

# **IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA DE CELDAS FOTOVOLTAICAS ORGÁNICAS OPTIMIZADAS**

## *ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE OF OPTIMIZED ORGANIC PHOTOVOLTAIC PANELS*

**Juan Carlos Gallegos Mendoza**

UNAM Campus Juriquilla Querétaro  
*gallegosju@hotmail.com*

**Domingo Rangel Miranda**

UNAM Campus Juriquilla Querétaro  
*ranged@fata.unam.mx*

**Rogelio Rodríguez Talavera**

UNAM Campus Juriquilla Querétaro  
*rogelior@unam.mx*

**Susana Vargas Muñoz**

UNAM Campus Juriquilla Querétaro  
*vmsu@unam.mx*

### **Resumen**

En este trabajo se presenta el estudio y caracterización de la impedancia electroquímica y sus circuitos eléctricos equivalentes que provienen de celdas fotovoltaicas orgánicas optimizadas. Se construyeron celdas orgánicas con varios pigmentos naturales tales como grana cochinilla (ácido carmínico), achiote (bixa Orellana) y  $\beta$ -caroteno. Se evaluó el rendimiento de cada uno de los tipos de celdas sensibilizadas con los pigmentos, basados en la eficiencia obtenida y ésta se relacionó con los parámetros electroquímicos y sus circuitos eléctricos equivalentes RC serie-paralelo. Así mismo dichos parámetros, obtenidos mediante pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica, se asociaron a dos variables que permitieron optimizar las celdas orgánicas como fueron el espesor del dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  como material semiconductor y el tiempo de adsorción de los pigmentos en este material semiconductor. De acuerdo con los resultados obtenidos fue posible correlacionar los parámetros electroquímicos y sus circuitos equivalentes con el rendimiento de las celdas orgánicas elaboradas.

**Palabra(s) Clave:** celdas, electroquímica, fotovoltaicas, impedancia, orgánicas.

## **Abstract**

*In this work the study and characterization of the electrochemical impedance and their equivalent electrical circuits derived from optimized photovoltaic organic cells is presented. Organic cells were constructed with several natural pigments such as cochineal (carminic acid), achiote (bixa Orellana) and  $\beta$ -carotene. The performance of each of the cell types sensitized with the pigments, based on its efficiency was evaluated and related to the electrochemical parameters and their electrical equivalent circuits series-parallel RC. Thus, these parameters, obtained by tests of EIS (electrochemical impedance spectroscopy), were associated to two variables that allowed to optimize the organic cells as the thickness of titanium oxide  $TiO_2$  as semiconductor material and the adsorption time of the pigments in this semiconductor material. According to the obtained results it is possible to correlate the electrochemical parameters and their equivalent circuits with the performance of the elaborated organic cells.*

**Keywords:** cells, electrochemical, photovoltaic, impedance, organic.

## **1. Introducción**

Como alternativa de las fuentes de energía que se obtienen por medio de la combustión de derivados del petróleo, se han desarrollado las Celdas Solares Orgánicas DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) por sus siglas en inglés. Una DSSC es un sistema capaz de convertir la energía luminosa en energía eléctrica, que a diferencia de las celdas convencionales (de unión n-p) constan de una película de material semiconductor depositada sobre un vidrio conductor (TCO por sus siglas en inglés) con band gap relativamente pequeño y un colorante sensibilizador a la luz [1]. Para el estudio de los parámetros característicos de una celda ordinaria se han elaborado algunos modelos a partir de los cuáles se obtienen curvas I-V (corriente/voltaje) para su caracterización. Por ejemplo, en [2] se modela la celda de silicio mono cristalino mediante un circuito equivalente compuesto de dispositivos electrónicos (resistencias, capacitores, diodos, fuente de corriente,

etc.) que representan parámetros que caracterizan algún proceso al cual está sujeta la celda en funcionamiento. Es mediante la construcción de curvas I-V que se realiza el estudio de esta celda. En analogía con las celdas ordinarias construidas a partir de silicio cristalino, se ha desarrollado estudios similares para la comprensión del funcionamiento de las DSSC. En [3], Bisquert propone un circuito equivalente de una DSSC mediante una línea de transmisión de portadores. Se deduce la forma y componentes del circuito realizando un estudio de espectroscopia de impedancia. Existen otros trabajos [4] en los que se ha tomado como modelo una cadena infinita de nanopartículas de óxido, y se considera un circuito equivalente de corriente alterna o dinámico. También se reporta sobre resultados obtenidos al aplicar la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica en DSSC [5] elaboradas con pigmentos a base de complejos de rutenio, material semiconductor  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titanio) y un electrolito a base de un par redox  $I^- / I_3^-$ . Los circuitos equivalentes en luz (a) y oscuridad (b) se observan en la figura 1.

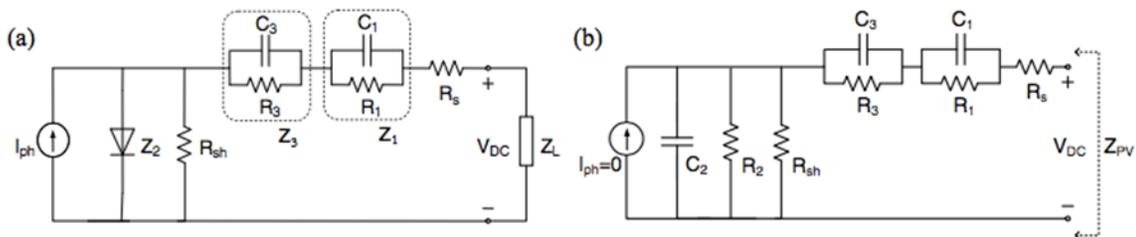


Figura 1 Circuito equivalente de una DSSC.

Finalmente, en un artículo reportado [6] realizan un estudio de espectroscopía de impedancia en DSSC sensibilizadas a partir de pigmentos naturales tales como: gardenia amarilla (*Gardenia Jasminoides*) y grana cochinilla (Ácido carmínico).

## 2. Desarrollo

Es importante conocer funcionamiento adecuado de una DSSC para asociar los materiales utilizados con los parámetros de su impedancia, el cual consta principalmente de la fotogeneración de electrones en las moléculas de pigmento adsorbidas en las moléculas de  $\text{TiO}_2$  anatasa (material semiconductor); una vez

que se han excitado las moléculas de pigmento, los electrones responsables del estado excitado son llevados a la banda de conducción de titania anatasa. Después las moléculas de pigmento son regeneradas por medio del electrolito y éste a su vez en el contraelectrodo de carboncillo. De acuerdo con los principios físicos, debe existir cierta correlación en los estados energéticos en la  $\text{TiO}_2$  anatasa, como la energía de Fermi  $E_f$ , banda gap  $E_{\text{gap}}$ , banda de conducción  $E_c$ , con el potencial químico  $\mu_{\text{redox}}$  del par redox en el electrolito (figura 2); ya que los principales procesos de transferencia de portadores de carga suceden en la interface  $\text{TiO}_2/\text{pigmento}/\text{electrolito}$  [7].

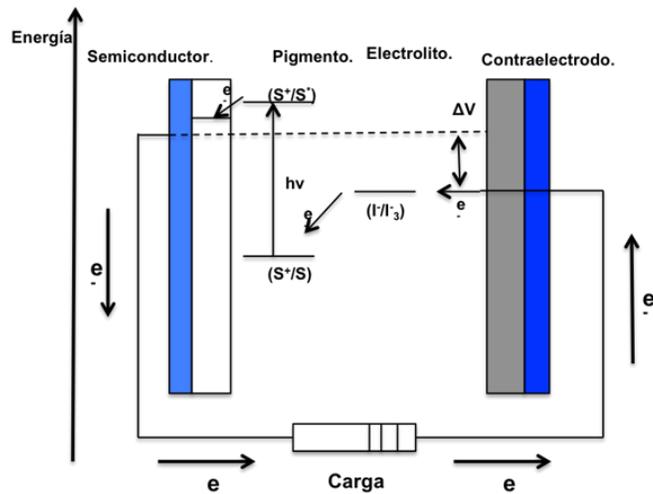


Figura 2 Esquema sobre el funcionamiento de una DSSC.

### Construcción de una DSSC

Una DSSC tipo tándem es básicamente una celda solar de capa delgada formada por disposiciones en sándwich de dos electrodos de óxidos transparentes conductores (TCO). En una DSSC se distingue un electrodo del otro (contraelectrodo) por los procesos que se llevan a cabo en cada uno y que sirven para el funcionamiento adecuado de la DSSC.

### Electrodo

El electrodo consta principalmente de una película delgada (10 a  $70\mu\text{m}$ ) depositada en un TCO. Dicha película puede ser de distintos tipos de óxidos

semiconductores como  $\text{TiO}_2$  anatasa,  $\text{ZnO}$ , etc. Para este trabajo se ha empleado  $\text{TiO}_2$  anatasa nanoestructurado. Para hacer sensible a la luz dicha película de  $\text{TiO}_2$  anatasa es impregnada con algún pigmento altamente sensible a la luz y buena adherencia a las moléculas de Titanio (IV). En este caso se han empleado pigmentos orgánicos como Acido Carmínico extraído de la grana cochinilla o *Dactylopius coccus*,  $\beta$ -caroteno sintético y Cis-bixin-Norbixin carotenoides extraídos de las semillas de una planta de nombre científico *Bixa Orellana*, comúnmente conocida en México como Achiote. Otro elemento empleado en la construcción de un electrodo es un electrolito, que consta básicamente de un par redox  $\text{I}^- / \text{I}^3^-$  que funciona como regenerador del pigmento y conductor de iones o cargas (huecos, y electrones).

La técnica empleada para depositar la película de  $\text{TiO}_2$  es la técnica de Dr. Blade [8]. Después de identificar la superficie conductora del ITO (Indium Tin Oxide), la técnica consiste en realizar un pequeño marco en un ITO con ayuda de una cinta adhesiva tal y como se muestra en la figura 3.

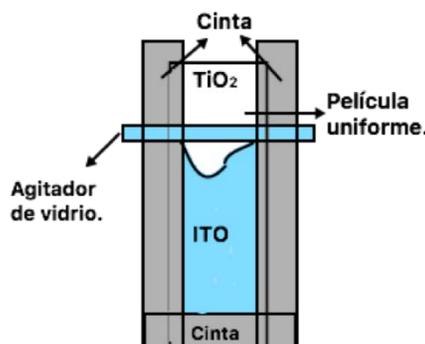


Figura 3 Construcción de las celdas fotovoltaicas orgánicas.

### Extracción de pigmentos

Para la sensibilización de las películas de  $\text{TiO}_2$  se han obtenido tres diferentes pigmentos que se aplican 24h antes de realizar mediciones:

- *Extracción Cis-bixin y Norbixin.* La preparación consiste en moler semillas de *Bixa Orellana* en mortero para obtener 1.3 g de polvo de semilla y depositarlo en vaso precipitado de 50 ml. Después, agregar 6 ml de acetil acetona  $\geq 99\%$ , agitar en parrilla de agitación mediante barra magnética de

agitación durante 10 min. Después sonicar la solución durante 5 minutos para después filtrar con ayuda del embudo de vidrio, un cono de papel filtro Whatman calibre 1 y una probeta.

- *Extracción de pigmento Ácido Carmínico.* La preparación es: moler grana cochinilla en mortero para obtener 0.5 g de polvo de grana cochinilla y depositarla en vaso precipitado de 50 ml. Hidratar el polvo de grana cochinilla con 8 ml de agua destilada durante 24 h. Pesar 0.25 g de alumbre al 90% y depositar en vaso precipitado de 50 ml, después pesar 0.035 g de ácido cítrico a 95% y depositarlo en el vaso precipitado de 50 ml. Calentar 20 ml de acetil acetona  $\geq 99\%$ . Agregar 4ml de acetil acetona al Alumbre y ácido cítrico en el vaso de 50 ml; el resto del acetil acetona (16 ml) caliente se agrega a la solución de grana cochinilla hidratada. Calentar y agitar en parrilla hasta obtener anillo de vapor en vaso precipitado. Después se filtra por medio del embudo de vidrio, el papel filtro y la probeta. Nuevamente se vuelve a calentar hasta hervir y por último se afora a 20 ml en algún recipiente opaco para proteger el color.
- *Extracción de pigmento  $\beta$ -caroteno.* Preparación: Pesar 0.01 g de  $\beta$ -caroteno y depositarlo en vaso precipitado de 50 ml. Agregar 0.005 g alumbre, después agregar 0.009 g de ácido cítrico. Adicionar 10 ml de acetil acetona para después calentar y agitar hasta obtener mezcla transparente.

Los tres pigmentos fueron debidamente conservados a temperatura de 25°C y una Humedad Relativa del 40% como se puede observar en la figura 4.

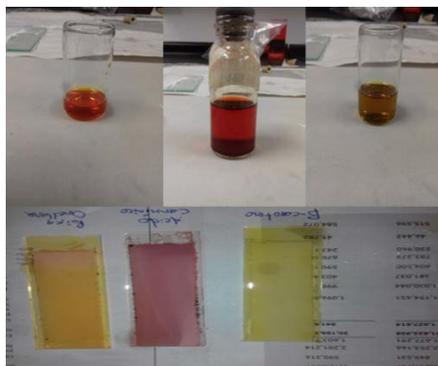


Figura 4 Pigmentos extraídos y utilizados para sensibilizar las celdas orgánicas.

### **Síntesis del electrolito**

Pesar 0.128 g de Ioduro ( $I^2$ ) y depositarlo en el vaso precipitado de 50 ml, agregar 10 ml de acetonitrilo y agitar durante 15 min. Después, en otro vaso de 50 ml pesar 0.15 g de Ioduro de litio y agregar 0.5 ml de 3-metoxypionitrilo, agregar esta última solución a la solución obtenida anteriormente y agitar durante 9 min. Guardar en vaso cubierto con papel aluminio.

### **Ensamblado de las DSSC**

Una vez que se ha logrado obtener cada uno de los componentes de la celda se procede al armado de ésta. Primero se obtienen las películas de  $TiO_2$  sensibilizadas por algún pigmento, se agrega aproximadamente 0.4 ml de electrolito de conductividad  $8.88 \pm 0.13$  mS. En la película (electrodo), se procede a colocar el contraelectrodo encima del electrodo de tal manera que queden desfasadas en su dirección más larga y se fijan con unas pinzas sujeta papeles, figura 5.



Figura 5 Vista frontal y transversal de una celda fotovoltaica ensamblada.

### **Medición de la impedancia electroquímica de las celdas orgánicas**

Material y Equipo de Medición:

- Potenciostato ACM Instruments GillAC.
- Cables BNC-caimán de potenciostato.
- Cables banana-caimán.
- Cámara oscura de 50x50x30 cm.
- Software de Potenciostato ACM Instruments GillAC.
- Lámpara de Halógeno.

- Filtro hot-mirror (para atenuar calor de la lámpara).
- Fuente de voltaje 12 V Agilent U8D31A.
- Switch Sun Hold Ras-1210.

Inicialmente se conectó la lámpara de Halógeno al Switch Sun Hold Ras-1210 alojados en la cámara oscura y éste a su vez a la fuente de 12 V por medio de los cables banana-banana.

Después se colocó cada una de las DSSC en el soporte de celdas dentro de la cámara oscura a una distancia de 7 cm de la fuente de luz. Por medio de los cables banana-caimán se conectó la DSSC al Potenciostato ACM Instruments GillAC. Para realizar la conexión se conectó el positivo con el electrodo de trabajo, el negativo se conectó con el electrodo de referencia y con electrodo auxiliar, Las pruebas se realizaron incidiendo luz Halógena (espectro solar) sobre cada celda en cuestión, con una potencia radiante de  $100 \text{ mW/cm}^2$ .

### 3. Resultados

Para cada una de las DSSC se obtuvo un circuito equivalente a partir de los diagramas de Nyquist y Bode. El circuito equivalente fue el que se muestra en la figura 6.

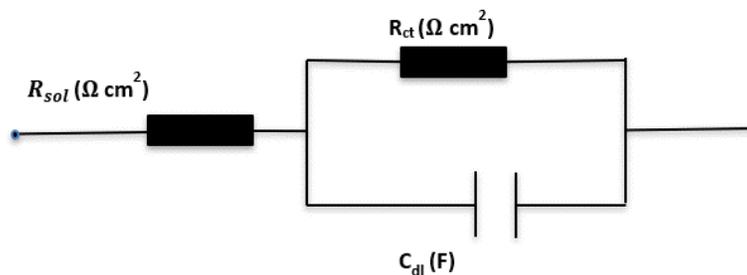


Figura 6 Circuito eléctrico equivalente propuesto.

Mediante el diagrama de Nyquist (figura 7) conocido como gráfico complejo, que corresponde graficar  $-Z''$  (parte imaginaria de la impedancia) contra  $Z'$  (parte real de la impedancia), es posible identificar los parámetros de  $R_{sol}$  que es la resistencia

de la solución electrolítica y  $R$  que en este caso corresponde a  $R_{ct}$ , que es la resistencia de reacción o de transferencia de carga como se muestra en figura 7.

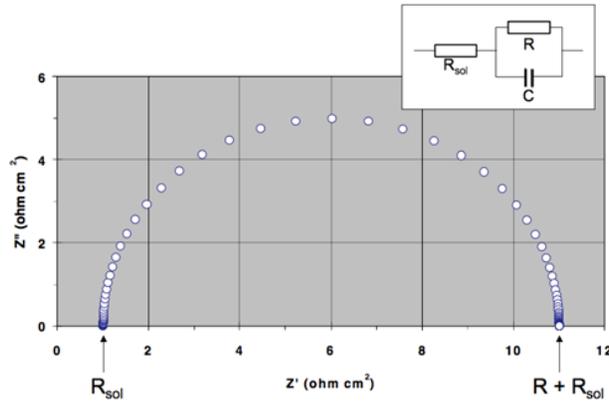


Figura 7 Interpretación electroquímica del Diagrama de Nyquist.

En este diagrama se realiza un barrido de la frecuencia angular  $\omega=2\pi f$  de derecha a izquierda del diagrama, comenzando con  $\omega = 0$  [9]. Cuando la frecuencia de barrido es cero hay una aportación de la capacitancia de la doble capa  $C_{dl}$  que siempre aparece en paralelo con  $R_{ct}$  y cuando la frecuencia es grande o tiende a infinito, se cortocircuita el capacitor y por lo tanto impedancia equivalente será tan solo  $R_{sol}$ . Por otro lado, mediante el diagrama de Bode que consiste en graficar el logaritmo base 10 del módulo de la impedancia o su valor absoluto contra el logaritmo base 10 de la frecuencia, es posible determinar la capacitancia de doble capa, debida al campo eléctrico de la carga fotogenerada en los electrodos, la cual está dada por ecuación 1.

$$C_{dl} = \frac{1}{2\pi f_{max} \cdot Z''} \quad (1)$$

Una vez que fueron identificados los parámetros electroquímicos en las celdas orgánicas y se propuso un modelo sencillo serie-paralelo asociado a los componentes e interfaces de los materiales de la celda, se obtuvieron los diagramas de Nyquist y Bode para las distintas celdas orgánicas sensibilizadas con los diferentes pigmentos ya mencionados.

Primero se realizó una medición de la impedancia electroquímica con una celda orgánica sensibilizada con  $\beta$ - caroteno, en la cual se observa en la figura 8, que la resistencia de la solución electroquímica es de  $547.5\Omega\text{-cm}^2$ , cuando la frecuencia  $\omega=0$  la resistencia de transferencia de carga es de  $1467\Omega\text{-cm}^2$ .

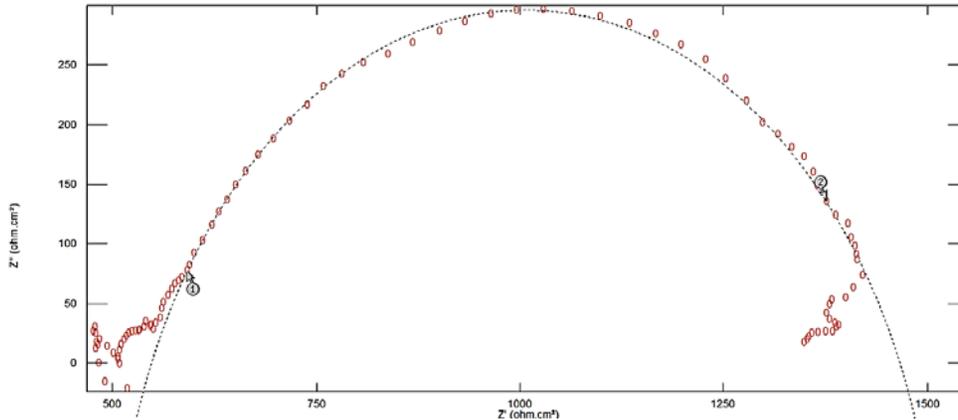


Figura 8 Diagrama de Nyquist de celda sensibilizada con  $\beta$ -caroteno.

La molécula de  $\beta$ -es pequeña por lo que tiene una mejor difusión hacia el material semiconductor y es poco estable a la luz solar, teniendo una capacitancia de doble capa de  $116.8\ \mu\text{F}$  (figura 9).

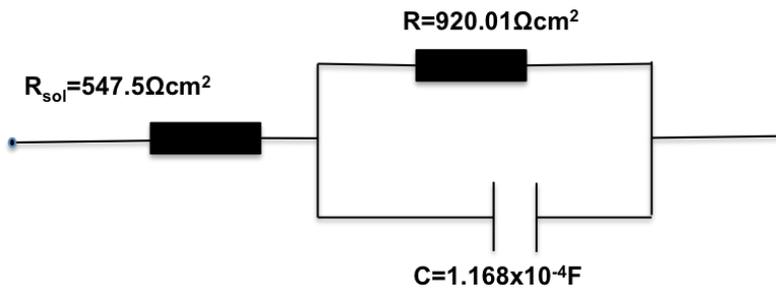


Figura 9 Circuito eléctrico equivalente de una celda con pigmento  $\beta$ -caroteno.

Enseguida se realizó la medición de impedancia con una celda sensibilizada con ácido carmínico. Como se puede notar en la figura 10, se tiene una forma irregular de semicírculo de aproximación con el Software del Potenciostato GillAC, idealmente sería un semicírculo perfecto, pero debido a las imperfecciones en las interfaces electrónicas de la celda éste tiene distorsión.

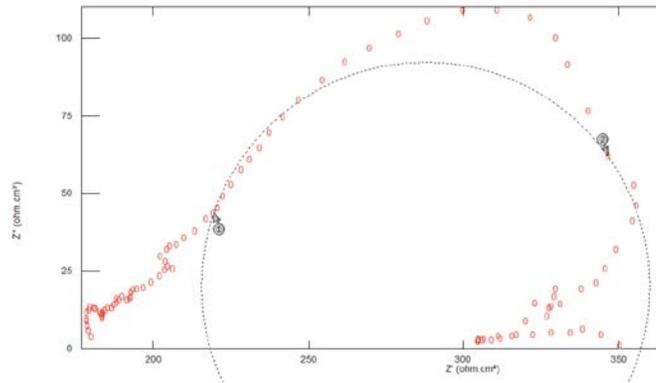


Figura 10 Impedancia electroquímica de celda sensibilizada con ácido carmínico.

En su circuito equivalente, se tiene un valor de resistencia de transferencia de carga  $R_{ct}$  de  $128.3\Omega\text{-cm}^2$ , como se muestra en la figura 11.

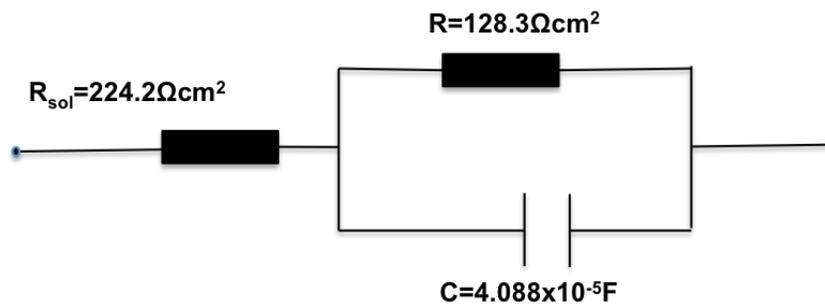


Figura 11 Circuito serie-paralelo de una celda sensibilizada con ácido carmínico.

La tercera celda medida fue una que se sensibilizó con Bixa Orellana (achiote), la cual mostró una aproximación más estrecha del semicírculo de aproximación (figura 12). Cabe mencionar que las irregularidades en el semicírculo a veces se les conocen como Impedancia de Warburg, la cual está en serie con la capacitancia de doble capa y se atribuye a procesos de difusión. Así mismo se observa en la figura 13 que la capacitancia de doble capa tiene un valor de  $1\mu\text{F}$ .

Una vez que fueron medidos los parámetros electroquímicos de las celdas orgánicas, también se midieron los valores del voltaje a circuito abierto  $V_{oc}$  y la corriente de corto circuito  $I_{sc}$  de cada celda orgánica, además se llevaron a cabo cálculos sobre el factor de llenado (fill factor) y se obtuvo la eficiencia ( $\eta$ ). Todos estos parámetros fueron colocados en la tabla 1.

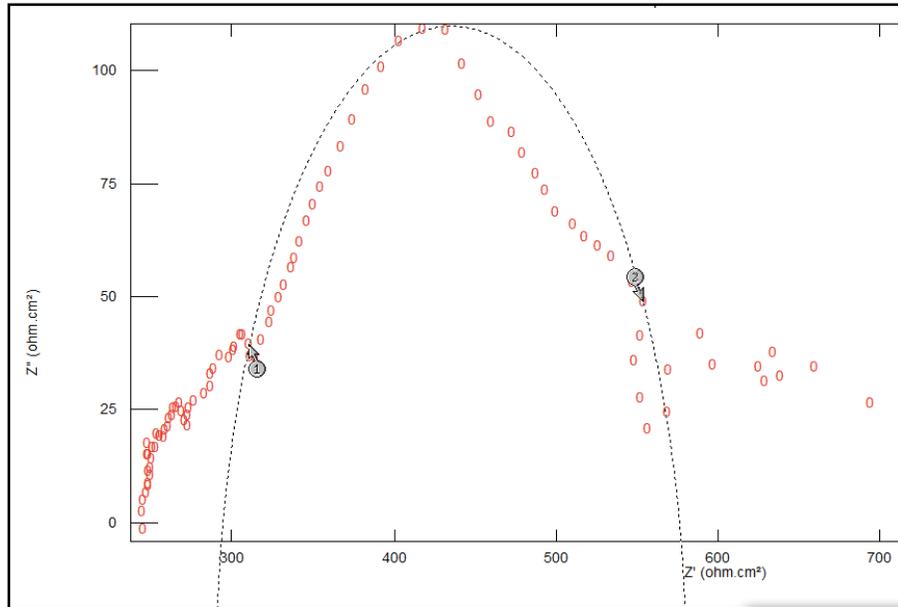


Figura 11 Barrido en frecuencia de una DSSC sensibilizada con Bixa Orellana (achiote).

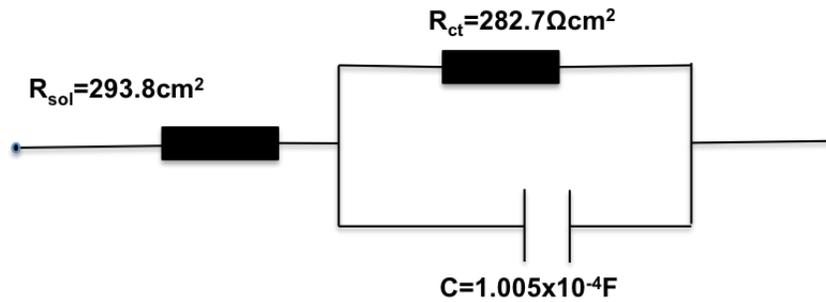


Figura 13. Modelo simple equivalente de una DSSC con Bixa Orellana (achiote).

Tabla 1 Parámetros eléctricos de las celdas relacionados con los parámetros electroquímicos de los circuitos equivalentes.

Pigmento	ff	$V_{OC}$ (Volt)	$I_{SC}$ (mA)	$\eta$ %	Parámetros eléctricos
$\beta$ -Caroteno	0.039	0.123	0.162	0.0001	$R_{sol.} = 547.5 \Omega cm^2$ $R_{ct} = 920.01 \Omega cm^2$ $C_{dl} = 1.168 \times 10^{-4} F$
Ácido Carmínico	0.033	0.160	0.350	0.0003	$R_{sol.} = 224.2 \Omega cm^2$ $R_{ct} = 128.3 \Omega cm^2$ $C_{dl} = 4.088 \times 10^{-5} F$
Bixa Orellana	0.002	0.372	0.443	0.00005	$R_{sol.} = 293.8 \Omega cm^2$ $R_{ct} = 282.7 \Omega cm^2$ $C_{dl} = 1.005 \times 10^{-5} F$

## **Celdas Optimizadas**

Durante el proceso de construcción de las celdas fotovoltaicas se pudo obtener una repetibilidad del 98% en los valores obtenidos de los parámetros eléctricos y electroquímicos, lo cual fue obtenido con el pigmento sensibilizador conocido como ácido carmínico. En la figura 14 se muestra una gráfica de la fotocorriente generada por una celda orgánica sensibilizada con este pigmento en la cual se hizo incidir un pulso de 1 segundo de oscuridad, 8 segundos de luz y nuevamente 1 segundo expuesta a la oscuridad. La fotocorriente alcanzó un valor de 450  $\mu\text{A}$ , y en donde se observa la respuesta inmediata que tiene la celda a la luz.

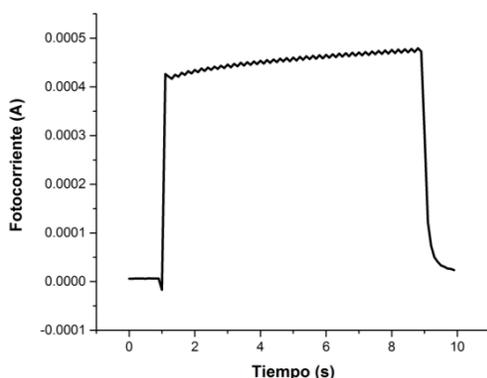


Figura 14 Gráfica de fotocorriente generada con un pulso que dura 8 segundos con luz.

Estos valores que consideramos óptimos en las celdas se deben a que dependiendo del espesor del dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  como material semiconductor es posible maximizar la corriente generada por la celda, lo cual ocurre a 34.66  $\mu\text{m}$ , debido a que se reduce el camino resistivo de la transferencia de carga  $R_{ct}$ , la cual es la mayor obtenida y es asociada con la resistencia “shunt” de salida de la celda fotovoltaica. Estos datos se presentan en la tabla 2.

Así mismo, se pudo observar que una vez que fueron alcanzados los valores óptimos del espesor, los semicírculos de aproximación de la impedancia electroquímica mejoraron notablemente con el pigmento de ácido carmínico. No ocurre distorsión que introduzca efectos resistivos o capacitivos ajenos al funcionamiento de las celdas y por lo tanto el circuito equivalente es más simple y adecuado al comportamiento de las propias celdas, con los parámetros

electroquímicos propuestos en el modelo inicial serie-paralelo, esto puede observarse en figura 15.

Tabla 2 Datos del espesor óptimo de TiO<sub>2</sub> en una celda fotovoltaica estandarizada con pigmento de ácido carmínico.

Espesor DSSC ( $\mu\text{m}$ )	Densidad de portadores superficial en pulso 1-8-1 ( $\text{mm}^{-2}$ )	Parámetros eléctricos.
5.75	1.84E+13	$R_{sol} = 313.5\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 244.8\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 2.361 \times 10^{-5} F$
10.6	1.79E+13	$R_{sol} = 412.8\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 215.9\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 49.78\mu F$
16.72	1.89E+13	$R_{sol} = 417.5\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 199.0\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 87.04\mu F$
34.66	2.41E+13	$R_{sol} = 202.8\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 802.6\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 146.1\mu F$
56.88	1.80E+13	$R_{sol} = 285.8\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 610.7\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 43.64\mu F$
70.4	1.75E+13	$R_{sol} = 243.3\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 342.4\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 97.17\mu F$

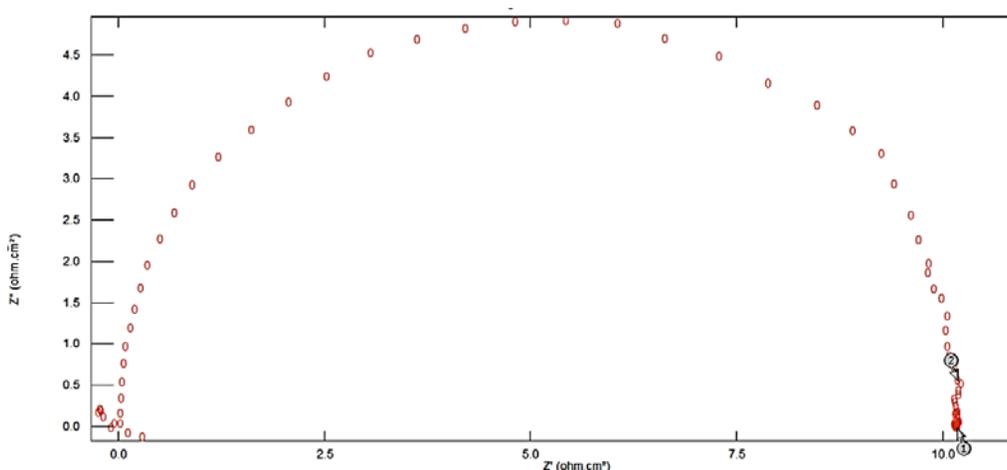


Figura 15 Nyquist de una DSSC optimizada en tiempo de adsorción de ácido carmínico.

También fue posible observar que dependiendo del tamaño molecular del pigmento utilizado para sensibilizar la celdas, se obtiene un mayor valor en la fotocorriente generada debido a que se tiene un tiempo adecuado para la difusión del pigmento en el material semiconductor. El  $\beta$ -caroteno difunde muy rápido por ser una molécula pequeña pero es muy inestable al ambiente y la molécula de Bixa Orellana es una molécula de mayor tamaño que lleva mucho tiempo para su difusión. Se

puede ver en la tabla 3 que el tiempo más adecuado para que difunda el ácido carmínico está alrededor de 24 h, al cual se tiene la mejor respuesta de la fotocorriente generada, la cual se asocia con la más baja resistencia de transferencia de carga  $R_{ct}$  que es de  $120 \Omega\text{-cm}^2$  y la menor capacitancia de doble capa  $C_{dl}$  que tiene un valor de  $17.05 \mu\text{F}$ .

Tabla 3 Datos de una DSSC sensibilizada con ácido carmínico (cochinilla) para evaluar el valor óptimo del tiempo de adsorción de dicho pigmento.

Tiempo de adsorción. (h)	Densidad superficial de portadores. ( $\text{mm}^{-2}$ )	Parámetros eléctricos.
0	2.86E+13	$R_{sol} = 248.2\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 209.3\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 4.487 \times 10^{-5} F$
12.5	1.98E+13	$R_{sol} = 410.2\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 264.2\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 9.329 \times 10^{-5} F$
24.5	1.51E+13	$R_{sol} = 261.5\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 120\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 1.705 \times 10^{-5} F$
37.5	1.60E+13	$R_{sol} = 204.7\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 161.3\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 5.865 \times 10^{-5} F$
48	1.56E+13	$R_{sol} = 394\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 239.9\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 7.45 \times 10^{-5} F$
61	1.63E+13	$R_{sol} = 471\Omega\text{cm}^2$ $R_{ct} = 191.1\Omega\text{cm}^2$ $C_{dl} = 7.411 \times 10^{-5} F$

#### 4. Conclusiones

Al analizar los parámetros eléctricos obtenidos para las distintas DSSC elaboradas con los distintos pigmentos orgánicos mencionados, se observó que los parámetros obtenidos sí se asocian a los circuitos equivalentes que se ha propuesto para modelar el sistema de la DSSC. Aunque existe una variedad de circuitos que pueden modelar una DSSC, el circuito propuesto modela los principales procesos que se llevan a cabo en ella, tales como: la generación y transferencia de carga en la película de  $\text{TiO}_2$ , en la película de carbón, en el electrolito y en la formación de la doble capa iónica. Para tener un circuito equivalente más completo es necesario tomar en cuenta la transferencia de masa y difusión que se refleja en una impedancia de Warburg. La importancia de obtener circuitos equivalentes en celdas fotovoltaicas orgánicas radica en que podemos obtener la relación que hay entre parámetros eléctricos y parámetros electroquímicos de la misma DSSC, tales como

espesor de película de TiO<sub>2</sub>, concentración iónica en electrolito, tiempo de adsorción de pigmentos, etc., que se pudo llevar a cabo mediante las pruebas de impedancia electroquímica. Por lo tanto, es de suma importancia reconocer que la metodología utilizada en este trabajo basada en la medición y análisis de la impedancia electroquímica en celdas fotovoltaicas orgánicas permite cotejar las bases teóricas planteadas en artículos publicados que modelan las celdas orgánicas con redes o circuitos eléctricos serie-paralelo con dispositivos experimentales diseñados y construidos de manera óptima.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] Gra M. and Grätzel M., Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells, *Inorganic Chemistry*, 44 (20), 6841–51, 2005.
- [2] Flores-Mena E., Juárez Moran L., Díaz Reyes J., Caracterización eléctrica de una celda solar de silicio monocristalino, *Internet Electronic Journal, Nanociencia et Moletrónica*, 8, 1571–1584, 2010.
- [3] Bisquert J., Theory of the impedance of electron diffusion and recombination in a thin layer, *The Journal of Physical Chemistry*, 325–333, 2002.
- [4] Pongklang T., Chenvidhya D., Kirtikara K., Chuangchote S., and Silsiranich N., Voltage and frequency dependent impedances of dye sensitized solar cell, *Energy Procedia*, 52, 536–540, 2014.
- [5] Jeng M. J., Wung Y. L., Chang L.B., and Chow L., Dye-Sensitized Solar Cells with Anatase TiO<sub>2</sub> Nanorods Prepared by Hydrothermal Method, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2013, 1–8, 2013.
- [6] Hao S., Wu J., Huang Y., and Lin J., Natural dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cell, *Solar Energy*, 80 (2), 209–216, 2006.
- [7] Kalyanasundaram K., *Fundamental Sciences: Chemistry, Dye-sensitized Solar Cells*, EPFL Press., 2010.
- [8] Law M., Greene L. E., Johnson J. C., Saykally R., and Yang P., Nanowire dye-sensitized solar cells, *Nature Materials*, 4 (6), 455–459, 2005.
- [9] Flores J. M., Romero R. D., Llongueras J. G., Instituto Mexicano del Petróleo, Facultad de Química, UNAM, “NOTAS,” pp. 1–33.