

Revisar

Avances recientes en electroquímica aplicada: una revisión

Paolo Yammine ^{1,*} , Hanna El-Nakat ¹, Rima Kasab ¹, Ágapy Mansour ¹, Bilal El Khoury ¹, Diala Koumeir ¹, Zeinab Matar ¹ y Ayman Chmayssem ^{1,2,*} 

¹ Universidad de Balamand, Facultad de Artes y Ciencias, Departamento de Química, Trípoli PO Box 100, Líbano

² Consultoría y servicios de electroquímica (E2CS), fundador, Trípoli PO Box 100, Líbano

* Correspondencia: paolo.yammine@balamand.edu.lb (PY); ayman.chmayssem@fty.balamand.edu.lb (AC);
Tel.: +00961-6-931 952 (ext. 3841) (PY)

Resumen: La electroquímica aplicada (AE) desempeña hoy un papel importante en una amplia gama de campos, incluidos la conversión y el almacenamiento de energía, los procesos, el medio ambiente, la química (bio)analítica y muchos otros. Actualmente se ha demostrado que la síntesis electroquímica es una vía prometedora para evitar todas las desventajas. en términos de alto consumo de energía y alta contaminación, mientras que el modelado electroquímico se convierte en un poderosa herramienta para comprender sistemas complejos y predecir y optimizar los dispositivos electroquímicos bajo diversas condiciones, lo que reduce el tiempo y el costo del estudio. El papel vital de la electroquímica ser considerado en gran medida en los próximos años, con el objetivo de reducir la huella de carbono y apoyar la transición hacia un marco energético verde y más sostenible. Este artículo de revisión resume los recientes avances en electroquímica aplicada. Muestra cómo este campo se ha convertido en una herramienta indispensable para la innovación, el progreso, la resolución de problemas en el mundo moderno y la solución de problemas sociales. desafíos en diversos campos.

Palabras clave: electroquímica; descarbonización; conversión y almacenamiento de energía; ambiental sostenibilidad; fabricación



Cita: Yammine, P.; El-Nakat, H.;

Kassab, R.; Mansur, A.; El Khoury, B.;

Koumeir, D.; Matar, Z.; Chmayssem,

A. Avances recientes en la enseñanza

Electroquímica: una revisión.

Química 2024, 6, 407–434. [https://](https://doi.org/10.3390/chemistry6030024)

doi.org/10.3390/chemistry6030024

Editor académico: Michael Lyons

Recibido: 29 de abril de 2024

Revisado: 16 de mayo de 2024

Aceptado: 17 de mayo de 2024

Publicado: 23 de mayo de 2024



Copyright: © 2024 por los autores.
Licenciario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto.
distribuido bajo los términos y

condiciones de los Creative Commons

Licencia de atribución (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

La electroquímica aplicada (AE) es una ciencia moderna líder que aborda los desafíos sociales en diversos campos, incluida la conversión y el almacenamiento de energía, los procesos, el medio ambiente, la química (bio)analítica y muchos otros [1–3]. En el sector energético, electroquímico. Los procesos se utilizan para la conversión y almacenamiento de energía. Esto permite el desarrollo de tecnologías productivas y sostenibles, como baterías [4,5], pilas de combustible [6,7] y electrolizadores [8,9]. Por tanto, estos avances ayudan en la integración de las energías renovables y apoyar la transición hacia fuentes de energía verdes y más sostenibles.

En el campo medioambiental, la electroquímica aporta soluciones novedosas para el control de la contaminación y el tratamiento del agua. Para la degradación se utilizan procesos electroquímicos, como procesos de oxidación electroquímica directa e indirecta y procesos de oxidación avanzada de contaminantes orgánicos [10], eliminación de metales pesados [11–13] y mejora de los efluentes biodegradabilidad [14,15]. Estas tecnologías ofrecen enfoques eficientes y rentables para abordar los desafíos ambientales, proteger los ecosistemas y mejorar la calidad del agua.

En el sector manufacturero, la electroquímica juega un papel vital en la electrosíntesis, fabricación de materiales y modificación de superficies. Técnicas electroquímicas, como galvanoplastia [16], electroformado [17] y mecanizado electroquímico [18], se utilizan para producir recubrimientos funcionales y protectores y mejorar el rendimiento de los materiales y componentes. Estos procesos permiten la producción de productos de alta calidad. con propiedades de material mejoradas y alta durabilidad. Por ejemplo, la electroquímica. Los tratamientos de superficies de materiales en las industrias metalúrgicas tienen como objetivo, en primer lugar, crear poros. materiales que tengan una mayor superficie geométrica y, en segundo lugar, permitir la creación de una gruesa capa de óxido metálico que protege y estabiliza la nanoestructura del metal o del semiconductor [19,20].

The diagram illustrates the interdisciplinary nature of Electrochemistry. At the center is a blue circle labeled "Electrochemistry". Surrounding it are seven other circles, each representing a related field: "Energy storage" (orange), "Material characterization" (gray), "Surface modification" (yellow), "Analysis" (blue), "Processes" (green), "Synthesis" (orange), and "Modeling" (gray). Small icons (a house, a car, a factory, a person, a gear, a flask, and a computer) are placed between the central circle and the surrounding ones, indicating the application of electrochemistry in various domains.

La energía nos rodea todo el tiempo, alimentando nuestras actividades día y noche. Nosotros a menudo damos por sentado la conveniencia de acceder a la energía para alimentar nuestros aparatos, electrodomésticos, máquinas y vehículos. Sin embargo, es crucial pensar en cómo almacenamos esta energía para uso [55]. A diferencia de los combustibles fósiles, que pueden almacenarse y transportarse fácilmente en su estado natural

En este estado, las fuentes de energía renovables, como la luz solar y el viento, requieren un método de almacenamiento intermedio debido a su naturaleza intermitente. Como resultado, las baterías se consideran la única solución para almacenar esta energía, de modo que pueda usarse cuando sea necesario, proporcionando un puente crucial entre la generación y el consumo de energía [56,57].

Hay dos tipos de baterías: las que almacenan energía para un solo uso, como las baterías no recargables, y las que tienen múltiples usos, como las baterías recargables.

Nos centramos en baterías conocidas por su capacidad para almacenar y liberar energía repetidamente, lo que genera rentabilidad y respeto al medio ambiente en diversas aplicaciones [58]. Las aplicaciones de las baterías se dividen en tres categorías principales: transporte y automoción, incluidos los vehículos eléctricos (EV); electrónica portátil; y almacenamiento de energía estacionario, y cada tipo exige especificaciones únicas. La Tabla 1 resume los diferentes tipos de baterías comerciales utilizadas para el almacenamiento de energía y sus principales aplicaciones, ventajas y desventajas.

De hecho, el progreso de los vehículos eléctricos depende en gran medida de la mejora de la tecnología de las baterías, que encuentra diversos obstáculos, como baterías subdesarrolladas y desafíos en las aplicaciones prácticas [59]. Las baterías de plomo-ácido (Pb-A) han dominado históricamente el mercado de las baterías recargables, particularmente en el sector automotriz, debido a su importante participación de mercado en términos de valor de ventas y producción de energía. Sin embargo, las baterías de Pb-A tienen limitaciones inherentes, incluido un ciclo de vida relativamente corto, baja densidad de energía, susceptibilidad a la estratificación ácida y fugas si se dañan, y desafíos para reducir su tamaño debido a preocupaciones relacionadas con la producción de plomo. Además, los impactos ambientales asociados con las baterías de plomo-ácido están bien documentados [60,61], lo que requiere grandes esfuerzos de reciclaje para mitigar sus efectos adversos. En consecuencia, las baterías de iones de litio (LIB) han surgido como una alternativa prometedora, ganando terreno debido a sus numerosas ventajas, incluida la alta eficiencia de almacenamiento cercana al 100% y la oferta de una amplia gama de productos químicos, lo que las hace adecuadas para diversos usos sostenibles. aplicaciones [62]. En los diseños más comunes de LIB, las celdas constan de un electrodo negativo llamado ánodo y un electrodo positivo llamado cátodo separados por un separador aislante y rodeados por un electrolito. Durante la descarga, los iones de litio se transportan desde el ánodo, a través del separador hasta el cátodo y se unen al material activo. Al mismo tiempo, los electrones se liberan y se conducen a través de un circuito externo desde el ánodo al cátodo. Al cargar el LIB, los movimientos de los iones de litio y los electrones se invierten mediante una fuente de alimentación conectada [63].

En los últimos años, ha habido un notable enfoque en avanzar en el desarrollo de la cateterismo. odas para ser más sostenibles y seguros. Estos esfuerzos han dado como resultado la comercialización de diferentes materiales catódicos en el mercado de vehículos eléctricos, incluidos $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$ (NCA), LiMn_2O_4 (LMO), $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ (LNMO) [64], LiFePO_4 (LFP) y $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC).)Baterías basadas en. Cada uno de estos materiales ofrece su propio conjunto de ventajas sobre los demás [65]. Las baterías basadas en NCA, LFP y NMC se utilizan de forma destacada en vehículos eléctricos producidos por empresas como BMW, Chevrolet, Nissan, Tesla, etc. [66]. Si bien se han fabricado baterías Li-air y Li-S, aún no están listas para aplicaciones en automóviles. Sin embargo, las baterías de iones de sodio están surgiendo como una alternativa potencial a las baterías de iones d

Por otro lado, los dispositivos personales, incluidos teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, tabletas, cámaras y tecnología portátil, dependen en gran medida del almacenamiento de energía para funcionar de manera efectiva dentro de diseños compactos. Las baterías sirven como fuente de energía principal para estos dispositivos y requieren capacidades de almacenamiento relativamente pequeñas en volúmenes limitados y formatos livianos. Entre los tipos de baterías, las LIB, especialmente las que utilizan LMO y LiCoO_2 , destacan por ser particularmente adecuadas para la electrónica de pequeña escala. Sirven como cátodo de energía principal en una variedad de dispositivos, desde teléfonos inteligentes y computadoras hasta herramientas eléctricas. Además, la utilidad de las LIB va más allá de alimentar dispositivos electrónicos portátiles y medios de transporte. Ahora desempeñan un papel vital en el apoyo a la red eléctrica. Esta expansión permite la integración de fuentes variables de energía renovable, mejorando en última instancia la eficiencia en los sistemas de transmisión y distribución [67].

Tabla 1. Resumen de los dispositivos de almacenamiento de energía (baterías), con sus aplicaciones, ventajas y desventajas.

Tipo de batería	Química de la batería	Principal Solicitud	Específico Energía (Wh/Kg)	Ventajas	Desventajas
Ácido de plomo [58]	Pb-A	Industria automotriz (EV) y uso industrial	30–50	- Bajo costo - Procesos de fabricación bien establecidos y ampliamente disponibles. - Alto rendimiento en diversas condiciones	- Densidad de energía limitada - Ciclo de vida corto (500–1000 ciclos) - Requisitos de mantenimiento que involucran cuestiones como la estratificación del ácido y las fugas. -Preocupaciones ambientales asociadas con el uso de plomo (metal pesado) - Uso limitado en aplicaciones donde el peso es una preocupación
Baterías de iones de litio (LIB) (Muchas químicas posibles), [63,65] Los LIB tienen una mayor densidad de energía, lo que permite diseños más livianos, mayor estabilidad y durabilidad en comparación con el Pb-A. Sensible a las bajas temperaturas, pero se están realizando mejoras y se vuelve más competitivo en costos con los avances.	Óxido de litio y manganeso (OVM)	Electrónica portátil (p. ej., teléfonos inteligentes, computadoras portátiles); herramientas eléctricas	100–150	- Costo más bajo - Mayor respeto al medio ambiente - Mejor estabilidad térmica y seguridad en comparación con los LCO, lo que los hace adecuados para algunos vehículos eléctricos.	- Menor densidad energética - Ciclo de vida reducido (300–700 ciclos)
	Óxido de litio y cobalto (LCO)		150–250	-Mayor densidad energética. -Ciclo de vida más largo (500–1000 ciclos)	- Mayor costo - Preocupaciones ambientales debido a la minería de cobalto.
	Fosfato de hierro y litio (LFP)	Herramientas eléctricas y vehículos eléctricos	90-120	- Más seguro - Mejor estabilidad térmica	- Menor densidad de energía entre los tres cátodos.
	Litio Níquel Cobalto Óxido de aluminio (NCA)	Almacenamiento en red y vehículos eléctricos	155–260	- Mayor densidad de energía	- Menor estabilidad térmica - Sistemas de Gestión Térmica de Baterías (BTMS) requisitos
	Litio Níquel Manganeso Cobalto Óxido (NMC)	herramientas eléctricas, vehículos eléctricos	150-200	- Densidad energética y seguridad moderadas.	- Requisitos BTMS
Baterías a base de polímeros, [68,69] Empresa: Evonik - Emplear técnicas de procesamiento únicas, como la impresión.	Polímeros activos redox para el cátodo, el ánodo o ambos electrodos.	Campos médicos y logísticos.	50–200	- Fabricación de baterías delgadas y flexibles. - Capacidad de alta velocidad - Libre de metales y reciclabilidad.	- Limitaciones en términos de capacidades de descarga y salidas de voltaje. - Aplicabilidad restringida a sistemas de baja potencia.
Biocombustible [70–74]	Pilas de combustible enzimáticas	Ideal para wearables e implantes: - Compacto - Integrables - Bioseguro	20–300	- Barato - Ligero - Flexible	- Baja densidad de energía - Estabilidad a corto plazo (disminución de la producción de energía con el tiempo)
	Pilas de combustible microbianas	Centrados en la generación de energía a macroescala desde el entorno. - Adecuado para Aplicaciones con demanda mínima de energía (por ejemplo, tratamiento de aguas residuales)		- Respetuoso del medio ambiente - Biodegradables - Capaz de generar electricidad a partir de diversos tipos de materia orgánica.	

Una estrategia alternativa a punto de comercializarse, además del desarrollo de cátodos, implica la transición de ánodos de grafito a ánodos de silicio. El silicio, un material abundante, no tóxico y rentable, ofrece una capacidad de almacenamiento significativamente mayor. Los primeros intentos de crear ánodos únicamente a partir de silicio puro no tuvieron éxito. Sin embargo, un enfoque más prometedor, ahora más desarrollado por la industria, implica incorporar aditivos de carbono porosos u otros aditivos en el ánodo [75]. Actualmente, varios fabricantes, como Varta, Sila Nanotechnologies, Enovix Corporation, Gotion High-Tech y otros, están trabajando activamente en ánodos compuestos con proporciones variables, aunque crecientes, de silicio y/o SiOx o TiSi [76]. La sustitución de electrodos convencionales como el grafito o el silicio por grafeno puede mejorar la estabilidad y la vida útil de la batería, al tiempo que proporciona una mayor densidad de energía a un menor costo. Sin embargo, las limitaciones estructurales del grafeno limitan el tamaño de la batería, restringiendo así la capacidad de almacenamiento de energía principalmente a dispositivos pequeños, haciéndolos inadecuados para paquetes de baterías grandes, incluidos los de vehículos eléctricos [77,78].

Los avances actuales en nanotecnología se centran en la miniaturización de dispositivos electrónicos para proporcionar energía según demanda. Las micro/nanobaterías basadas en iones de litio son excelentes candidatas para este propósito, ya que se caracterizan por su pequeño tamaño, peso ligero, alta capacidad y largo ciclo de vida, además de ofrecer estabilidad y seguridad, lo que las hace adecuadas para el almacenamiento de energía en microdispositivos y aplicaciones portátiles [79]. Además del desarrollo de baterías a base de metal, las baterías orgánicas, también conocidas como baterías a base de polímeros, presentan varias ventajas sobre sus contrapartes a base de metal comunes: no contienen metales pesados raros y tóxicos, sus materias primas orgánicas pueden potencialmente obtenerse de recursos renovables y, al final de su ciclo de vida, pueden eliminarse mediante incineración sin restos tóxicos. A principios de la década de 2000 se exploraron diferentes aplicaciones potenciales para estas baterías, que son más respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, estos sistemas no han encontrado aplicaciones comerciales hasta hoy, con Evonik Industries actualmente a la vanguardia en el suministro de materiales para baterías imprimibles a base de polímeros, que pueden usarse en dispositivos delgados y flexibles [69,80]. Las biobaterías basadas en pilas de biocombustible también están emergiendo como una solución con cero emisiones netas de CO₂. Aunque aún se encuentran en la fase de desarrollo, estas biobaterías proporcionan un almacenamiento de energía limpio, seguro, duradero y eficiente que se alinea con los objetivos climáticos futuros. Utilizan enzimas, orgánulos o microorganismos como biocatalizadores ecológicos para convertir la energía química o biológica en energía eléctrica, lo que permite la generación de energía sostenible para dispositivos portátiles, portátiles, implantables o ingeribles, además de ofrecer soluciones. La empresa BeFC (Bioenzymatic Fuel Cells) ha desarrollado las primeras pilas de biocombustible de papel rentables y eficientes. Estas celdas no contienen metales, son orgánicas, reciclables, compostables, seguras y sostenibles.

Ante el aumento previsto de la demanda de baterías para 2050, Verkor, con sede en Francia, ha puesto en marcha una gigafábrica de baterías. Su objetivo es fabricar baterías eléctricas de alto rendimiento y bajas emisiones de carbono, principalmente LIB, para apoyar los esfuerzos de movilidad sostenible. Esta iniciativa tiene como objetivo reducir la dependencia de los fabricantes chinos de baterías y crear más oportunidades laborales.

Además de utilizar baterías con cero emisiones netas de CO₂, su reciclaje es crucial [58]. Como la mayoría de los materiales de las baterías son reciclables, invertir en prácticas sostenibles es esencial para mitigar el impacto ambiental y satisfacer las crecientes necesidades energéticas. Al reconocer esta necesidad, se creó la empresa sueca de baterías NorthVolt y su filial Revolt, que se ocupa del reciclaje. Estas instalaciones están dedicadas no sólo a producir baterías de alta calidad sino también a implementar estrategias integrales de reciclaje. Desde la selección inicial de componentes (baterías sin Li o Co) hasta el proceso de reciclaje al final de su vida útil, estas empresas desempeñan un papel fundamental a la hora de minimizar el agotamiento de los recursos y reducir las emisiones de carbono asociadas con la producción y eliminación de baterías (Figura 2).

anes recycling, ave een estaise. Estas ciudades están interesadas no sólo en producir baterías de alta calidad, sino también en implementar estrategias integrales de reciclaje. Desde la selección inicial de componentes (baterías sin Li o Co) hasta el proceso de reciclaje al final de su vida útil, estas empresas desempeñan un papel fundamental a la hora de minimizar el agotamiento de los recursos y reducir las emisiones de carbono asociadas con la producción y eliminación de baterías (Figura 2)¹²

Química 2024, 6

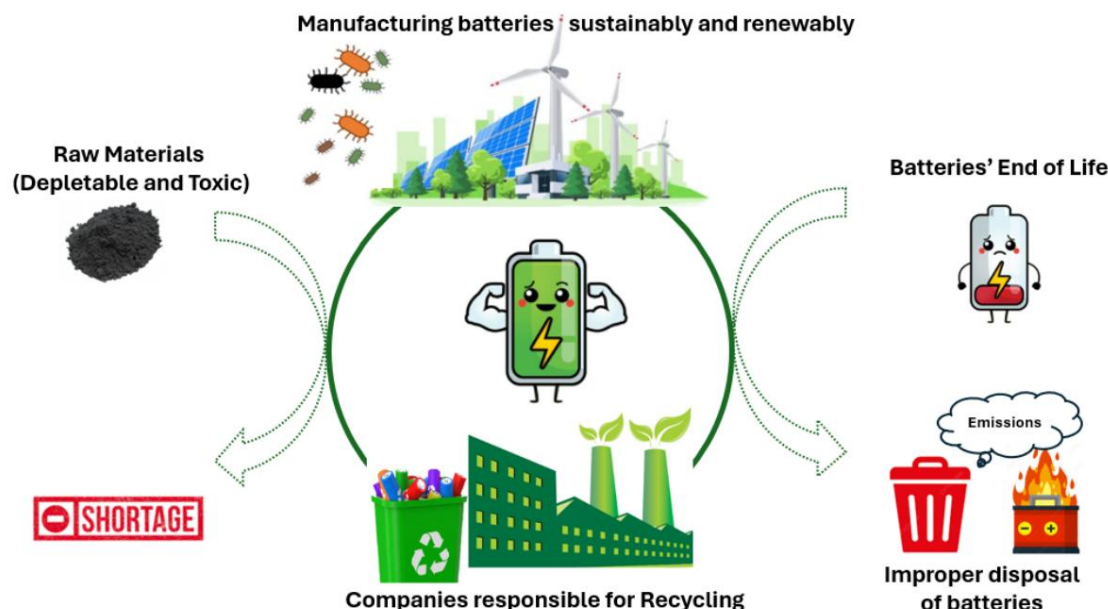


Figura 2. Ilustración de la fabricación de baterías utilizando materias primas, como Pb, Li y Co, y su tendencia a la escasez a largo plazo (lado izquierdo), seguida de su fase de final de vida después de su uso y eliminación inadecuada, lo que supone un peligro (lado derecho). En el centro, la tendencia entre el uso posterior y la eliminación inadecuada, lo que supone un peligro (lado derecho). En el centro, la tendencia Las empresas recientes y futuras es reciclar baterías y fabricar otras nuevas de manera sostenible. Entre las empresas recientes y futuras es reciclar baterías y fabricar otras nuevas de manera sostenible. Entre ellas, utilizando recursos renovables, como energía solar, energía eólica, bacterias y enzimas. En esta manera, utilizando recursos renovables, como energía solar, energía eólica, bacterias y enzimas.

2.2. Caracterización de Materiales

La caracterización electroquímica apunta a una gama de técnicas dentro del campo de La caracterización electroquímica apunta a una gama de técnicas dentro del campo de electroquímica que se utilizan para analizar y comprender las propiedades y comportamientos de los materiales o sistemas. Estas técnicas incluyen la aplicación de estímulos eléctricos y la medición de las señales eléctricas o electroquímicas resultantes para lograr conocimientos sobre diversas propiedades,

tales como conductividad, reactividad superficial [82], resistencia a la corrosión [83], actividad catalítica [84], y transporte de iones [85]. Las técnicas de caracterización electroquímica son herramientas valiosas para el análisis de ambas especies en solución y en estado sólido.

Para especies disueltas en una solución, técnicas comunes, como la voltamperometría cíclica, La cronoamperometría, la potenciometría y la espectroscopia de impedancia se emplean para la caracterización electroquímica. Sin embargo, para materiales sólidos, los microelectrodos de cavidad son típicamente usado. Para caracterizar las especies electroactivas, se insertan sólidos en la cavidad de el microelectrodo y se realiza la caracterización electroquímica. En esta parte, cada La técnica se describe brevemente y se dan ejemplos.

La voltamperometría cíclica (CV) es un método electroquímico potente y popular comúnmente Se utiliza para explorar los procesos de reducción y oxidación de especies moleculares. CV también es valioso para estudiar reacciones químicas iniciadas por transferencia de electrones, incluida la catálisis, Proporcionar información sobre los procesos catalíticos y facilitar la comprensión del proceso redox. mecanismos en varios sistemas [27]. La voltametría cíclica caracteriza la electroquímica. sistemas midiendo la respuesta de corriente (i) en función del voltaje aplicado (E) (i vs. E), proporcionando información sobre reacciones redox, cinética de transferencia de electrones y estabilidad de especies electroactivas [86]. Esta técnica implica barrer lineal y cíclicamente el voltaje mientras monitorea la respuesta de corriente resultante, permitiendo picos de potencial, pico corrientes y otros parámetros electroquímicos por determinar [87]. En CV, el mayordomo— La ecuación de Volmer (ecuación (1)) se utiliza a menudo para modelar la cinética de la transferencia de electrones en el interfaz del electrodo de la siguiente manera:

$$i = i_0 \left(\exp \frac{\alpha n F \eta}{RT} - \exp. \frac{-(1-\alpha) n F \eta}{RT} \right) \quad (1)$$

donde i es la densidad de corriente, i_0 es la densidad de corriente de intercambio (en A/m^2), α es el coeficiente de transferencia de carga (adimensional), n es el número de electrones involucrados en la reacción del electrodo, R y F son, respectivamente, los gas perfecto y las constantes de Faraday, T es la temperatura y η es el sobrepotencial, definido como la diferencia entre el potencial del electrodo aplicado y el potencial de equilibrio para la reacción del electrodo.

Por otro lado, la cronoamperometría es una técnica electroquímica que mide la corriente eléctrica (i) en función del tiempo (i vs. t) cuando se aplica un potencial eléctrico constante (E) a un electrodo. A diferencia de la voltametría cíclica, que implica aplicar un potencial que varía cíclicamente, la cronoamperometría mantiene un potencial constante y mide la corriente eléctrica resultante a lo largo del tiempo según la ley de Cottrell (Ecuación (2)). Esta técnica se utiliza a menudo para estudiar reacciones electroquímicas con materiales de electrodos específicos y para determinar las constantes cinéticas de reacciones electroquímicas [88,89].

$$= \frac{nFAD^{1/2}C}{\pi^{1/2}t^{1/2}} \quad (2)$$

donde i es la corriente, n es el número de electrones involucrados en la reacción electroquímica, F es la constante de Faraday, A es el área del electrodo, D es el coeficiente de difusión de las especies electroactivas, C es la concentración de las especies electroactivas, y t es el tiempo (en segundos).

Se considera ampliamente que la amperometría en estado estacionario que utiliza microelectrodos y se basa en experimentos de pasos potenciales ofrece una precisión superior para monitorear el estado de carga (SOC) en electrolitos de baterías de flujo redox (RFB). Se desarrolló un método analítico novedoso para mediciones amperométricas del estado de carga (SOC) y del estado de salud (SOH) en electrolitos individuales de baterías de flujo redox (RFB), centrándose en señales de corriente transitorias obtenidas en experimentos cronoamperométricos de pasos de potencial [90].

Por otro lado, la medición potenciométrica es una técnica utilizada para determinar la concentración de iones en una solución midiendo la diferencia de potencial eléctrico (ΔE) entre un electrodo de referencia (típicamente $Ag/AgCl$) o un electrodo pseudo-referencia y un electrodo de trabajo. electrodo [91–93] en función del tiempo (ΔE vs. t). Este método se basa en la ecuación de Nernst (Ecuación (3)), que relaciona el potencial medido con la concentración de iones en la solución. Se caracteriza por su sencillez y sensibilidad; sin embargo, la presencia de diferentes iones en solución conduce a medir un potencial mixto que es proporcional a la concentración del ion.

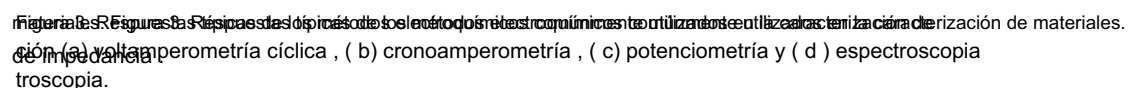
$$E_{Célula} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Buey]}{[Rojo]} \quad (3)$$

donde R y F son, respectivamente, el gas perfecto y las constantes de Faraday, n es el número de electrones, T es la temperatura y E^0 es el potencial estándar del analito objetivo.

En el campo de las baterías, el coeficiente de entropía ($dUOC/dT$) sirve como un parámetro crucial para predecir la generación de calor en baterías de iones de litio (LiB), particularmente en condiciones de baja velocidad. Aunque el método potenciométrico se usa comúnmente para medir el coeficiente de entropía, su precisión se logra a expensas del tiempo. En consecuencia, existe una necesidad crítica de una técnica de medición de entropía eficiente y precisa. El método potenciométrico mejorado, rápido y preciso propuesto, conocido como ajuste positivo (PA), reduce el tiempo de relajación a 10 min. Se utilizan celdas comerciales de iones de litio 18650 para validar el método PA. Una comparación entre los perfiles de entropía obtenidos mediante el método PA y el método potenciométrico convencional (CPM) indica una precisión comparable, con un error promedio de $\pm 0,01$ mV/K. Incluso en comparación con métodos alternativos recientes, el método PA demuestra ventajas notables en la eficiencia de la medición [94].

Por el contrario, la medición de la impedancia (Z) es una técnica utilizada para caracterizar el comportamiento eléctrico de un sistema en respuesta a una señal eléctrica alterna (para un rango de frecuencia fijo) [95]. La impedancia es una medida de la resistencia de un circuito eléctrico a la corriente alterna (según la ley de Ohm) y puede incluir componentes de resistencia, capacitancia

Química 2024, 6, PARA REVISIÓN POR PARES



Los microelectrodos de cavidad (CME) se utilizan en diversas áreas de la investigación científica [100], incluida la electrofisiología, la neurociencia, la química analítica de materiales [101,102] e incluso las baterías [103]. Generalmente están hechos de un material conductor, a menudo metálico, con una pequeña cavidad en el extremo (de decenas de μm de profundidad o más). Estos microelectrodos se utilizan para

Los microelectrodos de cavidad (CME) se utilizan en diversas áreas de la investigación científica [100], incluida la electrofisiología, la neurociencia, la química analítica de materiales [101,102] e incluso las baterías [103]. Generalmente están hechos de un material conductor, a menudo metálico, con una pequeña cavidad en el extremo (de decenas de μm de profundidad o más). Estos microelectrodos se utilizan para medir señales eléctricas a muy pequeña escala. La cavidad al final del electrodo permite una mejor conducción eléctrica entre el electrodo y el medio en

que se inserta. Esta característica mejora la sensibilidad de las mediciones electrofisiológicas o electroquímicas. En el caso de las baterías, se utilizan microelectrodos de cavidad para estudiar los procesos electroquímicos que tienen lugar en el interior de la batería. Permiten medir con precisión corrientes eléctricas y potenciales electroquímicos a escalas muy finas, contribuyendo así a la comprensión del rendimiento y la durabilidad de las baterías. Los microelectrodos de cavidad en el campo de las baterías se caracterizan por su pequeño tamaño, alta densidad de energía, rápida respuesta, estabilidad y durabilidad, así como por su capacidad para permitir un control preciso de los procesos electroquímicos. Ofrecen el potencial para nuevas arquitecturas de baterías que pueden conducir a un mejor rendimiento y una mejor eficiencia energética. Los microelectrodos de cavidad (CME) proporcionan una plataforma valiosa para evaluar el rendimiento electrocatalítico de materiales de micro y nanopartículas. Es necesario reconocer los factores técnicos y los procesos fisicoquímicos que afectan la respuesta electroquímica de las CME, en particular la accesibilidad de las especies redox en la superficie del electrocatalizador. La respuesta voltamétrica de los microelectrodos de cavidad (CME) se explora utilizando un enfoque combinado experimental y teórico. Esto incluye un examen comparativo de las técnicas de voltametría cíclica y voltametría de onda cuadrada (SWV). Los resultados demuestran una distorsión de la respuesta capacitiva, que aumenta con el área de la superficie del polvo, pero con una respuesta faradaica análoga a la de los microdiscos incrustados, lo que indica que las reacciones electroquímicas ocurren principalmente en la primera capa del relleno en polvo. Además, se demuestra que el SWV es muy adecuado para discriminar procesos farádicos en CME y se presentan expresiones matemáticas precisas para describirlo. Estos resultados proporcionan pautas para el diseño y análisis de las mediciones voltamétricas de CME [104].

En resumen, si bien la voltametría cíclica, la espectroscopia de impedancia, la potenciometría y la cronoamperometría son técnicas electroquímicas utilizadas en la investigación de baterías, cada una tiene principios, aplicaciones, ventajas y limitaciones distintas. La elección de la técnica depende de los aspectos específicos del comportamiento de la batería que se estudia y del nivel deseado de detalle y complejidad en el análisis.

2.3. Modificación de

superficies La modificación de superficies mediante métodos electroquímicos adopta diversas formas a través de diferentes procesos, como galvanoplastia, electrodeposición, anodización, grabado de superficies y funcionalización electroquímica. Esta sección resume brevemente el concepto de cada uno de los procesos citados anteriormente y se centra en las principales aplicaciones relacionadas con cada método.

Los procesos de galvanoplastia y electrodeposición a veces se utilizan indistintamente. Sin embargo, en contextos técnicos, se refieren a procesos diferentes. La galvanoplastia se refiere al proceso de depositar una fina capa de metal sobre la superficie de un sustrato mediante una reacción electroquímica [16,105]. Se utiliza ampliamente en industrias metalúrgicas, como la automoción, la electrónica y la fabricación de joyas (por ejemplo, revestimientos de níquel, revestimientos de platino [106], revestimientos de oro [107], revestimientos de cobre [108], etc.), con el objetivo de producir recubrimientos protectores para preservar las superficies de condiciones agresivas, aumentando así el rendimiento de los materiales y mejorando las propiedades físicas de los componentes (brillo, forma, etc.). Por el contrario, la electrodeposición se refiere al proceso de depositar cualquier material sobre la superficie de un sustrato mediante métodos electroquímicos. La electrodeposición permite la producción de productos de alta calidad con propiedades de material mejoradas y alta durabilidad. Permite realizar la electrodeposición de aleaciones, compuestos o materiales no metálicos (por ejemplo, deposición de vidrios [109], silicona [110] y polímeros conductores como polipiramidales).

componentes (brillo, forma, etc.). Por el contrario, la electrodeposición se refiere al proceso de depositar cualquier material sobre la superficie de un sustrato mediante métodos electroquímicos. La electrodeposición permite la producción de productos de alta calidad con propiedades materiales mejoradas y alta durabilidad. Permite realizar la electrodeposición de aleaciones, compuestos o materiales no metálicos (p. ej., deposición de vidrios [109], silicona [110] y polímeros conductores como polipirrol [111], polianilina [112,113], PEDOT [114], etc.). En resumen, función de galvanoplastia [111], polianilina [112,113], PEDOT [114], etc.). En resumen, la galvanoplastia es un tipo

de electrodeposición enfocada a depositar recubrimientos metálicos.

Como parte del proceso de anodización se usa una corriente eléctrica para mejorar la resistencia, laureza y adhesión del sustrato [115]. Esta técnica implica aplicar una intensidad, laureza y adhesión del sustrato [115]. Esta técnica consiste en aplicar una una potencial positiva a la superficie. Se utiliza principalmente en aluminio y sus aleaciones para mejorar las propiedades de la superficie y proporcionar diversos beneficios (durabilidad, estética mejorada). Dado que el anodizado tiene un impacto en la durabilidad de la superficie, se requiere una investigación científica para algunas aplicaciones y se debe mejorar la adhesión de la capa de óxido a la superficie para mejorar la adhesión de pinturas y de otros recubrimientos [116,117] (Figura 4).

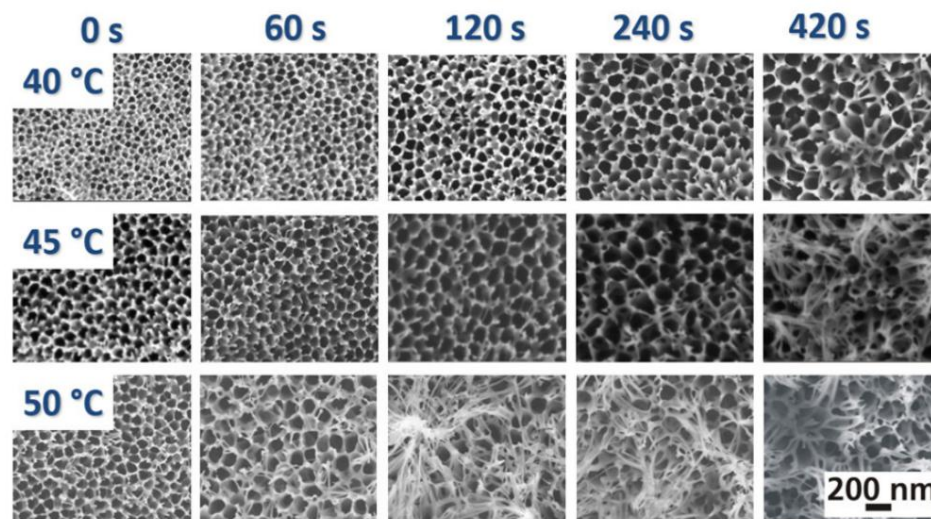


Figura 4. Imágenes SEM de la morfología superficial de capas de óxido anodizadas en ácido fosfórico a 50 V dependiendo del tiempo de permanencia y de la temperatura del baño (reproducido con permiso del editor bajo el número de licencia 5777000505982) [120].

El grabado electroquímico o grabado húmedo (también conocido como mecanizado electroquímico) es un Proceso que utiliza una corriente eléctrica y una solución electrolítica para eliminar selectivamente materiales de un sustrato conductor (metal o semiconductor) para realizar el grabado [121,122]. Esto se puede utilizar para crear texturas de superficie, patrones o microestructuras para diversas aplicaciones. Es de alguna manera el proceso reversible de electrodeposición donde una fina capa de metal está recubierto. El proceso consiste, en la mayoría de los casos, en sumergir el metal (o el semiconductor) en baños ácidos (electrolito) durante un tiempo específico para crear, primero, nanoestructuras porosas sobre las superficies del sustrato y, en segundo lugar, para permitir la creación de una fina capa de óxido metálico (por anodización) que protege y estabiliza las nanoestructuras [19,20]. Con esto, la superficie aumenta a medida que la estructura del sustrato se convierte de superficies 2D a superficies 3D [123]. Conceptualmente, muchos parámetros afectan el proceso y deben controlarse, por ejemplo, la concentración de las soluciones ácidas, la temperatura de los baños, la presencia de un catalizador, que tiene un papel esencial en el inicio de la nucleación del material (por ejemplo, iones de cobre) y, finalmente, el espesor del sustrato. Por otro lado, el grabado puede afectar la mecánica.

Propiedades del sustrato grabado. Por este motivo, se controlan muchas propiedades físicas durante el proceso confiando en pruebas de rutina del sustrato (por ejemplo, resistencia al estallido probador para sustratos de láminas, etc.). Para obtener el mejor compromiso entre el grabado de la superficie conservando propiedades físicas buenas y aceptables, el tiempo de contacto (tiempo de residencia del sustrato en los electrolitos) [124,125]. El grabado superficial

Puede adoptar diversas formas dependiendo de la composición del baño. En consecuencia, puede crear túneles que cruzan las superficies del material [126,127], y puede crear nanoporos (también llamados nucleación de poros) en las superficies del sustrato aumentando el área de superficie [128].

La aplicación generalizada del grabado electroquímico es en la preparación de materias primas materiales (componentes de ánodo y cátodo) utilizados en la fabricación de ca-

Pacitores, también conocidos como supercondensadores [129]. En este proceso, las láminas de aluminio (alta pureza $\geq 99\%$) se tratan mediante grabado electroquímico y luego se forman. Dependiendo de las mediciones de capacitancia, las hojas pueden clasificarse y usarse para diferentes aplicaciones, por ejemplo, alto voltaje de capacitor de CC, arranque de motor de capacitor de CA, etc. Los valores de capacitancia más altos pueden indicar ciertas propiedades deseables, como mayor área de superficie o electrodo mejorado. rendimiento [130]. Por lo tanto, deben interpretarse junto con otras técnicas de caracterización y métricas de rendimiento para evaluar con precisión la calidad general de la lámina.

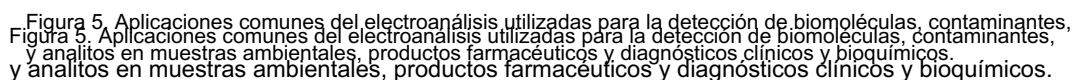
2.4. Electroanálisis EI

análisis electroquímico (o electroanálisis) se basa en el uso de métodos electroquímicos para determinar cuantitativamente la concentración de un analito en una muestra. Normalmente, estos métodos incluyen voltamperometría [27], amperometría [28], potenciometría [29] y espectroscopia de impedancia [131] (el principio de estos métodos se detalla en el § 2.2). Estos métodos se emplean para medir la actividad antioxidante [21,22] y analizar [24], y caracterizar diversos compuestos y materiales [25,26], así como para desarrollar métodos de referencia [132].

Los sensores electroquímicos y biosensores se encuentran entre las aplicaciones más comunes del electroanálisis. Se utilizan para la detección de biomoléculas [30,133], contaminantes [31] y analitos en muestras ambientales [32,33], alimentos [134], productos farmacéuticos [34,35] y diagnósticos clínicos y bioquímicos [23,36,135]. Estos dispositivos ofrecen mediciones rápidas, sensibles y relativamente selectivas, lo que los convierte en herramientas valiosas para la investigación, el control de calidad y el monitoreo de procesos en tiempo real (Figura 5).

En esta sección se investigan dos ejemplos de electroanálisis en función de su importancia y aplicaciones generalizadas: el electrodo de pH y el biosensor de glucosa. De hecho, el control del pH es de gran interés en muchos procesos químicos y bioquímicos. El término pH significa el potencial del hidrógeno y le permite expresar su poder. Las mediciones de pH expresan la acidez y alcalinidad de soluciones y vapores y ayudan a controlar y optimizar los procesos industriales. La medida del pH mediante una sonda de electrodo redox consiste en determinar potenciométricamente la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en una solución basándose en la ecuación de Nernst [136,137]. Recientemente, se han publicado en la literatura muchos electrodos de pH miniaturizados. Estos dispositivos están diseñados para ser pequeños y compactos y son esencialmente importantes en muchas aplicaciones que requieren sistemas de pequeña escala para su integración (por ejemplo, sistemas de laboratorio en un chip [23, 30], diagnósticos en el punto de atención, etc.) o dedicados a dispositivos portátiles (para monitoreo fisiológico o rastreadores de salud portátiles) [138,139].

Un biosensor de glucosa es un dispositivo que incorpora un elemento de reconocimiento biológico como componente sensor (enzimas, por ejemplo, glucosa oxidasa (GOx) o glucosa deshidrogenasa (GDH) y su cofactor). Los subproductos de la reacción enzimática se difunden a través de la membrana sensora y luego se oxidan o reducen en la superficie del electrodo a un potencial fijo que depende del material del electrodo [140,141]. Normalmente, en el caso de los biosensores enzimáticos de glucosa de primera generación, la oxidación enzimática de la glucosa por GOx conduce a la producción de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que se oxida a un potencial positivo de +0,7 V frente a un electrodo de referencia Ag/AgCl. o reducido a potenciales negativos (entre -0,2 y 0 V) utilizando mediadores que reducen los potenciales de detección y previenen problemas de interferencia. Los biosensores de glucosa son dispositivos comúnmente utilizados para monitorear los niveles de glucosa en sangre en pacientes diabéticos y representan una de las aplicaciones más utilizadas para el monitoreo de glucosa en todo el mundo [143].



El agua es un recurso limitado y su uso para fines industriales es un desafío debido a la necesidad de proporcionar agua de alta calidad y en grandes volúmenes. La contaminación del agua por actividades industriales y agrícolas es una preocupación importante. La contaminación del agua puede ser causada por la liberación de sustancias químicas, metales pesados y otros contaminantes en los cuerpos de agua. La contaminación del agua puede tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. La contaminación del agua puede ser causada por la liberación de sustancias químicas, metales pesados y otros contaminantes en los cuerpos de agua. La contaminación del agua puede tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. La contaminación del agua puede ser causada por la liberación de sustancias químicas, metales pesados y otros contaminantes en los cuerpos de agua. La contaminación del agua puede tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente.

La electrodesionización es una combinación de dos procesos de desalinización, electrodiálisis y intercambio iónico, que resulta en tasas de desmineralización aún más profundas. Desionización capacitiva permite la desalación de agua y la recuperación de energía eléctrica simultáneamente, en un manera eficiente. Electro-Fenton permite la generación de catalizadores in situ, reduciendo así formación de lodos. Además del tratamiento del agua, las pilas de combustible microbianas permiten la electricidad. energía a recuperar, reduciendo así los costes de mantenimiento necesarios para este proceso. El aumento de la separación de los portadores de carga y supresión de la recombinación electrón-hueco

en un campo eléctrico hacen que la fotoelectrocatalisis proporcione mejores eficiencias de eliminación que un solo fotocatalizador. La sonoelectrocatalisis aumenta la velocidad a la que se transfieren las sustancias reactivas, inhibe la polarización de los electrodos y desempeña un papel importante en la producción de radicales hidroxilo para mejorar la eficiencia del tratamiento en comparación con la oxidación de un solo electrolito.

Un ejemplo de la industria más antigua con procesos complejos y alto consumo de productos químicos es el sector textil. Debido a la demanda cada vez mayor de ropa por parte de la población mundial y los cambios en la industria de la moda, ésta continúa creciendo en variedad y número [153]. Esto puede contribuir al beneficio económico de la población, pero a menudo se informa del impacto negativo en el medio ambiente, en particular debido a la descarga de aguas residuales [154]. Debido a la toxicidad potencial y los riesgos para la salud humana, las aguas residuales textiles son motivo de preocupación y deben tratarse antes de ser vertidas al suministro de agua.

En el tratamiento de residuos textiles, los procesos convencionales son los más aplicados, como la integración de métodos químicos, biológicos o físicos. El sulfato de aluminio, el sulfato ferroso y el PAC (cloruro de polialuminio) se utilizan generalmente como coagulantes en el tratamiento de aguas residuales textiles [155]. Estos coagulantes son fáciles de aglomerar con contaminantes y forman pequeñas partículas y floculantes en las aguas residuales. Los floculantes, a su vez, mejoran el tamaño y las propiedades del flóculo, particularmente su estabilidad [156]. Sin embargo, para las aguas residuales de tintes, este proceso tiene una tasa de eliminación de DQO (demanda química de oxígeno) limitada del 10%, lo que puede provocar la producción de lodos. Para mejorar el rendimiento del tratamiento, generalmente se utilizan lodos activados, biorreactores móviles (MBR) y biofiltros después de la coagulación-floculación. Sin embargo, la calidad de los efluentes muchas veces no cumple con los estándares de calidad requeridos. Por tanto, necesita un proceso de acabado (sedimentación). Se reportan procesos físicos, como la adsorción, para su potencial aplicación como tratamiento de acabado. Sin embargo, tiene una vida útil relativamente corta (menos sostenible) y puede producir adsorbente gastado como subproducto. La integración de procesos químicos, biológicos y físicos generalmente requiere más espacio, mayor tiempo de retención (1 a 4 días), mayor costo operativo y necesita un sistema de manejo. Como tecnología independiente o combinada con procesos aeróbicos, a menudo se utilizan procesos biológicos. Un sistema integrado de procesos anaeróbicos y aeróbicos se ha convertido en una opción debido a las grandes cantidades de lodos generados en los procesos químicos [153]. Por otra parte, la eficacia de eliminación del color conseguida en este proceso es relativamente pequeña. Además, el alto contenido de amonio, el color y las DQO no degradables son características de las aguas residuales de los textiles de impresión. Como paso final para eliminar los contaminantes persistentes, incluidos los colorantes, y mejorar el rendimiento de las plantas de tratamiento biológico de aguas residuales, la mayoría de las industrias textiles utilizan un agente decolorante (DCA) [157]. DCA es un polímero orgánico catiónico con una base de resina de dicianidamida formaldehído con alta eficiencia de adsorción y sedimentabilidad, la capacidad de neutralizar la carga eléctrica de la superficie de las partículas, flóculos más estables y la capacidad de eliminar colorantes disueltos, como los directos, reactivos y dispersos. Sin embargo, el DCA a menudo no es la solución adecuada en todas las situaciones debido a su alto costo, baja disponibilidad y necesidad de eliminación de lodos. También vale la pena señalar el hecho de que los lodos producidos como subproducto en este caso pueden tener impactos ambientales significativos y ser de alto riesgo para los humanos y el ecosistema.

Durante la última década se han llevado a cabo intensas investigaciones sobre la eliminación del color en los procesos de oxidación modernos. Puede crearse mediante fotocatalizadores [159], ozonización, reactivo de Fenton [160] y procesos electrocatalíticos [161]. Las ventajas obvias de la oxidación fotocatalítica son los requisitos de baja temperatura y presión y el hecho de ser biológicamente inerte y soluble en agua, que está ampliamente disponible, es altamente fotoactiva, menos tóxica y respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, persisten limitaciones importantes en términos de potencial de aplicación en lo que respecta a la morfología y cristalinidad del catalizador de TiO₂, los requisitos de dopaje metálico, la alta selectividad al carácter específico de los contaminantes y el contacto cercano con fuentes de luz.

La oxidación electrocatalítica, comúnmente conocida como EAOP (proceso de oxidación avanzada electroquímica), utiliza energía eléctrica en la degradación de contaminantes. Estos procesos se basan en la formación in situ de radicales hidroxilo (OH•) que atacan y oxidan de forma no selectiva los contaminantes hasta lograr la biodegradabilidad o la mineralización total de los mismos.

efluente. Sus altos rendimientos en color y eliminación de DQO se informaron en aguas residuales de teñido de textiles y aguas residuales de impresión de textiles [162]. Se propone un nuevo sistema electroquímico híbrido Fenton y un reactor como una opción eficaz de postratamiento para efluentes textiles y muchos otros [10,163]. En términos de eliminación de color, DQO y amonio, este proceso es muy eficaz. Como son más baratos que el TiPtIr y más viables económicamente que el carbono GDL (capa de difusión de gas) [164], se han utilizado como electrodos malla de TiRuO₂ y varillas de carbono de grafito.

Aplicado en el sector industrial, se puede proponer un sistema único con un reactor cilíndrico de acero inoxidable con pares de electrodos (cilindro de malla Ti/RuO₂/ánodo y cátodo de varilla de grafito y carbono) para degradar los complejos contaminantes de las aguas residuales textiles reales. El sistema de circulación interna ofrece ventajas considerables para el funcionamiento de este sistema, por ejemplo, cargas de volumen aumentadas de hasta un 400%. Este método puede ser una alternativa prometedora para las aguas residuales textiles después del tratamiento, ya que los contaminantes se han estado degradando simultáneamente mediante oxidación electro-Fenton. En poco tiempo la eliminación de color, DQO y amonio fue significativa. Debido al contacto más prolongado entre las especies reactivas generadas y los contaminantes en las aguas residuales, el sistema con circulación era más ventajoso que el sistema sin circulación. La eficiencia de eliminación de contaminantes, color y DQO, el índice de oxidabilidad y los costos operativos han confirmado y respaldado. El consumo eléctrico fue de aproximadamente 3 kWh/m³ o 4.200 rupias/m³ para el sistema sin circulación, y se redujo significativamente a 1,1 kWh/m³ o 1.540 rupias/m³ para el sistema con circulación. Se puede encontrar un sistema de alto potencial en el electroquímico híbrido Fenton, y es posible investigarlo a través de un reactor ampliado con integración directa en una unidad textil anaeróbica-aeróbica existente [165].

Finalmente, debido a la diversidad y complejidad de los contaminantes químicos del agua, se necesitará una variedad de técnicas de tratamiento, como la remediación biológica, el tratamiento fisicoquímico y las técnicas electroquímicas como la reducción electroquímica/electrocatalítica, la oxidación y la electrocoagulación. El uso de tratamientos electrocatalíticos con aguas contaminadas es cada vez más común debido a la caída del coste de las fuentes de energía renovables y la creciente necesidad de transformar sustancias nocivas en compuestos inofensivos o beneficiosos. Si bien la reducción electrocatalítica puede manejar corrientes que contienen especies oxidadas como nitrato y nitrito producidos por la escorrentía de fertilizantes, la oxidación electrocatalítica puede manejar una variedad de corrientes de desechos industriales, incluidos efluentes textiles y alimentarios. Debido a estos beneficios y su idoneidad a pequeña escala, los procesos electrocatalíticos son perfectos para el tratamiento de agua descentralizado. La electrocatálisis tiene el potencial de tener un impacto sostenible en la conversión de contaminantes nocivos del agua en sustancias valiosas o inofensivas con la creciente disponibilidad de electricidad barata procedente de fuentes renovables.

2.6. Electrosíntesis

La síntesis orgánica electroquímica (o electrosíntesis) se ha convertido ahora en una herramienta para sintetizar nuevos compuestos a través de la química verde [166]. Pueden funcionar a temperatura y presión ambiente y principalmente no requieren productos químicos auxiliares. Normalmente, el proceso de electrosíntesis se basa en el uso de un reactor electroquímico alimentado por una fuente de energía [167].

Dos parámetros son claves para obtener una alta eficiencia de la electrosíntesis. En primer lugar, el diseño del reactor es crucial para obtener un alto rendimiento de producción. En segundo lugar, las características de los electrodos (material, número, tamaño, geometría y área de superficie) son una consideración esencial para la cantidad de compuestos electrogenerados, ya que los electrodos son el sitio que alberga las reacciones electroquímicas [168].

Alternativamente, el uso de corriente eléctrica a través de una reacción para activar moléculas orgánicas mediante la adición o eliminación de electrones posee varias ventajas, como la simplicidad y alta selectividad de las reacciones y la disponibilidad de materiales sintéticos (bajo costo, simplicidad de usos), sin aguja para un método de separación, etc.). Además, la electrosíntesis puede ser modular y escalable, lo que permite flexibilidad en la capacidad de producción [169]. Se han desarrollado metodologías de electrooxidación y electrosíntesis para la funcionalización selectiva de moléculas orgánicas, incluida la activación CH y el enlace CC.

formación y síntesis asimétrica. Este campo es importante en muchos procesos industriales importantes, como la generación de cloro [170], la fabricación de aluminio [171], la producción de fertilizantes a base de nitrógeno descarbonizados [172], la síntesis de fármacos [173] y muchos otros [174].

Esta parte muestra algunos ejemplos relacionados con la síntesis de nuevas moléculas orgánicas por vías electroquímicas. El primer ejemplo se centra en la síntesis de fertilizantes a base de nitrógeno (NBF) mediante métodos electroquímicos. La síntesis de NBF, como el amoníaco y la urea, se realizó con éxito utilizando compuestos de desecho, como dióxido de carbono y nitratos [175]. El trabajo se centró en gran medida en comprender los sitios catalíticamente activos para la electrosíntesis de urea. De hecho, se encontró que la selectividad y la actividad dependen de la composición relativa del catalizador de óxido de cobre y zinc y se asignaron a un efecto electrónico sinérgico. Por otro lado, se utilizaron nanomateriales amorfos como catalizadores, y la reacción implicaba la síntesis electroquímica de compuestos que contienen N a partir de una variedad de moléculas pequeñas que contienen abundante N (N_2 , NO, NO_3^- etc...). Los resultados muestran que estos materiales pueden simplificar (romper) el enlace de acoplamiento CN, lo que lleva a la síntesis de urea [176].

En la práctica, la producción de fertilizantes a base de nitrógeno (NBF) descarbonizados fue desarrollada por tecnologías CASFER combinando la nanotecnología y la ciencia electroquímica. De hecho, pudieron desarrollar NBF precisos, de tipo comercial, a partir de flujos de residuos. Utilizaron un enfoque sintético orgánico (OSA) para producir NBF, con ingredientes predecibles y confiables diseñados para estimular el crecimiento de las plantas [177].

Además, la electrólisis cloro-álcali es uno de los procesos más antiguos e implementados y tiene las aplicaciones más importantes de la electroquímica en la industria. Este proceso consiste en producir cloro e hidróxido de sodio ($NaOH$), que son productos químicos básicos requeridos por la industria. En este caso, se identificó la electrólisis como un método ecológico para la transferencia molecular. Los electrones en estas reacciones electroquímicas no generan desperdicios cuando se generan con energía solar y eólica.

También se implementó la importancia de la electrosíntesis para la funcionalización de moléculas de manera sustentable, minimizando el uso de reactivos y subproductos tóxicos. Esto se implementa mediante difuncionalización de alquenos, síntesis heterocíclica estereoselectiva y reacción de carboxilación [178].

Además, un estudio muy reciente de Talebi y compañía. describió la síntesis electroquímica de derivados de sulfonamida conocidos entre los antibióticos más utilizados en el mundo [179]. Se estudiaron las condiciones de electrosíntesis y las vías de reacción. Se evaluaron los valores óptimos de los parámetros de funcionamiento (pH, disolvente, electrodos...). Al optimizar las condiciones, el control de la reacción cinética y termodinámicamente utilizando el potencial del electrodo fue prometedor (Figura 6). De hecho, este método fue capaz de mostrar la selectividad para oxidar o reducir un determinado compuesto, previniendo, entonces, la oxidación /reducción de los intermedios. Este método electroquímico de síntesis de sulfonamidas frente a los métodos clásicos tiene muchas ventajas: - Permite el uso de oxidantes verdes, lo que reduce el uso de compuestos/solventes tóxicos y previene riesgos ambientales; - Depender de la electrificación como fuente de energía, lo que disminuye la cantidad y el coste de la energía consumida; - Prevenir el uso de catalizadores adicionales; - Confiar en una configuración menos complicada para simplificar el procedimiento técnico.

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) también se puede sintetizar mediante electroquímica. De hecho, la reacción catódica de reducción de oxígeno (ORR) de dos electrones ($2e^-$) conduce a la electrosíntesis de H_2O_2 . Esta reacción normalmente ocurre en condiciones alcalinas y requiere un catalizador adecuado para mejorar la eficiencia del proceso. Para ello se han investigado diversos catalizadores, incluidos complejos metálicos y óxidos metálicos. Algunos estudios muestran la importancia de un electrocatalizador basado en motivos Fe libre para la síntesis de peróxido de hidrógeno [180]. Este uso de Fe aislado condujo a una alta actividad, selectividad y estabilidad debido a la alta energía de unión con los intermedios para romper el enlace peroxilo en H_2O [181].

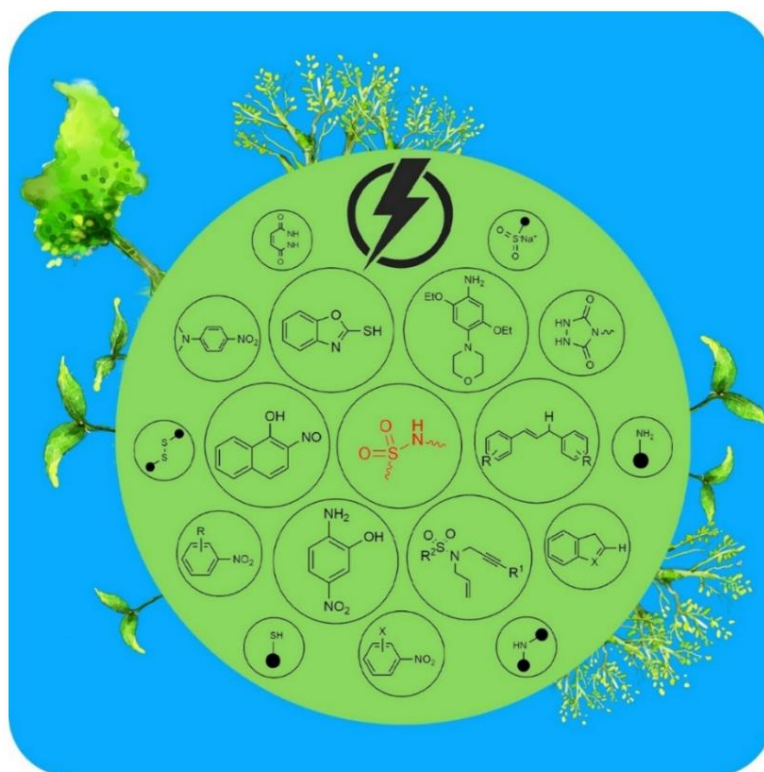


Figura 6. Síntesis electroquímica de derivados de sulfonamida por vía electroquímica (Creative Commons CC por licencia) [179].

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) también se puede sintetizar mediante electroquímica. De hecho, en conclusión, ahora se ha demostrado que la síntesis electroquímica es una vía prometedora para la reacción de reducción de oxígeno (ORR) catódica de dos electrones ($2e^-$) conduce el electrosíntesis del H_2O_2 . Esta reacción suele ocurrir en condiciones alcalinas y requiere una contaminación generada por el método clásico de síntesis química. Varios catalizadores, incluido el metal 2.7. Protección electroquímica. Para ello se han investigado complejos y óxidos metálicos. Algunos estudios muestran la importancia de un electrocatalizador basado en motivos de Fe libre para la síntesis de peróxido de hidrógeno. Estructuras de Fe aislado conduce a una alta actividad selectividad y estabilidad debido a conglomerados altos (etc) requiere un mantenimiento preventivo continuo para estabilizar un sistema altamente prolongado y seguro. operando [182]. La corrosión se detiene cuando ocurre sobre la superficie de la zona de salpicadura y submarino. En esta parte, discutiremos la protección electroquímica contra la corrosión de metales para prevenir Corrosión en plataformas de gas marinas y tuberías metálicas submarinas [183,184].

La protección electroquímica contra la corrosión de metales es el método más adecuado utilizado. e incluye protecciones anódicas y catódicas. Ambos métodos se basan en la manipulación del Reacciones electroquímicas en la superficie del metal para prevenir la corrosión y extender la vida útil. de estructuras de acero en entornos marinos hostiles [185].

El sistema de protección anódica (AP) mantiene la superficie en un estado de oxidación activa. estado. Este método implica aplicar una corriente eléctrica externa al metal, haciendo Es el ánodo de una celda electroquímica, que polariza la superficie a un estado más positivo. potencial, inhibiendo y previniendo así reacciones de corrosión [186,187]. De otra manera Aplicar este método es unir ánodos de sacrificio hechos de metales más reactivos. que tienen potenciales eléctricos más altos, como el zinc o el magnesio, a la estructura metálica. Los ánodos de sacrificio se corroen preferentemente, protegiendo la estructura de la corrosión mediante sacrificándose. En algunos sistemas, para maximizar el nivel de protección, se pueden utilizar ambos sentidos. utilizados juntos [188].

Los sistemas de protección catódica (CP) son otro método importante para reducir o detener la corrosión de estructuras metálicas reduciendo el potencial del metal mediante una corriente catódica suministrado por un sistema anódico [189,190]. Se utilizan ampliamente dos tipos principales de sistemas CP: Protección catódica con ánodo de sacrificio (SACP) y protección catódica por corriente impresa. (CIPC). La protección catódica con ánodo de sacrificio (SACP) se utiliza principalmente para instalaciones marinas más pequeñas.

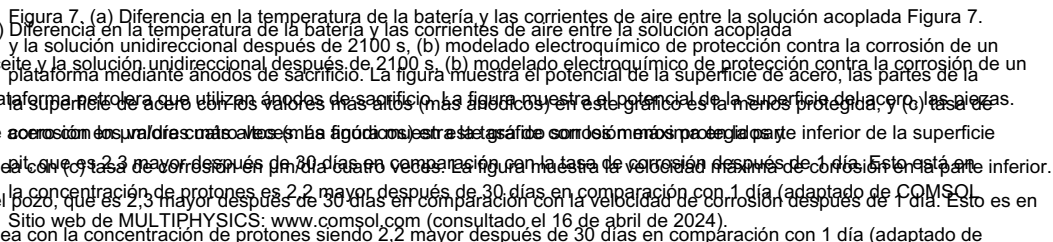
estructuras o ubicaciones con tasas de corrosión bajas a moderadas. En los sistemas SACP, la estructura a proteger se convierte en el cátodo de una celda electroquímica, mientras que los ánodos de sacrificio hechos de metales más reactivos, como el zinc o el aluminio, se unen a los monopolos de acero [191]. Estos ánodos de sacrificio se corroen preferentemente, sacrificándose efectivamente para proteger la estructura de acero al proporcionar una fuente de electrones que suprime la oxidación del acero. Como resultado, los ánodos de sacrificio deben reemplazarse periódicamente ya que se consumen con el tiempo. Sin embargo, los sistemas ICCP se utilizan en estructuras marinas más grandes o ubicadas en áreas con altas tasas de corrosión. De hecho, los ánodos inertes compuestos de óxidos metálicos mixtos o de titanio platinado están conectados a una fuente de energía externa [192]. Esta fuente de energía aplica una corriente eléctrica controlada a la estructura de acero, creando un potencial catódico protector que suprime la corrosión [193]. Los sistemas ICCP ofrecen un control preciso sobre el proceso de protección catódica.

2.8. Herramientas para el modelado

electroquímico El campo del modelado electroquímico ha experimentado avances continuos a través de mejoras en técnicas computacionales, herramientas de software y metodologías. Ejemplos de esto incluyen COMSOL MULTIPHYSICS [194], MATLAB con Simulink [195], Battery Design Studio [196], Canton, DigiElch [197,198], Python [199] y otros. Estos avances son cruciales para el desarrollo de baterías, sensores y biosensores, pilas de combustible y muchas otras aplicaciones electroquímicas [200]. En los últimos años, el modelado electroquímico ha mostrado una demanda creciente y se ha convertido en una poderosa herramienta para investigadores y científicos.

De hecho, permite comprender sistemas complejos y ayuda en la predicción y optimización de dispositivos electroquímicos en diversas condiciones y, como resultado, reduce el tiempo de estudio y el costo (Figura 7). Además, el modelado electroquímico permite la creación de prototipos virtuales de dispositivos y sistemas, lo que permite a los ingenieros simular el rendimiento, solucionar problemas potenciales e iterar diseños antes de la fabricación física [201,202]. Recientemente, para reducir las pruebas con animales, se volvió obligatorio modelar dispositivos (bio)médicos (incluidos dispositivos bioelectroquímicos) para obtener la aprobación de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), lo que resalta, nuevamente, la importancia del modelado electroquímico [203-205].

En esta parte, daremos algunos ejemplos de investigaciones recientes sobre modelado electroquímico divididos por campo de aplicación. En el campo de la electroquímica orgánica, Sigman et al. implementaron herramientas de modelado estadístico para el diseño de moléculas orgánicas redox activas para su aplicación como electrolitos en baterías de flujo redox no acuosas [206]. En el campo de los reactores electroquímicos, el modelado y simulación de reactores electroquímicos (ECRs) mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) ha sido de crucial importancia debido a sus principales aplicaciones: electrosíntesis de productos químicos y fármacos, electroobtención de metales, cloro-álcali, baterías de flujo redox, tratamiento de agua y pilas de combustible [207]. En el campo del nanoconfinamiento, Long et al. Estudiaron tres técnicas nanoelectroquímicas que implican modelado para estudiar la química multifásica bajo nanoconfinamiento: electroquímica de colisión estocástica, electroquímica de nanogotas individuales y electroquímica de nanoporos [208]. En el campo de la producción de hidrógeno utilizando un electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM), se utilizó una herramienta de modelado basada en el software de dinámica de fluidos computacional (CFD), ANSYS/Fluent [209]. En el campo de las pilas de combustible, que son una fuente prometedora de energía limpia, se utilizó COMSOL Multiphysics para incorporar una variedad de fenómenos físicos para simular el rendimiento de las pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) [210]. En otro estudio se construyó una simulación numérica de un modelo tridimensional con un único canal de flujo. Proporciona una base científica para la estrategia de control y el diseño estructural de las SOFC [211]. En el campo de las baterías, un estudio muestra cómo la implementación actual del modelo Doyle en COMSOL en electrodos de baterías de iones de litio puede mejorar la dinámica electroquímica de estas baterías [212].



2.9. Electroquímica en la educación

Los potencióstatos son cruciales para el desarrollo de investigaciones en electroquímica, pero su costo es el principal inconveniente de su uso masivo. Con el objetivo de proporcionar una alternativa asequible

Como alternativa para comunidades con recursos limitados, en la enseñanza y la investigación de posgrado se adoptó una estación de trabajo electroquímica portátil y de bajo costo que integra un potenciostato de código abierto basado en Arduino y una aplicación para teléfonos inteligentes. Puede realizar las técnicas electroquímicas más utilizadas de voltametría y cronoamperometría cíclica y lineal [217].

Por otro lado, la electroquímica es difícil de aprender debido a sus conceptos abstractos que involucran niveles de representación macroscópicos, microscópicos y simbólicos. Los estudios han demostrado que los estudiantes pueden visualizar y mejorar su comprensión de la química mediante el uso de simulación y animación interactiva por computadora. Este estudio informa sobre el efecto del módulo interactivo de simulación y animación por computadora denominado "Electrólisis interactiva de solución acuosa" (IEAS), que fue desarrollado para ayudar a los estudiantes a aprender la electrólisis [218]. Por lo tanto, se puede concluir que IEAS tiene un impacto en mejorar la comprensión de los estudiantes sobre el concepto de electrólisis, y los estudiantes están más motivados para aprender electroquímica.

Finalmente, la experimentación práctica con celdas electroquímicas, electrodos, electrolitos y dispositivos de medición sigue siendo la mejor opción para brindar a los estudiantes experiencia práctica y reforzar conceptos teóricos. Hoy en día, existen muchos fabricantes que pueden suministrar y dotar a las instituciones académicas de un "kit educativo". Contiene electrodos, electrolitos y materiales educativos, lo que facilita a los instructores incorporar la electroquímica en su plan de estudios (consulte la subsección para conocer las empresas que pueden ofrecer estos kits). Estos kits suelen incluir experimentos con procedimientos claros que facilitan la integración del aprendizaje de electroquímica aplicada en el plan de estudios. En este sentido, vale la pena señalar que la región MENA enfrenta una falta de instituciones que ofrezcan programas de educación superior en electroquímica, a pesar de la disponibilidad de diversas ofertas académicas. Este déficit es especialmente preocupante, dada la creciente demanda en numerosos sectores del mercado laboral de profesionales dotados de conocimientos electroquímicos. A medida que las industrias reconocen cada vez más la importancia de la electroquímica en diversas aplicaciones, la ausencia de oportunidades educativas relevantes subraya una brecha crítica que debe abordarse. En los próximos años, será imperativo integrar la experiencia en electroquímica en los planes de estudios educativos de toda la región para satisfacer las demandas cambiantes del mercado laboral y fomentar la innovación y el crecimiento en sectores clave.

2.10. Empresas electroquímicas

Muchas empresas electroquímicas se encuentran en todo el mundo. Representamos algunos de ellos según su ubicación.

La industria electroquímica europea se caracteriza por su enfoque en la sostenibilidad y la economía circular, con importantes inversiones en energía limpia, tecnología de baterías y procesos de reciclaje. Los actores e iniciativas clave incluyen Northvolt (Estocolmo, Suecia), Umicore (Bruselas, Bélgica), BASF (Ludwigshafen, Alemania), ITM Power (Sheffield, Reino Unido), SOLVAY (Bruselas, Bélgica), etc. El sector electroquímico en los Estados Unidos es diverso y tiene un fuerte énfasis en la innovación y el desarrollo tecnológico, particularmente en las áreas de baterías y soluciones de almacenamiento de energía renovable. Algunos actores clave y áreas de enfoque incluyen Tesla Inc. (Texas, Estados Unidos), 3M (Maplewood, Estados Unidos), Dow Chemical Company (Michigan, Estados Unidos), General Electric (Boston, Estados Unidos), Albemarle Corporation (Carolina del Norte), etc. La participación de la región MENA en el sector electroquímico está creciendo, particularmente en energías renovables y tecnologías relacionadas, como la producción de hidrógeno verde. Algunos actores clave son ACWA Power (Riad, Arabia Saudita), MASDAR (Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos), SABIC (Riad, Arabia Saudita), OQ (Mascate, Omán), etc.

Por otro lado, existen varias empresas que suministran instrumentos y accesorios para experimentación electroquímica, como potenciostatos de tipo mini y estándar (dispositivos monocanal o multicanal y dispositivos portátiles), electrodos (clásicos, electrodos de disco giratorio, pantallas), impresos, etc., células electroquímicas, kits educativos, etc. Los actores clave son Metrohm (Herisau, Suiza), instrumentos de Bio-Logic Sciences (Seyssinet-Pariset, Francia), PalmSens (Houten, Países Bajos), Solartron (Bognor Regis, Reino Unido), Hanna Instruments (Smithfield, VA, EE. UU.), Gamry Instruments (Warminster, PA, Estados Unidos), Sciospe

(Bennewitz, Alemania), Princeton Applied Research (Bognor Regis, Reino Unido), PINE RESEARCH (Durham, Carolina del Norte, EE. UU.), Texas Instruments (Dallas, TX, EE. UU.), Kanopypetech (Uttar Pradesh, India), Ivium Technologies (Eindhoven, Países Bajos), Corrttest Instruments (Wuhan, China), Xiamen Tob New Energy Technology (Ciudad de Xiamen, China), Phadke Instruments (Mum-bai, India), etc. (Figura 8). Esta lista no es exhaustiva y refleja una instantánea de una rápida campo que avanza (los sitios web de los proveedores se enumeran en la Tabla 2).

Tabla 2. Sitios web de proveedores de instrumentos y accesorios electroquímicos.

Lista de proveedores de electroquímicos Instrumentos y accesorios	Sitio web del proveedor
metroh	www.metrohm.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Instrumentos de ciencias biológicas	www.biologic.net , consultado el 16 de mayo de 2024.
PalmSens	www.palmsens.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Solartrón	www.solartronmetrology.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Instrumentos Hanna	www.hannainst.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Instrumentos de juego	www.gamry.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Sciospec	www.sciospec.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Investigación aplicada de Princeton	www.ameteks.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
INVESTIGACIÓN DEL PINO	www.pineresearch.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Instrumentos Texas	www.ti.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Tecnologías Ivium	www.ivium.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Kanopypetech	www.kanopypetech.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Instrumentos más correctos	www.corrttest.com.cn , consultado el 16 de mayo de 2024.
Tecnologías Ivium	www.ivium.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Instrumentos más correctos	www.tobmachine.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Xiamen Tob Nueva tecnología energética	www.tobmachine.com , consultado el 16 de mayo de 2024.
Instrumentos Phadke	www.phadkeinstruments.com , consultado el 16 de mayo de 2024.

Recientemente, Consultoría y Servicios de Electroquímica (E2CS) (Trípoli, Líbano) lanzado como una entidad nueva y emergente en la región MENA que brinda consultoría y soporte técnico a una amplia gama de clientes en el campo de la electroquímica aplicada, incluidos los de los sectores energético, minero, la industria electroquímica está experimentando un rápido crecimiento, impulsada por tr Por último, la industria electroquímica está experimentando un rápido crecimiento, impulsada por tr como sostenibilidad y economía circular, un aceleramiento de energía, electrificación del transporte, y innovación en ciencia de materiales. El futuro de las empresas electroquímicas. Innovación en ciencia de materiales. El futuro de las empresas electroquímicas. En los próximos años, sin embargo, el éxito dependerá de la capacidad de las empresas para innovar, adaptarse a las dinámicas cambiantes del mercado y abordar los desafíos emergentes de manera efectiva.



Figura 8. Principales proveedores de instrumentos y accesorios electroquímicos a nivel mundial.

3 Conclusiones

La electroquímica aplicada desempeña un papel importante en el avance de la tecnología, la sostenibilidad y la respuesta a los desafíos sociales en diversos campos. Es versátil La eficiencia y la confiabilidad lo convierten en una herramienta indispensable para la innovación, el progreso y la resolución de problemas en el mundo moderno. En los próximos años, se espera que ele-

3 Conclusiones

La electroquímica aplicada juega un papel importante en el avance de la tecnología, la promoción de la sostenibilidad y el abordaje de los desafíos sociales en diversos campos. Su versatilidad, eficiencia y confiabilidad lo convierten en una herramienta indispensable para la innovación, el progreso y la resolución de problemas en el mundo moderno. Se espera que en los próximos años la electroquímica ocupe una posición sólida en muchos sectores y se convierta en una ciencia de referencia para muchos investigadores. Esto requiere especial atención para integrar la experiencia electroquímica en los planes de estudios educativos de todo el mundo para satisfacer las demandas cambiantes del mercado laboral y fomentar la innovación y el crecimiento en sectores clave. Por otro lado, el futuro de las empresas electroquímicas parece alentador; sin embargo, las empresas deben adaptarse a los cambios del mercado y abordar los desafíos emergentes de manera efectiva para seguir la evolución de la tecnología electroquímica.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflictos de intereses: El autor Ayman Chmayssem es el fundador de la empresa Electrochemistry Consulting & Services (E2CS). El resto de autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un potencial conflicto de intereses.

Referencias

1. Singh, V.G. *Electroquímica Aplicada*; Nova Science Publisher Inc.: Nueva York, NY, EE. UU., 2010. [\[CrossRef\]](#)
2. Wragg, Revista AA de electroquímica aplicada; Springer Nature: Berlín, Alemania, 2009; Volumen 39, pág. 467. [\[Referencia cruzada\]](#)
3. Bevan, K.H.; Foong, Y.W.; Shirani, J.; Yuan, S.; Abi Farraj, S. Física Aplicada a la Electroquímica: Reacciones de túnel. J. Aplica. Física. 2021, 129, 090901. [\[Referencia cruzada\]](#)
4. Duan, J.; Tang, X.; Dai, H.; Yang, Y.; Wu, W.; Wei, X.; Huang, Y. Construcción de baterías de iones de litio seguras para vehículos eléctricos: una revisión. *Electroquímica. Energía Rev.* 2020, 3, 1–42. [\[Referencia cruzada\]](#)
5. Brinkert, K.; Mandin, P. Fundamentos y aplicaciones futuras de la conversión de energía electroquímica en el espacio. *npj Microgravedad* 2022, 8, 52. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Santoro, C.; Arbizzani, C.; Erable, B.; Ieropoulos, I. Pilas de combustible microbianas: de los fundamentos a las aplicaciones. Una revisión. J. poder Fuentes 2017, 356, 225–244. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Sazali, N.; Salleh, noroeste; Jamaludin, A.S.; Razali, M.N. Nuevas perspectivas sobre la tecnología de pilas de combustible: una breve revisión. *Membranas* 2020, 10, 99. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Esposito, D.V. Electrolizadores sin membrana para la producción de hidrógeno de bajo costo en un futuro de energía renovable. julio 2017, 1, 651–658. [\[Referencia cruzada\]](#)
9. Abbasi, R.; Setzler, B.P.; Lin, S.; Wang, J.; Zhao, Y.; Xu, H.; Pivovar, B.; Tian, B.; Chen, X.; Wu, G.; et al. Una hoja de ruta hacia el hidrógeno de bajo costo con electrolizadores de membrana de intercambio de hidróxido. *Adv. Madre.* 2019, 31, e1805876. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
10. Chmayssem, A.; Taha, S.; Hauchard, D. Reactor electroquímico ampliado con cátodo tridimensional de lecho fijo para el proceso Electro-Fenton: aplicación al tratamiento de bisfenol A. *Electrochim. Acta* 2017, 225, 435–442. [\[Referencia cruzada\]](#)
11. Yu, Y.; Zhong, Y.; Sol, W.; Xie, J.; Wang, M.; Guo, Z. Un nuevo proceso de electrocoagulación con electrodos centrífugos para el tratamiento de aguas residuales: comportamiento electroquímico del ánodo y cinética de eliminación de metales pesados. *Quimiosfera* 2023, 310, 136862. [\[Referencia cruzada\]](#)
12. Tran, T.K.; Chiu, K.F.; Lin, C.Y.; Leu, H.J. Tratamiento electroquímico de aguas residuales: selectividad de la eliminación de metales pesados. *Proceso. En t. J. Energía de hidrógeno* 2017, 42, 27741–27748. [\[Referencia cruzada\]](#)
13. Shrestha, R.; Prohibición, S.; Devkota, S.; Sharma, S.; Joshi, R.; Tiwari, A.P.; Kim, H.Y.; Joshi, M.K. Tendencias tecnológicas en metales pesados. Eliminación de aguas residuales industriales: una revisión. *J. Medio Ambiente. Química. Ing.* 2021, 9, 105688. [\[Referencia cruzada\]](#)
14. Yue, H.; Xue, L.; Chen, F. Eliminación electroquímica eficiente de la contaminación por nitrato con electrodos estables de RuO₂-TiO₂/Ti. *Aplica. Catalán. B* 2017, 206, 683–691. [\[Referencia cruzada\]](#)
15. Dao, K.C.; Yang, C.C.; Chen, K.F.; Tsai, Y.P. Tendencias recientes en la eliminación de productos farmacéuticos y productos de cuidado personal por parte de Electro-Oxidación química y sistemas combinados. *Agua* 2020, 12, 1043. [\[CrossRef\]](#)
16. Bhat, R.S.; Shetty, S.M.; Kumar, N.A. Galvanoplastia de revestimiento de aleación de Zn-Ni en acero dulce y sus estudios electroquímicos. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo.* 2021, 30, 8188–8195. [\[Referencia cruzada\]](#)
17. Zhang, H.; Zhang, N.; Gilchrist, M.; Fang, F. Avances en micro/nanoelectroformado de precisión: una revisión de vanguardia. *J. Micromecánico. Microing.* 2020, 30, 103002. [\[Referencia cruzada\]](#)
18. Xu, Z.; Wang, Y. Mecanizado electroquímico de componentes complejos de motores aeronáuticos: desarrollos, tendencias y avances tecnológicos. *Mentón. J. Aeronauta.* 2019, 34, 28–53. [\[Referencia cruzada\]](#)
19. Zhang, Y.; Lan, J.; Xu, Y.; Yan, Y.; Liu, W.; Liu, X.; Gu, S.; Zhou, J.; Wang, M. Aleación ultrafina de PtCo mediante pirólisis confinada al grabado. *Pirólisis para una mejor evolución del hidrógeno. J. coloide. Ciencia de la interfaz.* 2024, 660, 997–1009. [\[Referencia cruzada\]](#)

20. Zhan, Y.; Zhang, G.; Shen, J.; Zhou, B.; Zhao, C.; Guo, J.; Wen, M.; Tan, Z.; Zheng, L.; Lu, J.; et al. Fácil aleación electroquímica de superficies y grabado de cables de Au para permitir sustratos de alto rendimiento para la dispersión Raman mejorada en la superficie. *Nanomadre . Ciencia*. 2023. [\[Referencia cruzada\]](#)
21. René, A.; Abasq, ML; Hauchard, D.; Hapiot, P. ¿Cómo reaccionan los compuestos fenólicos con el ion superóxido? Un método electroquímico simple para evaluar la capacidad antioxidante. *Anal. Química*. 2010, 82, 8703–8710. [\[Referencia cruzada\]](#)
22. Keyrouz, R.; Abasq, ML; Le Bourvellec, C.; Blanco, N.; Audibert, L.; Argall, E.; Hauchard, D. Contenido fenólico total, captación de radicales y voltamperometría cíclica de algas marinas de Bretaña. *Química de los alimentos*. 2011, 126, 831–836. [\[Referencia cruzada\]](#)
23. Chmayssem, A.; Verplanck, N.; Boizot, F.; Alessio, M.; Santos, L.; Mourier, V.; Vignoud, S.; Navarro, F.; Mailley, P. Plataforma de microfluidos de biosensores electroquímicos para aplicaciones de órganos en chips. En *Actas de MicroTAS 2021: 25.ª Conferencia internacional sobre sistemas miniaturizados para química y ciencias biológicas*, Palm Springs, CA, EE. UU., 10 a 14 de octubre de 2021.
24. Chmayssem, A.; Hauchard, D. Nuevo método de detección de trazas de alquilfenol en agua basado en un sensor de celda electroquímica integrado. *Rev. Ciencia. l'Eau* 2015, 28, 35–40. [\[Referencia cruzada\]](#)
25. Hauchard, D.; Cassir, M.; Chivot, J.; Baudry, D.; Ephritikhine, M. Estudio electroquímico de compuestos organometálicos de uranio (IV) y (III) en tetrahidrofurano mediante microelectrodos y ultramicroelectrodos convencionales. Parte II. Aplicación a compuestos de borohidruro: estudio de la estabilidad de CP2U(BH4)2. *J. Electroanal. Química*. 1993, 347, 399–407. [\[Referencia cruzada\]](#)
26. Terbouche, A.; Lameche, S.; Ait-Ramdane-Terbouche, C.; Guerniche, D.; Lerari, D.; Bachari, K.; Hauchard, D. Un nuevo sensor electroquímico basado en un complejo de electrodo de pasta de carbono/Ru(III) para la determinación de nitrito: impedancia electroquímica y mediciones de voltamperometría cíclica. *Medición* 2016, 92, 524–533. [\[Referencia cruzada\]](#)
27. Shin, KY; Oum, W.; Yu, DJ; Kang, S.; Kim, EB; Kim, HW Fundamentos de voltamperometría cíclica. *J. Sens. Ciencia. Tecnología*. 2021, 30, 384–387. [\[Referencia cruzada\]](#)
28. Inzelt, G. Cronoamperometría, cronocoulometría y cronopotenciometría. En *Enciclopedia de Electroquímica Aplicada*; Springer Nature: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2014. [\[CrossRef\]](#)
29. Bakker, E.; Pretsch, E. Potenciometría moderna. *Angélica. Química.—Int. Ed.* 2007, 46, 5660–5668. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
30. Chmayssem, A.; Verplanck, N.; Tanasa, CE; Costa, G.; Monsalve-Grijalba, K.; Amigues, S.; Alias, M.; Gougis, M.; Mourier, V.; Vignoud, S.; et al. Desarrollo de una plataforma de (bio)detección multiparamétrica para el monitoreo continuo de metabolitos del estrés. *Talanta* 2021, 229, 122275. [\[CrossRef\]](#)
31. Chmayssem, A.; Hauchard, D. Detección directa de ultratrazas de alquilfenoles en agua mediante un sensor de microelectrodo de pasta de carbón de cavidad. *Tratamiento de Agua Desaladora*. 2017, 83, 321–326. [\[Referencia cruzada\]](#)
32. Liu, Y.; Xue, Q.; Chang, C.; Wang, R.; Liu, Z.; Él, L. Progresos recientes en materia de sensores electroquímicos para la detección de contaminantes típicos en entornos acuáticos. *Anal. Ciencia*. 2022, 38, 55–70. [\[Referencia cruzada\]](#)
33. Karthik, V.; Selvakumar, P.; Senthil Kumar, P.; Satheeskumar, V.; Godwin Vijaysunder, M.; Hariharan, S.; Antony, K. Avances recientes en el desarrollo de sensores electroquímicos para detectar contaminantes emergentes en ambientes acuáticos. *Quimiosfera* 2022, 304, 135331. [\[CrossRef\]](#)
34. Boumya, W.; Taoufik, N.; Achak, M.; Bessbousse, H.; Elhalil, A.; Barka, N. Sensores electroquímicos y biosensores para la determinación de diclofenaco en muestras farmacéuticas, biológicas y de agua. *Abierto de Talanta* 2020, 3, 100026. [\[CrossRef\]](#)
35. Sohrabi, H.; Dezhakam, E.; Khataee, A.; Nozohouri, E.; Majidi, señor; Mohseni, N.; Trofimov, E.; Yoon, Y. Tendencias recientes en (bio)sensores electroquímicos y ópticos basados en hidróxidos dobles en capas para la detección de compuestos farmacéuticos emergentes. *Reinar. Res.* 2022, 211, 113068. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Malzahn, K.; Molino de viento, JR; Valdés-Ramírez, G.; Schöning, MJ; Wang, J. Sensores electroquímicos portátiles para análisis in situ en Medios Marinos. *Analista* 2011, 136, 2912–2917. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Comisión Europea. Una estrategia de la UE para aprovechar el potencial de la energía renovable marina para un futuro climáticamente neutro; Comisión Europea : Bruselas, Bélgica, 2020.
38. Dong, J.; Zeng, J.; Yang, Y.; Wang, H. Una revisión de la ley y la política sobre descarbonización del transporte marítimo. *Frente. Marzo ciencia*. 2022, 9, 1076352. [\[Referencia cruzada\]](#)
39. Madurai Elavarasan, R.; Pugazhendhi, R.; Irfan, M.; Mihet-Popa, L.; Khan, IA; Campana, PE Enfoques sostenibles de última generación para una descarbonización más profunda en Europa: un legado para una visión climáticamente neutra. *Renovar. Sostener. Energía Rev.* 2022, 159, 112204. [\[CrossRef\]](#)
40. Beccarello, M.; Di Foggia, G. Revisión y perspectivas de los principales impulsores de la descarbonización hasta 2030. *Energies* 2023, 16, 1345. [\[CrossRef\]](#)
41. Nesterenko, N.; Medeiros-Costa, IC; Clatworthy, EB; Cruchade, H.; Konnov, SV; Dath, JP; Gilson, JP; Mintova, S. Metano a Productos químicos: un camino hacia la descarbonización. *Nacional. Ciencia. Rev.* 2023, 10, nwad116. [\[Referencia cruzada\]](#)
42. Papadis, E.; Tsatsaronis, G. Desafíos en la Descarbonización del Sector Energético. *Energía* 2020, 205, 118025. [\[CrossRef\]](#)
43. Tautorat, P.; Lalín, B.; Schmidt, TS; Steffen, B. Direcciones de innovación para la descarbonización de la producción de cemento y acero. Un análisis basado en modelos de temas. *J. Limpio. Pinchar*. 2023, 407, 137055. [\[Referencia cruzada\]](#)
44. Zier, M.; Stenzel, P.; Kotzur, L.; Stolten, D. Una revisión de las opciones de descarbonización para la industria del vidrio. *Conversaciones de energía. Gestionar. X* 2021, 10, 100083. [\[Referencia cruzada\]](#)
45. Ghisolfi, V.; Tavasszy, LA; Correia, GHdA; Chaves, GdLD; Ribeiro, GM Descarbonización del transporte de mercancías: una sistemática Revisión de la literatura sobre modelos de dinámica de sistemas. *Sostenibilidad* 2022, 14, 3625. [\[CrossRef\]](#)
46. Raza, MI; Zhongpan, Q.; Pengju, W. Consumo de energía relacionado con la agricultura, política alimentaria y reducción de emisiones de CO2: Nuevos conocimientos de Pakistán. *Frente. Reinar. Ciencia*. 2023, 10, 1099813. [\[Referencia cruzada\]](#)

47. Palou-Rivera, I.; Grieco, W. Papel de los procesos electroquímicos en el impulso hacia la descarbonización industrial. Reunión ECS. Abstr. 2022, MA2022-01, 2338. [\[Referencia cruzada\]](#)
48. Griffiths, S.; Sovacool, BK; Kim, J.; Basilliano, M.; Uratani, JM Descarbonización industrial a través del hidrógeno: una revisión crítica y sistemática de la evolución, los sistemas sociotécnicos y las opciones políticas. Res. energética. Soc. Ciencia. 2021, 80, 102208. [\[Referencia cruzada\]](#)
49. Schiffer, ZJ; Manthiram, K. Electrificación y descarbonización de la industria química. Julio 2017, 1, 10-14. [\[Referencia cruzada\]](#)
50. Mallapragada, DS; Dvorkin, Y.; Modestino, MA; Espósito, DV; Smith, Washington; Hodge, BM; Harold, diputado; Donnelly, VM; Nuz, A.; Bloomquist, C.; et al. Descarbonización de la Industria Química a través de la Electrificación: Barreras y Oportunidades. Julio 2023, 7, 23–41. [\[Referencia cruzada\]](#)
51. Brannstrom, C. Los futuros energéticos emergentes de las energías renovables y la electroquímica: ¿avanzando o socavando la democracia energética? En Democracias energéticas para futuros sostenibles; Prensa académica: Cambridge, MA, EE. UU., 2022. [\[CrossRef\]](#)
52. Xia, R.; Overa, S.; Jiao, F. Procesos electroquímicos emergentes para descarbonizar la industria química. JACS Au 2022, 2, 1054–1070. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
53. Brimley, P.; Almajed, H.; Alsunni, Y.; Alherz, AW; Desnudo, ZJL; Smith, Washington; Musgrave, CB Reducción electroquímica de CO₂ sobre catalizadores de un solo átomo de grafeno dopados con metal/nitrógeno modelados utilizando la teoría funcional de densidad grancanónica. ACS Catal. 2022, 12, 10161–10171. [\[Referencia cruzada\]](#)
54. Lvov, SN; Beck, JR; LaBarbera, MS Reducción electroquímica de CO₂ a combustibles. en combustibles y portadores de energía neutros en carbono; Prensa CRC: Boca Raton, FL, EE. UU., 2020. [\[CrossRef\]](#)
55. Pomerantseva, E.; Bonaccorso, F.; Feng, X.; Cui, Y.; Gogotsi, Y. Almacenamiento de energía: el futuro permitido por los nanomateriales. Ciencia 2019, 366, ean8285. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
56. Kang, H.; Jung, S.; Lee, M.; Hong, T. ¿Cómo compartir mejor la energía hacia una ciudad neutra en carbono? Una revisión de las estrategias de aplicación del sistema de almacenamiento de energía con baterías en la ciudad. Renovar. Sostener. Energía Rev. 2022, 157, 112113. [\[CrossRef\]](#)
57. Sufyan, M.; Rahim, NA; Amán, MM; Bronceado, CK; Raihan, SRS Dimensionamiento y aplicaciones de tecnologías de almacenamiento de energía en baterías en Sistema de red inteligente: una revisión. J. Renovar. Sostener. Energía 2019, 11, 014105. [\[CrossRef\]](#)
58. Dehghani-Sanij, AR; Tharumalingam, E.; Duseault, MB; Fraser, R. Estudio de los sistemas de almacenamiento de energía y los desafíos ambientales de las baterías. Renovar. Sostener. Energía Rev. 2019, 104, 192–208. [\[Referencia cruzada\]](#)
59. Li, Y.; Yang, J.; Song, J. Modelo de estructura de diseño y tecnología de energía renovable para baterías recargables hacia un modelo más ecológico y Vehículo eléctrico más sostenible. Renovar. Sostener. Energía Rev. 2017, 74, 19-25. [\[Referencia cruzada\]](#)
60. Rydh, CJ Evaluación ambiental de baterías redox de vanadio y plomo-ácido para almacenamiento de energía estacionario. J. Fuentes de energía 1999, 80, 21-29. [\[Referencia cruzada\]](#)
61. Wang, Z.; Yang, J.; Qu, R.; Xiao, G. Evaluación de impacto ambiental de la batería desmantelada: estudio de caso de una fuente de energía Fábrica de baterías de plomo-ácido en China. Procesos 2023, 11, 2119. [\[CrossRef\]](#)
62. Divya, KC; Østergaard, J. Tecnología de almacenamiento de energía en baterías para sistemas de energía: descripción general. eléctrico. Sistema de energía. Res. 2009, 79, 511–520. [\[Referencia cruzada\]](#)
63. Abraham, KM Perspectivas y límites del almacenamiento de energía en baterías. J. Física. Química. Letón. 2015, 6, 830–844. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
64. Huang, Y.; Dong y.; Li, S.; Lee, J.; Wang, C.; Zhu, Z.; Xue, W.; Li, Y.; Li, J. Cátodos de espinela de litio y manganeso para baterías de iones de litio . Adv. Materia energética. 2020, 11, 2000997. [\[Referencia cruzada\]](#)
65. Widyantara, RD; Zulaikah, S.; Juangsa, FB; Budiman, Licenciatura en Letras; Aziz, M. Revisión sobre estrategias de diseño de empaques de baterías para una calidad superior Gestión Térmica en Vehículos Eléctricos. Baterías 2022, 8, 287. [\[CrossRef\]](#)
66. Schöberl, J.; Ank, M.; Schreiber, M.; Wassiliadis, N.; Lienkamp, M. Propagación térmica desbocada en baterías de iones de litio para automóviles con cátodos NMC-811 y LFP: requisitos de seguridad e impacto en la integración del sistema. Transporte electrónico 2024, 19, 100305.
67. Trahey, L.; Brushett, FR; Balsara, NP; Ceder, G.; Cheng, L.; Chiang, YM; Hahn, Nuevo Testamento; Ingram, BJ; Minter, SD; Moore, JS; et al. Almacenamiento de energía emergente: una perspectiva del Centro Conjunto para la Investigación del Almacenamiento de Energía. Proc. Nacional. Acad. Ciencia. Estados Unidos 2020, 117, 12550–12557. [\[Referencia cruzada\]](#)
68. Barbosa, JC; Fidalgo-Marijuan, A.; Días, JC; Gonçalves, R.; Salado, M.; Costa, CM; Lanceros-Méndez, S. Diseño molecular de Polímeros funcionales para baterías de radicales orgánicos. Materia de almacenamiento de energía. 2023, 60, 102841. [\[Referencia cruzada\]](#)
69. Hager, MD; Esser, B.; Feng, X.; Schuhmann, W.; Theato, P.; Schubert, EE. UU. Baterías basadas en polímeros: energía flexible y fina Sistemas de almacenamiento. Adv. Madre. 2020, 32, e2000587. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
70. Choi, S. Pilas de biocombustible y biobaterías: conceptos erróneos, oportunidades y desafíos. Baterías 2023, 9, 119. [\[CrossRef\]](#)
71. Patra, S.; Verma, J.; Mishra, YK; Kurinec, S.; Wang, Q.; Syväjärvi, M.; Tiwari, A. El posicionamiento de biobaterías basadas en células de biocombustible para el futuro de energía neta cero. J. Almacenamiento de energía 2023, 72, 107919. [\[CrossRef\]](#)
72. Nguyen, TH; Fraiwan, A.; Choi, S. Baterías de papel: una revisión. Biosens. Bioelectrón. 2014, 54, 640–649. [\[Referencia cruzada\]](#)
73. Yazdi, AA; Preite, R.; Milton, RD; Hickey, director de fotografía; Minter, SD; Xu, J. Biobatería recargable de glucosa sin membrana: hacia Cátodos de estado sólido para dispositivos enzimáticos implantables. J. Fuentes de energía 2017, 343, 103–108. [\[Referencia cruzada\]](#)
74. Guimalda, Nuevo Testamento; Kaveti, R.; Bandodkar, AJ Células, baterías y supercondensadores de biocombustible activados por biofluidos: un estudio completo Revisar. Adv. Madre. 2023, 35, e2303197. [\[Referencia cruzada\]](#)
75. Li, P.; Kim, H.; Myung, ST; Sun, YK Desviando la exploración del ánodo de silicio a una forma práctica: una revisión centrada en el compuesto de silicio y grafito para baterías de iones de litio. Materia de almacenamiento de energía. 2020, 35, 550–576. [\[Referencia cruzada\]](#)
76. Fichtner, M. Investigaciones recientes y avances en baterías para vehículos eléctricos. Masa. Supercaps 2022, 5, e20210022. [\[Referencia cruzada\]](#)

77. Li, Y.; Yang, J.; Song, J. Modelo de sistema de nanoenergía y efecto a nanoescala de la batería de grafeno en energías renovables eléctricas Vehículo. *Renovar. Sostener. Energía Rev.* 2016, 69, 652–663. [\[Referencia cruzada\]](#)
78. Raccichini, R.; Varzi, A.; Passerini, S.; Scrosati, B. El papel del grafeno para el almacenamiento de energía electroquímica. *Nat. Madre.* 2015, 14, 271–279. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
79. Hu, B.; Wang, X. Avances en microbaterías de iones de litio para aplicaciones portátiles y en chips. *J. Micromecánico. Microing.* 2021, 31, 114002. [\[Referencia cruzada\]](#)
80. Muench, S.; Burges, R.; Lex-Balducci, A.; Brendel, J.C.; Jäger, M.; Friebe, C.; Salvaje, A.; Schubert, Adaptación estadounidense de electrodos y electrolitos de polímeros en gel imprimibles para baterías totalmente orgánicas optimizadas. *J. Polim. Ciencia.* 2021, 59, 494–501. [\[Referencia cruzada\]](#)
81. Invierno, M.; Brodd, R.J. ¿Qué son las baterías, las pilas de combustible y los supercondensadores? *Química. Rev.* 2004, 104, 4245–4270. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
82. Isa, N.N.C.; Mohd, Y.; Zaki, M.H.M.; Mohamad, S.A.S. Caracterización del revestimiento de cobre electrodepositado sobre acero inoxidable Sustrato. En t. *J. Electroquímica. Ciencia.* 2017, 12, 6010–6021. [\[Referencia cruzada\]](#)
83. Trentín, A.; Pakseresht, A.; Durán, A.; Castro, Y.; Galusek, D. Caracterización electroquímica de recubrimientos poliméricos para protección contra la corrosión: una revisión de avances y perspectivas. *Polímeros* 2022, 14, 2306. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
84. Molina, J.; Esteves, M.F.; Fernández, J.; Bonastre, J.; Casos, F. Tejidos conductores recubiertos de polianilina. *Química y Electroquímica Caracterización cal. EUR. Polímero. J.* 2011, 47, 2003–2015. [\[Referencia cruzada\]](#)
85. Stangl, A.; Muñoz-Rojas, D.; Burriel, M. Técnicas de caracterización in situ y operando para celdas electroquímicas de óxido sólido: avances recientes. *J. Física. Energía* 2021, 3, 012001. [\[CrossRef\]](#)
86. Raffee, M.; Abrams, D.J.; Cardenal, L.; Goss, Z.; Romero-Arenas, A.; Stahl, S.S. Voltametría y cronoamperometría cíclica: herramientas mecanicistas para la electrosíntesis orgánica. *Química. Soc. Rev.* 2024, 53, 566–585. [\[Referencia cruzada\]](#)
87. Elgrishi, N.; Rountree, K.J.; McCarthy, B.D.; Rountree, E.S.; Eisenhart, T.T.; Dempsey, J.L. Una guía práctica para principiantes sobre voltamperometría cíclica. *J. química. Educativo.* 2018, 95, 197–206. [\[Referencia cruzada\]](#)
88. Guziejewski, D.; Stojanov, L.; Zwierzak, Z.; Compton, R.G.; Mirceski, V. Cinética de electrodos de un solo experimento: análisis de amplitud múltiple en cronoamperometría de onda cuadrada. *Física. Química. Física.* 2022, 24, 24419–24428. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
89. Lee, G.Y.; Parque, J.H.; Chang, Y.W.; Cho, S.; Kang, M.J.; Pyun, J.C. Ciclismo Redox basado en cronoamperometría para su aplicación a Inmunoensayos. *ACS Sens.* 2018, 3, 106–112. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
90. Volodin, I.A.; Stolze, C.; Casas Mesa, C.; Haagen, U.; Terechin, C.; Hager, M.D.; Schubert, E.E. UU. Más allá de las condiciones del estado estacionario: mediciones cronoamperométricas del estado de carga y del estado de salud en electrolitos de baterías de flujo. *Sens. Actuadores B Chem.* 2024, 403, 135101. [\[Referencia cruzada\]](#)
91. Parrilla, M.; Cuartero, M.; Crespo, G.A. Sensores de iones potenciométricos portátiles. *TrAC: análisis de tendencias. Química.* 2019, 110, 303–320. [\[Referencia cruzada\]](#)
92. Düzgün, A.; Zelada-Guillén, G.A.; Crespo, G.A.; MacHo, S.; Riu, J.; Rius, F.X. Materiales Nanoestructurados en Potenciometría. *Anal. Bioanal. Química.* 2011, 399, 171–181. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
93. Ding, J.; Qin, W. Avances recientes en biosensores potenciométricos. *TrAC: análisis de tendencias. Química.* 2020, 124, 115803. [\[Referencia cruzada\]](#)
94. Lin, Z.; Wu, D.; Du, C.; Ren, Z. Un método potenciométrico mejorado para la medición del coeficiente de entropía de iones de litio Batería basada en ajuste positivo. *Representante de Energía* 2022, 8, 54–63. [\[Referencia cruzada\]](#)
95. Chmayssem, A.; Tanasa, C.E.; Verplanck, N.; Gougis, M.; Mourier, V.; Zebda, A.; Ghaemmaghami, A.M.; Mailley, P. Nuevo sistema de microfluidos para la evaluación por espectroscopia de impedancia electroquímica del rendimiento del cultivo celular: diseño y desarrollo de un nuevo material de electrodo. *Biosensores* 2022, 12, 452. [\[CrossRef\]](#)
96. Zhang, M.; Liu, Y.; Li, D.; Cui, X.; Wang, L.; Pequeño, W.; Wang, K. Espectroscopia de impedancia electroquímica: un nuevo capítulo en la estimación rápida y precisa del estado de salud de las baterías de iones de litio. *Energías* 2023, 16, 1599. [\[CrossRef\]](#)
97. Choi, W.; Shin, H.C.; Kim, J.M.; Choi, J.Y.; Yoon, W.S. Modelado y aplicaciones de espectroscopia de impedancia electroquímica (Eis) para baterías de iones de litio. *J. Electroquímica. Ciencia. Tecnología.* 2020, 11, 1–13. [\[Referencia cruzada\]](#)
98. Brett, espectroscopia de impedancia electroquímica CMA en la caracterización y aplicación de electrodos modificados para Sensores Electroquímicos y Biosensores. *Moléculas* 2022, 27, 1497. [\[CrossRef\]](#)
99. Magar, S.A.; Hassan, R.Y.A.; Mulchandani, A. Espectroscopia de impedancia electroquímica (Eis): principios, construcción y Aplicaciones de biosensores. *Sensores* 2021, 21, 6578. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
100. Cachet-Vivier, C.; Keddah, M.; Vivier, V.; Yu, L.T. Desarrollo de dispositivos de microelectrodos de cavidad y sus usos en varios Campos de investigación. *J. Electroanal. Química.* 2013, 688, 12–19. [\[Referencia cruzada\]](#)
101. Tremblay, M.L.; Martin, M.H.; Lebouin, C.; Lasia, A.; Guay, D. Determinación de la superficie real de materiales en polvo en microelectrodos de cavidad mediante espectroscopia de impedancia electroquímica. *Electrochim. Acta* 2010, 55, 6283–6291. [\[Referencia cruzada\]](#)
102. Cachet-Viviera, C.; Vivier, V.; Cha, C.S.; Nedelec, J.Y.; Yu, L.T. Electroquímica del material en polvo estudiado mediante el Microelectrodo de Cavidad (CME). *Electrochim. Acta* 2001, 47, 181–189. [\[Referencia cruzada\]](#)
103. Vivier, V.; Cachet-Vivier, C.; Cha, C.S.; Nedelec, J.Y.; Yu, L.T. microelectrodo de cavidad LT para estudiar materiales de baterías: aplicación a Polvo de polianilina. *Electroquímica. Comunitario.* 2000, 2, 180–185. [\[Referencia cruzada\]](#)
104. Hasegawa, N.; Shoji, K. Control de volumen de microcavidades en una punta de electrodos Ag/AgCl para mediciones de corriente de canal estable de Nanoporos Biológicos. *Analista* 2022, 147, 1191–1198. [\[Referencia cruzada\]](#)
105. Huang, X.; Shi, X.; Zeng, H. ¿Qué tan lejos está la recuperación de cobre/níquel de la aplicación práctica en la galvanoplastia? ¿Aguas residuales? *Recurso. Conservar. Reciclar. Adv.* 2023, 19, 200170. [\[Referencia cruzada\]](#)

106. Mohajeri, R.; Alipour, Z.; Hajhosseini, S.; Mirzaei, S.; Fardmanesh, M. Caracterización de electrodos recubiertos de platino encapsulados en canales de microfluidos para aplicaciones de impedanciometría. En *actas de la 28.ª Conferencia Nacional y 6.ª Internacional Iraní sobre Ingeniería Biomédica de 2021 (ICBME 2021)*, Teherán, Irán, 25 y 26 de noviembre de 2021. [\[CrossRef\]](#)
107. Solonin, MD; Asnis, NA; Grigoryan, NS; Vagramyan, TA Limpieza de alambre fino de tungsteno antes de la galvanoplastia de oro. *Tsvetnye Reunio.* 2023, 2023, 58–63. [\[Referencia cruzada\]](#)
108. Menk, LA; Baca, ED; Hollowell, AE Electrodeposición de cobre en vías ciegas de mesoescala a través de silicio. *Reunión ECS. Abstr.* 2018, MA2018-02, 823. [\[Referencia cruzada\]](#)
109. Mochizuki, C.; Senga, T.; Shibata, M. Electrodeposición de películas de vidrio metálico Pd-Ni-P. *Electroquímica* 2011, 79, 249–251. [\[Referencia cruzada\]](#)
110. Krywko-Cendrowska, A.; Strawski, M.; Szklarczyk, M. Electrodeposición a baja temperatura de películas de SiO_x fotoactivas en solución acuosa. *Electrochim. Acta* 2013, 108, 112–117. [\[Referencia cruzada\]](#)
111. Liu, AS; Oliveira, Electrodeposición MAS de películas de polipirrol sobre aluminio a partir de solución acuosa de tartrato. *J. Braz. Química. Soc.* 2007, 18, 143–152. [\[Referencia cruzada\]](#)
112. Sayah, A.; Habelhames, F.; Bahloul, A.; Boudjadi, A. El efecto del potencial aplicado de electrodeposición sobre la electroquímica Rendimiento de películas de polianilina. *J. Mater. Ciencia. Madre. Electrón.* 2021, 32, 10692–10701. [\[Referencia cruzada\]](#)
113. Lata, S.; Batra, B.; Kumar, P.; Pundir, CS Construcción de un biosensor amperométrico de D-aminoácido basado en d-aminoácido oxidasa/nanotubo de carbono de paredes múltiples carboxilado/nanopartículas de cobre/electrodo de oro modificado con polialinina. *Anal. Bioquímica.* 2013, 437, 1–9. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
114. Ji, J.; Zhu, X.; Mano, L.; Li, M.; Zhang, Q.; Shu, Y.; Cheng, Z.; Zhang, W.; Hua, E.; Sang, S. Electrodeposición de CA de películas PEDOT en líquidos iónicos próticos para transistores electroquímicos orgánicos estables a largo plazo. *Moléculas* 2019, 24, 4105. [\[CrossRef\]](#)
115. Martínez Viademonte, MP; Abrahami, ST; Hackear, T.; Burchardt, M.; Terry, H. Una revisión sobre la anodización del aluminio aeroespacial Aleaciones para protección contra la corrosión. *Recubrimientos* 2020, 10, 1106. [\[CrossRef\]](#)
116. Iwasaki, M. Anodizado de titanio. *J. surfear. Finalizar. Soc. Japón.* 2022, 73, 28–32. [\[Referencia cruzada\]](#) 117. de Sousa Araujo, JV; da Silva, RMP; Klumpp, RE; Costa, I. El proceso de anodizado del aluminio y sus aleaciones: una historia y Enfoque Electroquímico. *Quim. Nueva* 2021, 44, 999–1011. [\[Referencia cruzada\]](#)
118. Schneider, M.; Fürbeth, W. Anodizado: el poro marca la diferencia. *Madre. Corros.* 2022, 73, 1752–1765. [\[Referencia cruzada\]](#)
119. Tsangaraki-Kaplanoglou, I.; Theohari, S.; Dimogerontakis, T.; Wang, YM; Kuo, HH; Kia, S. Efecto de los tipos de aleaciones en el Proceso de anodizado del aluminio. *Navegar. Abrigo. Tecnología.* 2006, 200, 2634–2641. [\[Referencia cruzada\]](#)
120. Schneider, M.; Kremmer, K.; Weidmann, SK; Fürbeth, W. Interacción entre la variación de parámetros y la estructura del óxido de un Proceso PAA modificado. *Navegar. Interfaz Anal.* 2013, 45, 1503–1509. [\[Referencia cruzada\]](#)
121. Kuntty, O.; Zozulya, G.; Shepida, M. Formación de silicio poroso mediante grabado electroquímico. *Adv. Madre. Ciencia. Ing.* 2022, 2022, 1482877. [\[Referencia cruzada\]](#)
122. Zhang, L.; Lu, D.; Deng, H. Estudio sobre mecanismos de eliminación de material en el pulido de GaN mejorado con grabado electroquímico. *J. Fabricante. Proceso* 2022, 73, 903–913. [\[Referencia cruzada\]](#)
123. Fluczek, N.; Sawicka, M.; Feduniewicz-Zmuda, A.; Siekacz, M.; Zak, M.; Nowakowski-Szkudlarek, K.; Muziol, G.; Wolny, P.; Kelly, JJ; Skierbiszewski, C. Grabado electroquímico de GaN tipo P utilizando una unión de túnel para una inyección eficiente de orificios. *Acta Mater.* 2022, 234, 118018. [\[Referencia cruzada\]](#)
124. Sol, W.; Shah, SA; Chen, Y.; Tan, Z.; Gao, H.; Habib, T.; Radovic, M.; Green, MJ Grabado electroquímico de Ti₂AlC a Ti₂CT:X (MXene) en solución de ácido clorhídrico de baja concentración. *J. Mater. Química. Una Mater.* 2017, 5, 21663–21668. [\[Referencia cruzada\]](#)
125. Jiang, Y.; Wang, L.; Meunier, M.; Mirsaidov, U. Vías de formación de nanopartículas de aleaciones porosas mediante productos químicos selectivos y Grabado Electroquímico. *Pequeño* 2021, 17, 2006953. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
126. Peng, N.; Ey, Yang, H. Efectos del contenido de H₂SO₄ en la activación electroquímica de túneles grabados en papel de aluminio. *Corrosión* 2018, 74, 75–82. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
127. Peng, N.; Wen, Y.; Él, Y. Distribución mejorada de túneles grabados sobre papel de aluminio con tratamiento con silano. *Prog. Org. Abrigo.* 2019, 127, 151–156. [\[Referencia cruzada\]](#)
128. Kaya, D.; Keçeci, K. Revisión: Membranas de polímero nanoporoso grabadas en pistas como sensores: una revisión. *J. Electroquímica. Soc.* 2020, 167, 037543. [\[Referencia cruzada\]](#)
129. Chen, Y.; Si.; Zhong, Y.; Dong, S.; Hou, M.; Liu, H.; Chen, X.; Gao, J.; Wong, C.-P. Revisión: avances en el grabado electroquímico de semiconductores de tercera generación. *ECS J. Ciencia del estado sólido. Tecnología.* 2023, 12, 045004. [\[Referencia cruzada\]](#)
130. Lin, JC; Liu, YC; Lu, SH; yenes, moneda nacional; Settu, K. Mejora de la capacitancia específica de un condensador poroso a base de silicio mediante la incorporación de grafeno combinado con grabado electroquímico tridimensional. *Electroquímica. Comunitario.* 2023, 154, 107555. [\[Referencia cruzada\]](#)
131. Lazanas, AC; Prodromidis, MI Espectroscopia de impedancia electroquímica: un tutorial. *Medición ACS. Ciencia. Au* 2023, 3, 162–193. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
132. Chmayssem, A.; Monsalve-Grijalba, K.; Alias, M.; Mourier, V.; Vignoud, S.; Scomazzon, L.; Müller, C.; Barthes, J.; Vrana, NE; Mailley, P. Método de referencia para el análisis fuera de línea de óxidos de nitrógeno en medios de cultivo celular mediante un detector de quimioluminiscencia basado en ozono. *Anal. Bioanal. Química.* 2021, 413, 1383–1393. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
133. Chmayssem, A.; Pequeño, L.; Verplanck, N.; Mourier, V.; Vignoud, S.; Vrana, NE; Mailley, P. Caracterización del impacto de los medios de cultivo celular clásicos en la respuesta de sensores electroquímicos. *Electroanálisis* 2022, 34, 1201–1211. [\[Referencia cruzada\]](#)

134. Escarpa, A. Electroanálisis de alimentos: sentido y sencillez. *Química. Rec.* 2012, 12, 72–91. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
135. Bussoo, A.; Tubbs, E.; Revol-Cavalier, F.; Chmaysssem, A.; Alessio, M.; Cosnier, M.L.; Verplanck, N. Monitoreo en tiempo real de los niveles de oxígeno dentro de dispositivos termoplásticos de órgano en chip. *Electron SSRN. J.* 2022, 11, 4090175. [\[CrossRef\]](#)
136. Bühlmann, P.; Pretsch, E.; Bakker, E. Electroodos selectivos de iones basados en portadores y optodos a granel. 2. Ionóforos para potenciometría y sensores ópticos. *Química. Rev.* 1998, 98, 1593–1688. [\[Referencia cruzada\]](#)
137. Lonsdale, W. Desarrollo, fabricación y aplicación de un sensor de PH de estado sólido que utiliza óxido de rutenio; Universidad Edith Cowan: Joondalup, WA, Australia, 2018.
138. Liu, Y.; Pharr, M.; Salvatore, G. Lab-on-Skin: una revisión de dispositivos electrónicos flexibles y estirables para el monitoreo de la salud portátil. *ACS Nano* 2017, 11, 9614–9635. [\[Referencia cruzada\]](#)
139. Gao, W.; Emaminejad, S.; Nyein, H.Y.; Challa, S.; Chen, K.; Peck, A.; Fahad, H.M.; Ota, H.; Shiraki, H.; Kiriya, D.; et al. Conjuntos de sensores portátiles totalmente integrados para análisis de transpiración in situ multiplexados. *Naturaleza* 2016, 529, 509–514. [\[Referencia cruzada\]](#)
140. Soranzo, T.; Ben Tahar, A.; Chmaysssem, A.; Zelsmann, M.; Vadgama, P.; Lenormand, J.L.; Cinquin, P.; Martín, D.K.; Zebda, A. Biosensor electroquímico de glucosa basado en la reducción enzimática de glucosa. *Sensores* 2022, 22, 7105. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
141. Chmaysssem, A.; Shalayel, I.; Marinesco, S.; Zebda, A. Investigación de la estabilidad de GOx en una matriz de quitosano: aplicaciones para Electroodos enzimáticos. *Sensores* 2023, 23, 465. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
142. Chmaysssem, A.; Nadolska, M.; Tubbs, E.; Sadowska, K.; Vadgama, P.; Shitanda, I.; Tsujimura, S.; Lattach, Y.; Pavo real, M.; Tingry, S.; et al. Información sobre la monitorización continua de glucosa: desde los conceptos básicos médicos hasta los dispositivos comercializados. *Microchim. Acta* 2023, 190, 177. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
143. Yoo, E.H.; Lee, S.Y. Biosensores de glucosa: descripción general del uso en la práctica clínica. *Sensores* 2010, 10, 4558–4576. [\[Referencia cruzada\]](#)
144. Singh, N.; Goldsmith, B.R. Papel de la electrocatálisis en la remediación de contaminantes del agua. *ACS Catal.* 2020, 10, 3365–3371. [\[Referencia cruzada\]](#)
145. Naidu, R.; Biswas, B.; Willett, I.R.; Cribb, J.; Kumar Singh, B.; Paul Natanail, C.; Coulon, F.; Simple, K.T.; Jones, K.; Barclay, A.; et al. Contaminación química: un peligro creciente y un riesgo potencialmente catastrófico para la humanidad. *Reinar. En t.* 2021, 156, 106616. [\[Referencia cruzada\]](#)
146. Isarain-Chávez, E.; De La Rosa, C.; Godínez, L.A.; Brillas, E.; Peralta-Hernández, J.M. Estudio comparativo de procesos electroquímicos de tratamiento de agua para el efluente de una curtiduría. *J. Electroanal. Química.* 2014, 713, 62–69. [\[Referencia cruzada\]](#)
147. Feng, A.; Feng, J.; Xing, W.; Jiang, K.; Tang, W. Aplicaciones versátiles de sistemas de flujo electroquímico en procesos de tratamiento de agua. *Química. Ing. J.* 2023, 473, 145400. [\[CrossRef\]](#)
148. Alvarado, L.; Chen, A. Electrodesionización: principios, estrategias y aplicaciones. *Electrochim. Acta* 2014, 132, 583–597. [\[Referencia cruzada\]](#)
149. Salari, K.; Zarafshan, P.; Khashehchi, M.; Chegini, G.; Etezadi, H.; Karami, H.; Szulzyk-Cieplak, J.; Jagód, G. Conocimiento y tecnología utilizados en la desionización capacitiva del agua. *Membranas* 2022, 12, 459. [\[CrossRef\]](#)
150. Wang, K.; Li, H.; Yang, Y.; Wang, P.; Zheng, Y.; Song, L. Hacer que los compuestos catódicos sean más eficientes para Electro-Fenton y Sistemas Bio-Electro-Fenton: una revisión. *Sep. Purif. Tecnología.* 2022, 304, 122302. [\[Referencia cruzada\]](#)
151. El, L.; Du, P.; Chen, Y.; Lu, H.; Cheng, X.; Chang, B.; Wang, Z. Avances en pilas de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales. *Renovar. Sostener. Energía Rev.* 2017, 71, 388–403. [\[Referencia cruzada\]](#)
152. Sillanpää, M.; Shestakova, M. Métodos electroquímicos emergentes y combinados. En *Métodos electroquímicos de tratamiento de agua: fundamentos, métodos y aplicaciones a gran escala*; Elsevier Inc.: Amsterdam, Países Bajos, 2017; Capítulo 3, págs. 131–225. [\[Referencia cruzada\]](#)
153. Azañaw, A.; Birle, B.; Teshome, B.; Jemberie, M. Métodos de tratamiento de efluentes textiles y resolución ecológica de textiles Aguas residuales. *Caso Stud. Química. Reinar. Ing.* 2022, 6, 100230. [\[Referencia cruzada\]](#)
154. Vineta, S.; Silvana, Z.; Sanja, R.; Golomeova, S. Métodos de tratamiento de aguas residuales en la industria textil. En *Actas de la Conferencia científica internacional "UNITECH 2014"*, Gabrovo, Bulgaria, 21 y 22 de noviembre de 2014.
155. Behera, M.; Nayak, J.; Banerjee, S.; Chakraborty, S.; Tripathy, S.K. Una revisión sobre el tratamiento de los efluentes residuales de la industria textil hacia el desarrollo de una estrategia de mitigación eficiente: un enfoque de diseño de sistema integrado. *J. Medio Ambiente. Química. Ing.* 2021, 9, 105277. [\[Referencia cruzada\]](#)
156. Samsami, S.; Mohamadi, M.; Sarrafzadeh, M.H.; René, E.R.; Firoozbahr, M. Avances recientes en el tratamiento de aguas residuales que contienen tintes de las industrias textiles: descripción general y perspectivas. *Proceso de seguridad. Reinar. Prot.* 2020, 143, 138–163. [\[Referencia cruzada\]](#)
157. Labidi, A.; Salaberria, A.M.; Fernández, S.C.M.; Labidi, J.; Abderrabba, M. Derivado funcional de quitosano y quitina como materiales de decoloración para azul de metileno y naranja de metilo a partir de soluciones acuosas. *Materiales* 2019, 12, 361. [\[CrossRef\]](#)
158. Meng, X.L.; Nie, Y.; Sol, J.; Cheng, W.G.; Wang, J.Q.; El, H.Y.; Zhang, S.J. Polímeros funcionalizados de dicianidamida-formaldehído como catalizadores heterogéneos eficientes para la conversión de CO₂ en carbonatos orgánicos. *Verde. Química.* 2014, 16, 2771–2778. [\[Referencia cruzada\]](#)
159. Alinsafi, A.; Evenou, F.; Abdulkarim, E.M.; Pons, M.; Zahraa, O.; Benhammou, A.; Yaacoubi, A.; Nejmeddine, A. Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil por Fotocatálisis Soportada. *Tintes pigmentos* 2007, 74, 439–445. [\[Referencia cruzada\]](#)
160. Ilhan, F.; Ulucan-Altuntas, K.; Dogan, C.; Kurt, U. Tratabilidad de aguas residuales textiles crudas mediante el proceso Fenton y su comparación con la coagulación química. *Tratamiento de Agua Desaladora.* 2019, 162, 142–148. [\[Referencia cruzada\]](#)
161. Kaur, P.; Kushwaha, J.P.; Sangal, V.K. Tratamiento oxidativo electrocatalítico de aguas residuales textiles reales en un reactor continuo: vía de degradación y estudio de desechabilidad. *J. Peligro. Madre.* 2018, 346, 242–252. [\[Referencia cruzada\]](#)

162. Mukimin, A.; Wijaya, K.; Kuncaka, A. Oxidación de Remazol Brilliant Blue r (RB.19) con activo electrogenerado in situ Cloro mediante electrodo de Ti/PbO₂. Sep. Purif. Tecnología. 2012, 95, 1–9. [\[Referencia cruzada\]](#)
163. Chmaysem, A.; Al Choubassi, G.; Taha, S.; Hauchard, D. Proceso Electro-Fenton a escala semipiloto. Un estudio para ampliar el reactor para aplicaciones industriales. Res. Cuadrados. 2023. [\[Referencia cruzada\]](#)
164. Parque, S.; Lee, JW; Popov, BN Una revisión de la capa de difusión de gas en pilas de combustible PEM: materiales y diseños. En t. J. Energía del Hidrógeno 2012, 37, 5850–5865. [\[Referencia cruzada\]](#)
165. Mukimin, A.; Vistanty, H.; Hariastuti, N.; Setianingsih, NI; Djayanti, S.; Nilawati, Y. Reactor y sistema híbrido Fenton-electroquímico como postratamiento de aguas residuales textiles. J. Ing. de Procesos de Agua. 2024, 59, 105028. [\[Referencia cruzada\]](#)
166. Zhu, C.; Ang, Nueva Jersey; Meyer, TH; Qiu, Y.; Ackermann, L. Electroquímica orgánica: síntesis moleculares con potencial. SCA Centavo. Ciencia. 2021, 7, 415–431. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
167. Sanguijuela, MC; Lam, K. Una guía práctica para la electrosíntesis. Nat. Rev. Química. 2022, 6, 275–286. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
168. Botte, GG Fabricación electroquímica en la industria química. Electroquímica. Soc. Interfaz 2014, 23, 49–55. [\[Referencia cruzada\]](#)
169. Wang, F.; Li, W.; Wang, R.; Guo, T.; Sheng, H.; Fu, HC; Stahl, SS; Jin, S. Síntesis electroquímica modular utilizando un redox Depósito emparejado con semirreacciones independientes. Julio 2020, 5, 149–165. [\[Referencia cruzada\]](#)
170. Cui, B.; Shi, Y.; Li, G.; Chen, Y.; Chen, W.; Deng, Y.; Hu, W. Desafíos y oportunidades para la electrólisis del agua de mar: una mini revisión sobre materiales avanzados en electroquímica relacionada con el cloro. Wuli Huaxue Xuebao/Acta Phys.—Chim. Pecado. 2022, 38, 2106010. [\[Referencia cruzada\]](#)
171. Li, Q.; Jensen, JO; Bjerrum, Nueva Jersey Química, electroquímica y aplicaciones electroquímicas | Aluminio. En Enciclopedia de Fuentes de Energía Electroquímica; Elsevier Inc.: Ámsterdam, Países Bajos, 2009. [\[CrossRef\]](#)
172. Comer, BM; Fuentes, P.; Dimkpa, CO; Liu, YH; Fernández, CA; Arora, P.; Realf, M.; Singh, U.; Hatzell, MC; Medford, Arizona, EE.UU. Perspectivas y desafíos de los fertilizantes solares. Julio 2019, 3, 1578–1605. [\[Referencia cruzada\]](#)
173. Fu, N.; Sauer, GS; Lin, S. Un enfoque electrocatalítico general para la síntesis de diaminas vecinales. Nat. Protocolo. 2018, 13, 1725–1743. [\[Referencia cruzada\]](#)
174. Zheng, S.; Yan, J.; Wang, K. Progreso de la investigación en ingeniería de la tecnología de microrreacción electroquímica: un método novedoso para Electrosíntesis de sustancias químicas orgánicas. Ingeniería 2021, 7, 22–32. [\[Referencia cruzada\]](#)
175. Anastasiadou, D. Electrodo a base de Cu para electrosíntesis de amoníaco y urea. Doctor. Tesis, Universidad Tecnológica de Eindhoven, Eindhoven, Países Bajos, 2023.
176. Chen, X.; Lv, S.; Su, Z.; Yang, X.; Cui, H.; Yang, Z.; Xu, Z.; Teobaldi, G.; Kang, J.; Liu, L.-M.; et al. Progresos recientes en nanomateriales amorfos para la síntesis electroquímica de compuestos que contienen N. Química. Catalán. 2024, 100871. [\[Referencia cruzada\]](#)
177. Botte, GG Transición de tecnologías electroquímicas a la agricultura a través de la investigación en ingeniería de la Fundación Nacional de Ciencias Modelo Centro. Electroquímica. Soc. Interfaz 2023, 32, 69–73. [\[Referencia cruzada\]](#)
178. Meyer, TH; Choi, I.; Tian, C.; Ackermann, L. Impulsando el futuro: ¿Cómo puede la electroquímica marcar la diferencia en materia orgánica? ¿Síntesis? Química 2020, 6, 2484–2496. [\[Referencia cruzada\]](#)
179. Talebi, señor; Nematollahi, D. Síntesis electroquímica de derivados de sulfonamida: condiciones de electrosíntesis y vías de reacción. ChemElectroChem 2024, 11, e202300728. [\[Referencia cruzada\]](#)
180. Zuo, S.; Xue, W.; Zhang, Y.; Chen, J.; Lin, Z. Portada: Electrocatalizadores para hidrógeno basados en motivos de Fe atómicamente dispersos Síntesis de peróxido (ChemNanoMat 2/2024). ChemNanoMat 2024, 10, 202400093. [\[CrossRef\]](#)
181. Zuo, S.; Xue, W.; Zhang, Y.; Chen, J.; Lin, Z. Electrocatalizadores basados en motivos de Fe atómicamente dispersos para la síntesis de peróxido de hidrógeno. ChemNanoMat 2024, 10, 202300476. [\[CrossRef\]](#)
182. Schremp, FW Prevención de corrosión para plataformas marinas. JPT J. Pet. Tecnología. 1984, 36, 605–612. [\[Referencia cruzada\]](#)
183. Chen, Y.; Él, M.; Zong, Y.; Dong, S.; Yan, Y.; Zhang, Y.; Liu, H.; Cao, J. Progreso de la investigación sobre los modos de falla de los flexibles no vinculados Tubería y sus Medidas de Control. Nat. Gas. Indiana 2021, 41, 122–131. [\[Referencia cruzada\]](#)
184. Mahajanam, SPV; Joosten, Directrices de MW para la selección de material de relleno para minimizar la corrosión de soldadura preferencial en aceros para tuberías. Proyecto SPE. Fácil. Construcción 2011, 6, 5–12. [\[Referencia cruzada\]](#)
185. Erdogan, C.; Swain, G. Diseño conceptual de protección catódica de ánodo de sacrificio para monopilas eólicas marinas. Ing. Océano. 2021, 235, 109339. [\[Referencia cruzada\]](#)
186. Popov, BN Ingeniería de corrosión: principios y problemas resueltos; Elsevier: Ámsterdam, Países Bajos, 2015. [\[CrossRef\]](#)
187. Ahmad, Z. Principios de ingeniería de corrosión y control de la corrosión; Elsevier: Burlington, MA, EE. UU., 2006. [\[CrossRef\]](#)
188. Cicek, V. Ingeniería de corrosión; Wiley: Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU., 2014; ISBN 9781118720899. [\[Referencia cruzada\]](#)
189. Pyun, S.-I. Estrategias de protección contra la corrosión de metales. ChemTexts 2020, 7, 2. [\[CrossRef\]](#)
190. Ducasse-Lapeyrousse, J.; Bouteiller, V.; Marie-Victoire, E.; Bouichou, M.; Damián, G.; Martinet, V.; Annede-Villeau, C.; Lesieutre, O. Evaluación del sistema de protección catódica por corriente impresa después de 4 años de funcionamiento: estudio de caso del viaducto de Saint-Cloud (Francia). Caso Stud. Construcción Madre. 2023, 18, e02023. [\[Referencia cruzada\]](#)
191. Xu, J.; Yang, M.; Li, S.; Kainuma, S.; Ji, B.; Murayama, S. Aplicación del método de protección catódica en estructuras de acero utilizando ánodo de sacrificio y electrolito de hidrogel de poliácido de sodio-carboximetilcelulosa de sodio (PANa-CMC). Caso Stud. Construcción Madre. 2024, 20, e02742. [\[Referencia cruzada\]](#)
192. Ramanavasu, R.; Vijayakumar, K.; Fernández, SG Nanorred Integrada para el Sistema de Protección Catódica por Corriente Imprimida en Planta Desaladora. Sostenibilidad 2023, 15, 7088. [\[CrossRef\]](#)

193. Yao, G.; Él, X.; Liu, J.; Guo, Z.; Chen, P. Estudio de prueba del mecanismo de protección contra la corrosión del cable de puente basado en impresiones Protección catódica actual. *Lubricantes* **2023**, *11*, 30. [\[CrossRef\]](#)
194. Dickinson, E.J.F.; Ekström, H.; Fontes, E. COMSOL Multiphysics®: Software de elementos finitos para análisis electroquímico. A Mini-revisión. *Electroquímica. Comunitario*. **2014**, *40*, 71–74. [\[Referencia cruzada\]](#)
195. Jalalvand, AR; Roushani, M.; Goicoechea, HC; Rutledge, DN; Gu, HW MATLAB en electroquímica: una revisión. *Talanta* **2018**, *194*, 205–225. [\[Referencia cruzada\]](#)
196. Weddle, P.; Vicente, T.; Kee, RJ Identificación y aplicación de modelos de espacio de estados derivados de modelos físicos de alta fidelidad de baterías de iones de litio. Reunión ECS. Abstr. **2017**, MA2017-01. [\[Referencia cruzada\]](#)
197. Bennett, B.; Chang, J.; Bard, AJ Mecanismo de la reacción redox Br-/Br₂ en electrodos de platino y carbono vítreo en nitrobenzono mediante voltamperometría cíclica. *Electrochim. Acta* **2016**, *219*, 1–9. [\[Referencia cruzada\]](#)
198. Habekost, A. Simulación y ajuste de curvas de voltamperometría y cronoamperometría cíclicas de reacciones electroquímicas con diferentes mecanismos: una perspectiva didáctica. *Mundo J. Chem. Educativo*. **2019**, *7*, 53–64. [\[Referencia cruzada\]](#)
199. Wang, X.; Wang, Z. Módulos de simulación de electroquímica animados. *J. química. Educativo*. **2022**, *99*, 752–758. [\[Referencia cruzada\]](#)
200. Jaugstetter, M.; Blanco, N.; Kratz, M.; Tschulik, K. Electroquímica bajo confinamiento. *Química. Soc. Rev.* **2022**, *51*, 2491–2543. [\[Referencia cruzada\]](#)
201. Weiß, LJK; Lubins, G.; Música, E.; Rinklin, P.; Banzet, M.; Peng, H.; Terkan, K.; Mayer, D.; Wolfrum, B. Electroquímica de impacto único en microfluidos basados en papel. *ACS Sens.* **2022**, *7*, 884–892. [\[Referencia cruzada\]](#)
202. Zhou, Y.; Qi, J.; Engelberg, DL sobre la aplicación de la electroquímica bipolar para simular el comportamiento de corrosión galvánica de Aceros inoxidables diferentes. *Electroquímica. Comunitario*. **2021**, *126*, 107023. [\[Referencia cruzada\]](#)
203. Tetley, F.; Parupelli, SK; Desai, S. Una revisión de los dispositivos biomédicos: clasificación, directrices reglamentarias, factores humanos, Software como dispositivo médico y ciberseguridad. *Biomédica. Madre. Dispositivos* **2023**, *2*, 316–341. [\[Referencia cruzada\]](#)
204. Marcus, HJ; Payne, CJ; Hughes-Hallett, A.; Marco, AP; Yang, GZ; Darzi, A.; Nandi, D. Aprobación regulatoria de nuevos medicamentos Dispositivos: Estudio Transversal. *BMJ* **2016**, *353*, i2587. [\[Referencia cruzada\]](#)
205. Wagner, MV; Schanze, T. Comparación de procedimientos de aprobación de dispositivos médicos en Europa y Estados Unidos. actual. *Dir. Biomédica. Ing.* **2019**, *5*, 605–608. [\[Referencia cruzada\]](#)
206. Robinson, SG; Sigman, MS Integración de herramientas de análisis electroquímico y estadístico para el diseño molecular y la comprensión mecanicista. *Acc. Química. Res.* **2020**, *53*, 289–299. [\[Referencia cruzada\]](#)
207. Rivera, FF; Pérez, T.; Castañeda, LF; Nava, JL Modelado matemático y simulación de reactores electroquímicos: una revisión crítica. *Química. Ing. Ciencia*. **2021**, *239*, 116622. [\[Referencia cruzada\]](#)
208. Lu, SM; Vannoy, KJ; Dick, JE; Largo, Y.-T. Química multifásica bajo nanoconfinamiento: una perspectiva electroquímica. *J. Soy. Química. Soc.* **2023**, *145*, 25043–25055. [\[Referencia cruzada\]](#)
209. Ma, Z.; Witteman, L.; Wrubel, JA; Bender, G. Un método de modelado integral para electrolizador de membrana de intercambio de protones Desarrollo. En t. *J. Energía de hidrógeno* **2021**, *46*, 17627–17643. [\[Referencia cruzada\]](#)
210. Iliev, IK; Gizzatullin, AR; Filimonova, AA; Chichirová, ND; Beloev, IH Simulación numérica de procesos en una celda electroquímica utilizando COMSOL Multiphysics. *Energías* **2023**, *16*, 7265. [\[CrossRef\]](#)
211. Yaoxuan, Q.; Cheng, F.; Kening, S. Simulación multifísica de una pila de combustible de óxido sólido basada en el método Comsol. En *E3S Web de Conferencias; Ciencias EDP: París, Francia*, **2021**; Volumen 245. [\[CrossRef\]](#)
212. Goel, V.; Thornton, K. Habilitación de la simulación electroquímica de electrodos de baterías de iones de litio con tortuosidad anisotrópica en COMSOL Multifísica®. *MétodosX* **2021**, *8*, 101425. [\[CrossRef\]](#)
213. Salazar, PF; Kumar, S.; Cola, BA Diseño y Optimización de Celdas Termo-Electroquímicas. *J. Aplica. Electroquímica*. **2013**, *44*, 325–336. [\[Referencia cruzada\]](#)
214. Yang, W.; Sol, L.; Bao, J.; Mo, Z.; Du, M.; Xu, Y.; Zhang, J. Modelado multifísico de transferencia de masa y calor en una termo-Célula electroquímica. *Ing. de Indiana. Química. Res.* **2023**, *62*, 12345–12355. [\[Referencia cruzada\]](#)
215. El-Shafie, OA; El-Maghraby, RM; Albo, J.; Fateen, coronas suecas; Abdelghany, A. Modelado e investigación numérica del rendimiento de electrodos de difusión de gas para la reducción electroquímica de dióxido de carbono a metanol. *Ing. de Indiana. Química. Res.* **2020**, *59*, 20929–20942. [\[Referencia cruzada\]](#)
216. Yang, F.; Zhang, J.; Guo, C.; Zhao, S. Investigación del mecanizado electroquímico para una espiral profunda de forma especial con cambio gradual Agujero Basado en COMSOL. En t. *J. Adv. Fabricante. Tecnología*. **2020**, *108*, 2717–2725. [\[Referencia cruzada\]](#)
217. Córdova-Huamán, AV; Jauja-Ccaña, VR; La Rosa-Toro, A. Potenciostato de bajo costo controlado por teléfono inteligente basado en Arduino para la enseñanza de los fundamentos y aplicaciones de la electroquímica. *Helio* **2021**, *7*, e06259. [\[Referencia cruzada\]](#)
218. Ahmad, Nueva Jersey; Yakob, N.; Bunyamin, TAC; Winarno, N.; Akmal, WH El efecto de la simulación y animación interactiva por computadora en el rendimiento y la motivación de los estudiantes en el aprendizaje de electroquímica. *J. Pendidik. IPA Indonesia*. **2021**, *10*, 311–324. [\[Referencia cruzada\]](#)

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.