un mismo proceso de síntesis, cada una representa un momento particular dentro del desarrollo de la película.

Procesos



Etapas

Dimerización y oligomerización

Oxidación del monómero

Crecimiento y formación

Nucleación

Justifica tu respuesta aquí:

Etapas 1: _____

Etapas 2: _____

Etapas 3: _____

Etapas 4: _____

Ensayos de carga y descarga galvanostática (CDG)

Luego de la síntesis electro polimérica, el polipirrol obtenido se somete a procesos de caracterización electroquímica con el fin de evaluar sus propiedades de almacenamiento de carga y comportamiento capacitivo. Una de las técnicas más empleadas para este propósito es la carga y descarga galvanostática, la cual consiste en aplicar una corriente constante al material mientras se registra la variación del potencial en función del tiempo (Conway, 1999).



En esta técnica, el polímero depositado sobre el electrodo se somete primero a un proceso de carga, durante el cual se aplica una corriente en sentido que favorece la oxidación del material. Como consecuencia, el polipirrol incrementa su estado de dopaje: se generan cargas positivas adicionales en la cadena polimérica y se insertan aniones del electrorolito dentro de su estructura para mantener la electroneutralidad. Posteriormente, al invertir el sentido de la corriente, ocurre la etapa de descarga, donde el polímero se reduce, liberando carga eléctrica hacia el circuito externo y expulsando parcial o totalmente los contraiones previamente incorporados.

El electrorolito empleado para esta caracterización fue sulfato de sodio (Na_2SO_4) en solución acuosa. Este medio se utiliza con frecuencia porque es electroquímicamente estable, presenta buena conductividad iónica y no participa en reacciones redox dentro del rango de potencial de trabajo del polipirrol. De esta manera, permite evaluar principalmente el comportamiento del polímero sin interferencias faradaicas significativas del electrorolito (Bard & Faulkner, 2001).

Durante los ensayos de carga-descarga galvanostática, la respuesta potencial-tiempo Figura 9 proporciona información relevante sobre el material. Por ejemplo, la pendiente de las curvas está relacionada con la capacitancia electroquímica del sistema: cuanto más lenta sea la variación del potencial para una corriente dada, mayor será la capacidad de almacenamiento de carga del polímero. Asimismo, la simetría entre las curvas de carga y descarga permite evaluar la reversibilidad electroquímica y la eficiencia coulombica del material.

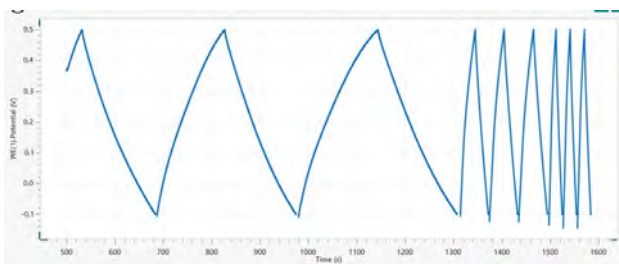


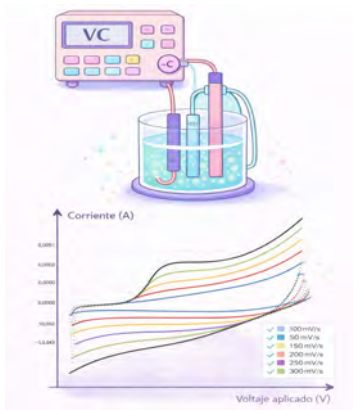
Figura 9. Curvas de GCD obtenidas en la caracterización del polipirrol

Sub-reto

Observe la Figura 9. Algunas curvas muestran ciclos amplios y simétricos, mientras que otras se vuelven más estrechas y rápidas.

¿Qué podría indicar esta diferencia sobre la capacidad del material para almacenar carga y su estabilidad durante los ciclos?

Voltamperometría cíclica



En un medio electrolítico de sulfato de sodio (Na_2SO_4), el polímero experimenta procesos redox asociados al intercambio de carga con el electrolito. Cuando el potencial se desplaza hacia valores más positivos, el polipirrol se oxida, generando cargas positivas en su cadena conjugada. Para mantener la electroneutralidad, aniones sulfato del medio se incorporan dentro de la matriz polimérica. En el barrido inverso, hacia potenciales más negativos, el material se reduce y ocurre la expulsión parcial de estos aniones, completando así el proceso de desdopaje (Skotheim & Reynolds, 2007).

Sub-retro

Observe la Figura 10. Notará que los ciclos no se superponen completamente y tienden a expandirse a medida que aumenta la velocidad.

¿Qué podría explicar este comportamiento en términos de transporte de carga y procesos electroquímicos que ocurren en el material?

La caracterización electroquímica del polipirrol mediante Voltamperometría Cíclica (VC) permite evaluar su comportamiento redox, su capacidad de almacenamiento de carga y la reversibilidad de los procesos de dopaje y desdopaje iónico. Esta técnica se basa en la aplicación de un barrido de potencial controlado al electrodo recubierto con el polímero, registrando simultáneamente la corriente generada como respuesta a las transformaciones electroquímicas del material (Bard & Faulkner, 2001).

Durante el experimento, el potencial se varía linealmente desde un valor inicial hasta un límite establecido y luego se invierte el sentido del barrido para regresar al punto de partida, completando uno o varios ciclos. Como resultado, se obtiene un voltamperograma corriente-potencial que refleja los procesos de oxidación y reducción que tienen lugar en la película de polipirrol depositada sobre el electrodo.

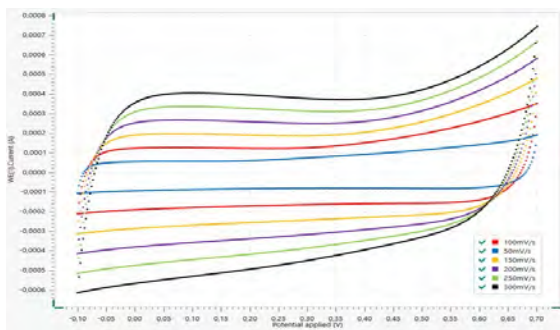


Figura 10. Voltamperograma cíclicos obtenido en la caracterización del polipirrol

Los voltamperogramas obtenidos para el polipirrol Figura 10 suelen presentar picos anódicos y catódicos anchos, característica típica de materiales poliméricos conductores. A diferencia de especies moleculares en solución, donde los picos son definidos, en polímeros sólidos los procesos redox están influenciados por la movilidad iónica dentro de la película y por el transporte de carga a lo largo de la cadena conjugada. Por ello, la forma, posición e intensidad de los picos proporcionan información sobre la facilidad de dopaje, la cinética del intercambio iónico y la estabilidad electroquímica del material (Conway, 1999).

Asimismo, el área encerrada por la curva voltamperométrica está relacionada con la cantidad de carga almacenada por el polímero, permitiendo estimar su comportamiento capacitivo. La superposición de los ciclos sucesivos indica estabilidad y buena adherencia de la película al electrodo, mientras que deformaciones o disminuciones de corriente pueden asociarse a degradación, pérdida de dopante o baja estabilidad del recubrimiento.

Nota: Algunas de las imágenes utilizadas en esta guía fueron generadas con ChatGPT (OpenAI, 2026) mediante el modelo de inteligencia artificial para fines académicos e ilustrativos.



¡Felicitaciones!

Has obtenido la medalla de cobre por completar la guía de estudio, demostrando que comprendes los fundamentos teóricos necesarios para iniciar en el estudio de materiales electroactivos. Durante este proceso exploraste conceptos clave como qué es un polímero y un polímero conductor, el pirrol y el polipirrol, el papel de las sustancias dopantes, y el funcionamiento de dispositivos como los supercapacitores. Además, comprendiste el montaje de la celda electroquímica de tres electrodos, el papel del potencióstato en los experimentos electroquímicos, así como los principales métodos de síntesis y caracterización empleados en el estudio de estos materiales. Este logro marca el inicio de tu camino hacia la síntesis y caracterización de materiales electroactivos.

Referencias

- Brédas, J. L., Street, G. B., Thémans, B., & André, J. M. (1985). Organic polymers based on aromatic rings (polypyrrole, polythiophene, etc.): Evolution of the electronic properties as a function of the doping mechanism. *Journal of Chemical Physics*, 83(3), 1323–1329. <https://doi.org/10.1063/1.449203>
- Heeger, A. J. (2001). Nobel Lecture: Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials. *Reviews of Modern Physics*, 73(3), 681–700. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.681>
- Conway, B. E. (1999). *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7, 845–854. <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- Snook, G. A., Kao, P., & Best, A. S. (2011). Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes. *Journal of Power Sources*, 196(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.084>
- Carey, F. A., & Sundberg, R. J. (2007). *Advanced Organic Chemistry: Part A: Structure and Mechanisms* (5th ed.). Springer.
- Joule, J. A., & Mills, K. (2010). *Heterocyclic Chemistry* (5th ed.). Wiley.
- Skotheim, T. A., & Reynolds, J. R. (Eds.). (2007). *Handbook of Conducting Polymers* (3rd ed.). CRC Press.
- Bredas, J. L., & Street, G. B. (1985). Polarons, bipolarons, and solitons in conducting polymers. *Accounts of Chemical Research*, 18(10), 309–315.
- OpenAI. (2026). Imágenes generadas con ChatGPT para fines ilustrativos [Imágenes generadas por IA]. ChatGPT. <https://chat.openai.com/>



Calibración electroquímica del electrodo de trabajo mediante voltamperometría cíclica

Nombre: _____

Fecha: _____

Introducción

Antes de emplear un electrodo en procesos de síntesis y caracterización electroquímica, es fundamental verificar que su respuesta sea confiable y reproducible. En esta guía se realizará la calibración del sistema electroquímico utilizando una solución patrón de hexacianoferrato de potasio (III), un sistema redox reversible ampliamente empleado para evaluar el comportamiento del electrodo.

A partir del análisis de la respuesta voltamperométrica del sistema $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$, se estudiarán fenómenos relacionados con el transporte de masa y la transferencia electrónica en la superficie del electrodo, lo que permitirá determinar el coeficiente de difusión de la especie electroactiva y estimar el potencial del par redox en función del electrodo de referencia utilizado. Este análisis permitirá interpretar el comportamiento electroquímico del sistema y fortalecer el pensamiento crítico especialmente en la habilidad de inferencia para interpretación de los resultados experimentales.

Objetivos

- Calibrar el sistema electroquímico utilizando una solución patrón de hexacianoferrato de potasio (III).
- Obtener voltamperogramas cíclicos reproducibles del sistema redox $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ para evaluar el comportamiento del electrodo de trabajo.
- Determinar el coeficiente de difusión y estimar el potencial del par redox a partir del análisis de los voltamperogramas obtenidos.

Procedimiento

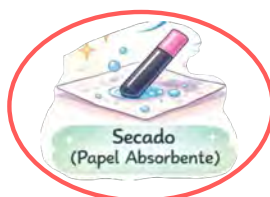
Limpieza de los electrodos



1. Disponga el paño de pulido sobre la superficie de trabajo y humedézcalo ligeramente con agua tipo 1
2. Coloque una pequeña cantidad de alúmina de tamaño de partícula 1 μm sobre el paño.
3. Frote el electrodo de carbono vítreo realizando movimientos en forma de ochos durante 2 minutos hacia ambas direcciones
4. Enjuagar con agua tipo 1 para remover la mayor cantidad de alúmina depositada en el electrodo



5. Introducir el electrodo en el sonicador con agua tipo 1 durante 2 minutos para remover residuos de Al_2O_3 .



6. Al finalizar el proceso secar el electrodo con papel absorbente o gas nitrógeno



7. Si es posible, observe la superficie del electrodo mediante microscopía, para evaluar la ausencia de rayones o partículas residuales.

Repetir los pasos del 1 al 5 primero con Al_2O_3 de $0,3\mu\text{m}$ y luego con la Al_2O_3 de $0,05\mu\text{m}$
Los pasos 6 y 7 se realizan al finalizar los tres pulidos

Calibración del sistema electroquímico

1 Preparación del Electrolito Soporte



Prepare 100 mL de solución de cloruro de potasio (KCl) 0,1 M.

2 Preparación de la Solución Stock



Prepare 25mL de una solución stock de hexacianoferrato de potasio (III) 0,01 M. Disuelva la sal y complete el volumen con el electrolito soporte KCl 0,1M

3 Preparación de Diluciones de Trabajo



Prepare 25 mL de cada una de las soluciones de trabajo a partir de la solución stock con el electrolito soporte KCl 0,1 M

¿Qué datos necesita conocer para preparar la solución correctamente?

¡Puede hacer sus cálculos aquí!

4 Sistema de Tres Electrodo



Electrodo de trabajo: Carbón vítreo
Contraelectrodo: Platino
Electrodo de referencia: Ag/AgCl, debe mantenerse almacenado en una de solución de KCl

5 Montaje de Celda



Disponga la solución de trabajo en la celda de reacción y realice el montaje del sistema conectando los electrodos al potenciostato:

Cable azul → Electrodo de referencia.
Cable rojo → Electrodo de trabajo.
Cable negro → Contraelectrodo.

6 Generar una atmósfera inerte



Burbujea nitrógeno en la solución durante 5 minutos con el fin de generar una atmósfera inerte

7 Cerrar la caja de Faraday



Se cierra la caja de Faraday y se enciende el potenciostato

9 Medición Electroquímica



Evaluar los ciclovoltamperogramas obtenidos al variar las concentraciones de hexacianoferrato de potasio (III)

Software

Acceda al siguiente enlace para ver un video explicativo, para la voltamperometría en el software Nova

<https://drive.google.com/file/d/1sijiQWlmBDCyblZbS35NSQsy-CYwKER/view?usp=sharing>



Sub-reto

¿Qué ocurriría si el electrodo de carbono vítreo no estuviera correctamente limpio antes de realizar la medición?

¿Cuál es la función de cada electrodo?

¿Por qué es necesario generar una atmósfera inerte?

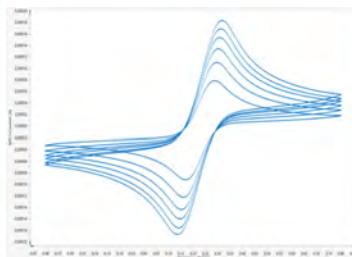
8 Configuración del Método



Ajuste las variables en el software Nova 2.1 y programe el método de voltamperometría:
Ventana de potencial: $-0,4$ a $0,8$ V
Número de ciclos: 5 ciclos por cada velocidad
Velocidades de barrido: $0,05 - 0,3$ V/s

Sub-reto

¿Qué podría indicar la aparición, desaparición o desplazamiento de picos en el voltamperograma después de varios ciclos de medición?



● ● ● Coeficiente de difusión ● ● ●



El coeficiente de difusión (D) es un parámetro fisicoquímico que cuantifica la rapidez con la que una especie química se desplaza a través de un medio generalmente una solución como resultado de un gradiente de concentración. En términos simples, describe qué tan rápido las moléculas o iones pasan desde zonas donde están más concentrados hacia zonas donde su concentración es menor, hasta alcanzar el equilibrio.

Desde el punto de vista matemático, el coeficiente de difusión aparece en las leyes de Fick y se expresa en unidades de $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ (o $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ en el SI). Estas unidades indican el área efectiva que una especie puede recorrer por difusión en un segundo.

Reto

A partir de su voltamperograma obtenido, determine el coeficiente de difusión (D) del ferricianuro donde el hierro presenta un estado de oxidación (Fe^{3+}) como del ferrocianuro donde tiene un estado de oxidación de (Fe^{2+})

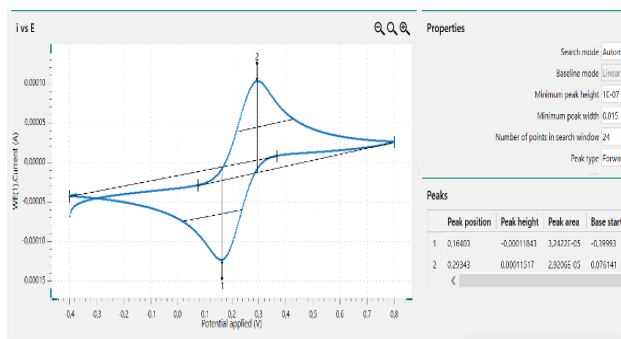


Figura 12. Voltamperograma cíclico hexacianoferrato de potasio (III) con los valores de sus picos anódicos y catódicos

¿Cómo resolver el reto anterior?

1

Usar la ecuación de Randles Sevcik

$$i_p = 0.4463 n F A C \sqrt{\frac{n F v D}{RT}}$$

i_p = Corriente pico de la reacción redox (A)
 n = Número de electrones transferidos en la reacción redox
 F = Constante de Faraday (96485 C mol^{-1})
 A = Área superficial del electrodo de trabajo (cm^2)
 C = Concentración de la especie redox (mol cm^{-3})
 v = Velocidad de escaneo (V s^{-1})
 D = Coeficiente de difusión de la especie redox ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)
 R = Constante de los gases ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 T = Temperatura (K)

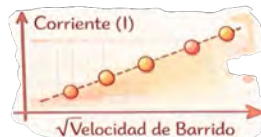
2

Identificar la corriente máxima de la reacción redox



3

Construir la gráfica de corriente vs la raíz de la velocidad de barrido para obtener el valor de la pendiente.



4

Como la relación anterior entre corriente y la raíz de la velocidad de barrido es igual a la pendiente, se despeja m de la ecuación de Randles



6

Conversión de las unidades de la concentración de mol/L a mol/cm³



7

Teniendo la pendiente por último se despeja D (coeficiente de difusión) de la ecuación de Randles.

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

5

Determinar el área del electrodo, teniendo en cuenta que su diámetro es de 0,3 cm, recuerden hallar el radio y área circular.



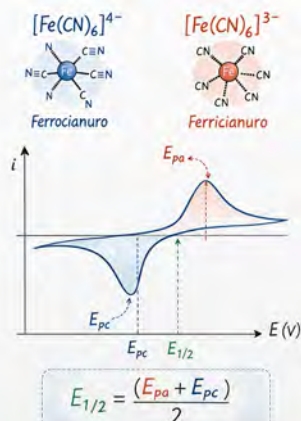
Sub-reto

Después de calcular el coeficiente de difusión (D) de la especie electroactiva, analiza el valor obtenido y compáralo con valores reportados en la literatura.

¿Qué podría indicar un valor alto o bajo del coeficiente de difusión sobre el movimiento de la especie en el medio y su comportamiento en el sistema electroquímico?

Potencial medio redox

El potencial medio redox ($E_{1/2}$) corresponde al valor característico de un par redox obtenido a partir de los potenciales de oxidación y reducción observados en un voltamperograma cíclico. Este parámetro representa una aproximación experimental al potencial formal del sistema electroquímico y permite describir la facilidad con la que una especie química se oxida o se reduce en la superficie del electrodo. En el caso del sistema ferrocianuro/ferricianuro, ampliamente utilizado como par redox de referencia en electroquímica, la determinación de este potencial permite evaluar la reversibilidad del proceso y verificar el correcto funcionamiento del sistema electroquímico durante la calibración del electrodo. Debido a que los potenciales medidos dependen del electrodo de referencia utilizado, es necesario realizar la conversión correspondiente respecto a dicho electrodo; en este caso, el electrodo de plata/cloruro de plata Ag(s)/AgCl(s), lo cual permite comparar los resultados con valores reportados en la literatura (Bard & Faulkner, 2001; Kissinger & Heineman, 1983).



Sub-retro

A partir de su voltamperograma obtenido durante la calibración del sistema electroquímico, determina el potencial medio del par redox Fc/Fc^+ y realice la conversión de potencial respecto al electrodo de referencia utilizado

Una vez realizado el cálculo, interprete qué representa este valor dentro del sistema electroquímico y por qué la conversión de potencial es importante para interpretar correctamente los resultados experimentales.

Utiliza las siguientes ecuaciones

$$E_{1/2} \left(\frac{F_c}{F_c^+} \right) = \frac{E_{pa} + E_{pc}}{2}$$

$$E \left(\frac{F_c}{F_c^+} \right) = E \left(\frac{Ag}{Ag^+} \right) - E_{1/2} \left(\frac{F_c}{F_c^+} \right)$$

$E_{1/2}$ = potencial medio del par redox

E_{pa} = potencial del pico anódico

E_{pc} = potencial del pico catódico

$E(Ag/Ag^+)$ = potencial del electrodo de referencia utilizado

Nota: Algunas de las imágenes utilizadas en esta guía fueron generadas con ChatGPT (OpenAI, 2026) mediante el modelo de inteligencia artificial para fines académicos e ilustrativos.



¡Excelente trabajo!

Has alcanzado la medalla de plata por completar la calibración del electrodo de carbono vítreo, demostrando tu capacidad para preparar, acondicionar y verificar el correcto funcionamiento del electrodo de trabajo. Durante este proceso analizaste la respuesta electroquímica del sistema patrón, lo que permitió determinar el coeficiente de difusión de la especie electroactiva y estimar el potencial del par redox correspondiente. Gracias a este paso, se garantizan mediciones electroquímicas confiables y reproducibles, fundamentales para la posterior síntesis

Referencias

- Cortés Montañez, M. T. (2025). Guía de laboratorio de electroquímica - calibración de electrodo Xbox hexacianoferrato (III). [Material de laboratorio, Universidad de los Andes].
- Yamada, H. (2022). Fundamentals of cyclic voltammetry: Relationships between peak current and diffusion coefficient in electrochemical systems. *Electrochemistry*, 90(10), 66082.
<https://doi.org/10.1016/j.electchem.2022.66082>
- OpenAI. (2026). Imágenes generadas con ChatGPT para fines ilustrativos [Imágenes generadas por IA]. ChatGPT.
<https://chat.openai.com/>



Síntesis por cronopotenciometría y Caracterización electroquímica del polipirrol

Nombre: _____

Fecha: _____

Introducción

La síntesis electroquímica de polímeros conductores permite observar en tiempo real cómo la materia se transforma bajo la acción de la electricidad, convirtiendo moléculas simples en materiales funcionales capaces de almacenar energía. En esta guía exploraremos la obtención de polipirrol mediante cronopotenciometría, una técnica donde controlamos la corriente aplicada para inducir la polimerización directamente sobre el electrodo de trabajo. Posteriormente, caracterizaremos la película obtenida mediante voltamperometría cíclica (CV) y carga–descarga galvanostática (CDG), técnicas esenciales para comprender su comportamiento electroquímico, su capacidad de almacenamiento y su estabilidad.

El propósito de esta guía es comprender no solo cómo se realiza la síntesis y la caracterización, sino por qué cada parámetro experimental influye en el resultado. A través de los sub-retos incluidos en el desarrollo de la práctica, se busca fortalecer el pensamiento crítico especialmente la habilidad de la explicación al analizar señales electroquímicas reales, relacionar teoría y experimento e interpretar el desempeño del material sintetizado.

Objetivos

- Sintetizar polipirrol mediante cronopotenciometría, controlando la corriente aplicada y comprendiendo la relación entre la carga transferida y la masa del polímero depositado.
- Caracterizar electroquímicamente la película de PPy obtenida mediante voltamperometría cíclica y carga–descarga galvanostática, determinando la capacitancia y capacitancia específica del material

Procedimiento

Limpieza de los electrodos



1. Disponga el paño de pulido sobre la superficie de trabajo y humedézcalo ligeramente con agua tipo 1



2. Coloque una pequeña cantidad de alúmina de tamaño de partícula 1 μm sobre el paño.
3. Frote el electrodo de carbono vítreo realizando movimientos en forma de ochos durante 2 minutos hacia ambas direcciones



4. Enjuagar con agua tipo 1 para remover la mayor cantidad de alúmina depositada en el electrodo



5. Introducir el electrodo en el sonicador con agua tipo 1 durante 2 minutos para remover residuos de Al_2O_3 .



6. Al finalizar el proceso secar el electrodo con papel absorbente o gas nitrógeno



7. Si es posible, observe la superficie del electrodo mediante microscopía, para evaluar la ausencia de rayones o partículas residuales.

Repetir los pasos del 1 al 5 primero con Al_2O_3 de $0,3\mu\text{m}$ y luego con la Al_2O_3 de $0,05\mu\text{m}$
Los pasos 6 y 7 se realizan al finalizar los tres pulidos

Preparación de la solución de pirrol con el agente dopante



Preparé 100 mL de solución de ácido p-toluensulfónico 0,1 M.



Determine la cantidad de pirrol a polimerizar, para ello realice la conversión del volumen (10mL) equivalente a masa, partiendo de la molaridad 0,1M



Una vez usado el frasco destilado regréselo con la jeringa a la bolsa hermética tipo Ziploc, ponga una atmósfera de nitrógeno y lleve a refrigeración rápidamente. Recuerde hacer este procedimiento cada vez que extraiga el monomero.



Pese la cantidad obtenida anteriormente directamente en la celda electroquímica, el pirrol se extrae desde el frasco destilado.



A la celda añada 10 mL de la solución preparada de ácido p-toluensulfónico 0,1 M.



Ponga la celda sobre un agitador magnético para homogeneizar la mezcla, simultáneamente burbujee nitrógeno durante 5 min, para generar una atmósfera inerte

Síntesis por cronopotenciometría del polipirrol



Determinar el área del electrodo, teniendo en cuenta que su diámetro es de 0,3 cm, recuerden hallar el radio y área circular.

Disponga la solución de trabajo en la celda de reacción y realice el montaje del sistema conectando los electrodos al potenciostato
Se verifica que los electrodos estén bien sumergidos, sin tocarse entre sí.



- Cable azul → Electrodo de referencia
- Cable rojo → Electrodo de trabajo
- Cable negro → Contraelectrodo



Se cierra la caja de Faraday y se enciende el potenciostato

Dado que la corriente debe normalizarse respecto al área del electrodo, los valores de la densidad de corriente deben multiplicarse por el área geométrica del electrodo de trabajo y el resultado se convierte a amperios (A)



Primera etapa

- Densidad de corriente: 0,2 mA/cm²
- Tiempo: 20 s

Corriente: $1,42 \times 10^{-5} \text{ A}$

Segunda etapa

- Densidad de corriente: 0,8 mA/cm²
- Tiempo: 800 s

Corriente: $5,68 \times 10^{-5} \text{ A}$



Al finalizar el experimento, con el cronopotenciograma obtenido, se calcula la carga mediante: $Q = I \cdot t$

Sub-reto

Calcule la masa del polipirrol

$$m = \frac{Q M_m + \gamma M_d}{F (2 + \gamma)}$$

Durante la síntesis, la cantidad de carga transferida está directamente relacionada con la cantidad de polímero que se forma sobre el electrodo.

Explica cómo un aumento en la carga total transferida podría afectar la cantidad de polipirrol depositado y el desempeño electroquímico del electrodo, particularmente su capacitancia.

m = masa de polipirrol depositado (g)
Q = carga total transferida durante la polimerización (C)

F = constante de Faraday

M_m = masa molar de la unidad repetitiva del pirrol (g mol⁻¹)

M_d = masa molar del ion dopante (g mol⁻¹)

γ = grado de dopaje del polímero

(fracción de aniones incorporados por unidad monomérica)

Estabilización con solución electrolítica de sulfato de sodio

Observación inicial de la película sintetizada

Una vez finalizada la síntesis electroquímica del polipirrol sobre el electrodo de trabajo:

Se retira cuidadosamente el electrodo de la celda.



Se enjuaga suavemente con agua destilada para eliminar residuos de monómero o electrolito.



Se realiza la observación microscópica de la superficie del electrodo



Montaje del sistema

1



Preparación de la solución electrolítica de estabilización. Se preparan 100 mL de solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) 0,5 M.

2



Limpieza y acondicionamiento de la celda electroquímica

1. Se lava la celda electroquímica con agua destilada.
2. Se purga la celda con un poco de la misma solución de Na_2SO_4
3. Se adiciona la solución electrolítica a la celda hasta cubrir adecuadamente los electrodos.

3



Disponga la solución de trabajo en la celda de reacción y realice el montaje del sistema conectando los electrodos al potenciostato, conecta los electrodos de la misma forma que lo hiciste en la síntesis.

4



Burbujea con nitrógeno durante 5 min



Configure el equipo en modo OCP (Open Circuit Potential). Se mantiene el sistema durante 60 segundos.



Posteriormente realiza la estabilización electroquímica de la película mediante voltamperometría cíclica:

- Número de ciclos: 15
- Ventana de potencial: $-0,1 \text{ V}$ a $0,5 \text{ V}$
- Velocidad de barrido: 100 mV/s

Capacitancia



La capacitancia es una medida de la capacidad que tiene un material o un sistema electroquímico para almacenar carga eléctrica cuando se aplica un potencial. En supercapacitores y polímeros conductores como el polipirrol, esta capacidad proviene tanto de la formación de la doble capa eléctrica como de la participación de procesos faradaicos rápidos y reversibles, conocidos como pseudocapacitancia. La capacitancia es fundamental porque determina cuánta energía puede almacenar el material y con qué rapidez puede cargar y descargar sin degradarse, lo que influye directamente en la eficiencia y estabilidad del dispositivo (Conway, 1999; Simon & Gogotsi, 2008).

La capacitancia puede calcularse mediante diferentes técnicas electroquímicas, y por ello los valores obtenidos son distintos según el método. En voltamperometría cíclica (CV), la capacitancia se estima a partir de la corriente integrada en función de la velocidad de barrido, lo cual refleja tanto la doble capa como procesos redox distribuidos en el potencial. En cambio, en carga–descarga galvanostática (CDG) la capacitancia se obtiene directamente de la pendiente del tramo lineal de descarga bajo corriente constante, siendo un valor generalmente más representativo del desempeño práctico del material en un dispositivo real. Además, es común distinguir entre la capacitancia gravimétrica (C , F/g), que expresa cuánta carga almacena el material por unidad de masa, y la capacitancia específica por área o por volumen (Cps), que describe la capacidad normalizada respecto al área del electrodo o al volumen del dispositivo, utilizada para comparar materiales con geometrías o espesores distintos (Kotz & Carlen, 2000; Conway, 1999).

Caracterización del polipirrol por voltamperometría cíclica

La caracterización se realiza manteniendo el montaje realizado en la estabilización del polipirrol, conservando la misma celda electroquímica, electrolito, electrodos y conexiones al potenciostato.

1. Configuración de velocidades de barrido

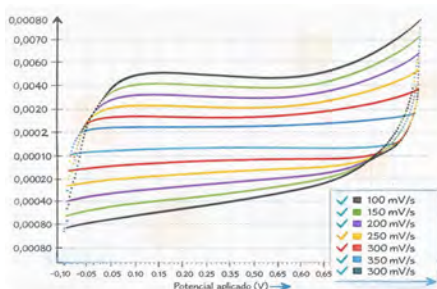
Se programan diferentes velocidades
Velocidades empleadas: 50 mV/s , 100 mV/s , 150 mV/s , 200 mV/s , 250 mV/s , 300 mV/s . Estos valores deben convertirse a V/s



2. Parámetros del barrido voltamétrico

Para cada velocidad se configuran las siguientes condiciones:

- Ventana de potencial: -0,1 V a 0,5 V
- Número de ciclos: 3 ciclos por cada velocidad de barrido



Sub-retro

Con los datos obtenidos por el software y la masa del polipirrol, calcula la capacitancia y capacitancia específica del material

Capacitancia

$$C = \frac{Q_a + Q_c}{2m\Delta V}$$

A partir de su voltamperograma obtenido para el polipirrol a diferentes velocidades de escaneo. Explique cómo el cambio en la velocidad de barrido influye en la corriente registrada y qué información proporciona este comportamiento sobre el proceso de almacenamiento de carga en el material.

C = capacitancia del sistema (F)

C_{sp} = capacitancia específica del material ($F\ g^{-1}$)

Q = carga almacenada, obtenida del área bajo la curva del voltamperograma (C)

m = masa del material activo depositado en el electrodo (g)

v = velocidad de barrido ($V\ s^{-1}$)

ΔV = ventana de potencial utilizada (V)

$i(V)$ = corriente en función del potencial

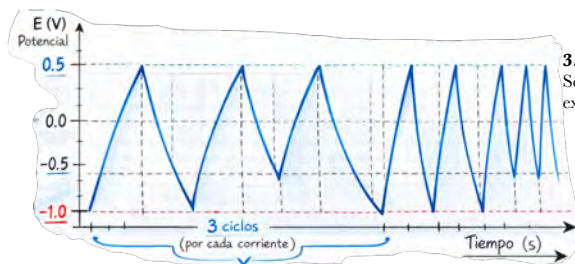
Caracterización del polipirrol por carga y descarga CDG

La caracterización se realiza manteniendo el montaje anterior

1. Configuración de corrientes aplicadas

Para la técnica se aplican diferentes valores de corriente constante. Corrientes empleadas: 0,1 mA, 0,5 mA, 1,0 mA.

Dado que la corriente debe normalizarse respecto al área del electrodo, los valores de la densidad de corriente deben multiplicarse por el área geométrica del electrodo de trabajo y el resultado se convierte a amperios (A)



3. Parámetros de la técnica CDG

Se configuran las siguientes condiciones experimentales:

- Ventana de potencial: -0,1 V a 0,5 V
- Modo de operación: Corriente constante (galvanostático)
- Número de ciclos: 3 ciclos por cada corriente aplicada

Sub-reto

Utilizando los datos experimentales proporcionados en la guía (corriente aplicada, tiempo de descarga y ventana de potencial), calcula la capacitancia del material empleando la ecuación correspondiente.

Capacitancia específica

$$C_{sp} = \frac{ix\Delta t}{mx\Delta V}$$

A partir de su diagrama de carga y descarga galvanostática obtenido para el polipirrol. Explique cómo la forma de estas curvas refleja el comportamiento electroquímico del material y qué información proporciona sobre su capacidad para almacenar y liberar carga.

C = capacitancia del electrodo (F)
 C_{sp} = capacitancia específica del material ($F\ g^{-1}$)
 I = corriente aplicada (A)
 Δt = tiempo de descarga (s)
 ΔV = ventana de potencial (V)
 m = masa del material depositado en el electrodo (g)

Software

Nota: Algunas de las imágenes utilizadas en esta guía fueron generadas con ChatGPT (OpenAI, 2026) mediante el modelo de inteligencia artificial para fines académicos e ilustrativos.

Acceda a los siguientes enlaces para ver un video explicativo de:

Síntesis cronopotenciométrica:

https://drive.google.com/file/d/1JQA3l83l3RcqSZRZ2v17o_ZAdL0tZF0o/view?usp=sharing

Estabilización en sulfato de sodio:

<https://drive.google.com/file/d/1-pUicxDIUdxrYcT3e5RXPUGGn72OWwcA/view?usp=sharing>

Caracterización por voltamperometría cíclica:

<https://drive.google.com/file/d/1K1MbDI8lJG53S1bMlGpox5sMFN4I3zZ/view?usp=sharing>

Caracterización por carga y descarga CDG:

<https://drive.google.com/file/d/134duKr8-w56u0xH4nG4XpyfQkUZGtVwR/view?usp=sharing>



¡Gran logro!

Has obtenido la medalla de oro por llevar a cabo la síntesis electroquímica mediante cronopotenciometría, controlando la corriente aplicada y comprendiendo cómo evoluciona el potencial durante la formación del material. Además, lograste caracterizar el polipirrol mediante voltamperometría cíclica y ensayos de carga–descarga galvanostática, calcular la masa depositada del polipirrol y determinar sus capacitancias. También obtuviste y analizaste los gráficos electroquímicos correspondientes a la parte experimental.



Referencias

- Cortés Montañez, M. T. (2025). Guía de laboratorio de electroquímica - calibración de electrodo Xbox hexacianoferrato (III). [Material de laboratorio, Universidad de los Andes].
- Conway, B. E. (1999). Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>
- Kötz, R., & Carlen, M. (2000). Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 45(15–16), 2483–2498.
[https://doi.org/10.1016/S00134686\(00\)00354-6](https://doi.org/10.1016/S00134686(00)00354-6)
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7(11), 845–854.
<https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- OpenAI. (2026). Imágenes generadas con ChatGPT para fines ilustrativos [Imágenes generadas por IA]. ChatGPT. <https://chat.openai.com/>



Síntesis por pulsos galvanostáticos y Caracterización del polipirrol

Nombre: _____

Fecha: _____

Introducción

La síntesis electroquímica por pulsos galvanostáticos es una estrategia avanzada que permite controlar con mayor precisión el crecimiento del polipirrol sobre el electrodo de trabajo. A diferencia de la cronopotenciometría continua, el modo pulsado alterna periodos de corriente aplicada con intervalos de reposo, lo que facilita una mejor reorganización del monómero y del dopante, disminuye la sobreoxidación y favorece la formación de películas más uniformes, porosas y electroactivas. Esta metodología resulta especialmente útil cuando se busca optimizar la morfología y accesibilidad iónica del polímero para aplicaciones en almacenamiento de energía.

En esta guía se explorará cómo el uso de pulsos galvanostáticos influye en la nucleación, crecimiento y propiedades finales del polipirrol. Posteriormente, la película sintetizada será analizada mediante voltamperometría cíclica (CV) y carga-descarga galvanostática (CDG), técnicas que permiten evaluar el comportamiento pseudocapacitivo y la capacidad de almacenamiento de carga del material. A través de los subretos y análisis incluidos en esta guía, se busca fortalecer el pensamiento crítico especialmente la habilidad de la explicación al comprender los parámetros de síntesis afectan directamente el desempeño del polipirrol en sistemas electroquímicos reales.

Objetivos

- Sintetizar polipirrol mediante pulsos galvanostáticos, controlando los tiempos de pulso y descanso para analizar su influencia en la nucleación, uniformidad y morfología de la película electropolimerizada.
- Caracterizar electroquímicamente la película de PPy obtenida mediante voltamperometría cíclica y carga-descarga galvanostática, determinando la capacitancia y capacitancia específica del material

Procedimiento

Limpieza de los electrodos



1. Disponga el paño de pulido sobre la superficie de trabajo y humedézcalo ligeramente con agua tipo 1
2. Coloque una pequeña cantidad de alúmina de tamaño de partícula 1 μm sobre el paño.
3. Frote el electrodo de carbono vítreo realizando movimientos en forma de ochos durante 2 minutos hacia ambas direcciones
4. Enjuagar con agua tipo 1 para remover la mayor cantidad de alúmina depositada en el electrodo



5. Introducir el electrodo en el sonicador con agua tipo 1 durante 2 minutos para remover residuos de alúmina.



6. Al finalizar el proceso secar el electrodo con papel absorbente o gas nitrógeno



7. Si es posible, observe la superficie del electrodo mediante microscopía, para evaluar la ausencia de rayones o partículas residuales.

Repetir los pasos del 1 al 5 primero con alúmina de $0,3\mu\text{m}$ y luego con la alúmina de $0,05\mu\text{m}$
Los pasos 6 y 7 se realizan al finalizar los tres pulidos

Preparación de la solución de pirrol con el agente dopante

1



Prepare 100 mL de solución de ácido p-toluensulfónico 0,1 M.

2



Determine la cantidad de pirrol a polimerizar, para ello realice la conversión del volumen (10mL) equivalente a masa, partiendo de la molaridad 0,1M

4



Una vez usado el frasco destilado regréselo con la jeringa a la bolsa hermética tipo Ziploc, ponga una atmósfera de nitrógeno y lleve a refrigeración rápidamente. Recuerde hacer este procedimiento cada vez que extraiga el monómero.

3



Pese la cantidad obtenida anteriormente directamente en la celda electroquímica, el pirrol se extrae desde el frasco destilado.

5



A la celda añada 10 mL de la solución preparada de ácido p-toluensulfónico 0,1 M.

6



Ponga la celda sobre un agitador magnético para homogeneizar la mezcla, simultáneamente burbujee nitrógeno durante 5 min, para generar una atmósfera inerte

Síntesis por pulsos del polipirrol



Determinar el área del electrodo, teniendo en cuenta que su diámetro es de 0,3 cm, recuerde hallar el radio y área circular.

Disponga la solución de trabajo en la celda de reacción y realice el montaje del sistema conectando los electrodos al potencióstato. Se verifica que los electrodos estén bien sumergidos, sin tocarse entre sí.



• Cable azul → Electrodo de referencia
• Cable rojo → Electrodo de trabajo
• Cable negro → Contraelectrodo



Se cierra la caja de Faraday y se enciende el potencióstato

Primera etapa

- Deposición por pulsos de corriente

Se programa 100 pulsos eléctricos, donde cada pulso está constituido por dos intervalos de corriente:

- 10 ms aplicando una densidad de corriente de 2,5 mA/cm².
- 100 ms a 0 mA (tiempo de relajación sin polarización).

Este ciclo se repite 100 veces.

El tiempo total de la etapa se calcula como:

$$(10 \text{ ms} + 100 \text{ ms}) \times 100 = 11 \text{ s}$$

Segunda etapa

- Deposición a corriente constante

Posteriormente se aplica una corriente constante con las siguientes condiciones:

- Densidad de corriente: 0,6 mA/cm²
- Tiempo: 18 minutos

Al igual que en la etapa anterior, la corriente debe ajustarse al área del electrodo (0,071 cm²) y convertirse a amperios

Esta etapa favorece el crecimiento continuo y el engrosamiento de la película polimérica previamente nucleada por los pulsos.

Sub-reto

Calcule la masa del polipirrol

$$m = \frac{Q M_m + \gamma M_d}{F (2 + \gamma)}$$

Explique cómo los parámetros de la síntesis, como la corriente aplicada, la duración de los pulsos y el número de ciclos, pueden influir en la cantidad de material depositado y en las características de la película formada



La suma de la carga generada en ambas etapas debe ser equivalente a la carga obtenida durante la síntesis realizada por cronopotenciometría durante los 700 s en el procedimiento anterior.

Estabilización con solución electrolítica de sulfato de sodio

Observación inicial de la película sintetizada

Una vez finalizada la síntesis electroquímica del polipirrol sobre el electrodo de trabajo:

Se retira cuidadosamente el electrodo de la celda.



Se enjuaga suavemente con agua destilada para eliminar residuos de monómero o electrolito.



Se realiza la observación microscópica de la superficie del electrodo



Montaje del sistema

1



Preparación de la solución electrolítica de estabilización. Se preparan 100 mL de solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) 0,5 M.

3



Disponga la solución de trabajo en la celda de reacción y realice el montaje del sistema conectando los electrodos al potencióstato, conecta los electrodos de la misma forma que lo hiciste en la síntesis.

2



Limpieza y acondicionamiento de la celda electroquímica

1. Se lava la celda electroquímica con agua destilada.
2. Se purga la celda con un poco de la misma solución de Na_2SO_4
3. Se adiciona la solución electrolítica a la celda hasta cubrir adecuadamente los electrodos.

4



Burbujea con nitrógeno durante 5 min



Configure el equipo en modo OCP (Open Circuit Potential). Se mantiene el sistema durante 60 segundos.



Posteriormente realiza la estabilización electroquímica de la película mediante voltamperometría cíclica:

- Número de ciclos: 15
- Ventana de potencial: $-0,1 \text{ V}$ a $0,5 \text{ V}$
- Velocidad de barrido: 100 mV/s

Caracterización del polipirrol por voltamperometría cíclica

La caracterización se realiza manteniendo el montaje realizado en la estabilización del polipirrol, conservando la misma celda electroquímica, electrolito, electrodos y conexiones al potencióstato.

1. Configuración de velocidades de barrido

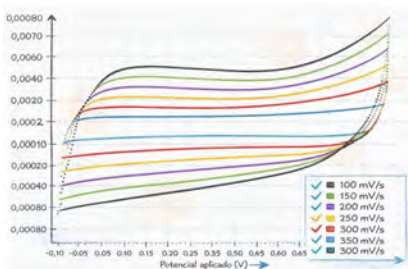
Se programan diferentes velocidades
Velocidades empleadas: 50 mV/s , 100 mV/s , 150 mV/s , 200 mV/s , 250 mV/s , 300 mV/s . Estos valores deben convertirse a V/s



2. Parámetros del barrido voltamétrico

Para cada velocidad se configuran las siguientes condiciones:

- Ventana de potencial: $-0,1 \text{ V}$ a $0,5 \text{ V}$
- Número de ciclos: 3 ciclos por cada velocidad de barrido



Sub-reto

Con los datos obtenidos por el software y la masa del polipirrol, calcula la capacitancia y capacitancia específica del material

Capacitancia

$$C = \frac{Q_a + Q_c}{2m\Delta V}$$

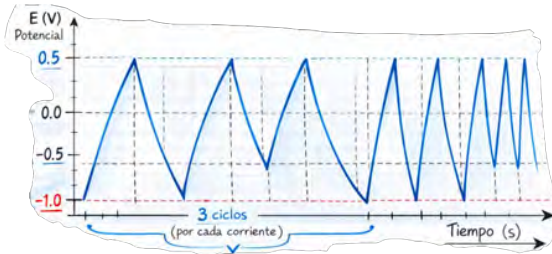
Analice la forma de su voltamperograma obtenido del polipirrol dentro de las ventanas de potencial aplicadas. Explique qué procesos electroquímicos podrían estar ocurriendo en el material y cómo estos se relacionan con su capacidad para almacenar carga.

Caracterización del polipirrol por carga y descarga CDG

La caracterización se realiza manteniendo el montaje anterior

1. Configuración de corrientes aplicadas

Para la técnica se aplican diferentes valores de corriente constante. Corrientes empleadas: 0,1 mA, 0,5 mA, 1,0 mA. Dado que la corriente debe normalizarse respecto al área del electrodo, los valores de la densidad de corriente deben multiplicarse por el área geométrica del electrodo de trabajo y el resultado se convierte a amperios (A)



2. Parámetros de la técnica CDG

Se configuran las siguientes condiciones experimentales:

- Ventana de potencial: -0,1 V a 0,5 V
- Modo de operación: Corriente constante (galvanostático)
- Número de ciclos: 3 ciclos por cada corriente aplicada

Sub-reto

Utilizando los datos experimentales proporcionados en la guía (corriente aplicada, tiempo de descarga y ventana de potencial), calcula la capacitancia del material empleando la ecuación correspondiente.

Capacitancia específica

$$C_{sp} = \frac{ix\Delta t}{mx\Delta V}$$

Durante los ensayos de carga y descarga galvanostática, la pendiente de las curvas está relacionada con la respuesta electroquímica del material.

Explique qué significa un aumento o disminución en esta pendiente y cómo este comportamiento se relaciona con la capacidad del polipirrol para almacenar carga.

Espesor de la película de polipirrol

En los sistemas de polímeros conductores, el espesor de la película depositada sobre el electrodo puede estimarse a partir de la carga total transferida durante el proceso de electropolimerización. Esta aproximación se fundamenta en la ley de Faraday, la cual establece que la cantidad de sustancia formada o transformada en un proceso electroquímico es proporcional a la carga eléctrica suministrada al sistema (Bard & Faulkner, 2001). En el caso de la deposición de polímeros conductores como el polipirrol, esta relación permite vincular la carga transferida con la cantidad de material formado y, por lo tanto, con el espesor de la película generada sobre la superficie del electrodo. Bajo esta consideración, el espesor de la película (dx) puede estimarse mediante una expresión que relaciona la carga transferida, la masa molar del material, el número de electrones involucrados en el proceso, la constante de Faraday y la densidad del polímero (Skotheim & Reynolds, 2007). De acuerdo con esta aproximación, el espesor de la película puede estimarse mediante la ecuación de la figura 13.

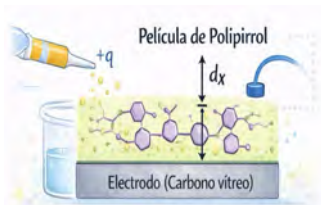
$$d_x = \frac{qM}{zF\rho}$$

Figura 13. Ecuación para calcular el espesor de la película

Sub-reto

Calcule el espesor de la película de polipirrol sintetizada por la técnica de cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos

Explique cómo cambios en variables como la corriente aplicada, el tiempo de síntesis o el número de ciclos/pulsos electroquímicos podrían afectar el espesor de la película obtenida

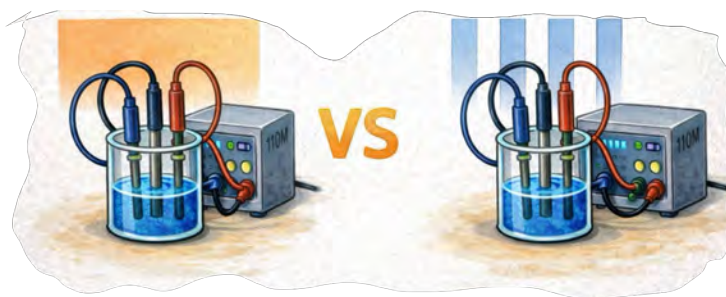


Has llegado hasta este punto superando cada uno de los sub-retos conceptuales y experimentales de todas las guías, analizando datos, interpretando resultados y comprendiendo el comportamiento electroquímico del polipirrol. Cada paso te ha permitido avanzar en el desarrollo de tus habilidades de pensamiento crítico inferencia y explicación, acercándote cada vez más al objetivo final. Ahora estás a un paso de alcanzar la medalla diamante, el nivel más alto de esta experiencia. Para conseguirla, solo queda resolver el reto general, en el que integrarás todo lo aprendido a lo largo de las guías para responder a la pregunta planteada al inicio de este recorrido.

Reto general

Síntesis por cronopotenciometría

Síntesis por pulsos galvanostáticos



El reto general, es determinar cuál es la diferencia entre la síntesis por cronopotenciometría y la síntesis por pulsos galvanostáticos, evaluar la variación de los resultados en ambas técnicas. Para ello compare las siguientes variables:

- Masa calculada del polipirrol en cada tipo de síntesis.
- Espesor de la película obtenida en cada tipo de síntesis
- Capacitancias por caracterización CV y capacitancia específica por carácter CDG.

Como los resultados varían, explique por qué los datos pueden ser mayores en un tipo de síntesis que en el otro.

Software

Acceda a los siguientes enlaces para ver un video explicativo de:

Síntesis por pulsos galvanostáticos:

https://drive.google.com/file/d/1beqN-hafsmr_60lPgepqO7KqjUJlsgOt/view?usp=sharing

Estabilización en sulfato de sodio:

<https://drive.google.com/file/d/1-pUicxDIUdxrYeT3e5RXPUGGn72OWwcA/view?usp=sharing>

Caracterización por voltamperometría cíclica:

<https://drive.google.com/file/d/1K1MbDI8LJG5f3S1bMIgPox5sMFN4I3zZ/view?usp=sharing>

Caracterización por carga y descarga CDG:

<https://drive.google.com/file/d/134duKr8-w56u0xH4nG4XpyfQkUZGtVwR/view?usp=sharing>



¡Nivel experto alcanzado!

Has conseguido la medalla diamante por completar la síntesis mediante pulsos galvanostáticos, aplicando estrategias de control de corriente para modular el crecimiento del material y mejorar sus propiedades electroquímicas. Durante este proceso lograste calcular la capacitancia y la capacitancia específica del material, así como estimar el espesor de las películas obtenidas mediante ambas técnicas de síntesis. Además, pudiste analizar y comparar los resultados experimentales, identificando las diferencias entre los métodos de síntesis en términos de los datos obtenidos y del comportamiento electroquímico del material. Este logro evidencia un buen dominio del componente teórico y experimental del proceso de síntesis y caracterización electroquímica.

Nota: Algunas de las imágenes utilizadas en esta guía fueron generadas con ChatGPT (OpenAI, 2026) mediante el modelo de inteligencia artificial para fines académicos e ilustrativos.

Referencias

- Cortés Montañez, M. T. (2025). Guía de laboratorio de electroquímica - calibración de electrodo Xbox hexacianoferrato (III). [Material de laboratorio, Universidad de los Andes].
- Conway, B. E. (1999). Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>
- Kötz, R., & Carlen, M. (2000). Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 45(15–16), 2483–2498.
- [https://doi.org/10.1016/S00134686\(00\)00354-6](https://doi.org/10.1016/S00134686(00)00354-6)
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7(11), 845–854.
- <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- OpenAI. (2026). Imágenes generadas con ChatGPT para fines ilustrativos [Imágenes generadas por IA]. ChatGPT.
- <https://chat.openai.com/>



Estructura informe de laboratorio

El informe deberá evidenciar la comprensión de los procesos estudiados y la forma en que los resultados experimentales permiten responder y explicar la respuesta del reto general planteado en la primera guía, así como los sub-retos conceptuales y experimentales desarrollados durante el recorrido por todas las guías.

El informe deberá incluir los siguientes apartados:

1. Introducción

Breve contextualización del tema abordado en la práctica. Debe incluir conceptos relevantes relacionados con polímeros conductores, polipirrol, síntesis electroquímica y comportamiento capacitivo, así como el propósito de la experiencia realizada y su relación con el reto general planteado.

2. Metodología

Descripción clara y ordenada del procedimiento experimental realizado durante la práctica. Se deben mencionar las técnicas electroquímicas utilizadas, los materiales empleados, las condiciones experimentales y las variables estudiadas durante la síntesis y caracterización del material.

3. Resultados

Presentación de los datos experimentales obtenidos durante la práctica. En esta sección se deben incluir:

- Voltamperogramas obtenidos en la caracterización electroquímica.
- Curvas de carga y descarga galvanostática.
- Cálculos realizados (capacitancia, capacitancia específica, masa depositada, espesor, coeficiente de difusión u otros parámetros solicitados en la guía).
- Tablas o gráficos que permitan organizar y visualizar los resultados.

4. Análisis y discusión

Interpretación de los resultados obtenidos. En esta sección los estudiantes deberán:

- Analizar el comportamiento electroquímico del polipirrol.
- Describir e interpretar las gráficas obtenidas
- Comparar los resultados obtenidos entre las diferentes técnicas de síntesis.
- Relacionar los resultados experimentales con los conceptos teóricos estudiados.
- Argumentar las respuestas a los sub-retos planteados en la guía.
- Explicar cómo los resultados obtenidos permiten dar respuesta al reto general de la guía, relacionado con el espesor y el comportamiento capacitivo de las películas de polipirrol.

5. Conclusiones

Síntesis de los principales hallazgos obtenidos durante la práctica. Se debe indicar qué se logró comprender sobre la síntesis, caracterización y comportamiento capacitivo del polipirrol, así como su posible aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía tipo supercapacitor.

6. Referencias

Listado de las fuentes bibliográficas utilizadas para sustentar la introducción, el análisis y las discusiones del informe, citadas adecuadamente.

Anexo B. Consentimiento informado

CONSENTIMIENTO INFORMADO DE PARTICIPACIÓN

Estimado/a químico en formación:

Reciba un cordial saludo. Agradecemos su disposición para participar en el proyecto de investigación titulado **“Diseño de trabajos prácticos de laboratorio fundamentados en el aprendizaje basado en retos y en la síntesis y caracterización electroquímica del polipirrol para el fortalecimiento de las habilidades de inferencia y explicación de un grupo de químicos en formación”**, desarrollado por José Miguel Melo Molina y Mayerly Rodríguez Hernández, bajo la dirección del profesor Diego Alexander Blanco Martínez y la codirección de la profesora María Teresa Cortés.

Este proyecto se desarrolla desde la Universidad Pedagógica Nacional, Facultad de Ciencia y Tecnología, Departamento de Química, y fue implementado en la Universidad de los Andes, en el programa de Química, específicamente en la asignatura Fisicoquímica Avanzada II. Su propósito es analizar y fortalecer las habilidades de pensamiento crítico inferencia y explicación de los químicos en formación mediante la estructuración de trabajos prácticos de laboratorio fundamentados en el enfoque del aprendizaje basado en retos.

Le solicitamos leer atentamente la siguiente información antes de manifestar su decisión de participar en esta investigación. Su participación es completamente voluntaria y la información recolectada será utilizada únicamente con fines académicos e investigativos.

Yo, _____, identificado(a) con documento de identidad número _____ de _____, manifiesto que:

- He recibido información clara y suficiente sobre los objetivos, metodología y alcance del proyecto de investigación mencionado.
- Comprendo que mi participación es completamente voluntaria y que puedo retirarme del estudio en cualquier momento, sin que esto genere consecuencias académicas o personales.
- He sido informado(a) de que los datos recolectados serán tratados con confidencialidad y utilizados exclusivamente con fines investigativos.
- Entiendo que puedo solicitar información adicional sobre el desarrollo del proyecto.

En consecuencia, manifiesto libremente mi voluntad de participar en las actividades propuestas dentro del proyecto de investigación. Otorgó mi consentimiento informado para participar en este estudio.

Para dejar constancia de lo anterior, firmo a continuación:

Fecha: _____ / _____ / _____ Bogotá D.C

Anexo C. Matriz de validación de instrumentos

MATRIZ DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS

Guías TPL para la síntesis y caracterización electroquímica de polipirrol (PPy)

Jose Miguel Melo Molina y Mayerly Rodríguez Hernández

La siguiente matriz tiene como objetivo que evaluadores expertos valoren la pertinencia, coherencia y claridad de las guías de trabajos prácticos de laboratorio (TPL) diseñadas y fundamentadas en el aprendizaje basado en retos (ABR), así como su capacidad para promover y evaluar habilidades del pensamiento crítico como la inferencia y la explicación, designados a cada guía como se muestra en la tabla 1, con los criterios de evaluación propuestos en la tabla 2. Es importante mencionar que estas guías serán implementadas en un grupo de químicos en formación de séptimo semestre de la Universidad de los Andes de Colombia, en la asignatura de fisicoquímica avanzada II.

Fortalecer las habilidades de pensamiento crítico, inferencia y explicación en un grupo de químicos en formación de la Universidad de los Andes a través del diseño e implementación de una serie de guías de trabajos prácticos de laboratorio fundamentadas en el enfoque del aprendizaje basado en retos y las técnicas de síntesis y caracterización electroquímica del polipirrol. Por lo que se hace necesario validar el instrumento principal de esta investigación a través de la matriz, presentada en la tabla 3.

Con el fin de contextualizar a los evaluadores, de acuerdo con Facione (1990), las habilidades de inferencia y explicación constituyen procesos cognitivos fundamentales en la construcción del conocimiento científico. La inferencia se refiere a la capacidad de interpretar información disponible, identificar relaciones entre datos, formular hipótesis y extraer conclusiones que no están explícitamente dadas, apoyándose en evidencias y en el razonamiento lógico. Por su parte, la explicación implica la capacidad de organizar y comunicar dichas conclusiones de manera coherente, justificando los resultados mediante conceptos, principios o modelos teóricos que permitan comprender el fenómeno analizado. En este sentido, dentro de la presente matriz estas habilidades se valoran no solo por la respuesta final obtenida, sino por la forma en que el estudiante

conecta los datos experimentales, el análisis conceptual y la argumentación científica para sustentar sus interpretaciones.

Tabla 1.

Habilidades que se pretenden fortalecer en cada guía

Guía de Laboratorio	Nombre	Habilidad del pensamiento crítico
Guía de estudio	Una introducción a las técnicas de síntesis y caracterización de Polipirrol	Inferencia
1	Calibración electroquímica del electrodo de trabajo mediante voltamperometría cíclica	Inferencia
2	Síntesis por cronopotenciometría y caracterización electroquímica del polipirrol	Explicación
3	Síntesis por pulsos galvanostáticos y caracterización electroquímica del polipirrol	Explicación

Tabla 2.

Escala de valoración para los criterios propuestos.

Valor	Significado
1	No cumple
2	Cumple parcialmente
3	Cumple adecuadamente
4	Cumple completamente

Tabla 3.

Matriz de validación del diseño de las guías de los TPL

Criterio	Descripción	Guía de estudio	Guía de laboratorio 1	Guía de laboratorio 2	Guía de laboratorio 3
Adecuación de las actividades para evidenciar la habilidad	La guía presenta sub-retos que permiten evidenciar de manera clara el desarrollo de la habilidad de pensamiento crítico propuesta (inferencia o explicación). Se valora si los sub-retos planteados generan situaciones en las que el estudiante debe interpretar información, relacionar datos experimentales con conceptos	4	4	4	4

	teóricos y justificar sus conclusiones.				
Claridad	Las instrucciones, preguntas y actividades están redactadas de manera comprensible y precisa.	4	4	4	4
Coherencia	Existe relación lógica entre objetivos, actividades y resultados esperados.	4	4	4	4
Relevancia científica	Los entramados conceptuales electroquímicos incluidos son pertinentes y coherentes con la naturaleza de la temática objeto de estudio.	4	4	4	4
Pertinencia didáctica	Las actividades propuestas son apropiadas para el nivel académico de los estudiantes.	3	3	3	3
Nivel cognitivo de las actividades	Las preguntas promueven procesos de pensamiento crítico (interpretar, inferir, explicar).	3	3	4	4
Organización y estructura del instrumento	La guía presenta una secuencia lógica y adecuada de actividades.	3	3	3	3

Observaciones del evaluador: El diseño de cada una de las guías es muy agradable a la vista, las imágenes son muy llamativas al lector. El tema interesante, novedoso, aplicable a todos los niveles educativos, especialmente generando alternativas y habilidades procedimentales en el docente para enseñar este tipo de temas que requieren un nivel de comprensión profundo. Valoro y resalto la creatividad para el diseño de las guías y la forma como se desarrolló el tema, llevando un hilo conductor en los procedimientos, generando en el lector curiosidad y mayor interés en aprender los conceptos y relacionarlos. El tema y el objeto de estudio despertará un interés muy alto para continuar con el estudio de los conceptos enunciados.

Recomendación final

- ☐ El instrumento es adecuado sin modificaciones
☒ El instrumento es adecuado con ajustes menores
☐ El instrumento requiere modificaciones importantes

Nombre del evaluador: Mercy Liliana Viasus Poveda.

Anexo D. Informe de laboratorio Grupo 1

Informe de laboratorio: síntesis por cronopotenciometría y por pulsos galvanostáticos y caracterización del Polipirrol.

Universidad de los Andes; Area de Fisicoquímica avanzada II

Grupo 1 de laboratorio

INTRODUCCIÓN

Los polímeros conductores han despertado un creciente interés en el campo de la electroquímica y la ciencia de materiales debido a su capacidad de combinar propiedades eléctricas con características mecánicas y químicas propias de materiales orgánicos. Dentro de estos, el polipirrol (PPy) se destaca como uno de los sistemas más estudiados, debido a su facilidad de síntesis, estabilidad ambiental y notable comportamiento electroquímico.

La conductividad eléctrica en el polipirrol se origina a partir de su estructura conjugada, en la cual los electrones π se encuentran deslocalizados a lo largo de la cadena polimérica. Este sistema puede ser dopado mediante la incorporación de aniones provenientes del electrolito, generando especies como polarones y bipolarones, que actúan como portadores de carga y permiten el transporte electrónico. Este fenómeno convierte al PPy en un material adecuado para aplicaciones en dispositivos de almacenamiento de energía, particularmente en supercapacitores.

Desde el punto de vista electroquímico, el polipirrol presenta un comportamiento pseudocapacitivo, en el cual el almacenamiento de carga ocurre mediante procesos redox reversibles asociados a la inserción y expulsión de iones en la matriz polimérica. Este comportamiento depende de variables como el método de síntesis, el tipo de dopante, el espesor de la película y la accesibilidad de los iones al material.

En la presente práctica se abordó la síntesis electroquímica del polipirrol mediante técnicas de cronopotenciometría y pulsos galvanostáticos, así como su posterior caracterización mediante voltamperometría cíclica y carga-descarga galvanostática. El propósito fue analizar cómo las

condiciones de síntesis influyen en propiedades como la capacitancia, la masa depositada y el espesor de la película, con el fin de comprender su desempeño como material activo en sistemas de almacenamiento de energía.

PREPARACIÓN (GUIA DE ESTUDIO)

¿Como cree que es posible que un polímero pueda conducir electricidad?

- Consideramos que bajo algún efecto químico se pueda modificar su estructura o la molécula, de manera que haya un movimiento de cargas y por ende se pueda conducir electricidad.

¿si usamos pirrol degradado en la síntesis, como podría afectar la calidad de la película obtenida?

- Quizá el sistema no responda bien a la oxidación del pirrol y se genere una película muy pequeña y no sería un resultado confiable a la hora de analizar el resultado o la película obtenida.

¿Cómo influye el tamaño del ion dopante?

- Según el ejemplo de la guía de estudio el que formaría una película más estable sería el PSS-, ya que suponemos que al ser más grande se va a incorporar mejor en la matriz o en los poros de la película, haciéndola más estable y ordenada.

Infiera porque la forma en que se conecta las unidades del monómero puede influir en la deslocalización de electrones y en la conductividad del polímero.

- Porque de la manera en que se presenta en la guía de estudio, se ve claramente que hay enlaces dobles (II) alternados, lo que va a contribuir en la deslocalización de los electrones. Si estos enlaces fueran seguidos no podría haber un movimiento del electrón a través de la molécula y no habría conducción del polímero.

¿Qué ocurre si hay una mala conexión de los electrodos en el sistema?

- La respuesta del equipo no va a ser lo que se esperaría de una síntesis, además por el potencial aplicado puede haber una descalibración del electrodo de trabajo y por ende del sistema en general.

Según el cronopotenciograma, ¿que indicaría un aumento del potencial al transcurrir el tiempo?

- Una película mucho más gruesa que va a evitar el transporte de masa y la conducción, esto indicaría un crecimiento notable de la película y una mayor resistencia y eso dificultaría el poder conducir.

¿Porque una síntesis más lenta podría favorecer la obtención de un material con mejores propiedades electroquímicas y conductoras?

- Porque entre más tiempo más gruesa será la película depositada en el electrodo y de esta manera sería más difícil que los iones dopantes ingresen a toda la película, mientras que un tiempo más corto, genera una película más delgada con accesibilidad para que los iones entren a la estructura.

¿Que indica que para la caracterización por GCD que algunos ciclos sean más amplios y simétricos y otros más estrechos y rápidos?

- Consideramos que estos ciclos más anchos representan una mayor capacidad del material de almacenar carga, y las más estrechas indicarían una pérdida de esta capacidad.

¿Que indica que los voltamperogramas obtenidos a diferentes velocidades de barrido no se superpongan?

- Consideramos que al aumentar la velocidad de barrido la corriente incrementa debido a que el proceso pasa de estar limitado por difusión iónica en el volumen del polímero a un régimen más capacitivo superficial, donde la transferencia de carga es más rápida. Esto provoca la expansión de las curvas y evidencia la influencia del transporte iónico y la cinética electroquímica en el material.

METODOLOGÍA

La metodología experimental se estructuró en cuatro etapas principales: preparación del sistema electroquímico, calibración de electrodos, síntesis del polipirrol y caracterización electroquímica, como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Metodología para la síntesis y caracterización del PPy

1. Preparación del sistema electroquímico.

Inicialmente, el electrodo de trabajo de carbón vítreo fue sometido a un proceso de limpieza mecánica mediante pulido con alúmina de tamaños de partícula de 1 μm , 0,3 μm y 0,05 μm durante aproximadamente dos minutos en cada etapa, seguido de sonicación en agua tipo I durante dos minutos, con el fin de garantizar una superficie activa limpia y homogénea.

2. Calibración del electrodo de trabajo y del sistema.

Para la calibración electroquímica, se empleó una solución de KCl 0,1 M como electrolito soporte y hexacianoferrato (III) 0,01 M como sonda redox. Se prepararon soluciones de trabajo de 2, 4, 6 y 8 Mm. El sistema se montó en una celda de tres electrodos (carbón vítreo como electrodo de trabajo, Ag/AgCl como referencia y platino como contraelectrodo), y se realizó desoxigenación mediante burbujeo de nitrógeno durante 5 minutos. Las mediciones se realizaron mediante voltamperometría cíclica para evaluar la relación entre corriente pico y concentración.

3. Síntesis del polipirrol

La síntesis electroquímica del polipirrol se llevó a cabo en una solución de pirrol 0,1 M y ácido p-toluensulfónico 0,1 M como dopante, utilizando dos técnicas:

- **Cronopotenciometría:**

Se aplicó una densidad de corriente inicial de 0,2 Ma/cm² durante 20 s, seguida de una densidad de corriente de 0,5 Ma/cm² durante un tiempo total de 800 s. Esta técnica implica una corriente constante, favoreciendo un crecimiento continuo del polímero.

- **Pulsos galvanostáticos:**

Se aplicaron 100 pulsos con una densidad de corriente de 2,5 Ma/cm², con un tiempo de pulso de 10 ms y un tiempo de reposo de 100 ms (corriente cero), seguido de una etapa de crecimiento a corriente constante de 0,6 Ma/cm² durante 18 minutos. Esta técnica introduce periodos de relajación que favorecen la reorganización estructural del polímero.

4. Caracterización de las películas obtenidas por cada tipo de síntesis.

Posteriormente, los electrodos recubiertos con polipirrol fueron estabilizados en una solución de sulfato de sodio 0,5 M mediante voltamperometría cíclica en una ventana de potencial de -0,1 V a 0,7 V, con una velocidad de barrido de 100 Mv/s durante 15 ciclos.

Finalmente, la caracterización electroquímica se realizó bajo las siguientes condiciones:

- **Voltamperometría cíclica (CV):**

Ventana de potencial de -0,1 V a 0,5 V, con velocidades de barrido de 50, 100, 150, 200, 250 y 300 Mv/s, realizando 5 ciclos por cada velocidad.

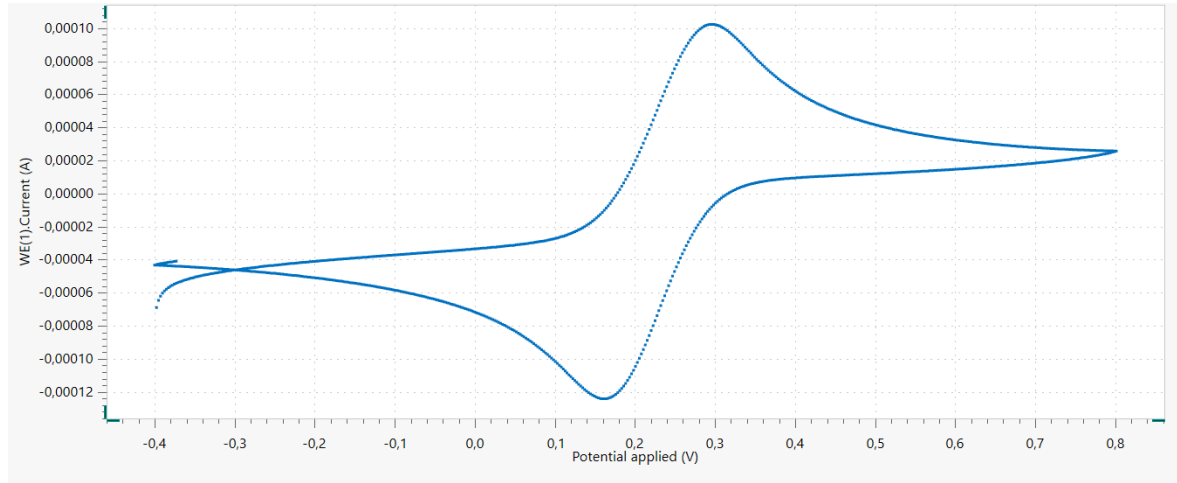
- **Carga-descarga galvanostática (GCD):**

Corrientes aplicadas de 0,1 Ma, 0,5 Ma y 1,0 Ma, en una ventana de potencial de -0,1 V a 0,5 V, con 3 ciclos por condición.

RESULTADOS

Guia número 1 de laboratorio: Calibración electroquímica del electrodo de trabajo mediante voltamperometría cíclica.

Determinación del coeficiente de difusión, a través de la calibración del electrodo de carbón vítreo.



Grafica 1. Voltamperograma obtenido para la calibración electroquímica del electrodo de trabajo, para el sistema ferri/ferricianuro.

$$D = \left(\frac{0,0003185 \frac{C}{V^{\frac{1}{2}} * S^{\frac{1}{2}}}}{0,4463 * 0,071 cm^2 * 96485 \frac{C}{mol} * 1 * 10^{-5} \frac{mol}{cm^3}} \right)^2 * \frac{8,314 \frac{J}{mol * K} * K}{96485 \frac{C}{mol}} \quad (1)$$

$$D = 2,61 * 10^{-6} \frac{cm^2}{s} \quad (2)$$

Potencial medio Fc/Fc⁺ y conversión

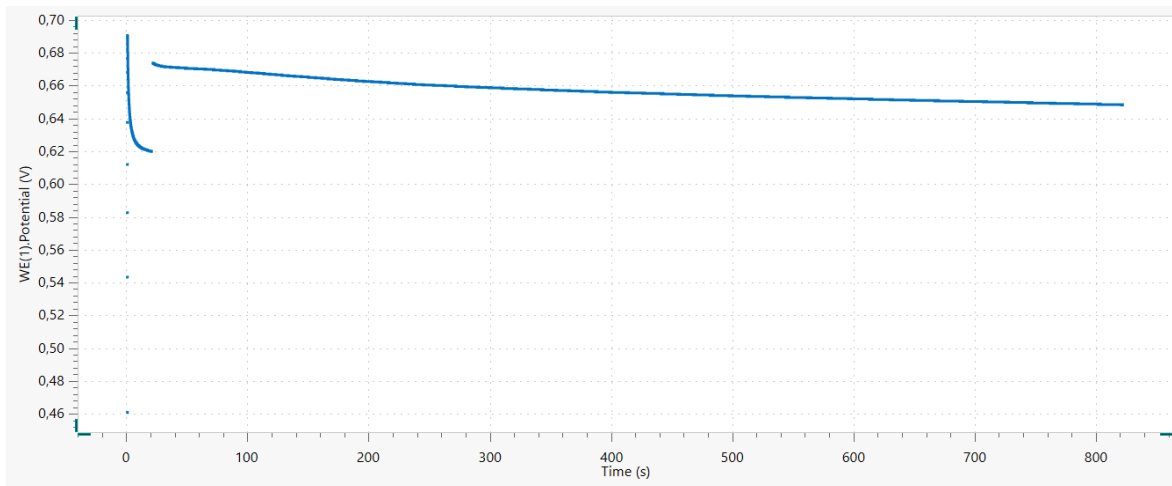
El potencial medio se calculó como:

$$E_{1/2} = \frac{0,44678 + 0,37598}{2} = 0,411 V \quad (3)$$

Posteriormente, se realizó la conversión:

$$E \left(\frac{Fc}{Fc^+} \right) = 0,80 - 0,411 = 0,389 \text{ V} \quad (4)$$

Guía número 2 de laboratorio: Síntesis por cronopotenciometría y caracterización electroquímica del polipirrol



Grafica 2. Cronopotenciograma obtenido para la síntesis electroquímica por cronopotenciometría.

Calculo la masa del polipirrol

A partir de la ecuación:

$$m = \frac{Q}{F} \cdot \frac{M_m + \gamma M_d}{2 + \gamma} \quad (5)$$

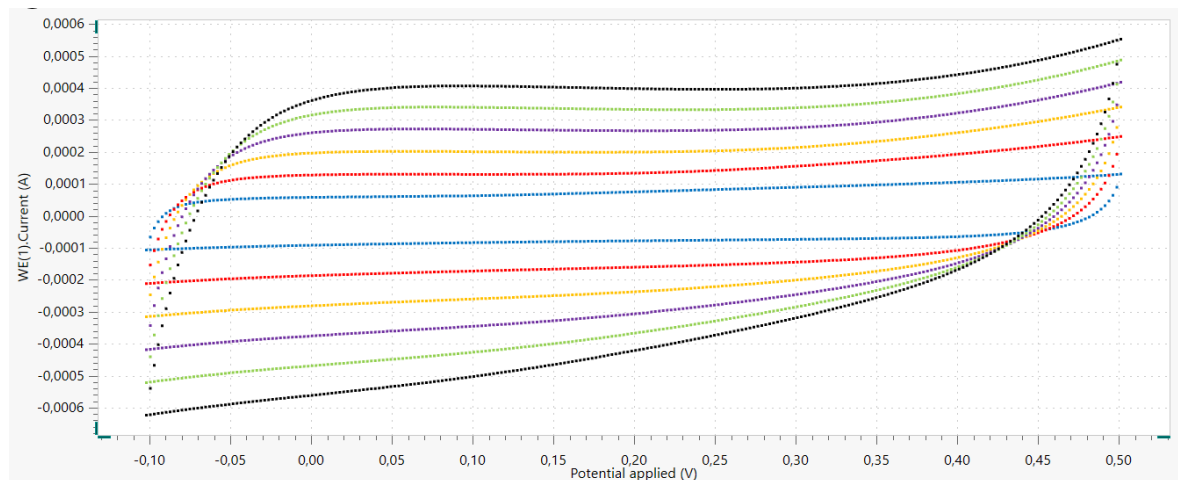
Q1	2,84E-04
Q2	4,54E-02
Q total	4,57E-02

F	96485
m pirrol	67,09
m (dopante)	172,2
y	0,33

Tabla 1. Datos obtenidos a partir del cronopotenciograma obtenido desde el aplicativo Nova

De esta manera, reemplazando los valores en la ecuación 5. La masa de polipirrol calculada es **m** = $2,52 \times 10^{-5}$ g

Caracterización de la película de PPy por voltamperometría cíclica a diferentes velocidades de barrido.



Grafica 3. Voltamperograma obtenido para la caracterización de la síntesis electroquímica por cronopotenciometría.

Cálculo de la capacitancia (CV)

$$C = \frac{Q_a + Q_c}{2m\Delta V} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 6 se reemplazan los valores obtenidos por el aplicativo Nova, como se muestra en la tabla 2.

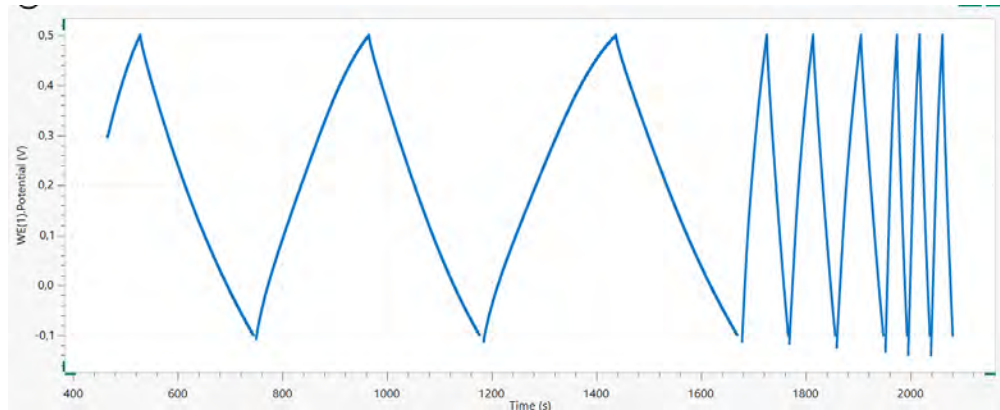
50 Mv/s		100 Mv/s		150 Mv/s		200 Mv/s		250 Mv/s		300 Mv/s	
Primer ciclo		Segundo ciclo		Tercer ciclo		Cuarto ciclo		Quinto ciclo		Sexto ciclo	
Qa	- 0,00091559	Qa	- 0,00055039	Qa	- 0,00085906	Qa	- 0,00083099	Qa	- 0,00080656	Qa	- 0,00078426
Qc	0,00095344	Qc	0,00056157	Qc	0,00087048	Qc	0,00083892	Qc	0,00081298	Qc	0,00078949
ΔV	0,6	ΔV	0,6	ΔV	0,6	ΔV	0,6	ΔV	0,6	ΔV	0,6
C	61,7987056	C	41,9815445	C	57,1864627	C	55,2148885	C	53,5494261	C	52,0354656

Tabla 2. Capacitancias obtenidas a partir del voltamperograma

V	C
50	61,8
100	59,61
150	57,19
200	55,21
250	53,55
300	52,04

Tabla 3. Consolidado Capacitancias obtenidas a partir del voltamperograma, a diferentes velocidades de barrido

Caracterización de la película de PPy por carga y descarga (GCD).



Grafica 4. Curva de carga – descarga galvanostática obtenida para la caracterización de la síntesis electroquímica por cronopotenciometría.

Cálculo de la capacitancia (GCD)

$$C_{sp} = \frac{I \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta V} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 7 se remplazan los valores obtenidos por el aplicativo Nova, como se muestra en la tabla 3.

1 descarga		2 descarga		3 descarga	
i	7,0892E-06	i	3,5465E-05	i	7,0929E-05
t	211,48	t	27,7	t	12,75
ΔV	0,599029	ΔV	0,592193	ΔV	0,584778
C	0,00250277	C	0,00165886	C	0,00154648
Csp	113,661613	Csp	75,3361871	Csp	70,232203

Tabla 4. Capacitancias obtenidas a partir de la curva de GCD

dC	Csp
0,1	113,7
0,5	115,3
1	105,6

Tabla 5. Consolidado capacitancias obtenidas a partir de la curva de GCD por densidad de corriente.

Calculo para el espesor de la película:

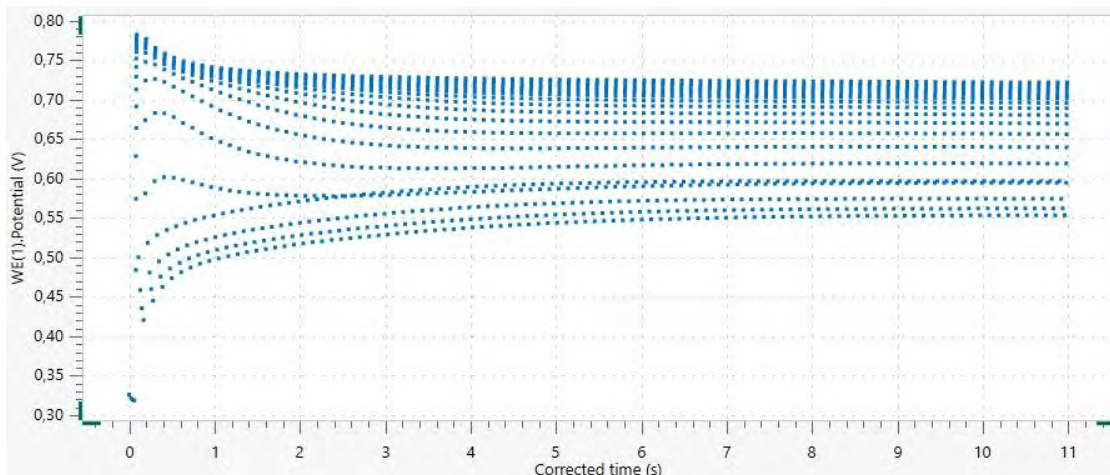
$$d_x = \frac{qM}{zF\rho} \quad (8)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 8 se remplazan los valores obtenidos por el aplicativo Nova, como se muestra en la tabla 6.

Q1	2,84E-04
Q2	4,54E-02
Area del electrodo	0,0000071
Q Total	6,44E+03
F	96485
z transferidos	2
m pirrol	0,06709
densidad	1500
espesor	1,49

Tabla 6. Datos obtenidos por el software Nova para el espesor de la 11película.

Guia número 3 de laboratorio: Síntesis por pulsos galvanostáticos y caracterización electroquímica del polipirrol



Grafica 5. Sintesis del PPy por Pulsos galvanostáticos

Calculo la masa del polipirrol.

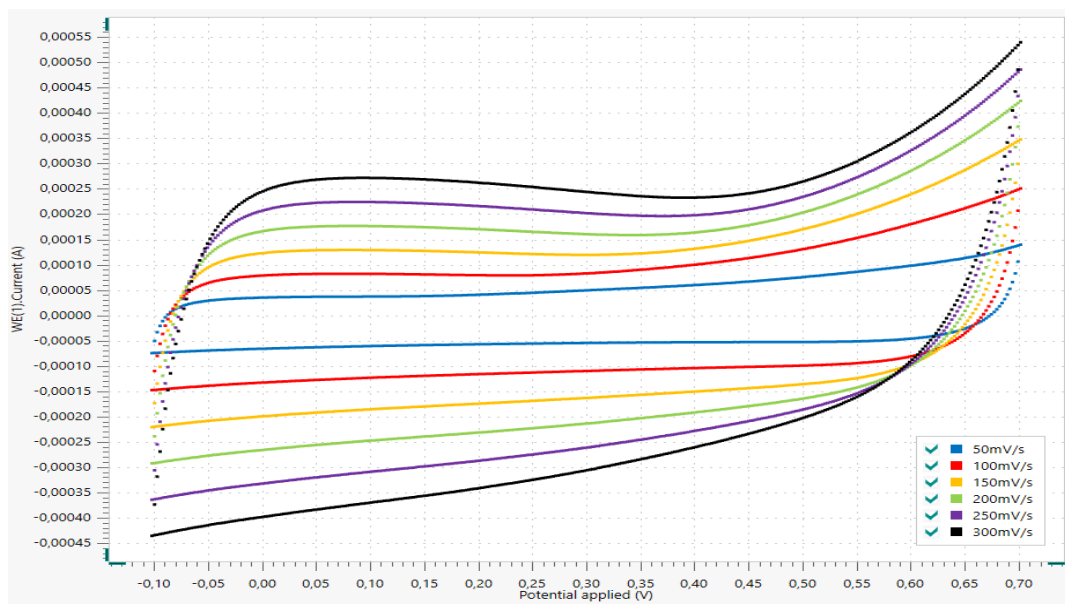
A partir de la ecuación:

Q1	1,95E-03
Q2	4,60E-02
Q Total	4,80E-02
F	96485
m pirrol	67,09
m (dopante)	172,2
y	0,33

Tabla 7. Datos obtenidos a partir de la síntesis por pulsos desde el aplicativo Nova

De esta manera, reemplazando los valores en la ecuación 5. La masa de polipirrol calculada es **m**
= $2,64 \times 10^{-5}$ g

Caracterización de la película de PPy por voltamperometría cíclica a diferentes velocidades de barrido.



Grafica 6. Voltamperograma obtenido para la caracterización de la síntesis electroquímica por pulsos.

Cálculo de la capacitancia (CV)

Teniendo en cuenta la ecuación 6 se remplazan los valores obtenidos por el aplicativo Nova, como se muestra en la tabla 8.

50 Mv/s		100 Mv/s		150 Mv/s		200 Mv/s		250 Mv/s		300 Mv/s	
Primer ciclo		Segundo ciclo		Tercer ciclo		Cuarto ciclo		Quinto ciclo		Sexto ciclo	
Qa	0,0008661 6	Qa	0,0008491 3	Qa	0,0008179 6	Qa	0,0007886 8	Qa	0,0007641 5	Qa	0,0007432 1
Qc	0,0009609 1	Qc	0,0008983 8	Qc	0,0008501 6	Qc	0,0008121 3	Qc	0,0007820 9	Qc	0,0007575 2

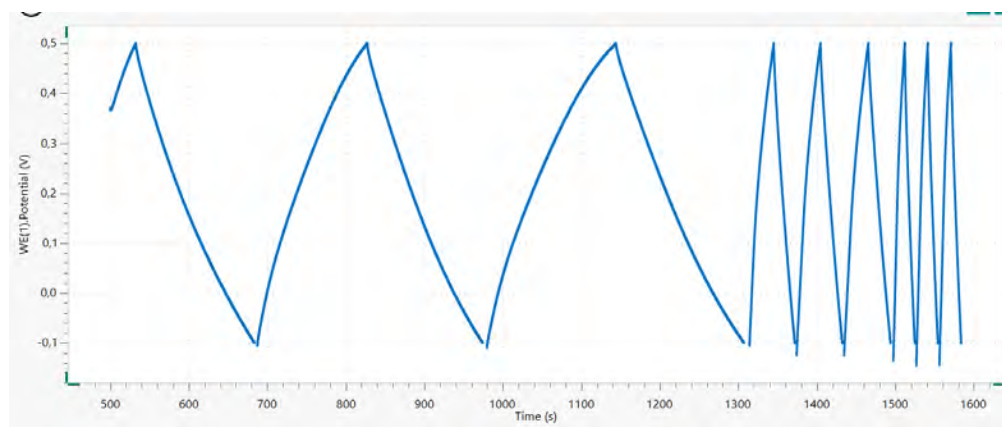
Δ V	0,8	Δ V	0,8	Δ V	0,8	Δ V	0,8	Δ V	0,8	Δ V	0,8
C	51,859691	C	49,601262	C	47,347801	C	45,437361	C	43,888333	C	42,596493
	1		8		8		1		7		6

Tabla 8. Capacitancias obtenidas a partir de la síntesis por pulsos desde el aplicativo Nova

V	C
50	51,86
100	49,6
150	47,35
200	45,44
250	43,89
300	42,6

Tabla 9. Consolidado Capacitancias obtenidas a partir del voltamperograma, a diferentes velocidades de barrido

Caracterización de la película de PPy por carga y descarga (GCD).



Grafica 7. Curva de carga – descarga galvanostática obtenida para la caracterización de la síntesis electroquímica por pulsos.

Cálculo de la capacitancia (GCD)

$$C_{sp} = \frac{I \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta V} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 7 se remplazan los valores obtenidos por el aplicativo Nova, como se muestra en la tabla 3.

1 descarga		2 descarga		3 descarga	
i	7,0892E-06	i	3,5465E-05	i	7,0929E-05
t	211,48	t	27,7	t	12,75
ΔV	0,599029	ΔV	0,592193	ΔV	0,584778
C	0,00250277	C	0,00165886	C	0,00154648
Csp	113,661613	Csp	75,3361871	Csp	70,232203

Tabla 10. Capacitancias obtenidas a partir de la curva de GCD para la síntesis por pulsos.

Dc	Csp
0,1	79,1
0,5	75,3
1	70,2

Tabla 11. Consolidado de capacitancias obtenidas a partir de la curva de GCD por densidad de carga.

Cálculo de el espesor de la película:

Teniendo en cuenta la ecuación 8 se remplazan los valores obtenidos por el aplicativo Nova, como se muestra en la tabla 12.

Q1	1,95E-03
Q2	4,60E-02
Area del electrodo	0,0000071
Q Total	6,76E+03
F	96485
z transferidos	2
m pirrol	0,06709
densidad	1500
espesor	1,57

Tabla 12. Datos obtenidos por el software Nova para el espesor de la 16 película.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Calibración electroquímica de los electrodos

La grafica 1 para el sistema ferri/ferrocianuro presentan pares de picos de oxidación y reducción bien definidos, lo que evidencia un comportamiento electroquímico reversible del sistema. La presencia de estos picos indica que las especies electroactivas pueden intercambiar electrones de manera eficiente en la superficie del electrodo, sin presentar pérdidas significativas por procesos irreversibles.

A medida que se incrementa la concentración de la solución, se observa un aumento proporcional en la intensidad de los picos de corriente, lo que refleja una mayor cantidad de especies disponibles

para participar en el proceso redox. Este comportamiento es consistente con la teoría electroquímica, donde la corriente es directamente proporcional a la concentración de la especie electroactiva bajo condiciones controladas por difusión.

Adicionalmente, al evaluar la dependencia de la corriente pico con la raíz cuadrada de la velocidad de barrido, se obtiene una relación lineal, lo cual es característico de sistemas donde el transporte de masa ocurre principalmente por difusión. Esta linealidad permite aplicar la ecuación de Randles-Sevcik para el cálculo del coeficiente de difusión, obteniéndose un valor de $2,61 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, como se muestra en la ecuación 1 y 2.

El valor obtenido se encuentra dentro del orden de magnitud de lo esperado, lo que indica que el sistema presenta un comportamiento electroquímico adecuado y que las condiciones experimentales permiten una correcta evaluación del transporte de especies. Asimismo, el cálculo del potencial medio del sistema Fc/Fc^+ arrojó valores consistentes, lo que confirma la estabilidad del electrodo de referencia y la reproducibilidad de las mediciones realizadas.

Síntesis de polipirrol por cronopotenciometría

La masa de polipirrol obtenida fue de $2,52 \times 10^{-5} \text{ g}$, valor determinado a partir de la carga total transferida durante el proceso de electropolimerización, ecuación 5. Este resultado refleja la cantidad de material depositado sobre la superficie del electrodo durante el tiempo de síntesis.

Durante la electropolimerización, el monómero de pirrol es oxidado en la superficie del electrodo, generando especies reactivas que se acoplan para formar estructuras diméricas y oligoméricas, las cuales continúan creciendo hasta formar una película polimérica continua. Este crecimiento está directamente relacionado con la cantidad de carga que fluye a través del sistema, lo que explica la relación observada entre carga y masa depositada.

El valor obtenido sugiere un crecimiento progresivo y controlado del polímero, favorecido por la aplicación de una corriente constante, lo que permite una deposición uniforme del material sobre la superficie del electrodo.

Los resultados de CV para esta síntesis muestran que la capacitancia disminuye progresivamente desde 61,8 F/g hasta 52,0 F/g al aumentar la velocidad de barrido entre 50 y 300 Mv/s, según la

tabla 3. Este comportamiento se evidencia en las gráficas como una reducción en el área encerrada por los ciclos, como se muestra en la gráfica 3.

A bajas velocidades de barrido, las curvas presentan una mayor área, lo que indica una mayor cantidad de carga almacenada durante el ciclo. Esto sugiere que el sistema dispone del tiempo suficiente para que ocurran los procesos electroquímicos asociados al material. A medida que aumenta la velocidad, las curvas se hacen más estrechas y el área disminuye, lo que indica una reducción en la cantidad de carga almacenada.

Las curvas presentan una forma cuasi-rectangular, con ligeras deformaciones en los extremos, lo que indica que el comportamiento del material combina características de almacenamiento capacitivo con procesos adicionales que afectan la forma ideal de la respuesta.

Ahora bien, las curvas de carga-descarga galvanostática que se muestran en la gráfica 4 presentan una forma aproximadamente triangular, lo que es característico de materiales con comportamiento capacitivo. A partir de estas curvas, se obtuvieron valores de capacitancia específica cercanos a 113 F/g, como se muestra en las tablas 4 y 5.

Se observa que el tiempo de descarga disminuye a medida que aumenta la corriente aplicada, lo cual es consistente con una descarga más rápida del sistema bajo condiciones de mayor exigencia. A pesar de esto, los valores de capacitancia se mantienen relativamente constantes, lo que indica una respuesta estable del material frente a diferentes condiciones experimentales.

La forma de las curvas es relativamente simétrica entre los procesos de carga y descarga, lo que sugiere que el sistema presenta un comportamiento reproducible y una buena eficiencia en el almacenamiento y liberación de carga.

Finalmente, el espesor de la película fue estimado en 1,49 μm para esta síntesis como se muestra en la tabla 6, valor que corresponde a la cantidad de material depositado distribuido sobre el área del electrodo.

Este espesor indica la formación de una película delgada, coherente con el tiempo de síntesis y la corriente aplicada. La formación de una película de estas características permite una adecuada

interacción entre el material y el electrolito, lo que se refleja en la respuesta electroquímica observada

Síntesis de polipirrol por pulsos galvanostáticos

La masa de polipirrol obtenida mediante esta técnica fue de $2,64 \times 10^{-5}$ g, valor ligeramente superior al obtenido por cronopotenciometría. Este resultado evidencia que la aplicación de pulsos galvanostáticos favorece un mayor depósito de material sobre la superficie del electrodo. Durante la síntesis, los pulsos de corriente generan periodos cortos de oxidación del monómero de pirrol, en los cuales se forman radicales catiónicos que inician el crecimiento de las cadenas poliméricas. Posteriormente, los tiempos de reposo (corriente cero) permiten la relajación del sistema, facilitando la redistribución de especies en solución, la reorganización de los oligómeros formados y la difusión de los aniones dopantes hacia el interior de la película en crecimiento.

Esta alternancia entre etapas de crecimiento y relajación favorece una acumulación progresiva del material, lo que se traduce en una mayor masa final. Además, estos periodos de reposo evitan una sobresaturación local de especies reactivas en la superficie del electrodo, influyendo en la forma en que el polímero se deposita y en la estructura final de la película.

Los valores de capacitancia obtenidos mediante voltamperometría cíclica, gráfica 6. se encuentran en el rango de 51,8 F/g a 42,6 F/g, disminuyendo progresivamente con el aumento de la velocidad de barrido, como se observa en las tablas 8 y 9. En las gráficas de CV, este comportamiento se refleja en una reducción del área bajo la curva y en una menor amplitud de la respuesta de corriente. Aunque las curvas mantienen una forma cuasi-rectangular, característica de materiales con comportamiento capacitivo, presentan una menor extensión en comparación con la síntesis por cronopotenciometría.

A bajas velocidades de barrido, el sistema presenta una mayor respuesta electroquímica, lo que indica que los iones del electrolito tienen el tiempo suficiente para penetrar en la estructura del polímero y acceder tanto a los sitios superficiales como a los internos. Sin embargo, al aumentar la velocidad de barrido, la capacitancia disminuye debido a limitaciones cinéticas y difusionales, ya que, a altas velocidades, los iones no alcanzan a difundirse completamente dentro de la matriz del

polipirrol. En consecuencia, solo contribuyen los sitios más accesibles en la superficie del material, mientras que los sitios internos quedan parcialmente inactivos.

Este fenómeno explica que, a pesar de la mayor masa depositada mediante pulsos galvanostáticos, la capacitancia específica sea menor. En las gráficas se evidencia que el área encerrada es inferior en comparación con la otra técnica, lo que indica que la cantidad de carga almacenada por unidad de masa es menor. Esto sugiere que no solo la cantidad de material depositado es determinante, sino también su organización estructural y la accesibilidad iónica dentro de la película, factores que controlan directamente el desempeño electroquímico del sistema.

Las curvas de carga-descarga galvanostática, grafica 7, presentan una forma aproximadamente triangular, lo que indica un comportamiento capacitivo general del material, característico de procesos donde la carga y descarga ocurren de manera relativamente lineal en el tiempo. Sin embargo, en comparación con la cronopotenciometría, se observan ligeras desviaciones en la simetría entre los procesos de carga y descarga, lo que sugiere la presencia de resistencias internas o limitaciones en el transporte iónico dentro de la película.

Los valores de capacitancia específica se encuentran entre 79 F/g y 70 F/g, como se muestra en las tablas 10 y 11 mostrando una disminución respecto a la otra técnica. Esta diferencia se refleja directamente en los tiempos de descarga, los cuales son menores bajo condiciones similares de corriente aplicada. En términos electroquímicos, la capacitancia en ensayos galvanostáticos está relacionada con la cantidad de carga almacenada, de acuerdo con la relación $C \propto \frac{I \Delta t}{\Delta V}$. Por lo tanto, una disminución en el tiempo de descarga implica que el sistema libera la carga más rápidamente, lo que indica una menor cantidad de carga almacenada por unidad de masa.

A medida que aumenta la corriente, el tiempo de descarga disminuye, lo cual no solo representa una respuesta más rápida del sistema, sino también una limitación en la capacidad del polipirrol para almacenar carga de manera eficiente. Esto se debe a que, a corrientes más altas, el proceso de inserción y extracción de iones ocurre en tiempos más cortos, impidiendo que los iones penetren completamente en la estructura del polímero. En consecuencia, solo participan los sitios más superficiales en el almacenamiento de carga, reduciendo la capacitancia efectiva.

En este sentido, un aumento de corriente no implica una mejora en el almacenamiento, sino una disminución en la eficiencia del proceso capacitivo, ya que el material no logra aprovechar completamente su volumen activo. Por el contrario, a corrientes más bajas, los iones disponen de mayor tiempo para difundirse y ocupar sitios internos, lo que favorece una mayor acumulación de carga y, por ende, una mayor capacitancia.

Las curvas mantienen una forma relativamente estable entre ciclos, lo que indica que el sistema conserva su comportamiento electroquímico durante las mediciones, evidenciando una buena estabilidad. No obstante, la menor capacitancia observada confirma que, aunque el material es electroquímicamente consistente, su capacidad de almacenamiento de carga es inferior, lo que está directamente relacionado con limitaciones en la accesibilidad iónica y en la utilización efectiva de la masa depositada.

El espesor de la película fue calculado en $1,57\ \mu\text{m}$ como se muestra en la tabla 12, valor superior al obtenido mediante cronopotenciometría. Este resultado es coherente con la mayor masa depositada durante la síntesis, indicando que la técnica de pulsos galvanostáticos favorece un crecimiento más significativo del polímero sobre la superficie del electrodo.

El aumento en el espesor indica que el crecimiento del polímero es más pronunciado bajo condiciones de pulsos galvanostáticos. La alternancia entre pulsos de corriente y tiempos de reposo permite que el material continúe acumulándose en la superficie del electrodo, generando una película más gruesa. Durante los pulsos, se favorece la oxidación del monómero y la formación de cadenas poliméricas, mientras que en los tiempos de reposo se facilita la difusión de especies en solución y la reorganización estructural del material ya depositado.

En este contexto, cambios en variables como la corriente aplicada, el tiempo de síntesis y el número de ciclos o pulsos influyen directamente en el espesor de la película. Un aumento en la corriente incrementa la velocidad de generación de especies reactivas, promoviendo un crecimiento más rápido del polímero, aunque puede generar depósitos menos uniformes. De manera similar, un mayor tiempo de síntesis o un mayor número de pulsos implica más eventos de oxidación y, por tanto, una acumulación progresiva de material que conduce a películas más gruesas. Además, los tiempos de reposo entre pulsos permiten que los iones dopantes se difundan hacia el interior de la

estructura, favoreciendo no solo el crecimiento en cantidad sino también la consolidación del material. En conjunto, estas variables controlan tanto la cantidad de material depositado como su distribución, lo que se traduce directamente en el espesor final de la película.

Este mayor espesor se refleja directamente en los valores experimentales obtenidos, tanto en la masa como en las mediciones electroquímicas, evidenciando un cambio en las características del material depositado. Sin embargo, un incremento en el espesor no necesariamente implica una mejora en el desempeño electroquímico, ya que capas más gruesas pueden presentar limitaciones en la difusión iónica hacia las regiones internas del polímero.

Al comparar con la técnica de cronopotenciometría, donde el espesor obtenido fue menor, se evidencia que el crecimiento del polímero ocurre de manera más controlada y posiblemente más compacta. Un menor espesor en este caso puede indicar la formación de películas más uniformes y con mejor accesibilidad iónica, lo que favorece el aprovechamiento efectivo del material en los procesos de almacenamiento de carga. En contraste, el mayor espesor obtenido mediante pulsos galvanostáticos sugiere una acumulación más rápida pero potencialmente menos organizada, lo que puede generar zonas internas menos accesibles para los iones y explicar por qué, a pesar de tener mayor masa y espesor, la capacitancia específica resulta inferior.

De esta manera, el material presenta una buena estabilidad electroquímica, lo cual es un aspecto fundamental para su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía como los supercapacitores. Sin embargo, la menor capacitancia específica observada, asociada a limitaciones en la accesibilidad iónica y al posible exceso de espesor de la película, sugiere que, en su estado actual, el sistema no aprovecha completamente su potencial como material activo. Esto no descarta su viabilidad, sino que indica la necesidad de optimizar las condiciones de síntesis para lograr una estructura más porosa, homogénea y accesible a los iones del electrolito. En este sentido, el polipirrol obtenido sí podría ser utilizado en capacitores, pero su desempeño estaría condicionado a mejoras en la arquitectura del material que permitan incrementar la eficiencia en el almacenamiento de carga por unidad de masa.

REFERENCIAS

Pérez-Torres, A. F., et al. (2022). *Statistical study of the influence of electrosynthesis conditions on polypyrrole films*. ACS Omega, 7(6), 5071–5080. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06843>

Liu, A. S., et al. (2007). *Electrodeposition of polypyrrole films on aluminum from tartrate aqueous solution*. Journal of the Brazilian Chemical Society, 18(7), 1433–1439.

<https://doi.org/10.1590/S0103-50532007000700023>

Sharma, P. K., et al. (2010). *Synthesis and characterization of polypyrrole by cyclic voltammetry*. Materials Chemistry and Physics, 120(1), 235–241.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.11.020>