

# ELECTROQUIMIENERGÍA

## ELECTROCHEMENERGY

**Jairo Márquez P\*. Olga P. de Márquez**

Laboratorio de Electroquímica, Departamento de Química, ,  
Facultad de Ciencias.

Universidad de Los Andes Mérida 5101, Venezuela.

jokkmarquez@gmail.com

**Recibido:** 05-02-18

**Aceptado:** 21-02-18

### Resumen

En síntesis electroquímica nos referimos al productor de sustancias (utilización de energía para la obtención de materia) y productor de energía (se obtiene energía como producto de la transformación de materia). Con el término electroquimienergía (EQ.E) queremos precisar y agrupar los distintos aspectos del productor de energía (incluyendo producción de combustibles), dada la importancia de esta temática y la ausencia de un término que la identifique. Se describen aspectos de la experimentación en el laboratorio, celdas, técnicas, etapas, también se presenta el ciclo de conversión del agua por métodos electroquímicos, que engloba y visualiza bastante bien el término antes referido “electroquimienergía”. Se reportan estudios en nuestro laboratorio, en ese campo y las variadas aplicaciones prácticas de esta temática, en nuestra sociedad.

**Palabras claves:** Electroquimienergía, Energía solar. Electroquímica aplicada

### Abstract

In electrochemical synthesis we commonly refer to the substances producer (obtention of matter by utilizing energy) and to the energy producer (by matter transformation). We introduce here the term electrochemenergy to involve different aspects of energy producer, including fuel production, as we feel the absence of a term to identify this important branch of electrochemistry. In this article a description of processes, cells, techniques, experimentation, are incorporated to give a general vision of the refered term. References to articles from our group, with results in the area are incorporated, also a section on the actually different applications of research results in our society.

**Keywords:** Electrochemenergy, Solar energy. Applied electrochemistry

**Jairo Márquez:** Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciado en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. e-mail: jamar@ula.ve. **Olga**

**P. Márquez:** Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciada en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. e-mail: olgamq@ula.ve

## ELECTROQUIMIENERGÍA

### Electroquimienergía (EQ.E):

El término electroquimienergía abarca las aplicaciones de la electroquímica sobre las distintas fuentes y formas energéticas disponibles, y en sus distintos aspectos característicos. Ello incluye lo relativo a captura, conversión, almacenamiento,

suministro, usos, aplicaciones y otros aspectos relacionados con la temática, y dentro del campo electroquímico. En la figura 1 resume la interconexión mencionada y su explicación es ampliada en el texto que le continúa.

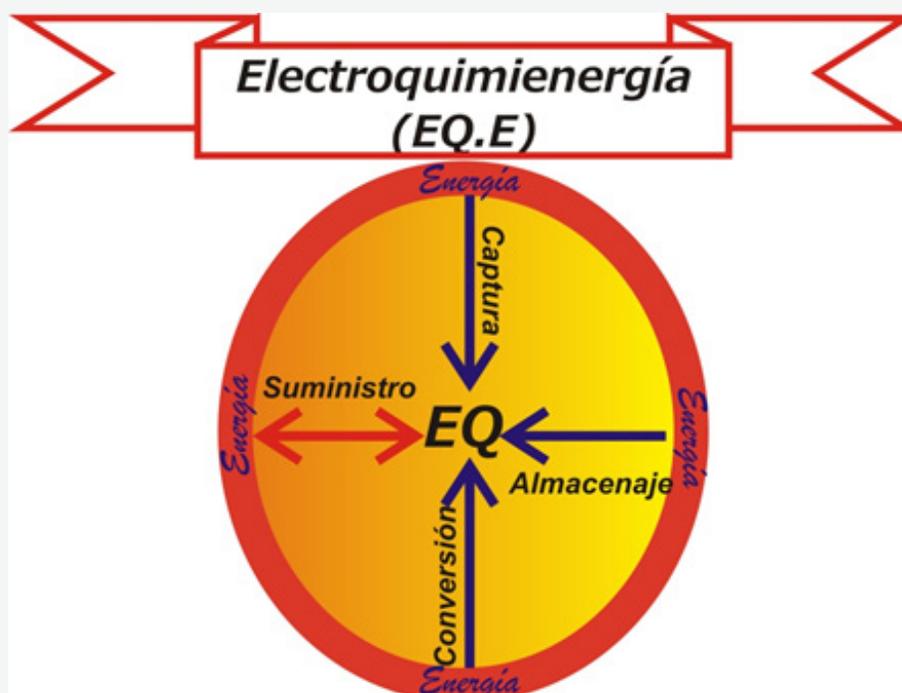


Figura 1.- Ilustración del término Electroquimienergía. EQ.E (interacción en todos los aspectos de la rama científica y tecnológica de la electroquímica, con el objeto de su estudio, la energía) [1].

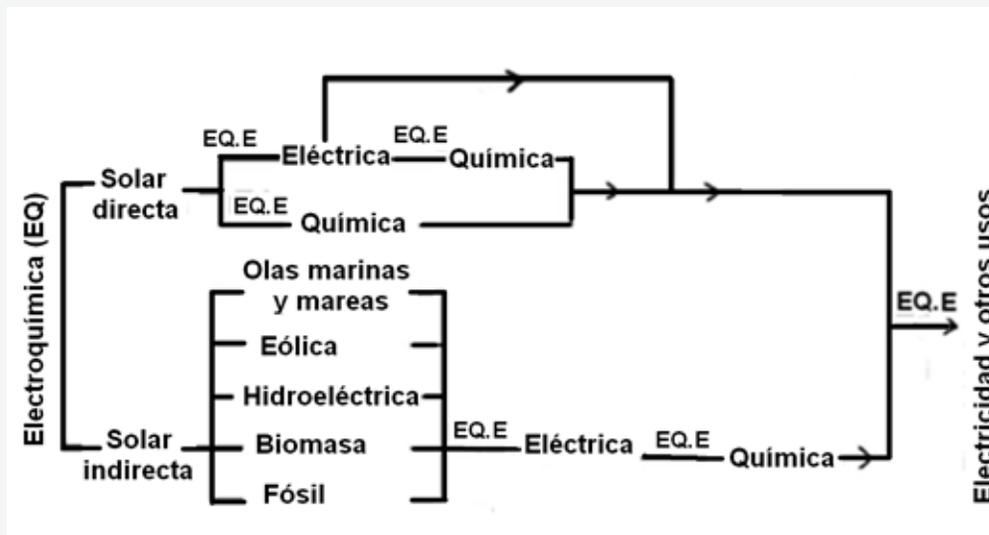


Figura 2.- Conversión electroquímica de la energía solar directa e indirecta, Captura, conversión, almacenaje y suministro están involucrados en el esquema.

El énfasis en este artículo estará centrado en el uso de la electroquímica sobre la energía solar directa e indirecta [2] (se excluyen procesos térmicos) y ello es también resumido en el esquema 2.

Se considera que el porcentaje de la contribución mundial, de fuentes energéticas alternativas es del 10-15% y en crecimiento. Es importante el acceso a zonas remotas, aisladas, poco accesibles.

En la Tabla 1 se resumen las técnicas electroquímicas más utilizadas en el campo [3-5].

Tabla 1.- técnicas electroquímicas

1. Potenciostáticas
2. Galvanostáticas
3. Barrido de corriente
4. Barrido de potencial
5. Pulsos de corriente (escalones, simple, doble, secuencial, combinado)
6. Pulsos de potencial (escalones, simple, doble, secuencial, combinado)
7. Técnicas Crono- (dependientes del tiempo)
8. Técnicas AC
9. Técnicas acopladas: Electroquímica / Química, Electroquímica / Térmica, Microscópica / Electroquímica, Espectroscópica/Electroquímica

## **CAPTURA Y CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR:**

En electroquímica existe una gran expectativa por la implementación de métodos (no contaminantes, sencillos, eficientes, económicos) de captura y conversión de energía solar. Se distinguen cuatro casos:

1. Captura de energía solar en celda fotovoltaica y conversión a energía eléctrica [6]. El aporte electroquímico lo constituye en este caso, la síntesis de semiconductores de alta pureza, en abundancia, mediante procesos sencillos y económicos.

2. Captura de energía solar y conversión a energía eléctrica en celda fotoelectrolítica, para la electrosíntesis de combustibles (Ej. Hidrógeno) [7,8].

3. Captura y conversión en celda fotoelectroquímica de energía solar a química, en síntesis in situ de combustibles [9-12].

4. Utilización de energía eléctrica obtenida desde fuentes indirectas (Ej. Eólica, hidráulica, marina, etc.), de energía solar, para la electrólisis (síntesis de combustibles) [13].

## **ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA:**

En la actualidad hay una creciente demanda por un eficiente almacenamiento y suministro de energías renovables, para la satisfacción de demandas sociales, sin que ello implique una amenaza, por contaminación, a la vida en el planeta.

El almacenaje es importante, teniendo en cuenta que la oferta natural del recurso es aleatoria, debido a la variabilidad natural de su suministro, por condiciones ambientales, uso horario, ubicación, fecha calendaria, etc.

El almacenamiento directo e indirecto de energía solar puede realizarse por vía electroquímica de diferentes formas, como energía química en combustibles (ej.  $H_2$ ,  $CH_2O$ ,  $CH_3OH$ ,  $CH_4$ ), almacenamiento

en baterías (galvánicas/voltaicas) (primarias, secundarias, redox), en super condensadores y en compuestos químicos en general [14-19].

## **SUMINISTRO DE ENERGÍA:**

El suministro de energía se realiza bien como electricidad desde fuentes directas o bien cuando es requerida, desde los dispositivos almacenadores antes mencionados. También hay suministro de energía desde las ya desarrolladas y comerciales celdas de combustible [20-25].

La utilización de estos procesos y celdas, la presenta el ciclo de conversión del agua por métodos electroquímicos, según se resume a continuación (figura 3):

1. Captura y conversión de energía solar a energía eléctrica (celda fotovoltaica)

2. Almacenamiento de energía eléctrica en batería secundaria

3. Conversión y almacenamiento de energía solar o energía eléctrica en compuestos químicos (combustibles ( $H_2$ )) (ej. fotoelectrólisis, electrolisis, fotólisis electroasistida)

4. Conversión de energía química a energía eléctrica y suministro de electricidad para diferentes aplicaciones (celdas de combustible)

En el caso de la economía del hidrógeno, éste actúa como un vector energético, capaz de almacenar y transportar la energía proveniente de fuentes renovables, ello debido a que su densidad energética (en peso) es mayor que la de los combustibles fósiles convencionales, puede ser empleado como materia prima en celdas de combustible de alta eficiencia y adicionalmente no emite gases de efecto invernadero.

En nuestro laboratorio se han hecho estudios en la preparación de semiconductores para celdas solares, con la utilización de elementos de los grupos III (In, Ga), VI (Se, Te) y metales de transición (Cd, Cu) [26,27]. Estudios en un sistema con flujo y celda redox

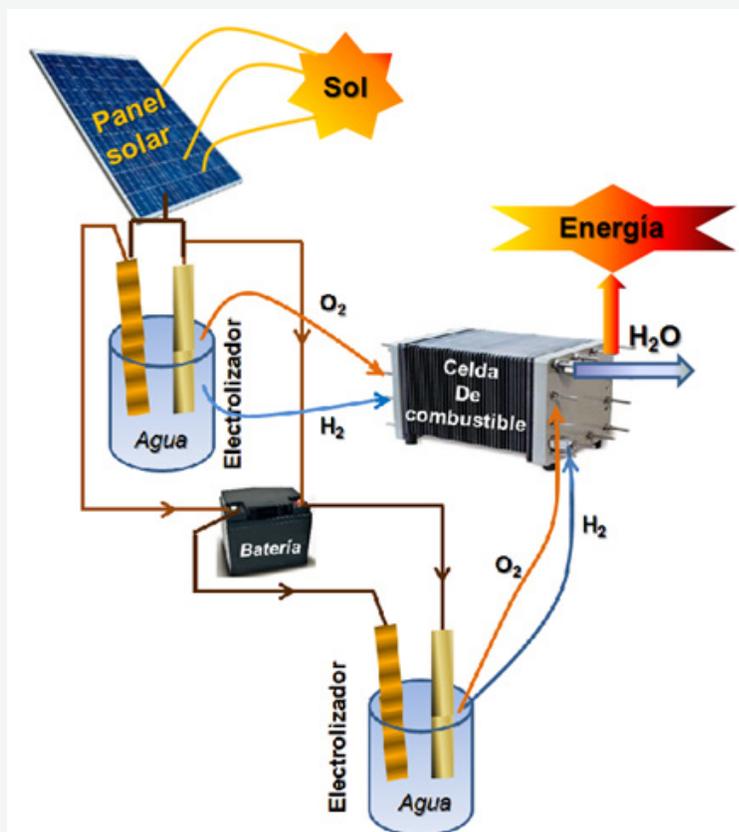


Figura 3. Conversión cíclica del agua por métodos electroquímicos [1]. Electroquímica captura, conversión, almacenamiento y suministro de energía.

de vanadio [17-19]. La utilización de orgánicos como acumuladores de carga (poliveratrol) [28,29]. Estudios en la oxidación y reducción de monocarbonados, de interés en celdas de combustible [23-25] y en la preparación electroquímica de catalizadores [10,11].

### Celdas en electroquimienergía

Las celdas pueden ser clasificadas de acuerdo a su modo de operación. 1) Celda fotovoltaica [6,30], en la cuál la energía radiante es convertida en energía eléctrica. 2) Celda fotoelectrolítica [7,8], en la cuál la energía radiante causa una conversión química neta en la celda, por ejemplo la producción del combustible hidrógeno. 3) Celdas fotoelectroquímicas, que incorporan energía radiante que induce una reacción electroquímica [9-12;31-34] (a) directa sobre electrodos semiconductores, en algunos

casos con electroasistencia adicional, (b) la llamada celda fotogalvanica, es una celda de concentración cuya función es la producción de energía eléctrica, (c) La llamada celda solar sensibilizada por colorante (CSSC), "Dye-sensitized solar cell (DSSC)", está basada en un semiconductor formado entre un ánodo fotosensible y el electrolito. 4) Celda electrolítica, en este caso la electrólisis es inducida directamente con, por ejemplo, energía eléctrica [13]. 5) Las comúnmente conocidas baterías (conjunto de celdas galvánicas, también llamadas voltaicas).

### Celda fotovoltaica

En la celda fotovoltaica, figura 4, la electroquímica contribuye con la síntesis de semiconductores, electrodos, estudios catalíticos, otros componentes, optimización de parámetros, etc., [8,35-41]

Los electrodos semiconductores [SC] pueden prepararse ía electroquímica para la conversión de energía solar, síntesis fotoelectroquímica, dispositivos electrocrómicos, espectroelectroquímica, sensores, catalizadores y otros dispositivos electrónicos y optoelectrónicos [35,36,39].

En la celda fotovoltaica, cuando el electrodo semiconductor es iluminado bajo cierta carga, se mide un fotovoltaje ( $\Delta V$ ), entre el semiconductor y el contraelectrodo y la correspondiente densidad de fotocorriente ( $J_c$ ). Bajo condiciones de circuito abierto,  $J_c = 0$  y se mide el fotovoltaje a circuito abierto,  $\Delta V^{ca}$ . Bajo condiciones de cortocircuito,  $\Delta V = 0$  y se obtiene la correspondiente densidad de corriente,  $J_c^{cc}$ . En general, la celda fotovoltaica es caracterizada mediante el grafico densidad de corriente ( $J_c$ )-voltaje ( $\Delta V$ ), figura 5. El producto  $J_c \times \Delta V$  es la potencia de salida por unidad de área, en cualquier punto y es un máximo ( $P_m = J_c^{max} \times \Delta V^{max}$ ).

La fracción de la potencia limite,  $\Delta V^{ca} \times J_c^{cc}$ , que una celda fotovoltaica suministra es el factor de llenado, definido como:

$$F = \frac{P_{max}}{J_c^{cc} \Delta V^{ca}} \quad (1)$$

El máximo valor de eficiencia de conversión de la energía solar, nm se define como:

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P^0} \quad (2)$$

donde  $P^0$  es la potencia incidente por unidad de área del electrodo, de la radiación solar incidente. En ciertos casos, se utiliza la eficiencia de radiación monocromática ( $\eta_\lambda = P_{max} / P_\lambda^0$ ),  $P_\lambda^0$  es la potencia incidente por unidad de área del electrodo, de la luz monocromática incidente de longitud de onda  $\lambda$ .

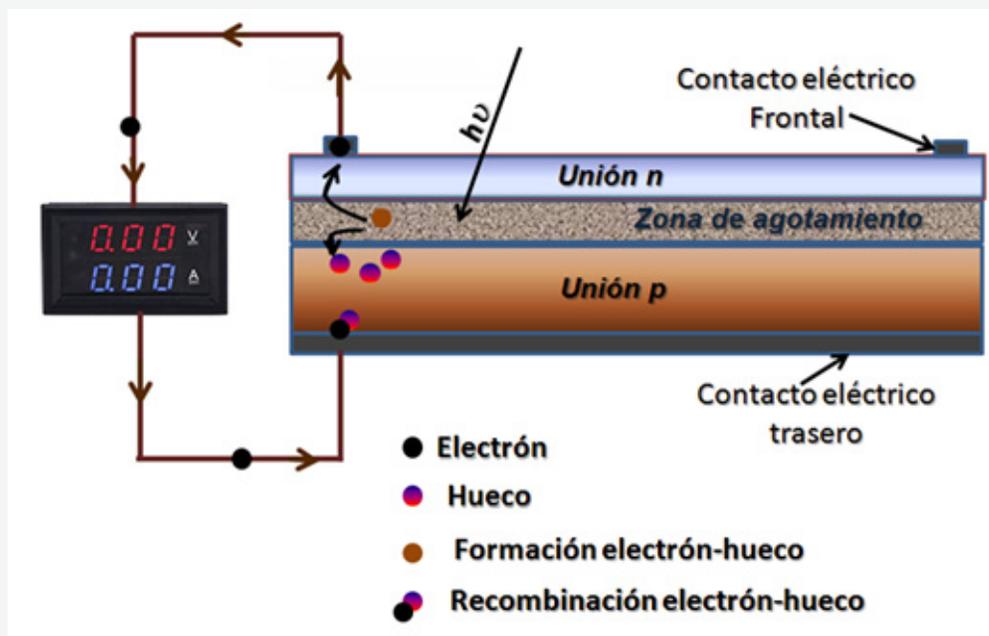


Figura 4. Celda Fotovoltaica [6]

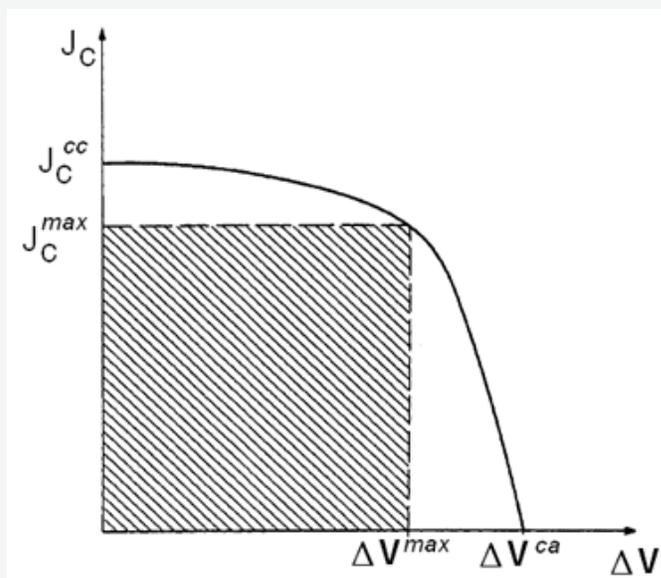


Figura 5. Gráfico de Potencia para una celda Fotovoltaica

En nuestro grupo se adelantan estudios en la síntesis electroquímica de semiconductores, de alta pureza, rendimiento y óptima composición. Se preparó el semiconductor  $\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  sobre titanio, con aplicación de la técnica de doble pulso de potencial, se obtuvo una película uniforme, pura y con la composición óptima requerida [26].

### Celda fotoelectrolítica

La energía queda contenida como energía química en las sustancias producidas. Si la energía proporcionada al sistema es de origen solar se tiene que:



Así, la ventaja de un sistema de este tipo es que no sólo se logra la transformación de la energía solar sino que también queda almacenada en los productos obtenidos.

Uno de los procesos más estudiados, como ya se mencionó anteriormente, es la descomposición de un material abundante como el agua para obtener combustibles como el hidrógeno, de gran utilidad. Esta reacción puede obtenerse utilizando únicamente energía solar o también mediante una combinación de iluminación con potencial aplicado externamente. Este último tipo de procesos se denomina fotoasistido, ya

que la energía luminosa sólo contribuye parcialmente a la generación de productos.

El proceso de descomposición del agua se puede resumir como:



En una celda constituida por un electrodo semiconductor n-TiO<sub>2</sub> (dióxido de titanio), un electrodo de platino (Pt) y una solución acuosa de sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), bajo

iluminación, se llevan a cabo las reacciones: sobre el fotoánodo de dióxido de titanio la formación de pares electrón-hueco y la oxidación del agua y sobre el cátodo de platino la producción de hidrógeno.

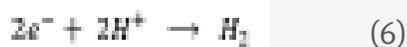
Formación de pares electrón-hueco



Oxidación del agua:



En el electrodo de platino ocurre la reducción de los protones, liberándose hidrógeno:



La solución de sulfato de sodio constituye el medio electrolítico.

Posteriormente se sustituyó el cátodo de platino por un semiconductor tipo p que actúe como fotocátodo y aproveche también la energía luminosa proporcionada al sistema. El material elegido fue el fosforo de galio (p-GaP). Al iluminar ambos electrodos, en el n-TiO<sub>2</sub> se desprende oxígeno y en el p-GaP se genera hidrógeno. El funcionamiento de esta celda depende de que la solución acuosa contenga un ácido (ej. HCl) o un álcali.

En el proceso fotoelectrolítico, la electricidad generada en el panel fotovoltaico alimenta un electrolizador, allí el electrolito y/o el solvente son descompuestos, ej. Agua en oxígeno e hidrógeno. La eficiencia de conversión solar es definida como la energía almacenada menos la energía eléctrica suministrada, esto dividido por la energía solar de entrada.

$$\eta_{sol} = \frac{\epsilon_{alm} - \epsilon_{elec}}{\epsilon_{solar}} \quad (7)$$

La fotoelectrolisis solo puede ser alcanzada a veces con la aplicación de una diferencia de potencial auxiliar,  $V_0$ . En casos en que la fotocorriente no contribuye completamente al almacenamiento de energía a causa de reacciones colaterales, un factor de eficiencia  $\beta$  de corriente tiene que ser incorporado.

$$\eta_{rec} = \frac{\int (V_0 - V_g) \beta I_c dt}{\int P^0 dt} \quad (8)$$

Donde  $V_0$  es el potencial estándar de la reacción total en la celda.

### Celdas fotoelectroquímicas (CFEQ)

Entre los métodos electroquímicos para la conversión de energía solar, aquellos que incorporan materiales semiconductores son promisorios. Los semiconductores pueden ser por ejemplo, suspensiones finas dispersas y partículas coloidales donde la fotólisis y la fotosíntesis proceden, y monocristales, policristales y materiales amorfos son utilizados en los métodos fotoelectroquímicos de conversión. En esta celda, la luz solar incide directamente sobre el o los electrodos semiconductores, en algunos casos hay soporte eléctrico adicional y la descomposición del medio ocurre. Por ejemplo la descomposición del agua sobre la superficie electroquímica [42,43].

Existen tres tipos de arreglo de fotoelectrodos [44]

- El fotoánodo hecho de un semiconductor tipo n y un cátodo metálico.
- El fotoánodo hecho de un semiconductor tipo n y un fotocátodo hecho de un semiconductor tipo p.
- El fotocátodo hecho de un semiconductor tipo p y un ánodo metálico

La figura 6 nos muestra el arreglo en una celda FEQ con dos fotoelectrodos. La energía solar induce el proceso redox en los dos compartimientos.

Los requerimientos básicos para fotoelectrodos son, máxima absorción de

energía solar y buen catalizador para otras reacciones, ej. Descomposición del agua.

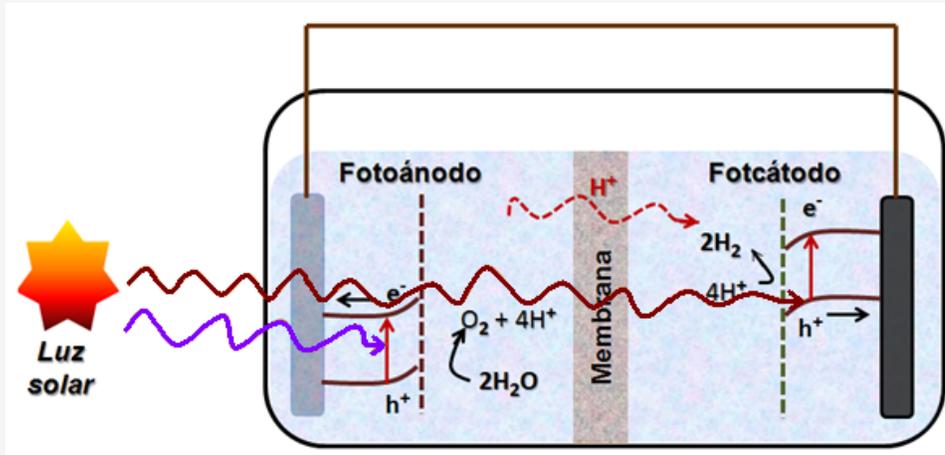


Figura 6. Celda FEQ. Dos fotoelectrodos, un fotoánodo tipo n y un fotocátodo tipo p. Los fotones de baja energía, no absorbidos por el fotoánodo tipo n, son absorbidos por el fotocátodo [45]

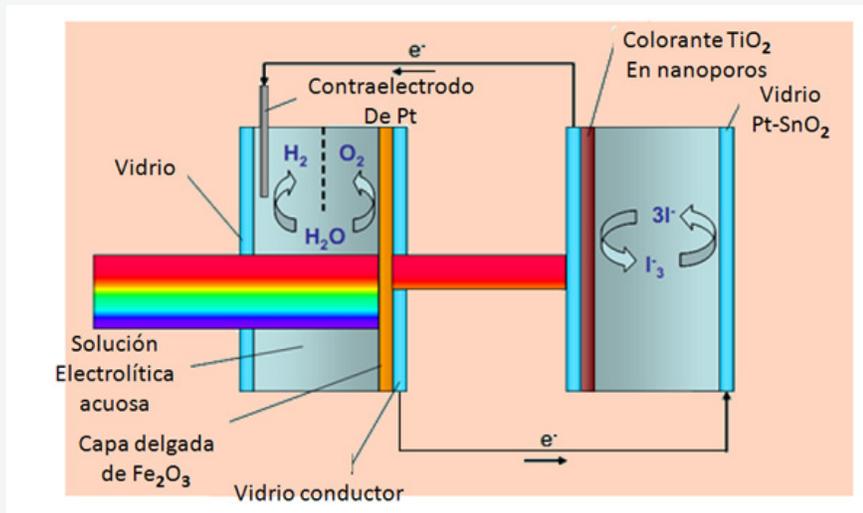


Figura 7 Celda Tandem [46] para la fotoelectrólisis del H<sub>2</sub>O

Actualmente en la celda FEQ se combinan las funciones de recolección de luz, separación de cargas, y electrólisis en una misma celda. Para ello se reemplazan, uno o ambos de los electrodos metálicos con un semiconductor, de esta manera se minimizan costos, adicionalmente, se combinan la celda fotovoltaica con la celda electrolítica o fotoelectrolítica en un sistema Tandem (celda consistente de dos a más subceldas que en conjunto convierten más eficientemente la luz solar en electricidad, incrementando la eficiencia de conversión. Las subceldas

absorben diferentes porciones de la luz solar) integrado fotoelectroquímico, con una eficiencia teórica solar-hidrógeno 31,1% a un sol de iluminación, se debe proteger el semiconductor, en la celda fotoelectroquímica de la corrosión, se incorporan catalizadores económicos y se mejoran el área efectiva y la absorptividad óptica con la incorporación de nanoestructuras.

Una celda fotoelectroquímica de tipo galvánico es aquella diseñada para transformar directamente la energía

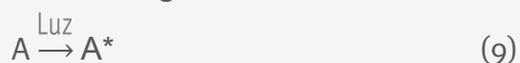
luminosa en energía eléctrica. Utilizan electrodos semiconductores como contadores de la energía solar. A diferencia de una pila galvánica normal en la que los reactivos se consumen, en estos sistemas se busca que las reacciones que suceden en el cátodo y en el ánodo sean iguales pero en sentido contrario. Esto es, una sustancia O que se reduce en el cátodo, transformándose en una especie reducida R, se regenera en el ánodo, donde se lleva a cabo la oxidación de R para dar O. Dado que no hay cambio químico neto de las especies presentes, esta celda permite que la energía luminosa absorbida por el semiconductor sea utilizada directamente como trabajo eléctrico.

Otro tipo de celda fotogalvánica, utiliza sustancias disueltas en el electrolito. Utiliza dos electrodos inertes y la luz es absorbida por el electrolito (ej. solución con colorante). La transferencia electrónica ocurre entre la molécula colorante excitada y moléculas añadidas al electrolito, dadoras oceptoras de electrones. Se desarrolla un fotovoltaje entre los electrodos, si la luz es absorbida por el electrolito cerca de uno de los dos electrodos inertes.

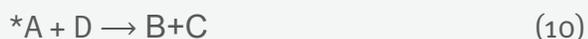
En general, se requieren dos pares redox (A/B y C/D) donde A es un colorante que puede absorber la radiación solar y pasar a un estado excitado A\*

Las reacciones en una celda fotogalvánica típica son:

Absorción de energía luminosa:

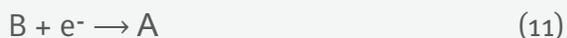


Reacción de óxido-reducción en la solución electrolítica

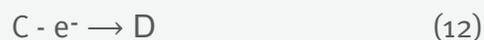


Donde A\* se oxida para formar B, mientras que D se reduce para formar el compuesto C. En los electrodos las reacciones son:

Regeneración de la sustancia A en el cátodo:

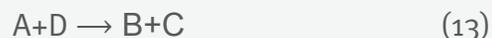


Regeneración de la sustancia D en el ánodo:

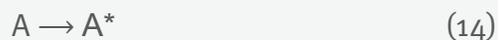


Cátodo y ánodo están unidos externamente por un conductor, de tal forma que es posible obtener un flujo de carga y, por tanto, un trabajo eléctrico.

Si la reacción:



ocurriera espontáneamente en condiciones de oscuridad, se tendría una celda galvánica común. El fundamento de la celda fotogalvánica es que se requiere la energía luminosa para promover la excitación:



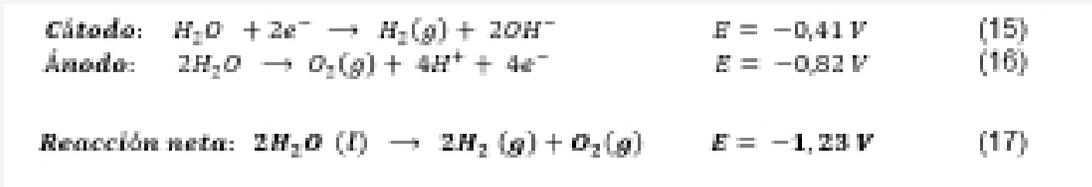
y es esta especie A\* la que puede reaccionar con D. Ya que, finalmente, los compuestos se regeneran, se tiene una transformación directa de energía solar a energía eléctrica sin cambio neto.

Una moderna celda solar sensibilizada por colorante (CSSC) "Dye-sensitized solar cell (DSSC)" [9,31-34], está compuesta por una capa porosa de nanopartículas de dióxido de titanio, cubierta con un colorante molecular que absorbe la luz del sol, tipo clorofila en plantas. El dióxido de titanio está sumergido en una solución electrolítica sobre la cual se encuentra un catalizador base platino. Un ánodo (TiO<sub>2</sub>) y un cátodo (Pt) son colocados a ambos lados del electrolito. La luz del sol pasa a través del electrodo transparente y va a la capa colorante donde excita electrones que fluyen al dióxido de titanio y luego al electrodo transparente donde son recolectados; fluyen por el circuito externo y son reintroducidos en la celda, en el electrodo metálico y luego de regreso al medio electrolítico y a las moléculas coloreadas. En la CSSC, el semiconductor es utilizado solo para el transporte de carga, los fotoelectrones son suministrados desde el colorante fotosensible. La separación de carga ocurre en las superficies colorante-semiconductor-electrolito.

Más recientemente, se reportan las celdas tandem sensibilizadas con colorante “Tandem Dye-sensitized solar cells” con las cuales se consiguen mejoras en las eficiencias de conversión de energía. Estas celdas tandem incorporan dos colorantes sensibles, en diferentes compartimientos de la celda o subceldas. Estas subceldas absorben diferentes porciones de la luz solar [47-49].

### Celda electrolítica

Es posible también la electrólisis directa en una celda electroquímica, en ese caso se alimenta la celda con corriente eléctrica de cualquier procedencia y el medio electrolítico es descompuesto. Este proceso es relativamente más costoso en la práctica. Por ejemplo, la electrólisis de una solución de ácido sulfúrico, resulta en la descomposición del agua



### Pilas y baterías

Otro grupo importante de almacenadores de energía lo constituyen las pilas y sus conjuntos (baterías). También los llamados super condensadores. En particular, las pilas y baterías secundarias son llamadas celdas secundarias, también celdas de almacenamiento, que describe su habilidad para convertir energía eléctrica en energía química y posteriormente re-suministrarla como energía eléctrica cuando es requerida. La reacción en la celda de almacenamiento puede proceder en cualquier dirección, durante el proceso de carga se realiza un trabajo eléctrico en la celda que fuerza la reacción en dirección no espontánea (conversión de energía eléctrica a química), en el proceso de descarga, la reacción es espontánea y ocurre el suministro de energía eléctrica.

### Celda de combustible

Cuando hidrógeno es utilizado como combustible, el subproducto es agua y la combustión produce 39,5 KWh/Kg de energía, 2 a 3 veces superior al metano y gasolina. Debido a su sencilla estructura química, pertenece a un pequeño grupo de combustibles que pueden ser utilizados en celdas de combustible a bajas temperaturas, lo que lo hace apropiado como combustible vehicular.

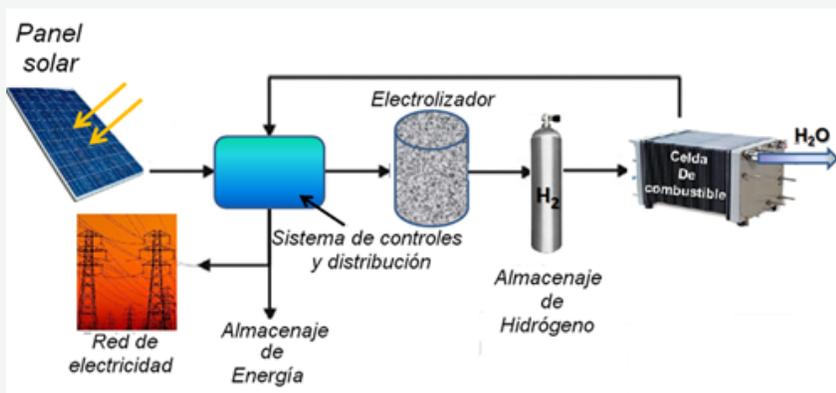


Figura 8.- Potencial fotovoltaico de la energía solar para la vida en sociedad

La figura 8 sintetiza la captura de energía solar, su conversión en energía eléctrica, la incorporación de energía eléctrica en la red de suministro, la conversión de energía eléctrica a energía química ( $H_2$ ) en un electrolizador, el suministro de hidrógeno a una celda de combustible para reconversión a energía eléctrica cuando sea requerida.

## Aplicaciones

Los procesos electroquímicos nos ofrecen las siguientes ventajas: (a) hay una gran variedad de reacciones posibles de oxidación y reducción, (b) hay una gran selectividad hacia los productos deseados, (c) se consume mucho menos energía que en los procesos químicos convencionales, (d) los procesos son menos agresivos y menos contaminantes, (e) se eliminan o minimizan los procesos de tratamiento de desechos, (f) Los sistemas son más simples, se eliminan procesos de multietapas, (g) se usan materiales de partida menos costosos que en procesos químicos convencionales, (h) los productos obtenidos son de muy alta pureza, (i) en la mayoría de los procesos electroquímicos son menores los costos operacionales que en procesos químicos convencionales.

Nuestra vida en Sociedad es soportada en gran medida por la electroquímica. Encontramos la electroquímica en el funcionamiento de nuestro organismo, el tratamiento de enfermedades, la producción de drogas, la belleza corporal, el suministro de medicamentos y otros aspectos del organismo humano. Nuestras funciones vitales, nuestro funcionamiento orgánico, nuestra comunicación e interacción con el medio ambiente y en buena parte nuestra salud, protección, defensa, bienestar, tratamiento, apariencia personal y vida social, tienen mucho que ver con fenómenos y procesos electroquímicos. La vida en el hogar y en la comunidad ahora es más cómoda, con el apoyo de dispositivos energéticos para el alumbrado, la construcción y funcionamiento de equipos electrónicos, juguetería, transporte vehicular, seguridad y campo de la informática. En el aspecto ambiental, son variados los procesos instalados para la descontaminación atmosférica, acuífera

y de suelos, tratamiento de desechos, purificación de procesos y remediación ambiental.

En el campo Industrial son diversas y variadas las compañías en producción de bienes y son numerosos los procesos electroquímicos para la producción de metales, materiales y compuestos químicos necesarios en nuestra vida diaria. Las industrias electroquímicas más exitosas son: plantas de hierro, estaño, oro, magnesio, manganeso, aluminio, níquel, berilio, sodio, cromo, titanio, siderúrgica, cobre, zinc, litio. Son también importantes en nuestro país, las industrias de energía, petróleo, petroquímica, electrosíntesis orgánica, clorosoda y clorato de sodio. Son procesos electroquímicos importantes, la extracción y purificación de metales; la recuperación, reciclaje y refinado de metales (tratamiento a la chatarra); recubrimientos metálicos; el tratamiento de aguas y la remediación de suelos. Para aumentar la selectividad de sensores electroquímicos se pueden utilizar elementos bioquímicos o biológicos (enzimas, células, tejidos, anticuerpos, ácidos nucleicos, microorganismos) como elementos sensores de tal manera que se obtiene un biosensor. Por vía electrolítica, la simple transferencia electrónica (oxidación o reducción) puede inducir cambios en la toxicidad de compuestos y conducir a su neutralización. En el proceso electrolítico directo ocurre una transferencia electrónica al contaminante o viceversa, para su anulación. En el proceso indirecto, el contaminante es inactivo (no sufre transferencia electrónica) pero reacciona con un mediador activo, que sirve de puente. Comercialmente existe tratamiento electroquímico para efluentes o actividades en industrias, farmacéutica, alimentos, agrícola, textil, veterinaria, química, polímeros, pulpa y papel, etc.

Los polímeros encuentran aplicaciones como electrodos, electrolitos sólidos, sustratos transparentes, utilización en dispositivos opto-electrónicos y sistemas fotoelectrocrómicos. El desarrollo de sensores electroquímicos, nanosensores, marcadores, nano transportadores, nanodetección y nanoinformática, hacen importantes aportes a nuestra defensa

y seguridad personal, comunitaria y nacional. Los desarrollos más recientes de la nanoelectroquímica y la producción electroquímica de puntos cuánticos y sus aplicaciones, constituyen nuevos desarrollos que traen implícitas también, soluciones a necesidades y satisfacciones, que nuestra vida en comunidad demanda.

En el campo energético, con fuentes renovables y no renovables, se trabaja en captura, conversión, almacenamiento, suministro y usos de esa energía. Hay importantes adelantos en captura de energías renovables, dispositivos de almacenamiento, sensores, detectores, dispositivos para suministro continuo, plantas energéticas, procesos electrolíticos de interés, además de las celdas solares con materiales poliméricos, éstos tienen aplicaciones como materiales electrónicos, dispositivos optoelectrónicos (celdas electrocromáticas, celdas electroquímicas emisoras de luz, dispositivos fotoconductores), materiales

láser, baterías recargables de estado sólido y supercapacitores.

La conversión de energía solar en formas útiles de energía comprende procesos térmicos y fotónicos. En los procesos fotónicos, la energía solar es absorbida en un absorbente y luego convertida en electricidad (celda fotovoltaica) o como energía química (celda fotoelectroquímica o electrolítica). En base a ello, hablamos de sistemas

- 1) fotoquímicos,
- 2) fotobiológicos,
- 3) Semiconductor (fotovoltaico, fotoelectroquímico, electroquímico),
- 4) Híbrido (combinación de los otros) [7,50-52].

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al FONACIT-Venezuela (Proyectos 2011001392, 2011001099 y CFI-00460), por su apoyo para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Márquez OP, Márquez J. (2018). Solid Catalysts for Renewable Energy production. Chapter 11 in Synthesis of electrocatalysts for electrochemistry in energy. IGI-global, (S González & F Imbert, Eds.), PA, USA
- Márquez OP, Márquez J. (2007). Energía y Electroquímica. Ier Congreso Internacional Científico Técnico de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela
- Southampton Electrochemistry Group (1990). Instrumental Methods in Electro- chemistry. Ellis Horwood Limited, Chichester, England.
- MacDonald DD. (1977). Transient Techniques in Electrochemistry. Plenum Press NY USA.
- Bard AJ, Faulkner LR. (2001). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, Inc. NY USA
- Miles RW, Hynes KM, Forbes I. (2005). Photovoltaic Solar Cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 51, 1-42.
- Márquez J, Márquez OP, (2012). Solar energy and electrochemistry. Chapter 6 in Recent Advances in Electrochemistry. Transworld Research Network, Kerala, India. Tremont R (Ed.).
- Márquez J, Márquez OP. (2015). Nanotecnología y Electroquímica. In Nanotecnología: Fundamentos y Aplicaciones, Lárez, C. (Ed.) (pp.105-135). Avances en Química (special issue).

- Bard AJ, Memming R, Miller B. (1991). Terminology In Semiconductor Electrochemistry and Photoelectrochemical Energy Conversion. *Pure & Appl, Chem.* 63(4) 569-596.
- Sathrum AJ. (2011). PhD thesis: Solar Energy Storage through the Homogeneous Electrocatalytic Reduction of Carbon Dioxide: Photoelectrochemical and Photovoltaic Approaches. University of California, USA
- Casadevall C, Call A, Codolá Z, Acuna-Pares F, Lloret-Fillol J. (2016). Catalizadores para la conversión de energía solar en enlaces químicos. *An. Quím.* 112(3), 133-141.
- Tuller HL. (2015). Solar to fuels conversión Technology. An MIT Future of Solar Energy Study Working Paper.
- Gandía LM, Oroz R, Ursúa A, Sanchis P, Diéguez PM. (2007). Renewable hydrogen production: performance of an alkaline water electrolyzer working under emulated wind conditions. *Energy Fuels* 21, 1699–1706.
- Zoulias E, Varkaraki E, Lymberopoulos N, Christodoulou CN, Karagiorgis GN. (2003). A Review of Water Electrolysis. European Union, RES2H2
- Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Sol. Energy* 78, 661–669.
- Ponce de León C, Frias-Ferrer A, González-García J, Szánto DA, Walsh FC. (2006). Redox flow cells for energy conversión. *Journal of Power Sources.* 160 716-732.
- Márquez K, Márquez OP, Márquez J. (2014). Diseño de Celda Redox de Vanadio y Systema con Flujo de Electrolito. *Observador del Conocimiento.* 2(6) 111-118.
- Colt G. (2006). “Evaluación del sistema redox de vanadio para el almacenamiento y producción de energía eléctrica”. MSc Tesis, Lab. Electroquímica, Facultad de Ciencias, ULA-Mérida, Venezuela
- Colt G, Márquez J, Márquez OP. (2010). Evaluación de una celda redox de vanadio. *Universidad, Ciencia y Tecnología.* 14 (56) 183-188.
- Lister S, McLean G. (2004). PEM Fuel cell electrodes. *Journal of Power Sources.* 130, 61-76.
- Wendt H, Spinacé EV, Neto AO, Linardi M. (2005). Electrocatalysis and Electrocatalysts for low temperature Fuel Cells: Fundamentals, State of the art, Research and Development. *Quim. Nova,* 28(6) 1066-1075.
- Barreras F, Lozano A. Hidrógeno: Pilas de Combustible de tipo PEM. Universidad de Zaragoza, España. [www.energia2012.es](http://www.energia2012.es).
- Márquez OP, Salazar E, Márquez J, Martínez Y, Manfredy L. (2016). Evaluación de nanopartículas de Pt/Rh/Ru depositadas sobre carbón vítreo como catalizador para la electrooxidación de metanol. *Equilibrium* 1:39-63
- Márquez OP, Mubita T, Márquez J. (2012). Preparación de electrocatalizadores Ru/Pd/Mo para La oxidación de moléculas orgánicas pequeñas. Editorial Académica Española. Alemania.
- Mubita T, Márquez OP, Márquez J, Martínez Y, Mora AE. (2014). Síntesis Electroquímica y

Evaluación Micrográfica de Electrocatalizadores Ru/Pd/Mo/CV. Rev. Univ. Sci. Tech. 18(71) 1-8.

Balladores Y, Márquez J, Martínez Y, Márquez OP, Manfredy L, López-Rivera SA. (2014). Double Potentiostatic Deposition and Characterization of CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> Semiconductor. ARPN J of Sci and Tech. 4(8):439-446.

Manfredy L, Márquez OP, Márquez J, López-Rivera AS, Martínez Y, Balladores Y. (2014). Electrosynthesis and Characterization of a CuInS<sub>2</sub> Good Absorber Semiconductor for Thin Film Solar Cells. ARPN Journal of Science and Technology. 4(8) 455-463.

Weinhold E, (1999). Electrosíntesis de poliveratrol. Tesis Doctoral, Laboratorio de Electroquímica. Facultad de Ciências, ULA-Mérida, Venezuela.

López-Rivera SA, Fontal B, Márquez OP, Márquez J. (2005) "High pressure conductivity and photoconductivity of polyveratrole". Polym. Bull., 54 (4-5), 291.

Kuzminskii YeV, Kolbasov GYa. (1999). Electrochemical systems for converting solar energy. Solar Energy Materials and Solar Cells 56:93-115.

Gratzel M. (2003). "Dye-sensitized solar cells" (PDF). Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 4(2): 145–153.

Wang L, Al-Mamun L, Liu P, Wang Y, Yang HG, Wang HF, Zhao H. (2015). The search for efficient electrocatalysts as counter electrode materials for Dye-sensitized solar cells: mechanistic study, material screening and experimental validation. NPG Asia materials, 7, 15.

Willkomm J, Orchard KL, Reynal A, Pastor E, Durrant JR, Reisner E. (2016). Dye-sensitised semiconductors modified with molecular catalysts for light-driven H<sub>2</sub> production. Chem. Soc. Rev., 45 9-23.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized\\_solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell)

Trindade T, O Brien P, Pickett NL. (2001). Nanocrystalline Semiconductors: Synthesis, Properties and Perspectives. Chem. Mater. 13, 3843-3858.

Schlesinger TE, Rajeshward K, de Tacconi NR. (2010). Electrodeposition of Semiconductors. Modern Electroplating, Schlesinger M & Paunovic M (Editors), John Wiley & Sons, Inc.

Murray RW, (2008). Nanoelectrochemistry: Metal Nanoparticles, Nanoelectrodes and Nanopores. Chem. Rev., 108 2688-2720.

Kalska-Szostko B, (2012). Electrochemical Methods in Nanomaterials Preparation, Recent Trent in Electrochemical Science and Technology, Dr. Ujjal Kumar Sur (Ed.), ISBN: 978-953-307-830-4.

Márquez J, Márquez OP, (2012). Electrochemical synthesis of micro- and nano-electrodes and arrays. Analytical applications. Chapter 1 in Recent Advances in Electrochemistry. Transworld Research Network, Kerala, India. Tremont R (Edit.).

Domínguez-Domínguez S, Arias-Pardilla J, Berengumer-Murcia A, Morallón E, Cazorla-Amorós D. (2008). Electrochemical deposition of platinum nanoparticles on different carbon supports and conducting polymers. Journal of Applied Electrochemistry. 38(2) 259-268.

- Velmurugan J, Mirkin MV. (2010). Fabrication of Nanoelectrodes and Metal Clusters by Electrodeposition. *Chem. Phys. Chem.* 11, 3011–3017.
- Fujishima A, Honda K. (1972). "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, 238, 37-38.
- Yang J, Wang D, Han H, Li C. (2013). Roles of Cocatalysts in Photocatalysis and Photoelectrocatalysis. *Accounts of Chemical Research.* 46(8) 1900-1909.
- Tryk D, Fujishima A, Honda K. (2000). "Recent topics in photo-electrochemistry: achievements and future prospects". *Electrochimica Acta.* 45 (15–16): 2363–2376.
- Sun J, Zhong DK, Gamelin DR. (2010). Composite photoanodes for photoelectrochemical water splitting. *Energy Environ. Sci.* 3 1252-1261.
- Graetzel M. (2006). Generation of hydrogen from the solar photolysis of water: Hydrogen Conference. UC Santa-Barbara, USA
- Dürr M, Bamedi A, Yasuda A, Nelles G. (2004). Tandem dye-sensitized solar cell for improved power conversion efficiencies. *Appl. Phys. Lett.* 84, 3397.
- Yanagida M, Onozawa N, Mitsuhiro K, Kazuhiro K, Sugihara SH. (2010). Optimization of tandem-structured dye-sensitized solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 94(2) 297-302.
- Ho P, Thogiti S, Lee YH, Kim JH. (2017). Discrete photoelectrodes with dyes having different absorption wavelengths for efficient cobalt-based tandem dye-sensitized solar cells. [www.nature.com/scientific-reports](http://www.nature.com/scientific-reports). 1-10.
- Wang Y, Xu H, Zhang J, Li G. (2008). Electrochemical sensors for clinic analysis. *Sensors*, 8, 2043-2081.
- Márquez OP, Márquez J. (2012). Electrochemical synthesis, electrical and optical properties and application of organic semiconductors. Chapter 3 in *Recent Advances in Electrochemical Research*, Tremont R (Ed.), Transworld Research Network, India
- Gurunathan K, Murugan AV, Marimutho R, Mulik UP, Amalnerkar DP. (1999). Electrochemically synthesized conducting polymeric materials for applications towards technology in electronics, optoelectronics and energy storage devices. *Materials Chemistry and Physics.* 61 173-191.