

# Técnicas electroquímicas básicas para la caracterización de materiales pseudocapacitivos: estudio de caso en CPE-K

## Basic electrochemical techniques for the characterization of pseudocapacitive materials: a case study of CPE-K

Óscar Medrano, Samuel Benjamin Baker y Ricardo Javier Vázquez\*

Departamento de Química, Universidad de Indiana, Bloomington, Indiana, EE. UU.

### PALABRAS CLAVE:

Pseudocapacitancia  
Voltametría cíclica  
Impedancia  
Almacenamiento de cargas

### RESUMEN:

Los materiales pseudocapacitivos son de gran interés académico e industrial porque tienen el potencial de combinar la alta densidad de energía de las baterías con la alta densidad de potencia de los capacitores. La pseudocapacitancia puede caracterizarse mediante voltametría cíclica, espectroscopía de impedancia electroquímica y carga-descarga galvanostática, utilizando celdas de tres electrodos, técnicas que además proporcionan información sobre la conducción iónica y electrónica. En esta contribución discutimos un estudio de caso que utiliza estas técnicas básicas para caracterizar CPE-K, el polielectrolito conjugado autodopado arquetípico. CPE-K posee un esqueleto  $\pi$ -conjugado y cadenas iónicas que favorecen su solubilidad en medios acuosos. Esta arquitectura molecular única favorece la formación de polarones positivos (autodopados), fundamentales para el comportamiento pseudocapacitivo de este material.

### KEYWORDS:

Pseudocapacitance  
Cyclic voltammetry  
Impedance  
Charge Storage

### ABSTRACT:

Pseudocapacitive materials have attracted considerable academic and industrial interest because they have the potential to combine the high energy density of batteries with the high power density of capacitors. Pseudocapacitance can be characterized using cyclic voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy, and galvanostatic charge-discharge measurements in a three-electrode configuration, techniques that also provide valuable insight into ionic and electronic transport. In this contribution, we present a case study demonstrating the application of these fundamental electrochemical techniques to characterize CPE-K, an archetypal self-doped conjugated polyelectrolyte with pseudocapacitive characteristics. CPE-K possesses a  $\pi$ -conjugated backbone and pendant ionic side chains that impart water solubility. This unique molecular architecture promotes the formation of positive polarons (self-doped), which are essential for the pseudocapacitive behavior of the material.

### Introducción

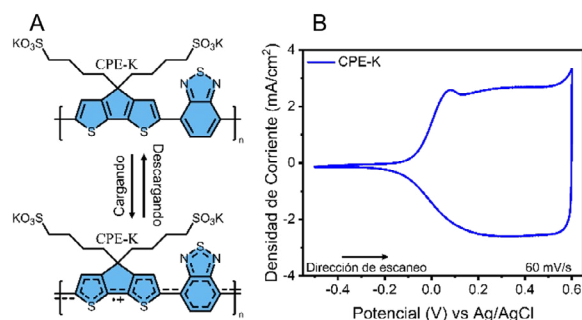
Los métodos tradicionales de almacenamiento de energía se basan en mecanismos de almacenamiento de carga, tanto faradaicos como no faradaicos.<sup>[1-3]</sup> Los procesos faradaicos se caracterizan por depender de reacciones de transferencia de electrones (oxidación-reducción) y de cambios en el estado de oxidación del material. Los mecanismos faradaicos son característicos de las baterías y presentan intrínsecamente alta densidad de energía (capacidad para almacenar y proveer cargas durante largo tiempo), pero una baja densidad de potencia (capacidad para cargarse y descargarse rápidamente).<sup>[3]</sup> Por otro lado, los mecanismos no faradaicos almacenan carga mediante procesos de asociación iónica superficiales. Este comportamiento es característico de los capacitores eléctricos de doble capa (EDLC, por sus siglas en inglés), en los que la carga se almacena electrostáticamente en la interfaz electrodo/electrolito mediante la formación de una doble capa eléctrica, en la que los iones del electrolito se adsorben o se

asocian a la superficie del electrodo.<sup>[1,4]</sup> Como consecuencia, los EDLC presentan altas densidades de potencia debido a sus procesos de carga y descarga rápidos, aunque poseen densidades de energía relativamente bajas.

Los materiales pseudocapacitivos almacenan energía mediante reacciones faradaicas iniciales y reversibles que tienen lugar en su superficie cuando se emplean como electrodo. Estas reacciones van acompañadas de la inserción o extracción de contraiones del electrolito, que compensan los cambios en el estado de oxidación del material y mantienen la "electroneutralidad", lo que potencialmente permite alcanzar altas densidades de energía y una alta capacidad de carga y descarga rápida en un mismo material.<sup>[4-6]</sup> Por ende, los materiales pseudocapacitivos son de gran interés académico e industrial porque tienen el potencial de combinar la alta densidad de energía de las baterías con la alta densidad de potencia de los capacitores.<sup>[6,7]</sup> Además, la pseudocapacitancia genera un estado dopado

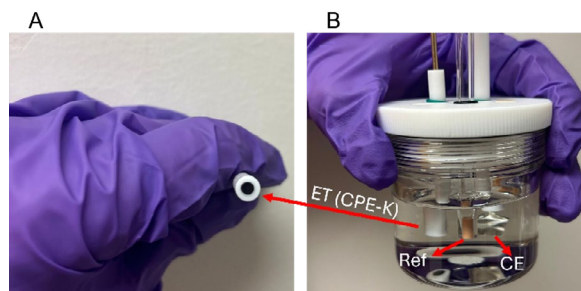
con transporte mixto iónico-electrónico, responsable de aplicaciones como la generación de biocorriente, la transducción iónica-electrónica, el transporte de huecos y el almacenamiento de energía. En CPEs autodopados como el CPE-K, este comportamiento se atribuye a la formación y estabilización de polarones y a una red intermolecular electroquímicamente activa que se extiende desde el colector de corriente, lo cual facilita el transporte simultáneo de iones y cargas electrónicas a través del material.

En este artículo se presentan y discuten las técnicas electroquímicas básicas empleadas para la caracterización de materiales pseudocapacitivos: voltametría cíclica, espectroscopía de impedancia electroquímica y carga-descarga galvanostática. Esta contribución didáctica está dirigida principalmente a estudiantes de química de nivel subgraduado avanzado y primeros años de posgrado con conocimientos básicos de química general, reacciones de oxidación-reducción, potencial, corriente y ley de Ohm. A partir de estos conceptos, se introducen herramientas electroquímicas para relacionar las respuestas experimentales con los mecanismos de almacenamiento y transporte de carga en materiales pseudocapacitivos. Como modelo de material pseudocapacitivo, utilizaremos CPE-K en este estudio didáctico, el polielektrolito conjugado autodopado arquetípico (Figura 1A).<sup>[8-15]</sup> CPE-K se caracteriza por presentar un esqueleto  $\pi$ -conjugado y cadenas iónicas, lo que favorece su solubilidad en medios acuosos. Esta arquitectura molecular favorece la formación de polarones positivos (autodopado) cuando se carga (Figura 1A-B), fundamentales para obtener el comportamiento pseudocapacitivo de este material.



**Figura 1.** (A) Estructura química de CPE-K en estado cargado y descargado, que muestra la formación del polaron. (B) Voltametría cíclica de CPE-K a una velocidad de barrido de 60 mV/s.

Para preparar el electrodo de trabajo, se disolvió CPE-K en agua a una concentración de 5 mg/mL. De esta solución, se depositaron 10  $\mu\text{L}$  de la dispersión sobre un electrodo de carbono vítreo de 3 mm de diámetro y se dejó secar al aire libre durante toda la noche para obtener una capa delgada y homogénea (Figura 2A). Como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de Ag/AgCl en (KCl 3.5 M), mientras que el contraelectrodo consistió en una placa cuadrada de platino con un área de 100 mm<sup>2</sup>. El electrolito empleado fue una disolución de NaCl 2 M, cuya concentración, según la literatura, maximiza las propiedades pseudocapacitivas de CPE-K.<sup>[11]</sup> Cabe resaltar que estas caracterizaciones se realizan en celdas de tres electrodos - trabajo (ET), referencia (Ref) y contraelectrodo (CE) - (Figura 2), lo que permite controlar con precisión el potencial aplicado al material y determinar propiedades como el potencial redox, la resistencia de transferencia de carga y la capacitancia.



**Figura 2.** (A) Electrodo de trabajo (ET) de carbono con CPE-K depositado. (B) Esquema del sistema de 3 electrodos: electrodo de trabajo (ET), electrodo de referencia (Ref) y contraelectrodo (CE).

### Voltametría cíclica

La voltametría cíclica es una técnica electroquímica en la que se aplica un cambio de potencial (voltaje) en función del tiempo (barrido cíclico) para oxidar y/o reducir un material, y se mide la corriente en respuesta a dicho potencial.<sup>[16]</sup> Es importante destacar que es posible modificar la escala de tiempo del experimento mediante la velocidad de barrido. Dependiendo del mecanismo de almacenamiento de carga, se obtienen diferentes respuestas voltamétricas. En la Figura 1B se muestra la respuesta electroquímica mediante voltametría cíclica de CPE-K a una velocidad de barrido de 60 mV/s, junto con sus estructuras moleculares en estado neutro y en estado dopado (Figura 1A). Se observa un pico consistente con un proceso faradaico a 0.1 V, correspondiente a la oxidación y la formación del polaron en CPE-K. La respuesta farádica va seguida de una respuesta anódica de corriente constante, característica de los capacitores e independiente del potencial aplicado, que presenta una forma cuasirrectangular. La misma corresponde a la asociación de los iones  $\text{Cl}^-$  del electrolito con el polaron positivo de CPE-K, lo que contribuye tanto a la formación de la doble capa eléctrica como al comportamiento pseudocapacitivo del material.<sup>[17]</sup> La observación de ambos procesos, faradaicos (0.1 V) y no faradaicos (respuesta rectangular), en CPE-K demuestra su capacidad pseudocapacitiva y constituye una señal arquetípica de materiales pseudocapacitivos. Para más detalles sobre estos procesos electroquímicos con cambios físicos en el material, se recomienda consultar los trabajos de Mathis *et al.* y de Fleischmann *et al.*<sup>[3,4]</sup>

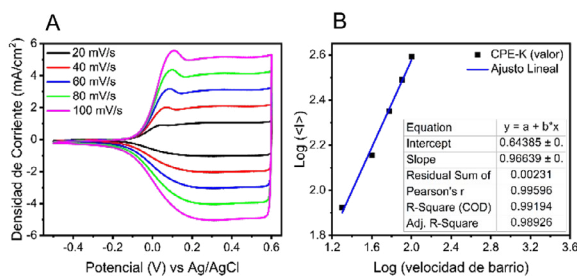
Obtener la respuesta electroquímica en función de diferentes velocidades de barrido es un parámetro importante al analizar la voltametría cíclica. La velocidad de barrido determina la escala temporal del barrido cíclico. Es posible modificar la escala temporal del experimento ajustando la velocidad de barrido. En términos cualitativos, la dependencia de la corriente electroquímica con la velocidad de barrido puede describirse mediante la Ecuación 1:<sup>[3,15]</sup>

$$\langle I \rangle_p \propto v^b$$

**Ecuación 1.**

en donde  $\langle I \rangle_p$  es el pico de corriente faradaica y  $v$  es la velocidad de barrido. La pendiente de la regresión lineal en la gráfica log-log corresponde a  $b$ . Un valor de  $b$  cercano a 1 indica que el material está dominado por pseudocapacitancia controlada en la interfaz material-electrolito, lo cual es ideal para este tipo de materiales.<sup>[3,10,11]</sup> En cambio, valores de  $b$  cercanos a 0.5 indican un almacenamiento de carga limitado por difusión. Los procesos limitados por difusión indican que los iones en la disolución electrolítica tienen dificultad para acceder a los sitios electroactivos del material pseudocapacitivo.<sup>[18]</sup>

Es importante destacar que la respuesta pseudocapacitiva de CPE-K se mantiene simétrica a medida que aumenta la velocidad de barrido (Figura 3A). Se puede transformar la información de la Figura 3A usando la Ecuación 1, lo que revela que CPE-K tiene un valor de  $b$  de 0.97 (Figura 3B), lo cual evidencia su alto comportamiento pseudocapacitivo. En el contexto de CPE-K, un valor de  $b$  de 0.97 indica que la respuesta está predominantemente controlada por procesos superficiales/pseudocapacitivos y presenta una dependencia mínima de procesos limitados por difusión a las velocidades de barrido utilizadas.<sup>[5,19]</sup>

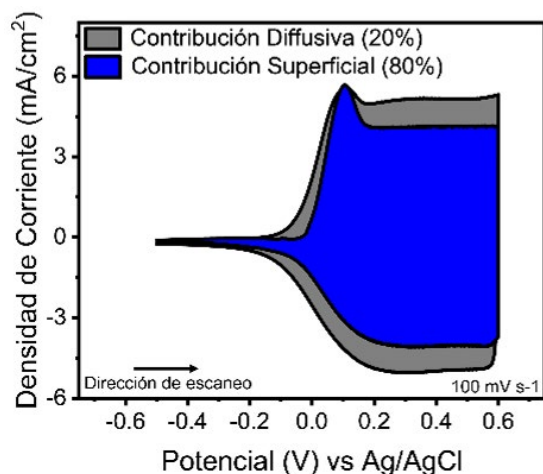


**Figura 3.** (A) Voltametría cíclica de CPE-K a velocidades de barrido de 20, 40, 60, 80 y 100 mV/s. (B) Gráfica de  $\log$  (corriente faradaica) versus  $\log$  (velocidad de barrido) para determinar el valor de  $b$  a partir de la Ecuación 1.

En términos cualitativos, el método de Dunn aplicado a voltametrías cíclicas obtenidas a diferentes velocidades de barrido permite separar la contribución capacitiva, o controlada por superficie, de la contribución controlada por difusión, definida en la Ecuación 2:

$$i(V) = k_1 v + k_2 v^{1/2} \quad \text{Ecuación 2.}$$

en donde  $k_1 v$  representa la corriente controlada por superficie y  $k_2 v^{1/2}$  la corriente controlada por difusión. Al medir la voltametría cíclica a diferentes velocidades de barrido y graficar  $i/v^{1/2}$  vs.  $v^{1/2}$  para cada potencial, se obtienen  $k_1$  y  $k_2$ , permitiendo cuantificar y separar ambas contribuciones de la corriente total. En la Figura 4 se muestra la aplicación del método de Dunn, donde, a una velocidad de barrido de 100 mV/s, se obtiene una contribución difusiva del 20 % y una superficial del 80 %. Esta distribución corresponde únicamente a esta velocidad de barrido, ya que las contribuciones relativas de los procesos superficiales y difusivos dependen de la velocidad de barrido.



**Figura 4.** Contribución difusiva y superficial durante la carga de CPE-K a una velocidad de barrido de 100 mV/s.

## Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE): transporte de cargas e iones

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE) es una técnica que mide la impedancia de un sistema electroquímico en función de la frecuencia mediante la aplicación de pequeñas perturbaciones sinusoidales, según la ley de Ohm. La impedancia describe la oposición del sistema al flujo de corriente alterna y se expresa como una cantidad compleja en la Ecuación 3:

$$Z = Z' + jZ'' \quad \text{Ecuación 3.}$$

donde  $Z'$  y  $Z''$  corresponden a las componentes real e imaginaria de la impedancia, respectivamente. En una EIE potencioestática se aplica una perturbación de potencial y se mide la respuesta de corriente, mientras que en una EIE galvanostática se aplica una perturbación de corriente y se registra la respuesta de potencial. La relación entre ambas señales permite determinar la resistencia del sistema y separar las contribuciones resistivas provenientes de procesos asociados al transporte de carga e iones.<sup>[10,12,13,20]</sup>

Para la EIE, una de las representaciones más utilizadas es el diagrama de Nyquist (Figura 5A-B), en el que la parte imaginaria de la impedancia ( $-Z''$ ) se representa en función de la parte real ( $Z'$ ). Esta representación permite distinguir los diferentes procesos electroquímicos según la frecuencia: a altas frecuencias predominan la resistencia de la disolución y la transferencia de carga en la interfaz electrodo/electrolito, mientras que a bajas frecuencias predominan los procesos de difusión iónica y el almacenamiento de carga pseudocapacitivo.<sup>[9-12,15,21]</sup>

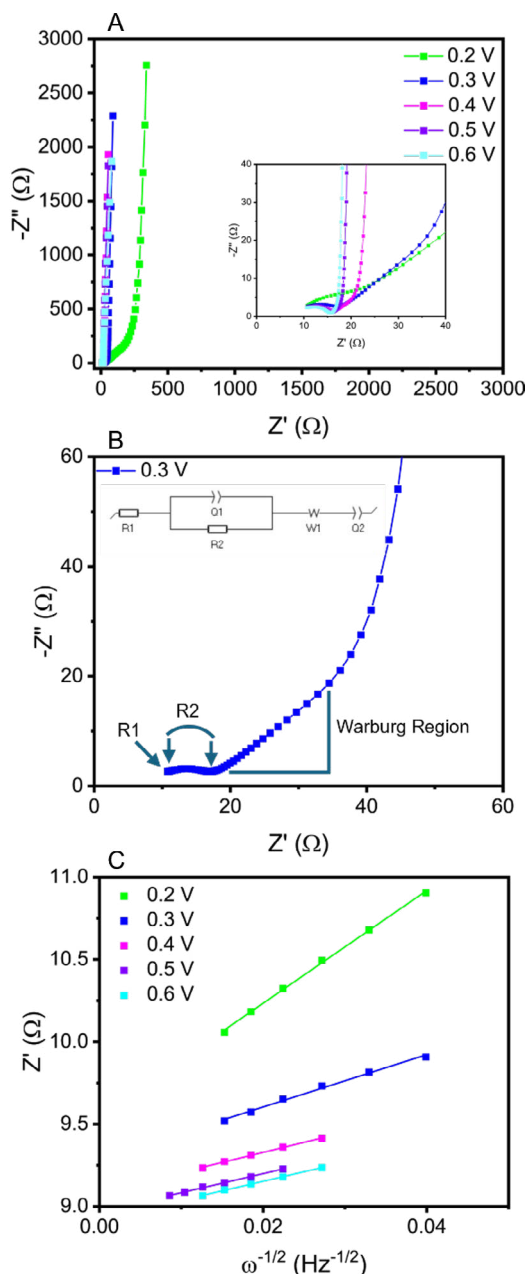
En términos cualitativos, a altas frecuencias se observa un semicírculo asociado con la resistencia de transferencia de carga ( $R_{CT}$ ). A frecuencias intermedias-bajas se observa una región aproximadamente lineal con un ángulo cercano a  $45^\circ$ , asociada al transporte difusivo de iones. A frecuencias aún menores, la respuesta se verticaliza y se desvía del comportamiento de Warburg semiinfinito, lo que refleja el carácter pseudocapacitivo ideal y creciente de la película. La Figura 5A muestra los diagramas de Nyquist de CPE-K obtenidos entre 0.2 y 0.6 V vs Ag/AgCl, donde se observa una reducción de  $R_{CT}$  concomitante con una respuesta de Warburg seguida de una verticalización en la región de bajas frecuencias, lo que indica un incremento en el carácter capacitivo de CPE-K (Figura 5A-B) a voltajes cercanos a 0.6 V.<sup>[9-12,22]</sup> Dado que la respuesta de impedancia depende del estado de oxidación del material, se recomienda realizar las mediciones a un potencial en el que el material pseudocapacitivo esté dopado.

Para obtener información cuantitativa del diagrama de Nyquist, los espectros, adquiridos en un intervalo de frecuencias de 100 mHz a 1 MHz, se ajustaron mediante un circuito equivalente de Randles modificado para describir el comportamiento electroquímico del material, según la Ecuación 4:<sup>[11,15]</sup>

$$R_s + (Q_{DL}/R_{CT}) + W + Q_{GEOM} \quad \text{Ecuación 4.}$$

En este circuito,  $R_s = R_i$  y representa la resistencia del electrolito,  $Q_{DL} = Q_i$  y representa el comportamiento no ideal de la doble capa eléctrica asociada a la capacitancia,  $R_{CT} = R_e$  y representa la resistencia de transferencia de carga,  $W = W_i$  y representa la impedancia de Warburg asociada a la difusión de iones y  $Q_{GEOM} = Q_2$  y representa la pseudocapacitancia del material. Los elementos  $Q_{DL}$  y  $Q_{GEOM}$  se emplean para describir la respuesta capacitiva no ideal originada por la heterogeneidad estructural y electroquímica de las películas del-

gadas de CPE-K.<sup>[18-23]</sup> Debemos resaltar que el elemento  $W_1$  se utiliza únicamente como parte del ajuste global del espectro y que su valor no se emplea para cuantificar la difusión iónica. Usando este modelo, la  $R_{CT}$  de CPE-K disminuye de  $9.038 \Omega$  a  $5.453 \Omega$  cuando el potencial usado para la caracterización EIE aumenta de 0.2 V a 0.6 V (Tabla 1).



**Figura 5.** (A) Diagramas de Nyquist de CPE-K entre 0.2 y 0.6 V vs Ag/AgCl. (B) Diagrama de Nyquist de CPE-K a 0.3 V versus Ag/AgCl y el circuito equivalente utilizado para el ajuste, ampliado para mostrar el comportamiento de tipo semicircular en la región de altas frecuencias asociado a la resistencia de transferencia de carga. (C) Análisis de Warburg de los datos de EIE entre 0.2 y 0.6 V vs Ag/AgCl para determinar  $\sigma_W$  a partir de la región aproximadamente lineal de  $45^\circ$ .

**Tabla 1.** Valores de  $R_{CT}$  y  $\sigma_W$  de CPE-K para cada potencial investigado mediante EIE.

| Potencial | $R_{CT} (\Omega)$ | $\sigma_W (\Omega \cdot s^{-1/2})$ |
|-----------|-------------------|------------------------------------|
| 0.2 V     | 9.038             | 34.25                              |
| 0.3 V     | 7.170             | 15.91                              |
| 0.4 V     | 6.302             | 12.20                              |
| 0.5 V     | 5.689             | 11.59                              |
| 0.6 V     | 5.453             | 11.58                              |

De forma independiente del ajuste del circuito equivalente, el factor de Warburg ( $\sigma_W$ ) se determinó directamente a partir de los datos experimentales. Para ello, se seleccionó únicamente la región del diagrama de Nyquist con un comportamiento aproximadamente de tipo Warburg (Figura 5B), caracterizada por una pendiente cercana a  $45^\circ$ . La región de baja frecuencia con pendiente  $> 45^\circ$  debe excluirse de este análisis, ya que se desvía del comportamiento de difusión semiinfinita. Los datos seleccionados se representaron como la parte real de la impedancia ( $Z'$ ) en función de  $\omega^{-1/2}$ , según la Ecuación 5:<sup>[11,15]</sup>

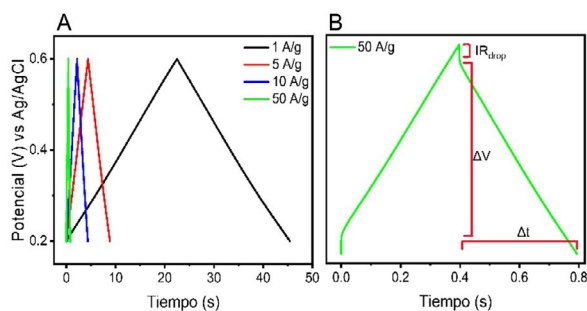
$$Z' = R_s + R_{CT} + \sigma_W \omega^{-1/2} \quad \text{Ecuación 5.}$$

donde  $R_s = R_1$  y representa la resistencia de la disolución,  $R_{CT} = R_2$  y representa la resistencia de transferencia de carga,  $\omega$  es la frecuencia angular en la región Warburg (específica para valores con pendiente de  $45^\circ$ ) y  $\sigma_W$  es el factor de Warburg (ver Figura 5C).<sup>[10,11,15]</sup> Es importante señalar que el valor  $\sigma_W$  se calcula manualmente a partir de la Ecuación 5, y no es un valor extraído del circuito en la Ecuación 4. Esto se debe a que el circuito se modeló con un componente Warburg semiinfinito, y no uno finito. Un valor bajo de  $\sigma_W$  indica una menor impedancia asociada al transporte difusivo de iones y es consistente con un transporte iónico más favorable.<sup>[9,13,15,18,23]</sup> Mediante este análisis,  $\sigma_W$  disminuye de  $34.25 \Omega \cdot s^{-1/2}$  a  $11.58 \Omega \cdot s^{-1/2}$  al aumentar el potencial de caracterización EIE de 0.2 V a 0.6 V (Tabla 1).

### Ciclo de carga y descarga galvanostática

La carga-descarga galvanostática (CDG) es la técnica de referencia para evaluar el desempeño de materiales pseudo-capacitivos, ya que permite determinar la capacitancia, la capacidad operativa a diferentes densidades de corriente, la eficiencia coulombica y la estabilidad durante el ciclado. En esta técnica, el material se carga y descarga aplicando una corriente constante, mientras se registra la variación del potencial en función del tiempo. La ventana de potencial utilizada para las mediciones de CDG se determina previamente mediante voltametría cíclica, de modo que el material opere en la región en la que presenta un comportamiento pseudo capacitivo estable.

En el caso de CPE-K, la voltametría cíclica mostró que esta ventana se encuentra entre 0.2 y 0.6 V vs Ag/AgCl (Figuras 1B y 3A); por lo tanto, es prudente realizar las mediciones de CDG dentro de este intervalo de potencial. Las Figuras 6A y 6B muestran los perfiles de carga y descarga obtenidos a diferentes corrientes específicas. Al incrementar la corriente específica, definida como la corriente aplicada normalizada por la masa del material electroactivo ( $A \cdot g^{-1}$ ), el tiempo de un ciclo completo disminuyó de aproximadamente 45 s a 0.8 s al aumentar la corriente de 1 a  $50 A \cdot g^{-1}$ , sin deteriorar de manera significativa el perfil galvanostático (Figura 6), lo que refleja la propensión de CPE-K para operar a altas velocidades de carga y descarga.



**Figura 6.** (A) Perfiles galvanostáticos de carga-descarga de CPE-K a diferentes corrientes. (B) Perfil galvanostático de carga-descarga a 50 A/g que ilustra las contribuciones de las variables de la Ecuación 6.

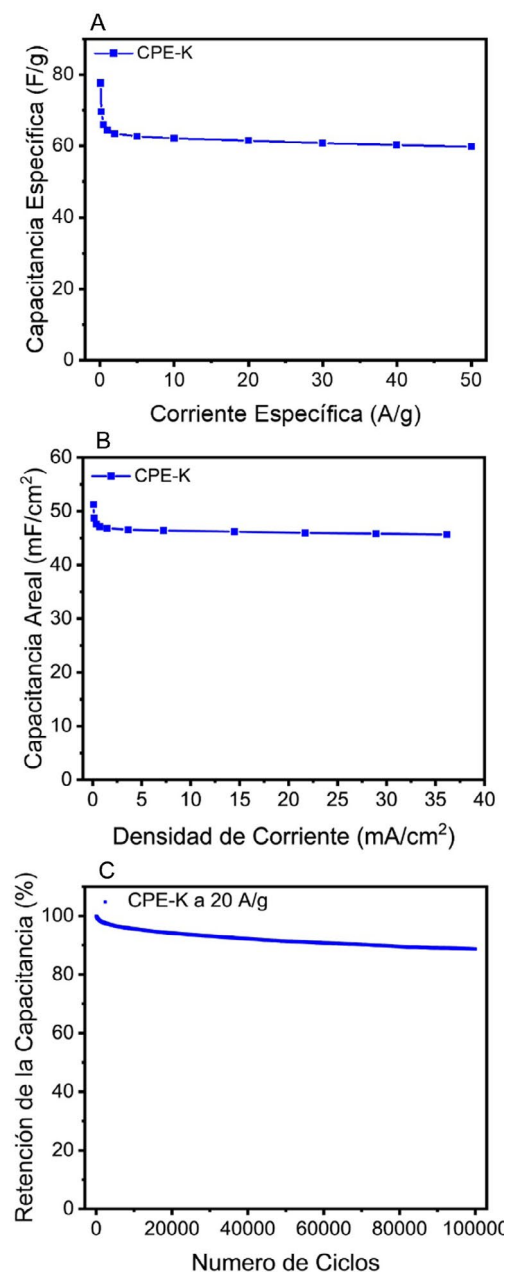
Los perfiles de CDG observados en la Figura 6A-B, generalmente se transforman y analizan mediante la capacitancia específica ( $C_s$ ), que se mide en farads por gramo del material ( $\text{Fg}^{-1}$ ) y se calcula a partir de la curva de descarga utilizando la Ecuación 6:<sup>[10,14,15]</sup>

$$C_s = \frac{I\Delta t}{m\Delta V} \quad \text{Ecuación 6.}$$

donde  $I$  es la corriente aplicada,  $\Delta t$  es el tiempo de descarga,  $m$  es la masa del material electroactivo y  $\Delta V$  es la ventana de potencial, corregida por la caída óhmica ( $IR_{\text{DROP}}$  – ver Figura 6B a 50 A.g-1). La caída óhmica se debe principalmente a la resistencia del electrolito, aunque también puede incluir las resistencias del electrodo y de contacto. Una caída óhmica mayor implica mayores pérdidas resistivas y un voltaje efectivo menor durante la descarga. Dado que está normalizado por la masa del material, constituye la métrica más utilizada para comparar el desempeño de diferentes materiales pseudocapacitivos.

La Figura 7A muestra que la capacitancia específica de CPE-K disminuye de aproximadamente 80 a 60  $\text{Fg}^{-1}$  al aumentar la corriente específica de 1 a 50  $\text{A.g}^{-1}$ , lo que indica que el material conserva cerca del 75 % de su capacitancia incluso a altas tasas de carga y descarga. Otra forma común de reportar el desempeño es mediante la capacitancia areal ( $C_A$  -  $\text{mF.cm}^{-2}$ ), obtenida al normalizar la capacitancia por el área del electrodo y representarla en función de la densidad de corriente ( $\text{mA.cm}^{-2}$ ). Como se muestra en la Figura 7B, la  $C_A$  presenta una tendencia similar a la de  $C_s$ , disminuyendo de 57 a 42  $\text{mF.cm}^{-2}$  al aumentar la densidad de corriente de 0.71 a 35  $\text{mA.cm}^{-2}$ .

Además de conservar la pseudocapacitancia a corrientes específicas y densidades de corriente elevadas, un material pseudocapacitivo debe mantener su desempeño durante ciclos repetidos de carga y descarga para garantizar su viabilidad en aplicaciones prácticas.<sup>[4-6]</sup> Por ello, la retención de la capacitancia y la estabilidad cíclica constituyen dos de las principales figuras de mérito en la evaluación de estos materiales. En el caso de CPE-K, después de 100,000 ciclos de carga y descarga a una corriente específica de 20  $\text{A.g}^{-1}$ , el material retiene el 88.7 % de su capacitancia inicial (Figura 7C), lo que evidencia una excelente estabilidad electroquímica y una degradación mínima incluso tras un ciclado prolongado. Este valor se encuentra entre los más altos reportados para materiales pseudocapacitivos, particularmente en sistemas completamente orgánicos.<sup>[9-15,19,22,24]</sup> En conjunto con los resultados de voltametría cíclica y espectroscopía de impedancia electroquímica, las mediciones de CDG confirman que el almacenamiento de carga en CPE-K está dominado



**Figura 7.** (A) Capacitancia específica en función de la corriente específica. (B) Capacitancia areal en función de la densidad de corriente. (C) Retención de la capacitancia de CPE-K durante 100,000 ciclos de carga-descarga a una corriente específica de 20  $\text{A.g}^{-1}$ .

por procesos pseudocapacitivos rápidos, favorecidos por una transferencia de carga eficiente, un transporte iónico eficaz y una elevada reversibilidad de los procesos de reducción y oxidación. Estas características convierten a CPE-K en un material pseudocapacitivo altamente eficiente y estable para aplicaciones de almacenamiento electroquímico de energía.

## Conclusiones

En este trabajo se presentaron tres de las técnicas electroquímicas más utilizadas para la caracterización de materiales pseudocapacitivos: la voltametría cíclica, la espectroscopía de impedancia electroquímica y la carga-descarga galvanostática, empleando CPE-K como estudio de caso. La voltametría cíclica permitió identificar la respuesta pseudocapacitiva del

material y evaluar la cinética del almacenamiento de carga; la espectroscopía de impedancia electroquímica proporcionó información sobre la transferencia de carga y el transporte iónico; y la carga-descarga galvanostática permitió cuantificar la capacitancia, el desempeño a altas densidades de corriente y la estabilidad durante el ciclado. Al replicar estos experimentos y estudiar los conceptos presentados, se espera que los estudiantes y la comunidad científica puedan adquirir, analizar e interpretar datos electroquímicos básicos, distinguir entre procesos faradaicos, capacitivos y limitados por difusión, y relacionar estas respuestas con los mecanismos de almacenamiento y transporte de carga en el material. En conjunto, estas técnicas ofrecen una caracterización integral del comportamiento pseudocapacitivo y proporcionan una base experimental y conceptual para el estudio de materiales de almacenamiento electroquímico de energía. A medida que los materiales pseudocapacitivos expanden sus aplicaciones, desde supercondensadores hasta dispositivos emergentes como los transistores electroquímicos orgánicos, el dominio de estas técnicas permitirá establecer relaciones entre estructura molecular, transporte de carga y desempeño electroquímico, facilitando el estudio y desarrollo de materiales orgánicos de nueva generación.

### Agradecimientos

El paquete de financiamiento inicial (*start-up*) proporcionado por la Indiana University Bloomington (IUB) al autor de correspondencia respaldó esta contribución.

### Bibliografía

- [1] W. Liu, X. Sun, X. Yan, Y. Gao, X. Zhang, K. Wang, Y. Ma, *Batteries* **2024**, *10*, <https://doi.org/10.3390/batteries10080271>.
- [2] Y. Ugata, C. Motoki, K. Dokko, N. Yabuuchi, *J. Solid State Electrochem.* **2024**, *28*, 1387, <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05670-z>.
- [3] T. S. Mathis, N. Kurra, X. Wang, D. Pinto, P. Simon, Y. Gogotsi, *Adv. Energy Mater.* **2019**, *9*, 1902007, <https://doi.org/10.1002/aenm.201902007>.
- [4] S. Fleischmann, J. B. Mitchell, R. Wang, C. Zhan, D. Jiang, V. Presser, V. Augustyn, *Chem. Rev.* **2020**, *120*, 6738, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00170>.
- [5] V. Augustyn, P. Simon, B. Dunn, *Energy Environ. Sci.* **2014**, *7*, 1597, <https://doi.org/10.1039/c3ee44164d>.
- [6] V. Augustyn, J. Come, M. A. Lowe, J. W. Kim, P.-L. Taberna, S. H. Tolbert, H. D. Abruña, P. Simon, B. Dunn, *Nat. Mater.* **2013**, *12*, 518, <https://doi.org/10.1038/nmat3601>.
- [7] X. Wang, S. M. Bak, M. Han, C. E. Shuck, C. McHugh, K. Li, J. Li, J. Tang, Y. Gogotsi, *ACS Energy Lett.* **2022**, *7*, 30, <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.1c02262>.
- [8] S. R. McCuskey, Y. Su, D. Leifert, A. S. Moreland, G. C. Bazan, *Adv. Energy Mater.* **2020**, *32*, 1908178, <https://doi.org/10.1002/adma.201908178>.
- [9] G. Quek, Y. Su, R. K. Donato, R. J. Vázquez, V. S. Marangoni, P. R. Ng, M. C. F. Costa, B. Kundukad, K. S. Novoselov, A. H. C. Neto, G. C. Bazan, *Adv. Electron. Mater.* **2022**, *8*, 2100942, <https://doi.org/10.1002/aem.202100942>.
- [10] B. R. P. Yip, R. J. Vázquez, Y. Jiang, S. R. McCuskey, G. Quek, D. Ohayon, X. Wang, G. C. Bazan, *Adv. Mater.* **2024**, *36*, <https://doi.org/10.1002/adma.202308631>.
- [11] R. J. Vázquez, G. Quek, Y. Jiang, B. R. P. Yip, S. R. McCuskey, D. Ohayon, B. Kundukad, X. Wang, G. C. Bazan, *J. Mater. Chem. A Mater.* **2023**, *11*, 18843, <https://doi.org/10.1039/d3ta02820h>.
- [12] Y. Jiang, R. J. Vázquez, S. R. McCuskey, B. R. P. Yip, G. Quek, D. Ohayon, B. Kundukad, X. Wang, G. C. Bazan, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, *16*, <https://doi.org/10.1021/acsaami.3c13137>.
- [13] Y. Su, S. R. McCuskey, D. Leifert, A. S. Moreland, L. Zhou, L. C. Llanes, R. J. Vázquez, L. Sepunaru, G. C. Bazan, *Adv. Funct. Mater.* **2021**, *31*, 2007351, <https://doi.org/10.1002/adfm.202007351>.
- [14] R. J. Vázquez, S. R. McCuskey, G. Quek, Y. Su, L. Llanes, J. Hinks, G. C. Bazan, *Macromol. Rapid Commun.* **2022**, *43*, 2100840, <https://doi.org/10.1002/marc.202100840>.
- [15] R. J. Vázquez, G. Quek, S. R. McCuskey, L. Llanes, B. Kundukad, X. Wang, G. C. Bazan, *J. Mater. Chem. A Mater.* **2022**, *10*, 21642, <https://doi.org/10.1039/d2ta05053f>.
- [16] N. Elgrishi, K. J. Rountree, B. D. McCarthy, E. S. Rountree, T. T. Eisenhart, J. L. Dempsey, *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 197, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>.
- [17] G. Quek, B. Roehrich, Y. Su, L. Sepunaru, G. C. Bazan, *Adv. Mater.* **2022**, *34*, <https://doi.org/10.1002/adma.202104206>.
- [18] H. Li, J. Wang, Q. Chu, Z. Wang, F. Zhang, S. Wang, *J. Power Sources* **2009**, *190*, 578, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.01.052>.
- [19] J. C. Russell, V. A. Posey, J. Gray, R. May, D. A. Reed, H. Zhang, L. E. Marbella, M. L. Steigerwald, Y. Yang, X. Roy, C. Nuckolls, S. R. Peurifoy, *Nat. Mater.* **2021**, *20*, 1136, <https://doi.org/10.1038/s41563-021-00954-z>.
- [20] S. R. McCuskey, G. Quek, R. J. Vázquez, B. Kundukad, M. H. Bin Ismail, S. E. Astorga, Y. Jiang, G. C. Bazan, *Adv. Sci.* **2024**, *11*, 2405242, <https://doi.org/10.1002/advs.202405242>.
- [21] T. Q. Nguyen, C. Breitenkopf, *J. Electrochem. Soc.* **2018**, *165*, E826, <https://doi.org/10.1149/2.1151814jes>.
- [22] S. J. Cox-Vázquez, B. Shakir, O. Medrano, D. Shah, K. Bortey, B. Biswas, A. Tran, C. Tran, R. J. Vázquez, *JACS Au* **2024**, *4*, 4592, <https://doi.org/10.1021/jacsau.4c00789>.
- [23] J. Wang, S. Dong, B. Ding, Y. Wang, X. Hao, H. Dou, Y. Xia, X. Zhang, *Natl. Sci. Rev.* **2017**, *4*, 71, <https://doi.org/10.1093/nsr/nww072>.
- [24] O. Medrano, Q. Zhou, B. Shakir, G. A. Narváez-Lozano, E. Hickey, M. J. Bayro, E. D. Bloch, R. J. Vázquez, *Chem. Mater.* **2025**, *37*, 6282, <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5c01255>.

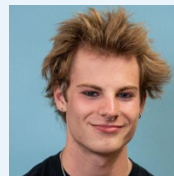


### Óscar Medrano

*Departamento de Química, Universidad de Indiana Bloomington, Indiana, EE.UU.*

C-e: [oscmadra@iu.edu](mailto:oscmadra@iu.edu)

Óscar Medrano es estudiante de doctorado en química en la Universidad de Indiana, donde inició sus estudios de posgrado en 2023. Su investigación se centra en la síntesis y caracterización de materiales orgánicos de capa abierta (*open-shell*) para aplicaciones electroquímicas. Su trabajo busca comprender la relación entre la estructura molecular, las propiedades electrónicas y los mecanismos de almacenamiento de carga. Emplea técnicas electroquímicas y espectroscópicas para estudiar estos materiales y desarrollar plataformas de almacenamiento de energía, así como otras tecnologías electroquímicas de nueva generación.



### Samuel Benjamin Baker

*Departamento de Química, Universidad de Indiana Bloomington, Indiana, EE.UU.*

C-e: [bakersb@iu.edu](mailto:bakersb@iu.edu)

Samuel Baker actualmente cursa la licenciatura en bioquímica en la Universidad de Indiana, con una especialización secundaria en estudios rusos y de Europa del Este. Su meta es realizar estudios de posgrado y desarrollar una carrera de investigación en el campo de la salud pública. Está interesado en comprender cómo la gestión de residuos afecta la salud de las comunidades y en contribuir al desarrollo de estrategias que reduzcan su impacto ambiental y sanitario. Además de sus actividades académicas, es DJ y administra la estación de radio estudiantil de la universidad, donde programa música, coordina reuniones y organiza eventos estudiantiles.



### Ricardo Javier Vázquez

*Departamento de Química, Universidad de Indiana Bloomington, Indiana, EE.UU.*

C-e: [ricvazqu@iu.edu](mailto:ricvazqu@iu.edu)

ORCID: 0000-0003-3245-8123

Ricardo Javier Vázquez nació en Puerto Rico, donde obtuvo su bachillerato en química en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras. Posteriormente, realizó su doctorado en la Universidad de Michigan, en Ann Arbor, investigando semiconductores orgánicos mediante espectroscopía temporalmente resolutive y óptica no lineal. Más tarde, realizó estudios posdoctorales en la Universidad Nacional de Singapur, donde sintetizó y caracterizó semiconductores orgánicos solubles en agua. Actualmente es profesor en la Universidad de Indiana, donde integra la síntesis de materiales orgánicos y las técnicas de medición para desarrollar tecnologías en materiales cuánticos, biosensores, transducción de energía y bioelectrónica.

## Sobre la revista

- La revista **Anales de Química de la RSEQ** es editada por la Real Sociedad Española de Química (RSEQ).
- Publica trabajos científicos originales, especializados, de revisión y divulgación en el campo de la química.
- Incluida en **LATINDEX**, **ICYT** y **DIALNET**.
- Enfoque especial en «Química y Medio Ambiente», historia, didáctica y docencia de la química.

**¡Envíanos tus artículos en el campo de la química!**

