

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERAS AMBIENTALES**

**TEMA:
ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DEL COMPORTAMIENTO DE
CELDA SOLARES DSSCs, UTILIZANDO ELECTROLITO
BIODEGRADABLE NO PATENTADO Y EL TINTE SQ2.**

**AUTORAS:
JOHANNA ELIZABETH RUIZ CRUZ
JESSICA GABRIELA VELASCO PUCUJI**

**TUTORA:
MARÍA CRISTINA CALERO ARMAS**

Quito, noviembre del 2016

Cesión de derechos de autor

Nosotras Johanna Elizabeth Ruiz Cruz con documento de identificación N° 1724499180 y Jessica Gabriela Velasco Pucuji con documento de identificación N° 1719318899, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del trabajo de titulación intitulado: ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DEL COMPORTAMIENTO DE CELDAS SOLARES DSSCS, UTILIZANDO ELECTROLITO BIODEGRADABLE NO PATENTADO Y EL TINTE SQ2, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieras Ambientales, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autoras nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Johanna Elizabeth Ruiz Cruz
1724489180
Noviembre de 2016

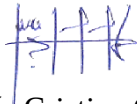


.....
Jessica Gabriela Velasco Pucuji
1719318899
Noviembre de 2016

Declaratoria de coautoría del docente tutora

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DEL COMPORTAMIENTO DE CELDAS SOLARES DSSCS, UTILIZANDO ELECTROLITO BIODEGRADABLE NO PATENTADO Y EL TINTE SQ2 realizado por Johanna Elizabeth Ruiz Cruz y Jessica Gabriela Velasco Pucuji, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, noviembre 2016



María Cristina Calero Armas

1714550645

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
Materiales	15
Métodos	16
Limpieza de los vidrios FTO	16
Construcción del capacitor con Electrolito Biodegradable no Patentado Viscoso (EBNP-V)	16
Construcción del capacitor con Electrolito Biodegradable no Patentado Líquido (EBNP-L).....	17
Construcción del capacitor con Electrolito Yoduro/Triyoduro (IE^-/I_3^-)	18
Construcción del capacitor con Electrolito Biodegradable Yoduro/Triyoduro (EBI^-/I_3^-).....	19
Caracterización de los electrolitos	19
.....	21
Caracterización del pigmento SQ_2	21
Metodología para la construcción de una DSSC	22
Preparación del vidrio FTO	22
Caracterización y medición de la eficiencia energética de una DSSC	27
Diseño Experimental	29
Variables.....	30
Consideraciones éticas	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
Resultados de la caracterización de los diferentes electrolitos.....	31
Resultados de voltametría cíclica	31
Resultado de la prueba de carga y descarga	33
Resultados de la caracterización del pigmento SQ_2	38
Espectro de absorción del pigmento SQ_2	38
Espectro de absorción del pigmento SQ_2 con TiO_2	39
Resultados del comportamiento de las DSSC's	40
Resultados del comportamiento de las DSSC's con variaciones de EBNP y IE^-/I_3^-	43
CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto fotovoltaico: Absorción de fotones, generación de cargas y producción de corriente.....	3
Figura 2. Principio de funcionamiento de una DSSC's	5
Figura 3. Estructura esquemática de una DSSC's.....	6
Figura 4. Señal de excitación potencial- tiempo en voltamperometría cíclica.	9
Figura 5. Voltamperograma para voltametría cíclica donde: E_{pa} : energía potencial anódica, E_{pc} : energía potencial catódica, I_{pa} : Corriente del pico anódico y I_{pc} : corriente del pico catódico.	10
Figura 6. Tabla para determinar la correlación existente entre ΔE_p calculada y Λ ..	11
Figura 7. Parámetros de Nicholson para determinar el mecanismo de transferencia de electrones.....	11
Figura 8. Conexión del circuito RC en a) carga y b) descarga.	12
Figura 9. Curvas de un condensador correspondientes: a) Carga y b) Descarga.....	13
Figura 10. Pasos para la construcción del capacitor con EBNP-V. a) Sinterización del Platisol en la placa calefactora de laboratorio con tapa oscura de vidrio termo resistente como aditamento, b) Deposición del electrolito en el área cuadrangular hueca, c) Retiró la parte protectora de la cinta doble faz y d) Colocación del contra electrodo y sellado con el adhesivo de Cianoacrilato.....	17
Figura 11. Construcción del capacitor con EBNP-L. a) Colocación del Meltonix en el electrodo, b) Sellado del capacitor, c) Inyección del electrolito I^-/I_3^- y d) Capacitores con EBNP-L.	18
Figura 12. Capacitores contruidos con la disolución 1/20 del EI^-/I_3^- en agua destilada.	18
Figura 13. Capacitores contruidos con la disolución 1/20 del EBI^-/I_3^- en agua destilada.....	19
Figura 14. Prueba de voltametría cíclica para el EI^-/I_3^-	20
Figura 15. Prueba de carga y descarga con el generador de funciones, osciloscopio y el circuito con su respectivo capacitor.	20
Figura 16. Medición de la capacitancia con ayuda del LCR.	21
Figura 17. Prueba UV/VIS del pigmento SQ ₂ . a) Diferentes disoluciones del pigmento SQ ₂ en etanol a partir de 0,3 [mM] y b) Espectrofotómetro VARIAN 50 Bio UV-Visible.	21
Figura 18. Espectrofotometría de absorción del SQ ₂ en la película del TiO ₂ transparente a) Muestras con SQ ₂ y sin SQ ₂ en TiO ₂ transparente y b) Espectrofotómetro Jasco V630 N° C269961148.....	22

Figura 19. Malla de Serigrafía con contornos cuadrangulares internos de 5x5 [mm].	23
Figura 20. Proceso para la deposición de la pasta de TiO ₂ nanopartícula transparente. a) Deposición de la pasta por serigrafía con ayuda de una racleta, b) Homogeneidad de la capa deposita con un Spin Coating a 2000 [rpm] por 25 segundos y c) Sinterización de la pata a 450°C por 30 minutos.	24
Figura 21. Pasos para la pigmentación del TiO ₂ . a) FTO con dióxido de titanio ya sinterizado a 60°C, b) Colocar en el pigmento por 21 horas y c) TiO ₂ pigmentado..	25
Figura 22. Proceso final para la construcción de una DSSC. a) Unión entre el electro y contra- electrodo, b) inyección del electrolito, c) sellado de la celda y d) DSSC con SQ2.....	27
Figura 23. Simulador Solar empleado para la caracterización de las DSSC's.....	28
Figura 24. Graficas curva de corriente – voltaje y potencial – voltaje generados por el programa computacional para determinar los parámetros de rendimiento fotovoltaicos de las celdas.....	29
Figura 25. Resultados de la prueba de voltametría cíclica para el Electrolito Biodegradable No Patentado -Viscoso (EBNP-V) y Electrolito Biodegradable No Patentado- Líquido (EBNP-L) a un barrido de potencial de -1 a 1 [V] y una velocidad de barrido de 0,5 [V/s].	31
Figura 26. Resultados de la prueba de voltametría cíclica para el Electrolito I ⁻ /I ₃ ⁻ a un barrido de potencial de 1 a -1 [V] y una velocidad de barrido de 0,5 [V/s].....	32
Figura 27. Resultados de la prueba de voltametría cíclica para el Electrolito Biodegradable I ⁻ /I ₃ ⁻ (EB I ⁻ /I ₃ ⁻) a una velocidad de barrido de 0,5 [V/s].	33
Figura 28. Comportamiento del EBNP-V en la prueba carga y descarga con ayuda del generador de funciones a una frecuencia de 100 [Hz] y voltajes de: a) 1 [V], b) 2 [V], c) 5 [V], d) 8 [V] y e) 10 [V].....	34
Figura 29. Comportamiento del EBNP-V en la prueba carga y descarga con ayuda del generador de funciones a una frecuencia de 100 [Hz] y voltajes de: a) 1 [V], b) 2 [V], c) 5 [V], d) 8 [V] y e) 10 [V].....	35
Figura 30. Comportamiento del EI-/I ₃ - en la prueba carga y descarga con ayuda del generador de funciones a una frecuencia de 100 [Hz] y voltajes de: a) 1 [V], b) 2 [V], c) 5 [V], d) 8 [V] y e) 10 [V].....	35
Figura 31. Comportamiento del EBI-/I ₃ - en la prueba carga y descarga con ayuda del generador de funciones a una frecuencia de 100 [Hz] y voltajes de: a) 1 [V], b) 2 [V], c) 5 [V], d) 8 [V] y e) 10 [V].....	35
Figura 32. Graficas del ln (Voltaje) en función del tiempo correspondientes a la descarga de cada capacitor con su diferente electrolito.	36
Figura 33. Resultados de la prueba de LCR representados en graficas de capacitancia vs frecuencia para: a) Electrolito Biodegradable no Patentado Viscoso (EBNP-V), b)	

Electrolito Biodegradable no Patentado Líquido (EBNP-L), c) Electrolito I-/I ₃ ⁻ (EI-/I ₃ ⁻) y d) Electrolito Biodegradable I-/I ₃ ⁻ (EBI-/I ₃ ⁻).	37
Figura 34. Espectro de absorción del tinte SQ ₂ con una concentración de 0,3 [mM].	38
Figura 35. Espectro de absorción de la película de TiO ₂ pigmentada con SQ ₂ a una concentración de 0,3 [mM] durante 21 horas.....	39
Figura 36. Curvas de densidad de corriente-voltaje sensibilizadas con pigmento SQ ₂ con diferentes electrolitos.	40
Figura 37. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos de los diferentes parámetros fotovoltaicos de una DSSC que son: a) Eficiencia (η), b) Voltaje (Voc), c) Corriente (Isc) y d) Factor de llenado (FF). Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente.....	42
Figura 38. Curvas de densidad de corriente-voltaje sensibilizadas con pigmento SQ ₂ con variaciones de EBNP-L y EI/I ₃ ⁻	43
Figura 39. Grafica de η normalizada en [%] vs variación del porcentaje de EBNP-L en el EI/I ₃ ⁻ y la densidad de corriente vs la variación del porcentaje del EBNP-L en el EI/I ₃ ⁻	44
Figura 40. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para eficiencia (η).....	46
Figura 41. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para voltaje (Voc).	47
Figura 42. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para corriente (Isc).	48
Figura 43. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para el factor de llenado (FF).....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Equipos, materias y reactivos utilizados para la caracterización del electrolito y construcción de las DSSC's..	15
Tabla 2. Concentraciones aplicadas en las variaciones de electrolitos.	25
Tabla 3. Diseño experimental para la caracterización de las DSSC's..	29
Tabla 4. Diseño experimental para la caracterización de las DSSC's con variaciones de concentración del EBNP-L y Et^+/I_3^-	30
Tabla 5. Prueba de carga y descarga con ayuda del generador de funciones para los electrolitos.....	34
Tabla 6. Capacitancia en corriente directa y frecuencia 0 [Hz] para los diferentes electrolitos.....	37
Tabla 7. Parámetros fotovoltaicos de las DSSC's con SQ_2 y diferentes electrolitos.	41
Tabla 8. Parámetros fotovoltaicos de las DSSC's con SQ_2 y diferentes variaciones de electrolitos.....	43

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Voltamperograma del EBNP-V a un barrido de potencial de 1 a -1 y una velocidad de barrido de 0,5 [V/s].....	56
Anexo 2. Voltamperograma del EBNP-L a un barrido de potencial de 1 a -1 y una velocidad de barrido de 0,5 [V/s].....	56
Anexo 3. Voltametría Cíclica del EI/I_3^- a diferentes velocidades de barrido.....	57
Anexo 4. Voltametría Cíclica del EBI/I_3^- a diferentes velocidades de barrido	57
Anexo 5. Preparación del pigmento SQ ₂ y ácido Quenodeoxicólico en Etanol	58
Anexo 6. DSSC's con SQ ₂ y diferentes electrolitos	58
Anexo 7. DSSC's con SQ ₂ y diferentes variaciones de electrolito.....	59
Anexo 8. Resultados obtenidos de las diferentes muestras con diferentes electrolitos para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's	59
Anexo 9. Tabla de ANOVA para los resultados obtenidos de las diferentes muestras con diferentes electrolitos para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's	60
Anexo 10. Resultados obtenidos de las diferentes muestras con variaciones de concentraciones de EBNP-L y $E I/I_3^-$ para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's	60
Anexo 11. Tabla de ANOVA para los resultados obtenidos de las diferentes muestras con variaciones de concentraciones de EBNP-L y $E I/I_3^-$ para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's.....	61
Anexo 12. Grafica de medias de los resultados obtenidos con variaciones de concentraciones de EBNP-L y $E I/I_3^-$ para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's	62

RESUMEN

Con el afán de contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías de energías alternativas, en el presente estudio se ha investigado a escala de laboratorio el comportamiento de Celdas Solares Sensibilizadas con Pigmentos (Dye Sensitized Solar Cells o DSSC's) utilizando diferentes electrolitos y el tinte orgánico unsymmetrical squaraine (SQ₂). Los electrolitos estudiados fueron: Electrolito Biodegradable no Patentado Viscoso (EBNP-V), Electrolito Biodegradable no Patentado Líquido (EBNP-L), Electrolito Yoduro/Triyoduro (EI⁻/I₃⁻) y Electrolito Biodegradable Yoduro/Triyoduro (EBI⁻/I₃⁻). A estos se los caracterizó mediante pruebas electroquímicas de voltametría cíclica, carga y descarga y medidor de inductancia, capacitancia y resistencia (LCR) con el fin de conocer sus propiedades electroquímicas y su influencia en las celdas. Se realizó la construcción de las DSSC's con los diferentes electrolitos y se caracterizaron los parámetros fotovoltaicos de Eficiencia (η), Voltaje de circuito abierto (V_{oc}), Corriente de corto circuito (I_{sc}) y Factor de llenado (FF).

Mediante pruebas estadísticas se determinó el electrolito que más influye en los parámetros fotovoltaicos de las celdas, siendo este el EBI⁻/I₃⁻, el cual se elaboró con un solvente biodegradable. Además, se obtuvieron resultados favorables al complementar el EI⁻/I₃⁻ con EBNP-L en bajas concentraciones, esto favorece al desarrollo de nuevas investigaciones en busca de un electrolito biodegradable y de bajo costo que contribuya con un mejor rendimiento de las DSSC's.

ABSTRACT

In an effort to contribute to the development of new alternative energy technologies, in the present study it has been investigated on a laboratory scale the behavior of Dye Sensitized Solar Cells (DSSC's) using a variety of electrolytes and an optimized asymmetric squaraine tint (SQ₂). The analysed electrolytes were: Biodegradable viscous unpatented electrolyte (EBNP-V), Biodegradable unpatented liquid electrolyte (EBNP-L), Iodide/Tri-iodide electrolyte (EI⁻/I₃⁻) and Biodegradable Iodide/Tri-iodide electrolyte (EB I⁻/I₃⁻). These were characterized through electro-chemical testing of cyclic voltammetry, charge and discharge and an inductance, capacitance and resistance (LCR) measurer in order to meet its electrochemical properties and its influence over cells. The DSSC's were constructed with the electrolytes listed previously and the efficiency photovoltaic parameters (η), open circuit voltage (V_{oc}), short circuit current (I_{sc}) y fill factor (FF) were characterized.

By statistical tests, the EBI⁻/I₃⁻ comes as the most influential electrolyte in the photovoltaic performance parameters of the cells, it was prepared with a biodegradable solvent. Additionally, favorable results were obtained by complementing EI⁻/I₃⁻ with EBNP-L at low concentrations, this contributes to the develop new research to look for a biodegradable and low cost electrolyte which contributes to a better performance of the DSSC.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la humanidad se ve obligada a enfrentar un continuo crecimiento de la demanda energética y los problemas ambientales ocasionados por el uso intensivo de recursos fósiles como fuente de energía. El agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, sus costos elevados y el control de los niveles de emisión de CO₂ para regular el efecto invernadero, han incrementado la búsqueda de fuentes de energías renovables que sean capaces de satisfacer las demanda energética mundial y asegurar la protección del medio ambiente (Carbó & Rocha, 2012; M. Wang, Grätzel, Zakeeruddin, & Grätzel, 2012).

Dentro de las posibles fuentes de energías renovables, la solar fotovoltaica es la más confiable y sostenible para el futuro, ya que al convertir directamente la luz solar en energía eléctrica utilizando celdas solares no genera desechos y contribuye a la protección del medio ambiente, así como el crecimiento económico de los recursos sostenibles (Cerdeira & Enciso, 2014; Stathatos, 2011). La producción de energía fotovoltaica ha tenido un crecimiento considerable en las dos últimas décadas, sin embargo, se busca mejorar las tecnologías existentes y el desarrollo de nuevos sistemas con la finalidad de mejorar su estabilidad, eficiencia y comercialización (M. Wang et al., 2012).

En relación al desarrollo de energías alternativas, la propuesta de este trabajo experimental es estudiar el comportamiento de las Celdas Solares Sensibilizadas con Pigmentos (DSSC's) utilizando un electrolito biodegradable y el tinte SQ₂. Contribuyendo así a la aplicación de procesos sencillos para su obtención que generan un bajo costo, a comparación de las celdas solares de silicio. Por otra parte, es un tema que está en vanguardia de la investigación a nivel mundial, dado que hoy en día se buscan alternativas para cada componente de una DSSC con la finalidad de mejorar su

funcionamiento, sin embargo, no se presentan estudios que aborden exhaustivamente el tema, lo cual constituye una razón de investigación en materia de ciencias ambientales.

La hipótesis de investigación planteada para el presente trabajo experimental es determinar si una Celda Solar Sensibilizada por Pigmentos presenta diferente comportamiento y eficiencia al variar el electrolito y utilizar el tinte SQ₂. La hipótesis nula menciona que una Celda Solar Sensibilizada por Pigmentos no presenta diferente comportamiento y eficiencia al variar el electrolito y utilizar el tinte SQ₂. Finalmente, las hipótesis alternativas son:

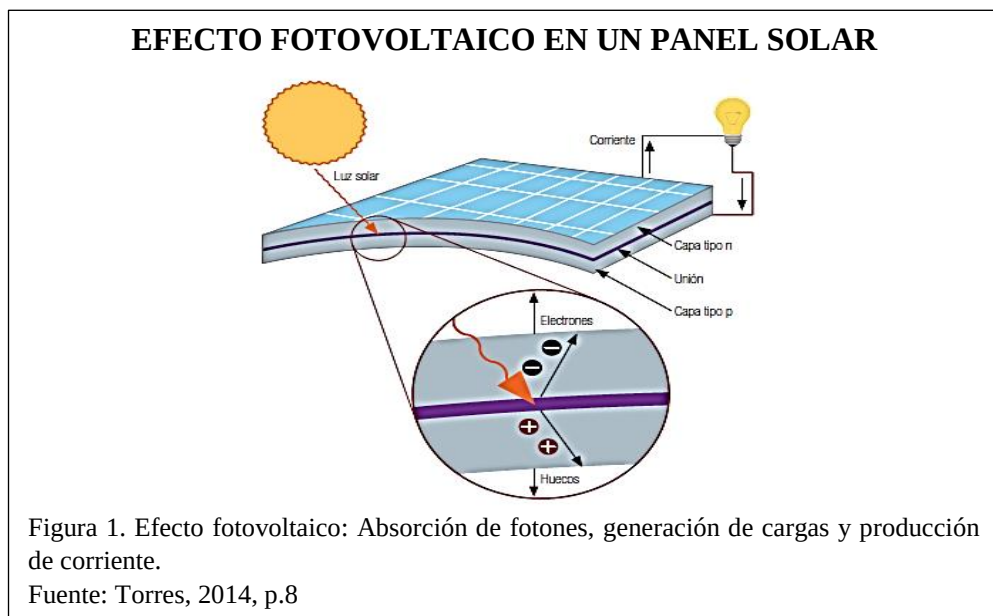
- El electrolito biodegradable no patentado tiene potencial para remplazar al electrolito Idolito AN-50, Solaronix, en la construcción de celdas solares DSSC's.
- Los pigmentos varían la capacidad de regeneración del electrolito biodegradable no patentado.
- Las propiedades mecánicas del electrolito biodegradable no patentado difieren en la forma de llenado de una DSSC.

Además, en el presente estudio se tiene como objetivo general estudiar a escala de laboratorio el comportamiento de las DSSC's utilizando electrolito biodegradable no patentado y el tinte SQ₂ para el aprovechamiento de la luz solar como fuente de energía y los objetivos específicos establecido son:

- Caracterizar el electrolito biodegradable no patentado mediante métodos electroquímicos para conocer sus propiedades electroquímicas.
- Desarrollar una metodología adecuada para caracterizar el electrolito biodegradable no patentado.

- Realizar un análisis comparativo tomando en cuenta el electrolito y tinte SQ₂ en el desempeño de las celdas construidas.

A partir de la radiación solar se obtiene la energía solar fotovoltaica la cual genera electricidad mediante el efecto fotovoltaico mismo que fue descubierto en 1839 por Alexandre Edmond Becquerel. Este efecto se da a través de un semiconductor que absorbe la luz en el rango del espectro de la radiación solar (luz visible), esta absorción de luz genera cargas de excitación provocando flujos de electrones y originando huecos dejados por estos (Ver Figura 1), produciendo así una diferencia de voltaje generando electricidad (Kusumawati, 2015, p. 3).



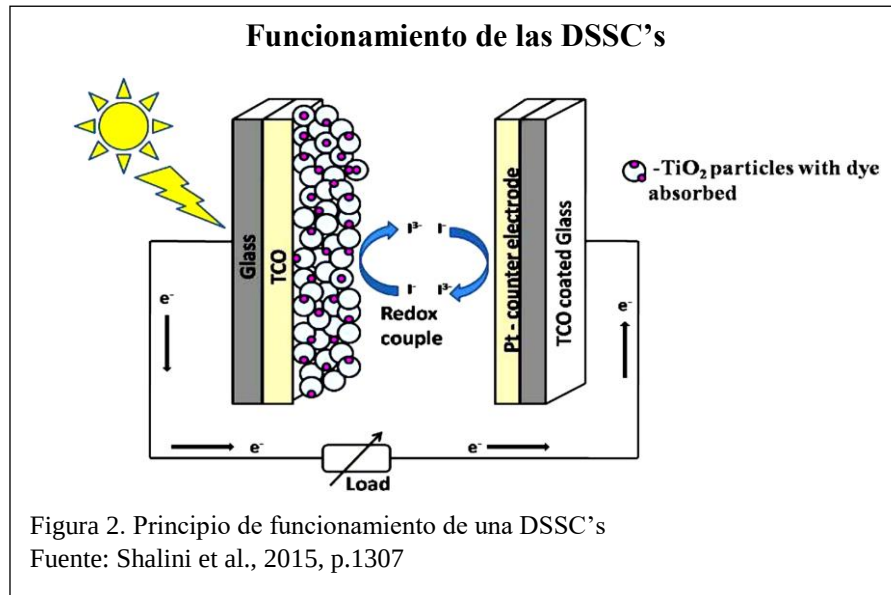
Con el afán de aprovechar el recurso solar se han desarrollado diversas tecnologías, desde 1950, la industria internacional de energía solar fotovoltaica ha evolucionado continuamente favoreciendo a la existencia de varias generaciones de celdas solares. La primera generación se basa en el silicio cristalino, estas celdas solares están vigentes y son dominantes en el mercado, presentan alta eficiencia de hasta el 25%. La segunda generación se conoce como celdas solares de película delgada, los tres materiales utilizados para estas son: el silicio amorfo, telurio de cadmio (CdTe) y el

seleniuro de cobre-indio-galio (CIGS del acrónimo del inglés de Copper indio gallium selenide) su eficiencia varia del 10 al 20%. En una tercera generación se encuentran las Celdas Solares Sensibilizadas por Pigmento (DSSC's) o celdas de Grätzel, las eficiencias récord de DSSC's que se han alcanzado en celdas pequeñas es del 12%. En las diferentes generaciones, se ha buscado mejorar la eficiencia de conversión teórica, incrementar su accesibilidad y reducir el coste de producción de las mismas (Arévalo, Espinoza, & Jaramillo, 2013; Yu, 2012, p. 2).

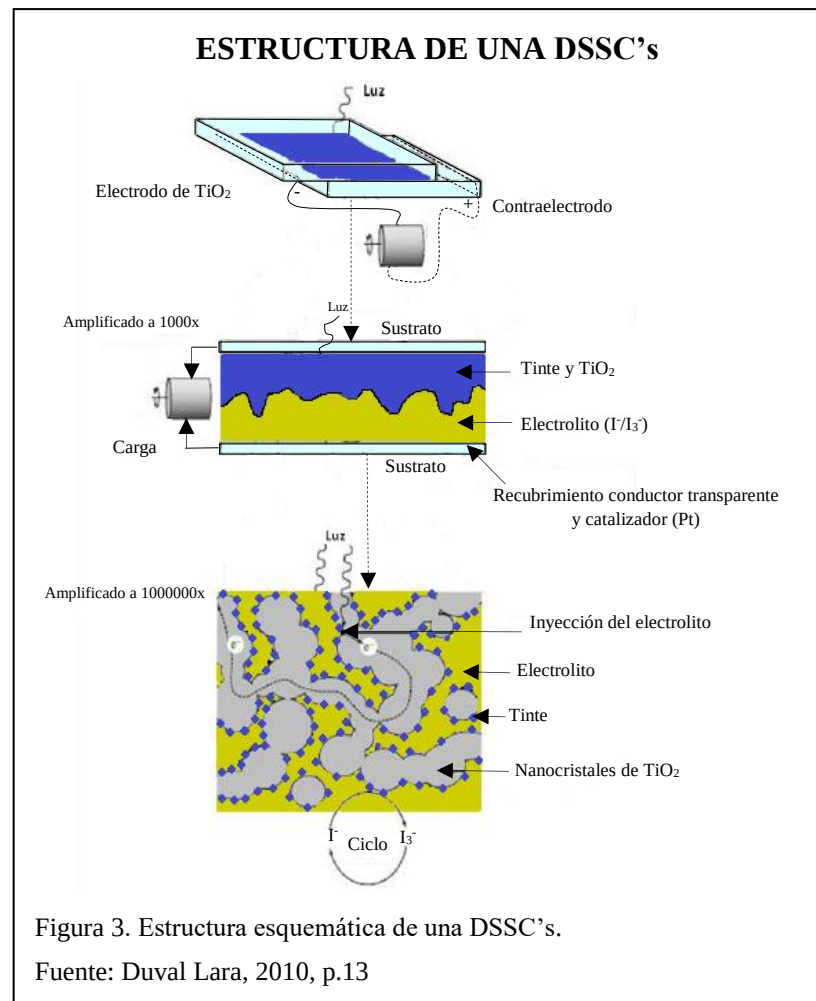
En 1991, O'Regan & Grätzel provocan una innovación de las celdas solares, dicho aporte se basó en utilizar celdas fotoelectroquímicas como un prototipo atractivo y económico para la conversión de la luz solar en energía eléctrica. Las celdas propuestas por Grätzel son celdas fotoelectroquímicas que imitan un proceso semejante a la fotosíntesis en cuanto a la absorción de fotones y transferencia de electrones. En ambos casos se posee mecanismos de acción como son: aceptor de electrones, donante de electrones y absorbedor de fotones; siendo en las DSSC's nanopartículas de TiO_2 , electrolito triyoduro y colorante respectivamente, mientras que en la fotosíntesis se encuentran las moléculas plastoquinonas, agua y clorofila (Carbó & Rocha, 2012).

En la Figura 2 se indica una representación esquemática del principio de funcionamiento de las DSSC's. Al incidir la radiación sobre el electrodo (ánodo) las moléculas del colorante absorben los fotones incidentes de la luz solar a través de la superficie de la capa de TiO_2 , lo que genera un estado foto excitado de los electrones los cuales se inyectan en la banda de conducción de TiO_2 . Los electrones viajan a través de la capa de TiO_2 para luego alcanzar el contra electrodo (cátodo) el cual contiene platino. Después de ello se recupera la estructura inicial del pigmento por lo que se da lugar a la regeneración del mismo mediante la donación de electrones desde el electrolito para posteriormente dirigirse al electrodo. La regeneración del electrolito

que contiene un par redox yoduro/triyoduro (I^-/I_3^-) tiene lugar en el contra electrodo (cátodo) a través de la donación de electrones desde el circuito externo y así finalmente completando el circuito (Sengupta, Das, Mondal, & Mukherjee, 2016; Shalini, Balasundara prabhu, Prasanna, Mallick, & Senthilarasu, 2015).



La estructura de una DSSC se basa en una capa semiconductor de óxido de metal nanocristalino, generalmente TiO_2 depositada y sinterizada sobre un placa de vidrio conductora transparente, una monocapa de algún colorante natural o sintético que absorbe la luz visible, el contra-electrodo que está cubierto por un material catalítico, siendo el más usado el platino y un electrolito que contiene un par redox (Abdel-Latif, Abuiriban, El-Agez, & Taya, 2015; Clifford, Martínez-Ferrero, & Palomares, 2012). Ver Figura 3.



El electrodo o también conocido como ánodo es una lámina de vidrio constituido con óxido conductor transparente (TCO) que habitualmente contiene óxido de estaño dopado con flúor (FTO), el mismo permite que la luz pase a través de la celda solar debido a que es un sustrato de vidrio transparente. Este es utilizado porque posee una gran transparencia en el espectro visible, además de ser de bajo costo y presentar buena disponibilidad. En el lado conductor del electrodo se coloca una película de óxido semiconductor el cual se compone de cristales, el más utilizado es el TiO_2 este permite el paso de electrones a través de la celda. Una condición importante del TiO_2 es que posee buena estabilidad química bajo la radiación solar y que el borde de la banda de conducción coincide con el nivel electrónico excitado del pigmento lo cual es muy

importante para la inyección de electrones del colorante en la banda de conducción del TiO_2 (Al-Alwani, Mohamad, Ludin, Kadhum, & Sopian, 2016).

El pigmento actúa como fotosensibilizador por ello desempeña un papel muy importante en las DSSC's. Sin embargo, para que este sea eficaz debe poseer ciertas características tales como: tener una rápida absorción en el espectro visible, fuerte adsorción sobre la superficie del óxido semiconductor y una inyección de electrones eficiente en la banda de conducción del semiconductor (TiO_2). A demás, se debe regenerar rápidamente con la finalidad de evitar procesos de recombinación de electrones y ser bastante estable, tanto en su estado inicial como en su estado excitado (Narayan, 2011).

En cuanto al electrolito es considerado como el elemento central de una DSSC, ya que contiene iones, generalmente I^-/I_3^- que se encuentran localizados entre el electrodo y el contra electrodo. Su función es el transporte de carga entre estos electrodos y la regeneración del colorante fotosensibilizador (Cong, Yang, Kloo, & Sun, 2012).

El par redox utilizado en el electrolito es decisivo en la determinación del rendimiento fotovoltaico de una DSSC, por lo tanto, según Yu (2012), es necesario que cumpla los siguientes requisitos: 1) su potencial redox debe ser menos negativo que el nivel oxidado de una molécula del colorante, con la finalidad de lograr la regeneración del tinte; 2) la cinética de recombinación de electrones en la interfaz debe ser lenta; 3) debe poseer una absorción de luz visible insignificante; 4) su cinética de transferencia en el contra electrodo debe ser bastante rápida; 5) debe ser soluble en el disolvente y tener buenas propiedades de difusión y por último, 6) tener una buena estabilidad fotoquímica, es decir que presente un buen proceso de oxidación-reducción (pp. 9–10).

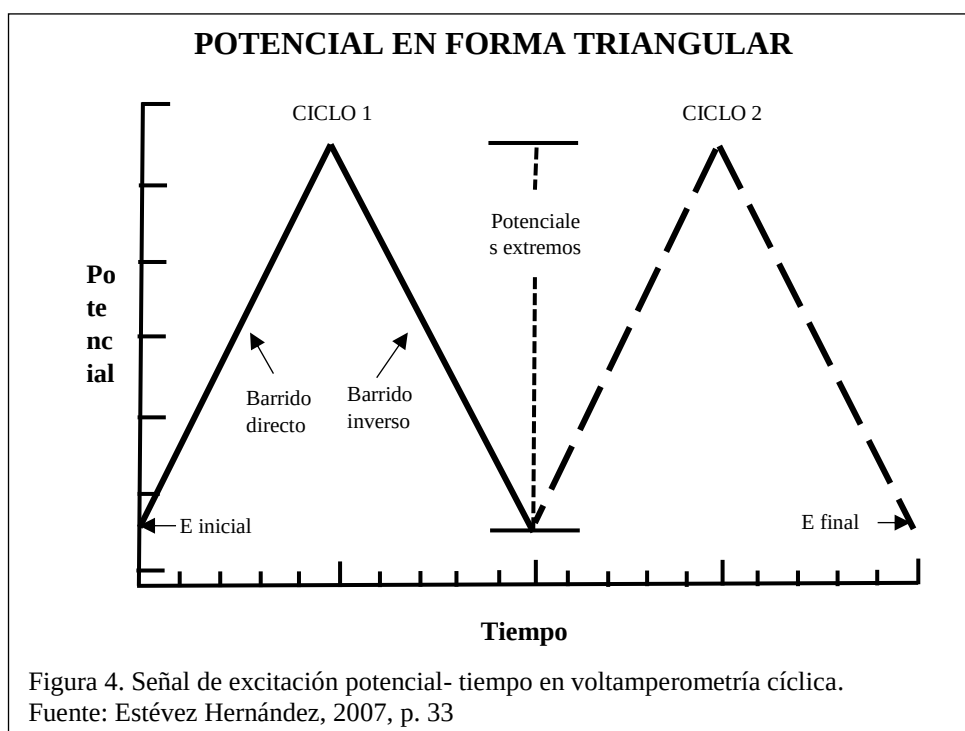
O'Regan & Grätzel (1991) obtuvieron una eficiencia del casi 8% al utilizar un electrolito elemental que se basa en un disolvente orgánico y un par redox disuelto. El I^-/I_3^- es el par redox más usado en el electrolito de una DSSC, ya que posee una buena capacidad de penetración en la película porosa del semiconductor (TiO_2), rápida regeneración del tinte y es el único par redox que posee una estabilidad a largo plazo, sin embargo, tiene como desventajas reducir la fotocorriente de corto circuito, ser corrosivo a gran escala, ser muy volátil pues se encuentra en estado líquido y al ser utilizados con nuevos pigmentos orgánicos no produce resultados favorables (Cong et al., 2012; J. Wang, 2001).

En el transcurso del tiempo se han realizado varias investigaciones con el fin de encontrar un par redox óptimo para ser utilizada en DSSC's, es así que en el estudio realizado por Cong et al. (2012) se nombran las investigaciones realizadas utilizando par redox orgánicos, par redox inorgánicos y par redox basados en complejos metálicos, que dan buenos resultados pero presenta mayores desventajas que las del par redox común, ya que su síntesis es bastante compleja y hay que buscar un fotosensibilizador adecuado para que coincida con los diferentes pares redox. Por tal motivo el par redox I^-/I_3^- sigue siendo el más utilizado y lo que se pretende es que la elaboración del electrolito a base de I^-/I_3^- sea lo más amigable con el medio ambiente y contribuya a una eficiencia óptima en las DSSC's.

Stathatos (2011) menciona que el contra electrodo (cátodo) constituye el elemento final en la estructura de las DSSC's, en este se da lugar la reducción de las especies redox las cuales han sido utilizadas como mediadoras en la regeneración del pigmento tras haber inyectado los electrones en el óxido semiconductor. Es importante que el contra electrodo presente baja resistencia eléctrica y una buena actividad catalítica para

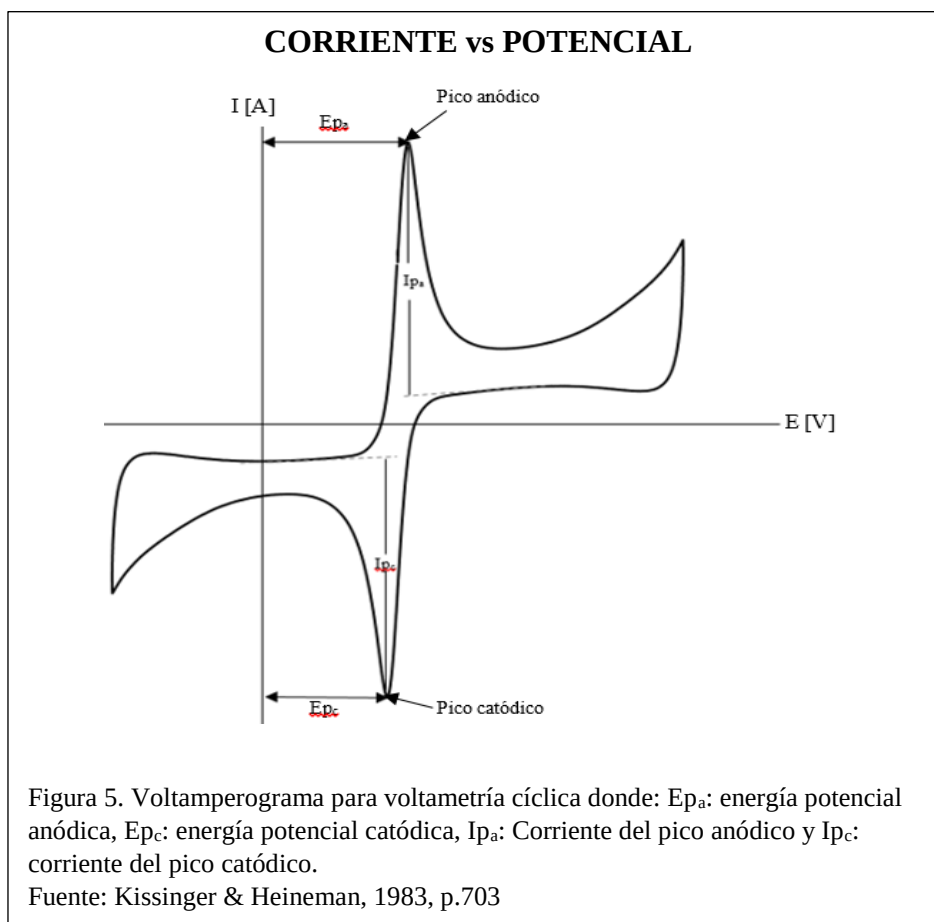
efectuar la reacción hacia el par redox yoduro/triyoduro (I^-/I_3^-) por lo que comúnmente se utiliza platino (Pt) como catalizador (Shalini et al., 2015).

Una de las técnicas electroquímicas utilizadas actualmente para el estudio de los mecanismos de reacción es la voltametría cíclica, la cual proporciona información en un amplio rango de potencial y así genera una observación rápida del comportamiento redox de las especies que participan en la reacción química (Kissinger & Heineman, 1983). El potencial de trabajo que se aplica en voltametría cíclica varía entre dos valores de un mínimo a un máximo en un determinado tiempo, generando un crecimiento lineal y posterior descenso hacia el valor mínimo, lo que conlleva a tener un potencial en forma triangular (Estévez Hernández, 2007, p. 32). Ver Figura 4.



Para el experimento de voltametría cíclica es necesario el uso de tres electrodos que se encargan del control y monitoreo de la reacción, así mismo es necesario tener la solución a estudiar, un potenciostato y un software que nos permita obtener la información generada por el mismo. El experimento inicia con la aplicación de un

barrido de potencial, el cual se elige en función de los valores del par redox controlados por difusión, es así que la solución de estudio se encuentra en estado reducida, ya que se mantiene en el potencial inicial. Al aumentar el voltaje, aparece la corriente anódica y la especie reducida empieza a recibir electrones generando que la superficie del electrón se oxide, esta corriente llega hasta el punto máximo del potencial redox donde se forma el pico anódico. Dado el estado de oxidación de la especie la corriente disminuye lentamente y la dirección del barrido cambia de sentido, apareciendo la corriente catódica y generando que la especie oxidada se vuelva a reducir, esta corriente llega hasta el punto de potencial máximo donde se forma el pico catódico, finalmente el voltaje vuelve a su punto inicial y es ahí donde se termina el ciclo y se forma el voltamperograma, que es simplemente la respuesta de la corriente en función del potencial (Kissinger & Heineman, 1983, p. 703). Ver Figura 5.



En el estudio de Aristov & Habekost (2015) establecen que los parámetros más importantes para considerar si un par redox es reversible, cuasi-reversible o irreversible son: el potencial catódica (E_{pc}), el potencial anódica (E_{pa}), corriente del pico catódico (I_{pc}) y corriente del pico anódico (I_{pa}). Conociendo estos valores se calcula la variación de potencial (ΔE_p) con la siguiente fórmula:

$$\Delta E_p = E_{pa} - E_{pc} \quad (1)$$

Una vez conocido el valor de ΔE_p se utiliza la tabla de la correlación de Nicholson entre los parámetros ΔE_p y Λ , que se muestra en la Figura 6 y se determina el valor de Λ (Ver Figura 7), para luego ser comparada y determinar el proceso de transferencia de electrones.

CORRELACIÓN DE NICHOLSON ENTRE LOS PARÁMETROS ΔE_p Y Λ

ΔE_p /mV	60	64	66	68	70	90	100	110	120	130	160
Λ	19	5,1	3,63	2,81	2,26	0,77	0,57	0,44	0,36	0,29	0,19

Figura 6. Tabla para determinar la correlación existente entre ΔE_p calculada y Λ .
Fuente: Aristov & Habekost, 2015, p. 116

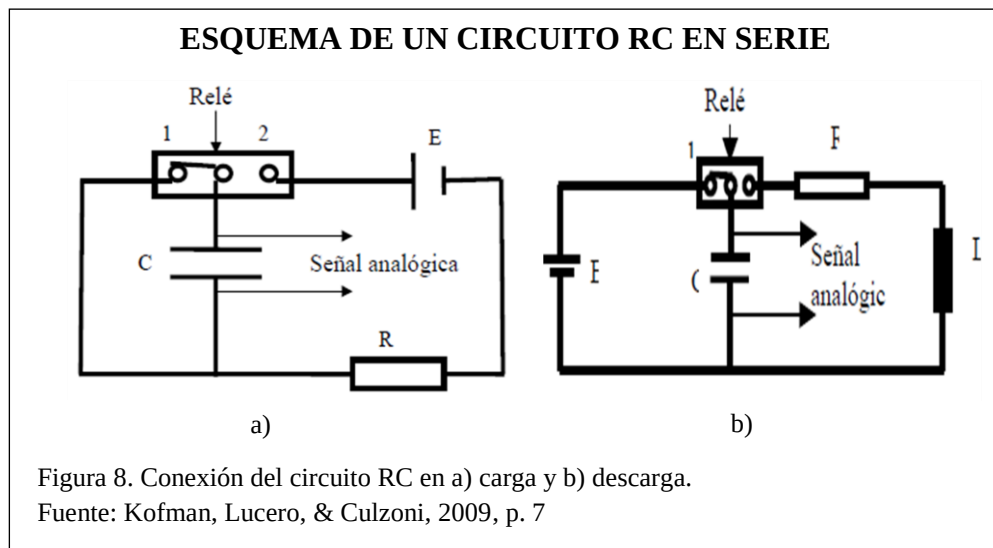
MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE ELECTRONES

reversible	$\Lambda > 10$	$k_0 > 0.35 \cdot v^{1/2}$
quasi-reversible	$10 > \Lambda > 10^{-2}$	$0.35 \cdot v^{1/2} > k_0 > 3.5 \cdot 10^{-4} \cdot v^{1/2}$
irreversible	$\Lambda < 10^{-2}$	$k_0 < 3.5 \cdot 10^{-4} \cdot v^{1/2}$

Figura 7. Parámetros de Nicholson para determinar el mecanismo de transferencia de electrones.

Fuente: Aristov & Habekost, 2015, p. 117

De manera general los dispositivos electrónicos de almacenamiento de energía se someten a diversas pruebas por lo que para analizar el comportamiento de los capacitores que contienen en su estructura especies electrolíticas, estos se someten a un proceso de carga y descarga en un circuito RC en serie (Ver Figura 8), este proceso físico se basa en la transferencia de electrones desde una placa a otra y se distribuyen uniformemente en las superficies internas de las placas, generándose así un campo electrostático en el cual los capacitores almacenan energía, la capacidad que tiene un capacitor de almacenar cargas eléctricas se denomina capacitancia (Hallyday, Resnick, & S. Krane, 1999, p. 95).



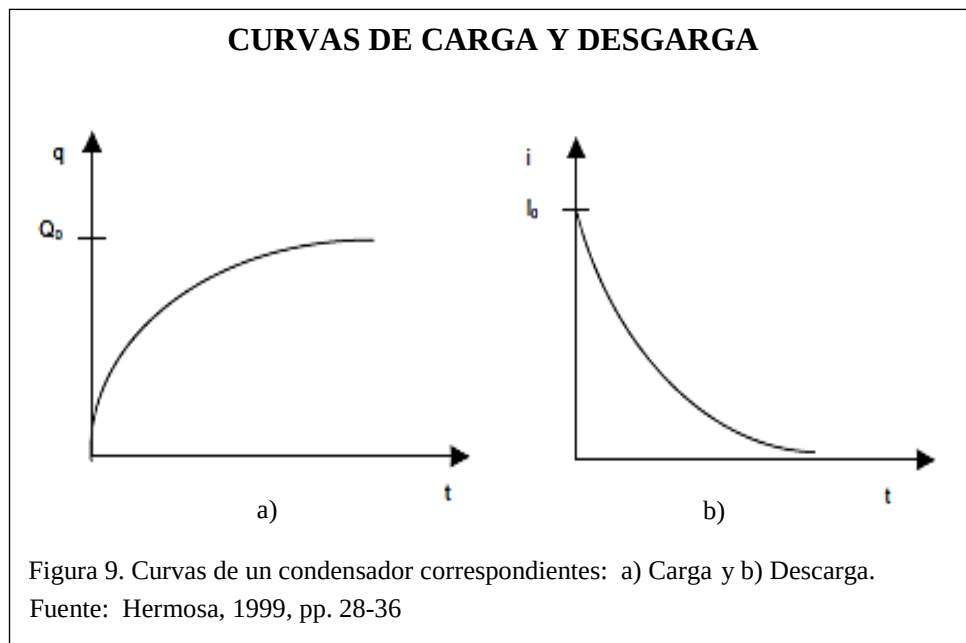
El proceso de carga de un capacitor se da cuando se conecta a una fuente de energía eléctrica en donde se empieza a cargar con cargas iguales y opuestas, hasta que la diferencia de potencial entre las placas alcanza la diferencia de tensión de la fuente. Como se observa en la Figura 9a la carga tiende a un comportamiento exponencial, cuando se inicia el proceso de carga el capacitor está vacío por lo que no hay corriente a través de este y el valor de la caída total de voltaje aparece en el resistor, por lo tanto cuando la carga posee un valor este es cero, la corriente alcanzará un valor máximo a través de la resistencia, transcurrido cierto tiempo la corriente es nula en el resistor y

la carga es máxima misma que se está almacenada en el capacitor. Durante el proceso de descarga como se indica en la Figura 9b, el capacitor se comporta como una fuente de voltaje con una diferencia de potencial cero a través del resistor debido a que la corriente es cero para un tiempo cero, así la carga es máxima en este instante tiempo, y su valor empieza a decrecer en forma exponencial de manera asíntota (Gallego & Cortés, 2008).

De acuerdo a las leyes de Kirchhoff para conocer los valores de capacitancia correspondientes a la carga y descarga de un sistema en estudio se tiene:

$$\ln \left(1 - \frac{V_c}{V_o} \right) = - \frac{t}{RC} \quad (2)$$

$$\ln \left(\frac{V_c}{V_o} \right) = - \frac{t}{RC} \quad (3)$$



Otro método experimental que se utiliza para caracterizar sistemas eléctricos son los analizadores de impedancia o LCR, estos son instrumentos usados para mediciones de parámetros primarios y secundarios de impedancia los cuales indican una respuesta dieléctrica de un material en función de un intervalo amplio de frecuencias generando

información sobre la respuesta dinámica del mecanismo que origina la polarización eléctrica en un material (Instrumentos de Medida S.L., 2016).

La técnica para la caracterización consiste en aplicar una perturbación senoidal de potencial eléctrico de frecuencia variable al material estudiado y el registro de la respuesta en corriente dentro de una celda electroquímica. La impedancia se define como el cociente entre el potencial aplicado y la intensidad medida a la salida. En muchos materiales y sistemas electroquímicos la impedancia varía con la frecuencia del potencial aplicado en una forma que está relacionada con las propiedades de dichos materiales lo cual se debe a la estructura física del material, a los procesos electroquímicos o a su vez ambos. Por consiguiente, si se hace una medida de impedancias en un rango de frecuencias adecuado y los resultados se representan en ejes acorde a los datos obtenidos se relaciona los resultados con las propiedades físicas y químicas de los materiales dieléctricos. A partir de las mediciones de desfase y de amplitud de la respuesta, es posible obtener la impedancia de transferencia electroquímica del material estudiado. (Vázquez, 2007, p. 3)

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

A continuación, se indican los equipos, materiales y reactivos que se utilizaron para la realización del presente proyecto:

Tabla 1.

Equipos, materias y reactivos utilizados para la caracterización del electrolito y construcción de las DSSC's.

Equipos	Materiales	Reactivos
✓ Medidor de LCRhp Hewlett packart 4263B	✓ Vidrios conductores (FTO), Solaronix	✓ Isopropanol, ✓ Agua destilada
✓ Generador de funciones B+K Model 4071 31.5 MHz Synthesized Arbitrary Waveform Generator.	✓ Estropajo no abrasivo ✓ Cinta doble faz ✓ Resina selladora, Meltonix 60PF, Solaronix ✓ Pastas Dióxido de Titanio TS/P, Solaronix	✓ Jabón líquido ✓ Metanol ✓ Diluyente para screenn printing ✓ Solución concentrada micro 90
✓ Osciloscopio Tektronix DPO 2012B Digital Phosphor Oscilloscope.	✓ Jeringa ✓ Adhesivo de Cianoacrilato (Krazzy glue)	✓ Platisol, Solaronix ✓ Etanol ✓ Piridina
✓ Potenciostato DY2100 Series Mini Potentiostat	✓ Vasos de precipitación	✓ Yoduro de sodio
✓ Multímetro	✓ Pastilleros	✓ Yodo metálico
✓ Malla de serigrafía		✓ Grafeno
✓ Spin coating		✓ Ácido Quenodesoxicólico
✓ Plancha térmica de laboratorio		✓ Pigmento orgánico SQ ₂ ✓ Electrolito Biodegradable no Patentado (EBNP-V)
✓ Plancha para ropa		✓ Electrolito Biodegradable no Patentado (EBNP-L)
✓ Cautín		✓ Electrolito I ⁻ /I ₃ ⁻ (E I ⁻ /I ₃ ⁻)
✓ Balanza de precisión		
✓ Centrifugadora PLC series		
✓ Sonicador		
✓ Agitador de laboratorio		
✓ Simulador Solar		
✓ Espectrofotómetro UV/VIS		

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Métodos

Para la elaboración del trabajo experimental se detallan a continuación las metodologías tanto para la caracterización de los electrolitos, así como, para la construcción de las DSSC's.

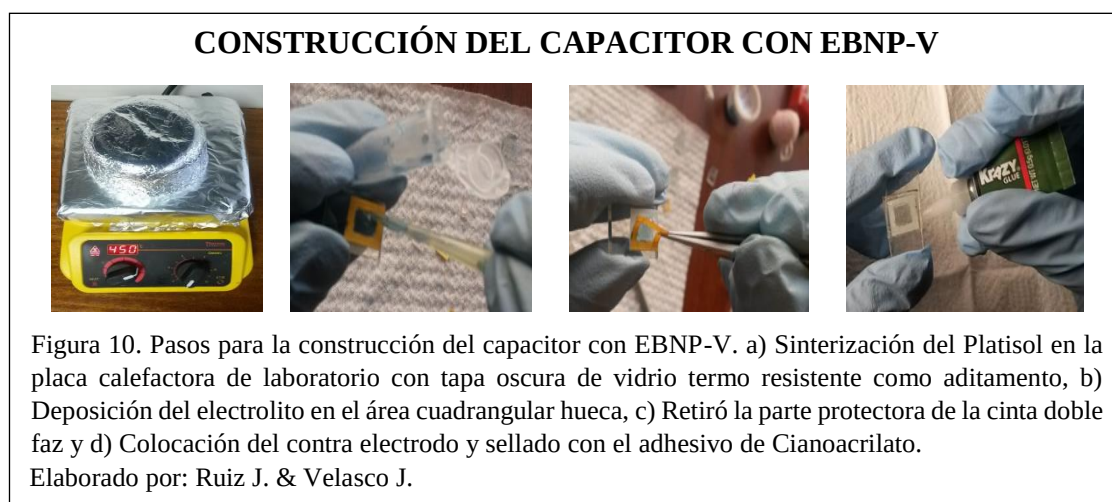
Limpieza de los vidrios FTO

Para la limpieza de los vidrios FTO se siguió la metodología de Calero (2016). Se inició con el lavado de los vidrios FTO utilizando un estropajo no abrasivo, agua y jabón líquido, a los cuales se enjuagó con abundante agua. Se preparó una solución con detergente Micro-90 al 1% en agua destilada, en la que se colocó los vidrios conductores para ser sonicados por 10 minutos y posteriormente se enjuagó con abundante agua destilada. A continuación, los vidrios conductores fueron colocados en agua destilada y sonicados por 10 minutos; se escurrió el agua destilada y se sonicó por 5 minutos con Isopropanol. Finalmente se llevó a los FTO a una superficie limpia y se dejó secar a temperatura ambiente.

Construcción del capacitor con Electrolito Biodegradable no Patentado Viscoso (EBNP-V)

Para la construcción del capacitor con electrolito biodegradable no patentado se utilizó los FTO previamente lavados, a los cuales se les aplicó una capa de solución precursora de platino, Platisol, Solaronix en la parte conductora. A continuación, se realizó la sinterización del Platisol con la ayuda de una placa calefactora de laboratorio, en la cual se colocó como aditamento una tapa oscura de vidrio termo resistente, se aumentó la temperatura en 50°C cada minuto, hasta llegar a los 450°C, donde se esperó 10 min. Posteriormente se apagó la placa calefactora sin retirar la tapa termo resistente para evitar choques térmicos y se dejó enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

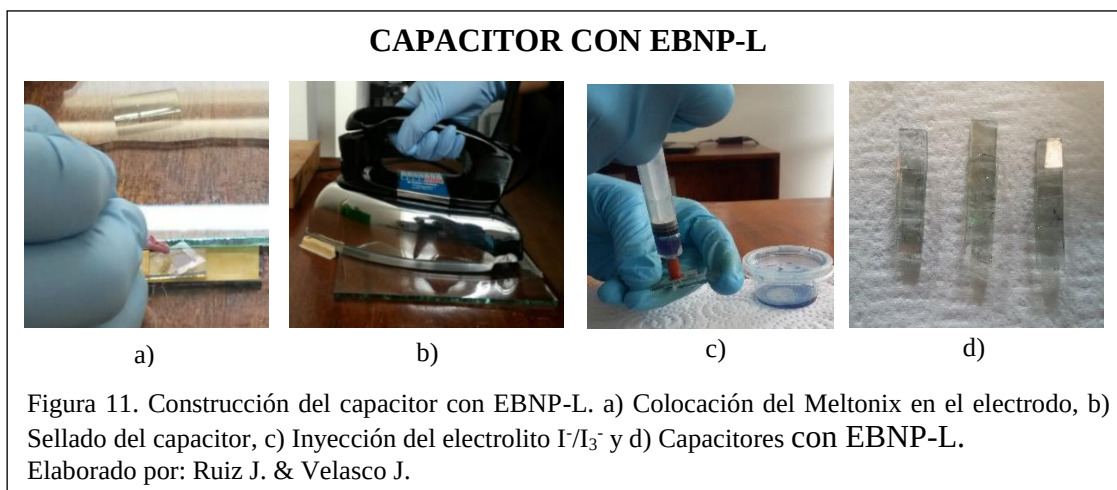
Una vez colocado el Platisol se tomó dos placas FTO, a una de ellas se aplicó una cinta doble faz de 1 [cm] x 1 [cm] con un área cuadrangular hueca de 6 [mm] x 6 [mm], en dicha área se depositó el EBNP-V, se retiró la parte protectora de la cinta doble faz y se procedió a sellar con la otra placa conductora. Para mejorar el sellado se aplicó en los bordes del capacitor un adhesivo de Cianoacrilato (Krazy glue). Ver Figura 10.



Construcción del capacitor con Electrolito Biodegradable no Patentado Líquido (EBNP-L)

En la construcción del capacitor con EBNP-L se tomaron dos placas FTO. A continuación, se siguió el mismo procedimiento de limpieza y aplicación del Platisol que del EBNP-V. Para unir el electrodo y el contra-electrodo que forma el capacitor se utilizó una resina térmica denominada Meltonix, la cual es una lámina delgada transparente de 60 micras de espesor, en esta se realizó un corte de 1 [cm] x 1 [cm] dejando en su interior una abertura de 6 [mm] x 6 [mm]. Posteriormente se coloca la lámina de Meltonix de medidas especificadas en el electrodo y sobre estos dos elementos el contra-electrodo. Con la ayuda de una plancha común de ropa a 140°C y aplicando presión se fija el Meltonix sobre los electrodos logrando su sellado. Ya formado el capacitor se inyecta el EBNP-L, mismo que fue previamente llevado a baño maría para disminuir su viscosidad y facilitar la inyección del electrolito en el

capacitor, este procedimiento se realizó con una jeringa que posee una ventosa en su apertura, mediante la cual se realizó vacío succionando el aire e ingresando el electrolito al área destinada para tal fin. Ver Figura 11.



Construcción del capacitor con Electrolito Yoduro/Triyoduro (EI^-/I_3^-)

Se tomaron dos placas FTO para construir el capacitor con EI^-/I_3^- , para lo cual se siguió el mismo procedimiento de limpieza y aplicación del Platisol que el EBNP-V.

Una vez formada la estructura del capacitor con la metodología descrita en el EBNP-L, se realizó una disolución 1/20 del EI^-/I_3^- en agua destilada, la cual se inyectó en el capacitor. Ver Figura 12.



Construcción del capacitor con Electrolito Biodegradable Yoduro/Triyoduro ($\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$)

Para la construcción del capacitor con $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$ se utilizó la misma metodología descrita anteriormente. Sin embargo el electrolito utilizado en estos capacitores fue elaborado considerando el estudio de Chiba et al. (2006), por lo tanto se utilizó una concentración de 0,5M de NaI, 0,5M de piridina y 0,05M de I_2 en una solución de etanol para preparar 4 [ml] del $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$. Se tomó 50 [μL] de la preparación anterior y 1000 [μL] de agua destilada, formando una disolución de 1/20, la cual se inyectó en el capacitor. Ver Figura 13.



Caracterización de los electrolitos

Para determinar las propiedades eléctricas de los diferentes electrolitos se realizó la prueba de voltametría cíclica, carga y descarga y medidor de LCR. A continuación, se detallan cada una de estas.

Voltametría Cíclica

Para determinar la capacidad de reacción del electrolito se realizaron 4 barridos, en los que se estableció el rango de potencial eléctrico de 1 a -1 [V] la velocidad de barrido de 0,02 [V/s] para el primero, el segundo de 0,1 [V/s] y el tercero y cuarto de 0,5 [V/s] (Ver Anexo 1- Anexo 4), además, se implantó 4 ciclos para los 3 primeros barridos y 7 ciclos para el cuarto. Ver Figura 14.

PRUEBA DE VOLTAMETRÍA CÍCLICA

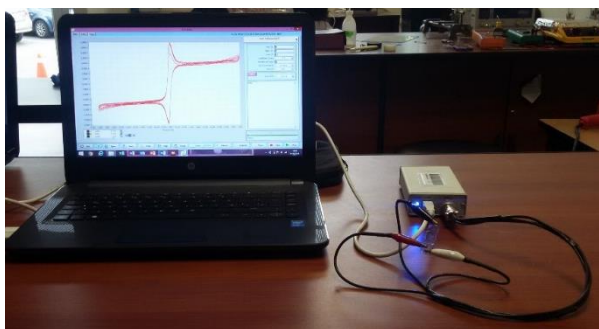


Figura 14. Prueba de voltametría cíclica para el EI^-/I_3^- .
Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Prueba de carga y descarga

Se utilizó un generador de funciones para realizar ciclos de carga y descarga con frecuencias de 100 y 1000 [Hz] y voltajes de 1, 2, 5, 8 y 10 [V], a fin de medir la capacitancia con la ayuda de un multímetro.

Para la segunda prueba de carga y descarga se adicionó al sistema anterior un osciloscopio y un circuito con su respectivo capacitor y se procedió a medir la carga y la descarga variando su voltaje de 100 en 100 [mV] hasta llegar a 1000 [mV], con una frecuencia de 1 [Hz] y las medidas fueron tomadas cada 50 [ms]. Con los datos obtenidos se logró determinar la capacitancia del electrolito en estudio aplicando la Ecuación 2 y Ecuación 3 de Kirchhoff.

PRUEBA DE CARGA Y DESCARGA

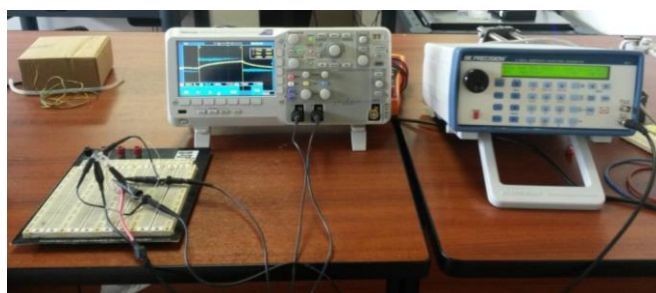
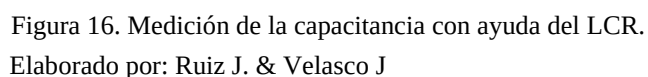


Figura 15. Prueba de carga y descarga con el generador de funciones, osciloscopio y el circuito con su respectivo capacitor.
Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

En esta prueba se procedió a medir la capacitancia de los capacitores antes contruidos a diferentes frecuencias de 100, 120, 1000, 10000 y 100000 [Hz] y un voltaje fijo de 1 [V].



Espectro de absorción del pigmento SQ₂

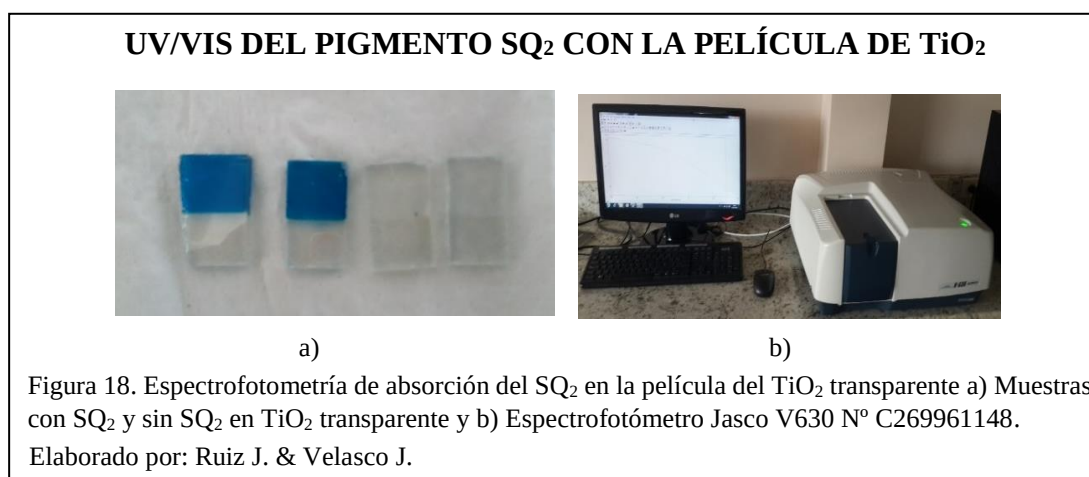
Para determinar la longitud de onda de la absorbancia máxima del pigmento SQ₂, se prepararon 9 disoluciones del pigmento a partir de una disolución patrón concentrada a 0,3 [mM] del SQ₂ en etanol (Ver Figura 17a). La medición del espectro de absorción se la realizó con la ayuda de un espectrofotómetro VARIAN 50 Bio UV-Visible, donde se realizó un barrido espectral entre 250 y 800 [nm] con un Factor de Disolución, FD=80. Ver Figura 17b.



Figura 17. Prueba UV/VIS del pigmento SQ₂. a) Diferentes disoluciones del pigmento SQ₂ en etanol a partir de 0,3 [mM] y b) Espectrofotómetro VARIAN 50 Bio UV-Visible.
Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Espectro de absorción del SQ₂ con la película de TiO₂ transparente

La medición del espectro de absorción se realizó con el espectrofotómetro Jasco V630 N° C269961148. Para lo cual se prepararon 2 muestras con la película de TiO₂ transparente y con SQ₂. El barrido espectral se lo hizo entre 250 y 800 [nm], se utilizó como blanco la pasta de TiO₂ transparente deposita en el FTO y como muestra el TiO₂ pigmentado con SQ₂ durante 21 horas.



Metodología para la construcción de una DSSC

Preparación del vidrio FTO

Para la construcción de las DSSC se utiliza una placa de vidrio recubierta por un lado de una capa de óxido transparente y conductor (TCO), la cual está compuesta con oxido de estaño dopado con flúor (FTO) (Solaronix, 2012, p. 8).

Se inicia cortando el vidrio de dimensiones 2x1 [cm²] de área, una vez obtenidas las medidas deseadas, se procede a realizar el protocolo de limpieza del FTO descrito en la sección anterior para la construcción de capacitores.

Deposición de la pasta por serigrafía

Siguiendo la metodología de (Calero, 2016, pp. 43–44), la deposición de la pasta se realizó a través del método de serigrafía, el cual consiste en la impresión de la

pastamediante una malla tensada en un marco de dimensiones de 25x30 [cm²], en su interior la malla posee contornos en forma cuadrangular de 5x5 [mm]. Ver Figura 19.



El estudio realizado por Calero (2016) determinó depositar tres capas debido a que presenta óptimos resultados en la eficiencia de las DSSC's, por consiguiente, se realizó la deposición de la pasta de TiO₂ nanoparticulado transparente (Ti-Nanoxide T/SP, Solaronix) acorde a este estudio. Previo a la deposición se realizó una limpieza de la malla con el diluyente para Screen Printing y metanol. Con la ayuda de un multímetro se identificó el lado conductor de la placa de vidrio, para luego colocarla bajo los contornos de la malla; se aplicó la pasta T/SP sobre los contornos y con una racleta a 45° ejerciendo presión se expandió uniformemente. Para conseguir la homogeneidad de la capa deposita se realizó un Spin Coating a 2000 [rpm] por 25 segundos, luego se procedió a secarla en la plancha térmica de laboratorio a 120°C por 7 minutos subiendo la temperatura en pasos de 50°C por minuto. Durante el secado el depósito debe estar cubierto para evitar fracturas en la capa depositada, se dejó enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente y se siguió el mismo proceso para el número de capas establecidas. Una vez depositada la última capa se realizó la sinterización a 450°C por 30 minutos, subiendo la temperatura en pasos de 50°C cada minuto, se bajó gradualmente la temperatura y se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Ver Figura 20.

DEPOSICIÓN DE LA PASTA

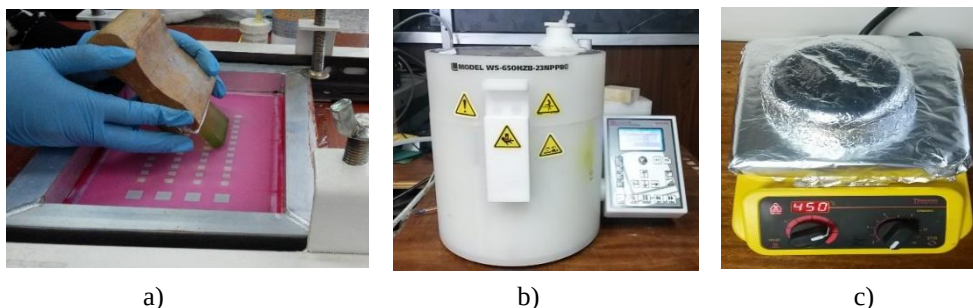


Figura 20. Proceso para la deposición de la pasta de TiO_2 nanopartícula transparente. a) Deposición de la pasta por serigrafía con ayuda de una racleta, b) Homogeneidad de la capa deposita con un Spin Coating a 2000 [rpm] por 25 segundos y c) Sinterización de la pata a 450°C por 30 minutos. Elaborado por: Ruiz J. y Velasco J.

Pigmentación del dióxido de titanio

Para pigmentar la pasta de dióxido de titanio sinterizado en el FTO, se disolvió el tinte en etanol, tomando una concentración de 0,3 [mM] del tinte SQ_2 de acuerdo al estudio realizado por (Geiger et al., 2009). Para mejorar el rendimiento del tinte SQ_2 en las DSSC's se adicionó Ácido Quenodesoxicólico diez veces la concentración del tinte, el cual modifica la superficie del óxido de titanio evitando su agregación (Solaronix, 2013, p. 2). Ver Anexo 5.

Se preparó el tinte de acuerdo a la cantidad de celdas a pigmentar, para evitar su degradación. Las placas de vidrio FTO con dióxido de titanio ya sinterizado, se las llevó a una temperatura de 60°C para luego colocarlos en recipientes plásticos (pastilleros) que contienen 1,5 [ml] del tinte SQ_2 , durante un tiempo de 21 horas para lograr una adecuada pigmentación del dióxido de titanio. Finalmente, transcurrido este tiempo, se enjuagaron con agua destilada y secaron a temperatura ambiente. Ver Figura 21.

PIGMENTACIÓN DEL DIÓXIDO DE TITANIO



a)



b)



c)

Figura 21. Pasos para la pigmentación del TiO_2 . a) FTO con dióxido de titanio ya sinterizado a 60°C , b) Colocar en el pigmento por 21 horas y c) TiO_2 pigmentado.

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Preparación de los electrolitos

Con la finalidad de mejorar la eficiencia de las DSSC's , al EI^-/I_3^- y $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$ se les adicionó grafeno de concentración 0,059 [g/L], de la cual se tomó una relación de 1: 10 de grafeno – electrolito, esto se realizó debido a que Brennan, Barwich, Satti, Faure, & Gun'ko (2013) menciona que la adición de grafeno en bajas concentraciones mejora la transferencia de carga y origina un aumento de la eficiencia de las celdas.

Para el caso de las variaciones del EBNP-L y EI^-/I_3^- , se prepararon las siguientes concentraciones. Ver Tabla 2.

Tabla 2.

Concentraciones aplicadas en las variaciones de electrolitos

Electrolitos		Concentraciones [%]					
EBNP-L	0	1	2	6	15	50	100
EI^-/I_3^-	100	99	98	94	85	50	0

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

A estas variaciones de concentración se le añadió una relación de 1:10 de grafeno–electrolito.

Preparación del contra- electrodo, inyección del electrolito y sellado de la celda

Para la construcción del contra electrodo se utilizó un FTO previamente lavado, a los cuales se les aplicó una capa de solución precursora de platino, Platisol, Solaronix

en la parte conductora. A continuación, se realizó la sinterización del Platisol con la ayuda de una placa calefactora de laboratorio, se colocó como aditamento una tapa oscura de vidrio termo resistente, se aumentó la temperatura en 50°C cada minuto para evitar gradientes térmicos fuertes hasta llegar a los 450°C donde se esperó 10 min. Posteriormente se apagó la placa calefactora sin retirar la tapa termo resistente para evitar choques térmicos y se dejó enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

Para la formación de la celda se procedió a unir el electrodo y el contra electrodo con una lámina de Meltonix de 60 micras de espesor, esta se colocó en el electrodo alrededor de la pasta de TiO_2 ya pigmentada, encima de esta se ubicó el contra electrodo y con ayuda de una plancha térmica a 130° C se ejerció presión sobre estos, por un tiempo de 45 segundos consiguiendo el sellado de la celda.

Una vez sellada la celda se procedió a inyectar el electrolito con ayuda de una jeringa que en su parte inferior contiene una ventosa, mediante la cual se succiona todo el aire contenido en el área efectiva de la celda, creando así un vacío que permite el ingreso del electrolito por el agujero que se encuentra en el contra-electrodo.

Finalizada la inyección se retiró el exceso de electrolito que quedó en el agujero con ayuda de un paper points, para que al momento del sellado el electrolito no ascienda por capilaridad. Para sellar el agujero por donde se inyectó el electrolito se utilizó Meltonix de 60 micras y un vidrio cubre objetos con dimensiones de 6 x 6 [mm], estos componentes se colocaron en el orden mencionado y con ayuda de un cautín a una temperatura de 100°C se selló. Ver Figura 22.

CELDA SOLARES SENSIBILIZADAS CON PIGMENTO SQ₂

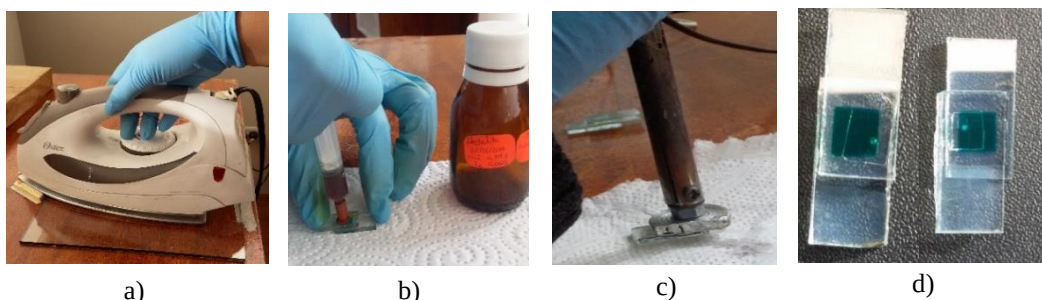


Figura 22. Proceso final para la construcción de una DSSC. a) Unión entre el electro y contra-electrodo, b) inyección del electrolito, c) sellado de la celda y d) DSSC con SQ₂.
Elaborado por: Ruiz J. y Velasco J.

Caracterización y medición de la eficiencia energética de una DSSC

Para caracterizar y evidenciar la eficiencia energética de las DSSC's ya construidas, mismas que se aprecian en el Anexo 6 y Anexo 7, se utilizó un simulador solar, el cual fue construido en la Escuela Politécnica Nacional basándose en las normas IEC 60904-9 y ASTM E927-10 edición 2, en las que el estándar mínimo correspondiente a un simulador equivale a una densidad de potencial de 1000 W/m^2 . Este simulador reproduce el espectro de la radiación solar, dando un espectro de banda similar a la luz natural del sol en Quito, permitiendo así trabajar en condiciones de laboratorio controlables y reproducibles (Calero, 2016, p. 58).

El simulador está compuesto de una luz halógena de 12 [V] y 55 [W], una lente biconvexa de 3,4 [cm] de radio, una lente menisco convexo de 4,4 [cm] de radio, una columna de agua de 5 [cm] de ancho que absorbe el exceso de la porción del espectro infrarrojo de la luz halógena, además de simular el efecto del vapor de agua presente en la atmosfera y un arreglo circular de luces LED's (12 azules, 4 moradas, 8 verde y 4 anaranjadas) enfocadas todas sobre un área de $2,5 \text{ [cm}^2\text{]}$. El área efectiva en la que se consigue caracterizar adecuadamente las DSSC's ensambladas es de $25 \text{ [mm}^2\text{]}$ (Calero, 2016, pp. 60–63). Ver Figura 23.

SIMULADOR SOLAR



Figura 23. Simulador Solar empleado para la caracterización de las DSSC's.
Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Para la medición de la curva corriente–voltaje, se conectó una fuente de voltaje variable (Keithley) a la celda solar, permitiendo medir el paso de la corriente a través de la celda con un voltaje dado, cuando esta se encuentra iluminada (Calero, 2016, p. 64). Mediante el programa GPIBACQUIRE.exe, se pudo manipular los intervalos de voltaje variables que dependiendo del electrolito con el que se construyó cada celda varió, logrando un máximo de 0,6 [V] con un incremento de 0,001 [V], realizando así cinco lecturas para cada celda. Los datos fueron analizados por el programa computacional Photovoltaic Cell Characterization, el cual generó la curva de corriente–voltaje y potencial–voltaje, además de los parámetros de rendimiento que son: corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), factor de llenado (FF), resistencia en serie (R_{series}) y resistencia en paralelo (R_{shunt}), y los parámetros de potencia que son: potencial máximo (P_{max}), voltaje (V_{mp}), intensidad (I_{mp}) y eficiencia (η). Ver Figura 24.

PARÁMETROS DE RENDIMIENTO FOTOVOLTAICO DE UNA DSSC

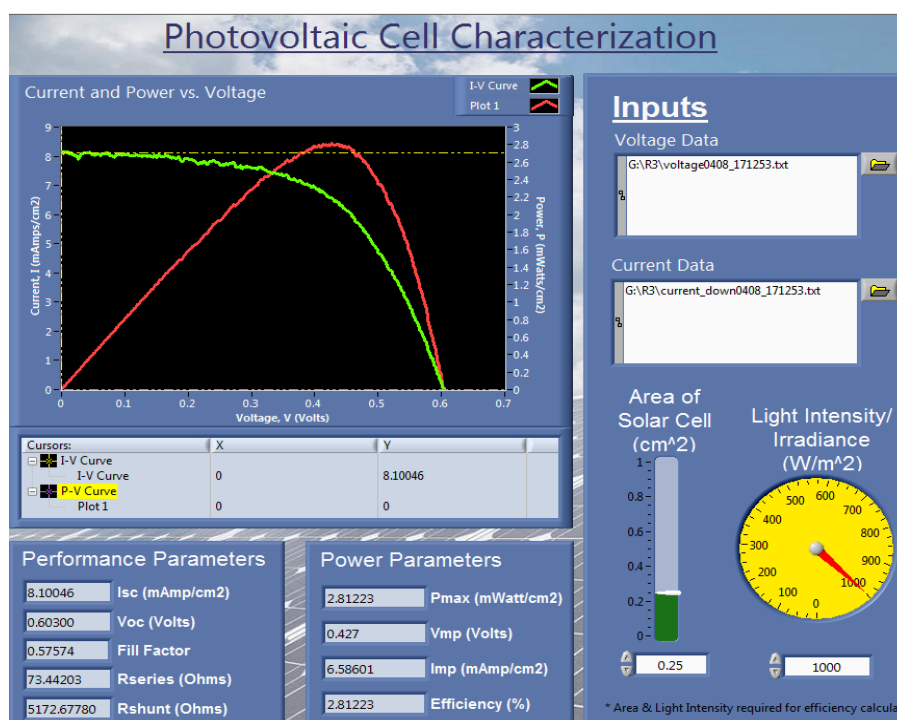


Figura 24. Graficas curva de corriente – voltaje y potencial – voltaje generados por el programa computacional para determinar los parámetros de rendimiento fotovoltaicos de las celdas.

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Diseño Experimental

Para ver la influencia que presentan los diferentes electrolitos en el desempeño de las DSSC's se aplicó un modelo unifactorial de efectos fijos, con 3 niveles y 3 réplicas. Ver Tabla 3.

Tabla 3.

Diseño experimental para la caracterización de las DSSC's.

Niveles	Código	Nº de Repeticiones	Variables
Electrolito Biodegradable no patentado	EBNP-L	3	Eficiencia (η) Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) Corriente de corto circuito (I_{sc}) Factor de llenado (FF)
Electrolito Biodegradable Etanol	EBI/ I_3^-	3	
Electrolito I^-/I_3^-	EI/ I_3^-	3	

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Del mismo modo se aplica el modelo unifactorial de efectos fijos para las variaciones de concentración de EBNP-L y EI^-/I_3^- , teniendo 7 niveles y 3 réplicas por cada uno. Ver Tabla 4.

Tabla 4.

Diseño experimental para la caracterización de las DSSC's con variaciones de concentración del EBNP-L y EI^-/I_3^- .

Niveles	Código	N° de Repeticiones	Variables
EBNP-L 0%+100% EI^-/I_3^-	0/100	3	Eficiencia (η) Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) Corriente de corto circuito (I_{sc}) Factor de llenado (FF)
EBNP-L 1%+99% EI^-/I_3^-	1/99	3	
EBNP-L 2%+98% EI^-/I_3^-	2/98	3	
EBNP-L 6%+94% EI^-/I_3^-	6/94	3	
EBNP-L 15%+85% EI^-/I_3^-	15/85	3	
EBNP-L 50%+50% EI^-/I_3^-	50/50	3	
EBNP-L 100%+0% EI^-/I_3^-	100/0	3	

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Variables

La variable independiente de este estudio es el electrolito y sus diferentes variaciones, las cuales son: Electrolito Biodegradable no Patentado Líquido (EBNP-L), Electrolito I^-/I_3^- (EI^-/I_3^-) y Electrolito Biodegradable I^-/I_3^- ($\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$).

En cuanto a las variables dependientes tenemos: Eficiencia (η) medido en [%], Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) medido en [V], Corriente de corto circuito (I_{sc}) medida en [mA/cm^2] y Factor de llenada (FF).

Consideraciones éticas

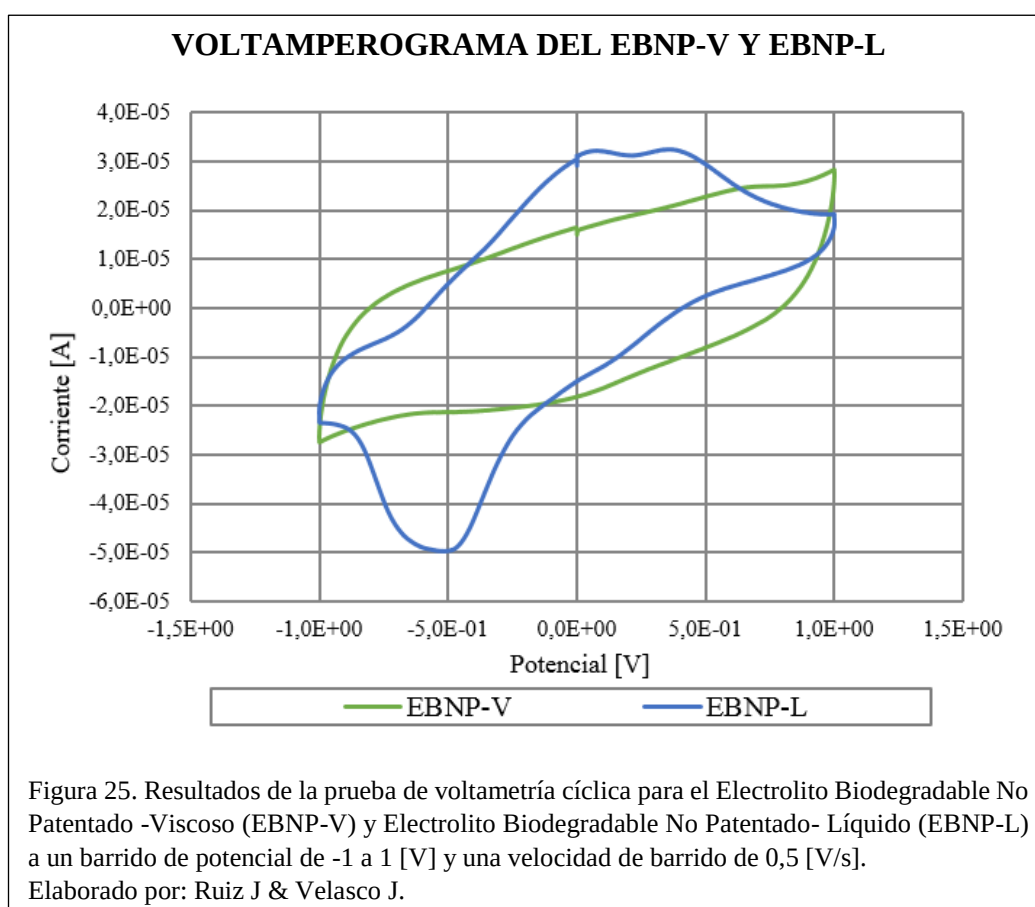
Se realizó la prueba de LCD Fisher con un nivel de confianza del 95%, para determinar que electrolitos influyen en los parámetros de rendimiento fotovoltaico de las DSSC's.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la caracterización de los diferentes electrolitos

Para determinar las propiedades eléctricas de los diferentes electrolitos se realizaron las pruebas de voltametría cíclica, carga y descarga y LCR. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de ellos.

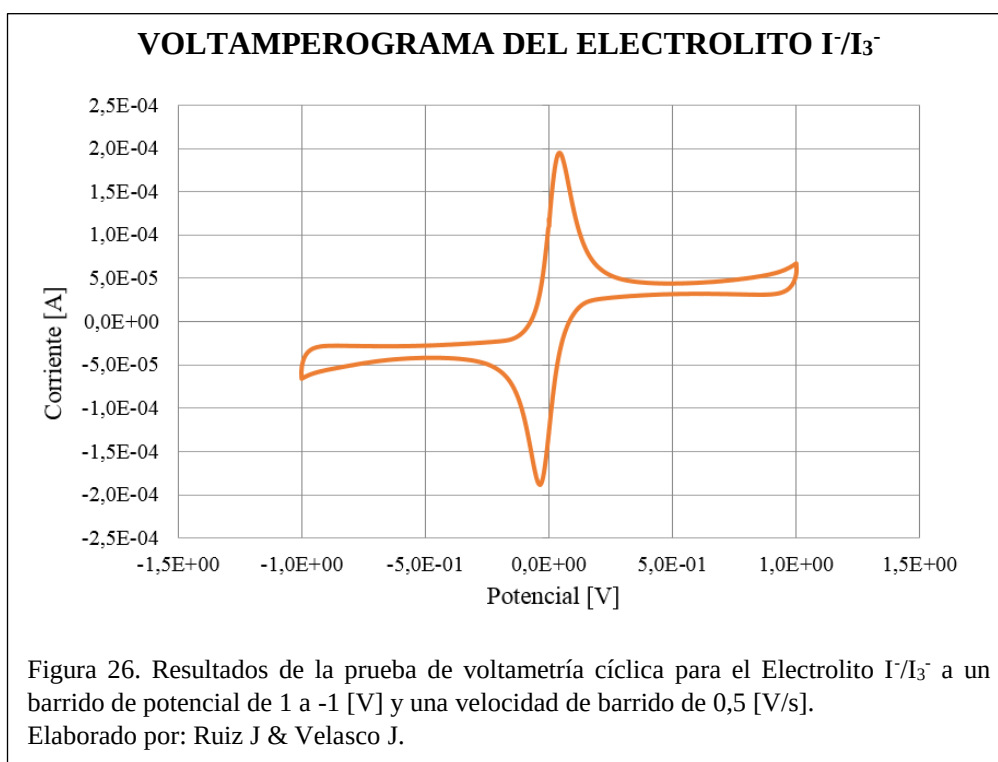
Resultados de voltametría cíclica



En la Figura 25 se muestran los voltamperogramas del EBNP-V y EBNP-L, en donde se observa que los dos electrolitos presentan un comportamiento pseudo capacitivo. Esto se puede afirmar ya que voltamperograma de forma rectangular perfecta corresponde a un material capacitivo ideal y en las gráficas obtenidas se tienen irregularidades respecto a la forma ideal. Según Vaquero (2015) la forma del

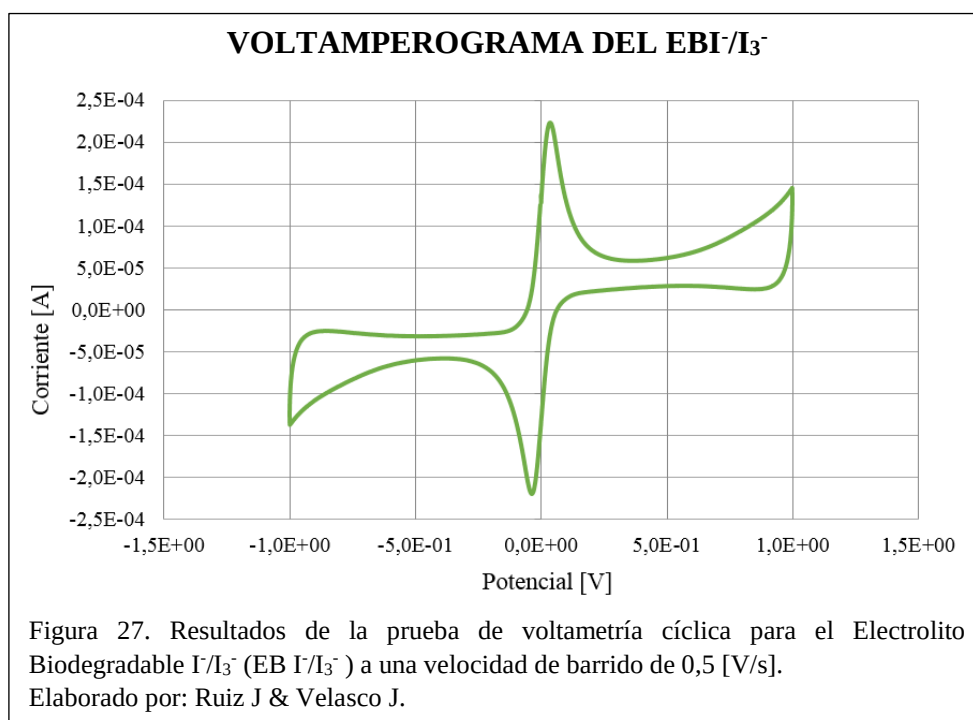
voltamperograma correspondiente al EBNP-V es un ejemplo típico de un material capacitivo en el cual el mecanismo de almacenamiento es puramente electrostático.

Esto fenómeno se muestra cuando el material dieléctrico (electrolito) contribuye a la forma de la doble capa eléctrica. Por otro lado, se observa que el EBNP-L presenta perturbaciones en forma de picos en las curvas de voltametría cíclica, esto podría darse debido a fenómenos de óxido-reducción dados por la descomposición del electrolito.



En la Figura 26 se presenta un voltamperograma del EI^-/I_3^- , en el cual se aprecia un proceso de óxido-reducción. Se determinó el potencial de pico anódico (E_{pa}) y el potencial de pico catódico (E_{pc}) cuyos valores son: 0,043 y -0,036 [V] respectivamente. Además, se presentan los valores de corriente de pico anódico (I_{pa}) y corriente de pico catódico (I_{pc}) de 1,947E-4 y -1,883E-4 [A] respectivamente. A partir de estos valores se obtuvo la ΔE_p de 0,078 [V] que de acuerdo a Aristov & Habekost (2015) corresponde a un proceso cuasi-reversible, debido a que la

correlación de ΔE_p y Λ es de 2,26 por lo que cumple con la condición de $10 > \Lambda > 10^{-2}$, haciéndole un sistema cuasi-reversible.



La Figura 27 corresponde al voltamperograma del EBI^-/I_3^- , el cual indica un comportamiento de óxido-reducción, teniendo un E_{pa} de $3,70E-02$ [V] y un E_{pc} de $-3,71E-02$ [V]. A partir de estos valores se obtiene la ΔE_p de $7,41E-02$ [V] que de acuerdo a Aristov & Habekost (2015) existe un proceso cuasi-reversible, debido a que la correlación de ΔE_p y Λ es de 2,26 cumpliendo con la condición de $10 > \Lambda > 10^{-2}$, donde se determina que el sistema es cuasi-reversible. Además, se determinó que el valor de I_{pa} y I_{pc} es de $2,24E-01$ y $-2,20E-01$ [A] respectivamente.

Resultado de la prueba de carga y descarga

Generador de funciones

La información obtenida en la prueba de carga y descarga con ayuda del generador de funciones se ve en la tabla 5.

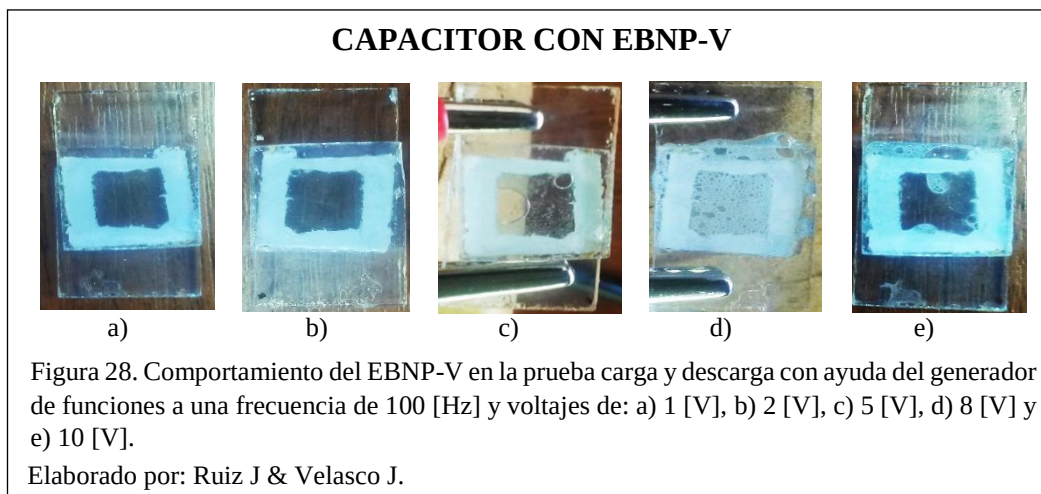
Tabla 5.

Prueba de carga y descarga con ayuda del generador de funciones para los electrolitos.

Frecuencia [Hz]	Voltaje [V]	Tiempo [min]	Capacitancia [μF]			
			EBNP-V	EBNP-L	EI^+/I_3^-	$\text{EBI}^+/\text{I}_3^-$
100	1	10	1,05	2,3	20,34	16,7
	2		1,12	0,70	25,25	10,7
	5		3,10	0,08	0,55	0,49
	8		1,40	0,28	0,25	0,90
	10		1,06	0,15	0,17	0,79
1000	1	10	0,8	3,10	22,83	10,01
	2		1,9	2,72	18,7	8,03
	5		2,1	0,71	0,27	0,44
	8		3,6	0,26	0,12	0,85
	10		2,1	0,18	0,08	0,76

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Ribeiro, Johnson, Crow, Arsoy, & Liu (2001) mencionan que la capacitancia es una constante del capacitor que depende únicamente de la superficie de las placas, la distancia entre las placas y la capacidad del material dieléctrico. Como se observa en la tabla 5 los valores de capacitancia para el EBNP-V y EBNP-L no son constantes y presentan un comportamiento anómalo, debido a que el material dieléctrico no tiene una estabilidad electroquímica y en su composición existe la presencia de agua, por lo que a voltajes superiores de 2 [V], existe la descomposición de esta, generando hidrólisis lo que se evidencia en las Figuras 28 y 29.



CAPACITOR CON EBNP-L

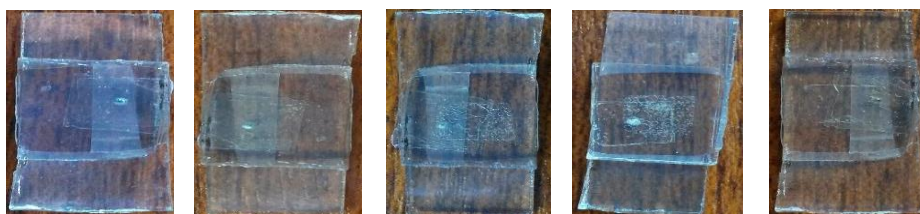


Figura 29. Comportamiento del EBNP-V en la prueba carga y descarga con ayuda del generador de funciones a una frecuencia de 100 [Hz] y voltajes de: a) 1 [V], b) 2 [V], c) 5 [V], d) 8 [V] y e) 10 [V].

Elaborado por: Ruiz J & Velasco J.

Para el caso del EI^-/I_3^- y $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$ los valores de capacitancia son mayores que de los capacitores formados por los anteriores electrolitos. Sin embargo, a pesar de presentar mayores valores de capacitancia, estos no son constantes. Esto se debe a que los electrolitos utilizados en estos capacitores fueron diluidos en agua destilada, porque a su concentración inicial presentaban alta conductividad, lo cual no permitía realizar su medición. Por otro lado, a voltajes superiores a los 2 [V] se observó la presencia de burbujas, lo cual supone un proceso de hidrólisis. Además, se evidenció que al aplicar 8 [V] el material dieléctrico se envejeció, tal como se aprecia en las Figuras 30 y 31.

CAPACITOR CON EI^-/I_3^-

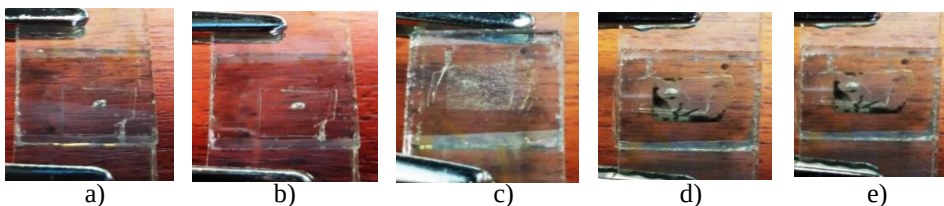


Figura 30. Comportamiento del EI^-/I_3^- en la prueba carga y descarga con ayuda del generador de funciones a una frecuencia de 100 [Hz] y voltajes de: a) 1 [V], b) 2 [V], c) 5 [V], d) 8 [V] y e) 10 [V].

Elaborado por: Ruiz J & Velasco J.

CAPACITOR CON $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$

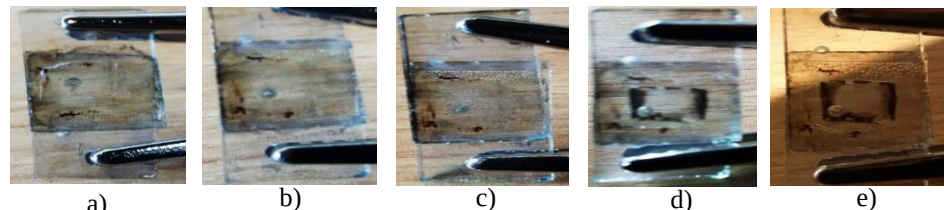
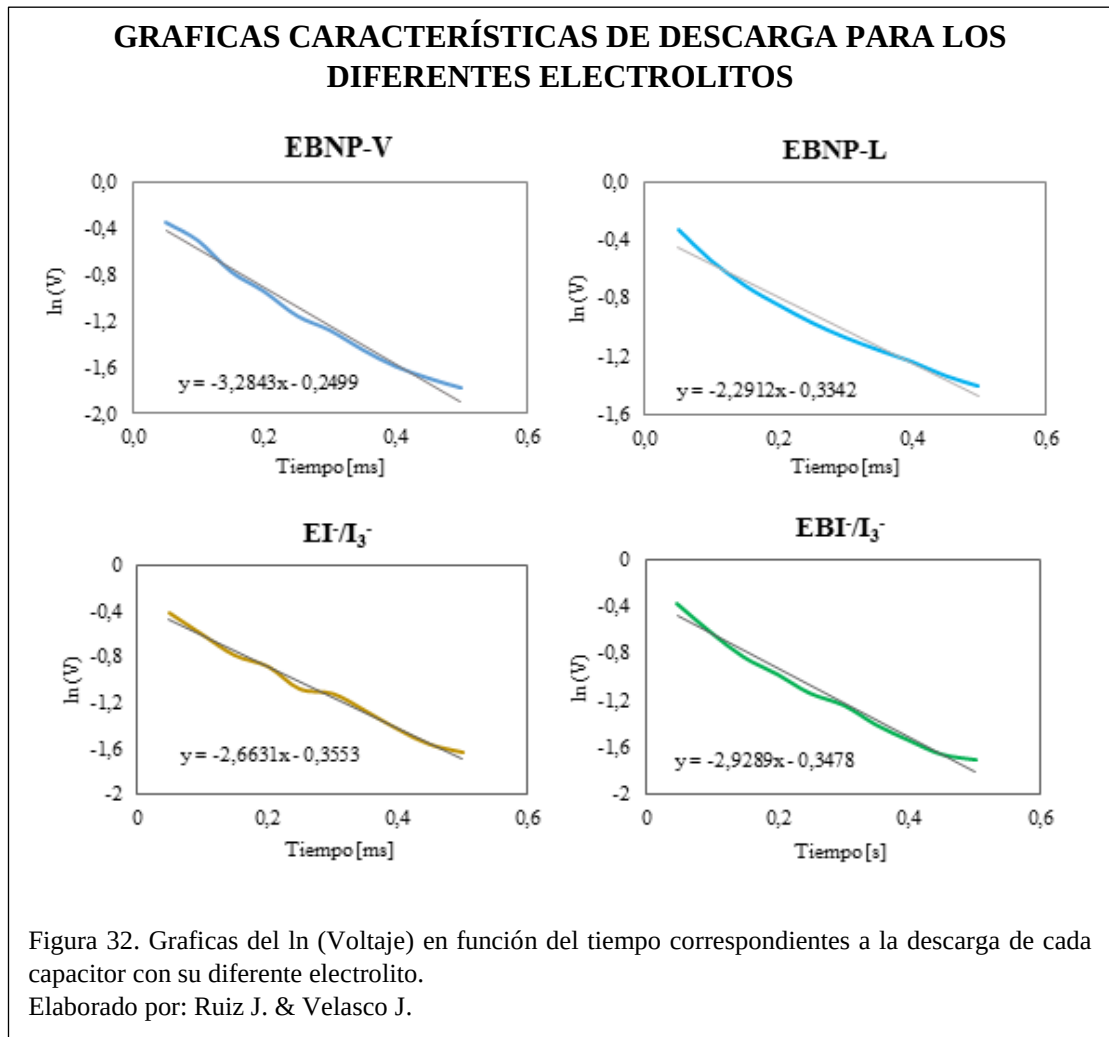


Figura 31. Comportamiento del $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$ en la prueba carga y descarga con ayuda del generador de funciones a una frecuencia de 100 [Hz] y voltajes de: a) 1 [V], b) 2 [V], c) 5 [V], d) 8 [V] y e) 10 [V].

Elaborado por: Ruiz J & Velasco J.

Resultados de la prueba de carga y descarga con ayuda del osciloscopio



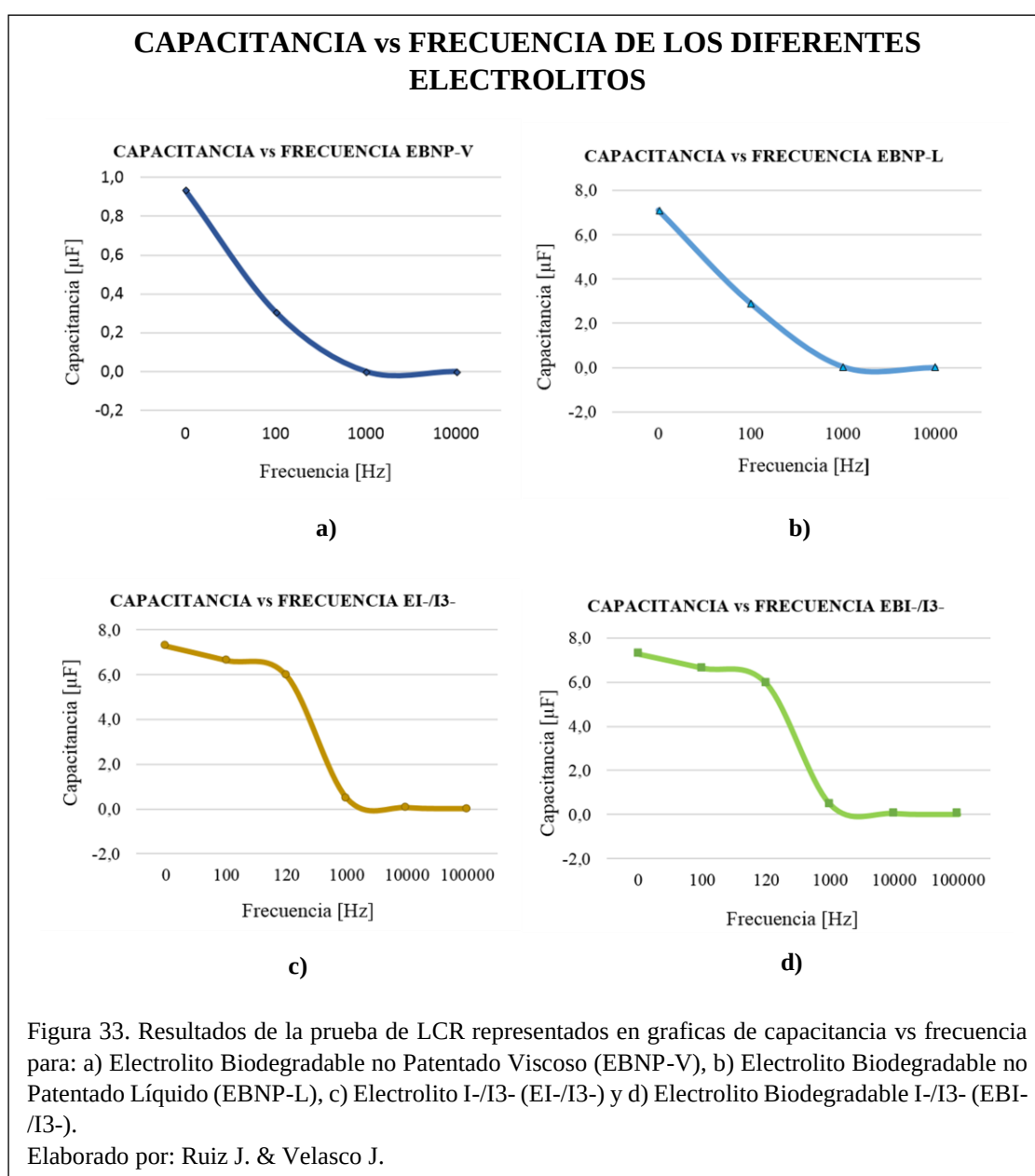
En la Figura 32 se muestran las curvas características correspondientes a la descarga de los capacitores construidos con diferentes electrolitos. No se presenta las curvas de la carga ya que se considera que el proceso de descarga es más estable. Las curvas se aproximan a un decaimiento exponencial, por lo que se realizó una linealización con un logaritmo natural ($\ln$). Una vez obtenida la ecuación de línea recta, se calcula el valor de capacitancia con la Ecuación 3, cuyos valores se indican en la tabla 6, estos datos fueron utilizados para analizarlos conjuntamente con la prueba de espectroscopia de impedancia.

Tabla 6.

Capacitancia en corriente directa y frecuencia 0 [Hz] para los diferentes electrolitos.

Electrolitos	Capacitancia [F]
EBNP-L	7,10E-06
EBNP-V	9,32E-06
EI/I ₃ ⁻	7,28E-06
EBI/I ₃ ⁻	7,08E-06

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

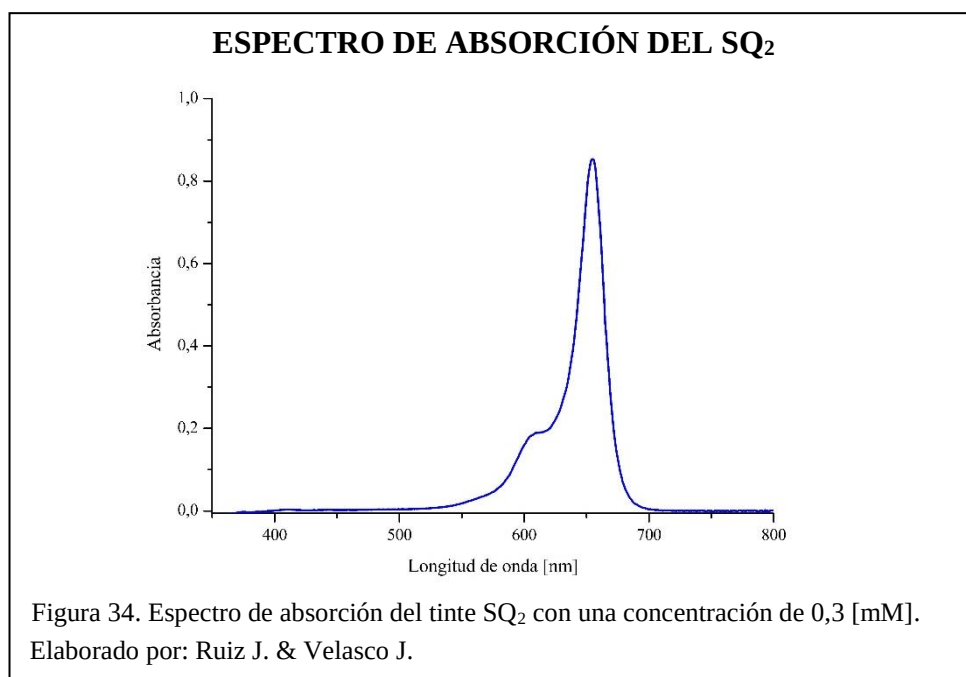


En la Figura 33 se muestran las gráficas de capacitancia vs. frecuencia para los diferentes electrolitos, donde las gráficas del EBNP-V y EBNP-L presentan similitud, sucede de igual manera para el EI^-/I_3^- y $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$. Como lo indica la Figura 33a la capacitancia respecto a la frecuencia decae considerablemente conforme aumenta la frecuencia, este mismo comportamiento se observa en la Figura 33b. Es importante mencionar que podría existir un pequeño valor de capacitancia a una frecuencia de 0 a 6 [Hz], sin embargo, no se pudo constatar este valor debido a que no se contó con el equipo necesario.

En las Figuras 33c y 33d se determinó que la capacitancia alcanza un valor máximo en el rango de baja frecuencia y se mantiene estable hasta una frecuencia de 120 [Hz], a medida que se incrementa la frecuencia la capacitancia disminuye hasta que a una frecuencia de 1000 [Hz] alcanza un valor mínimo, donde los capacitores se comportan más como una resistencia óhmica que como un condensador.

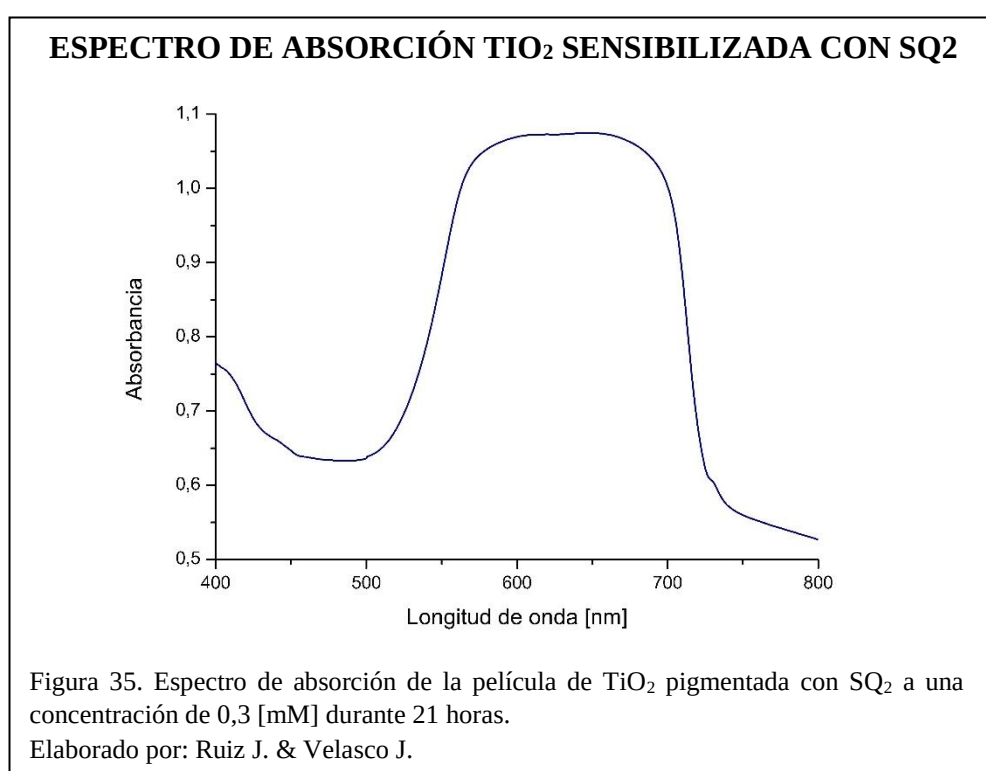
Resultados de la caracterización del pigmento SQ₂

Espectro de absorción del pigmento SQ₂



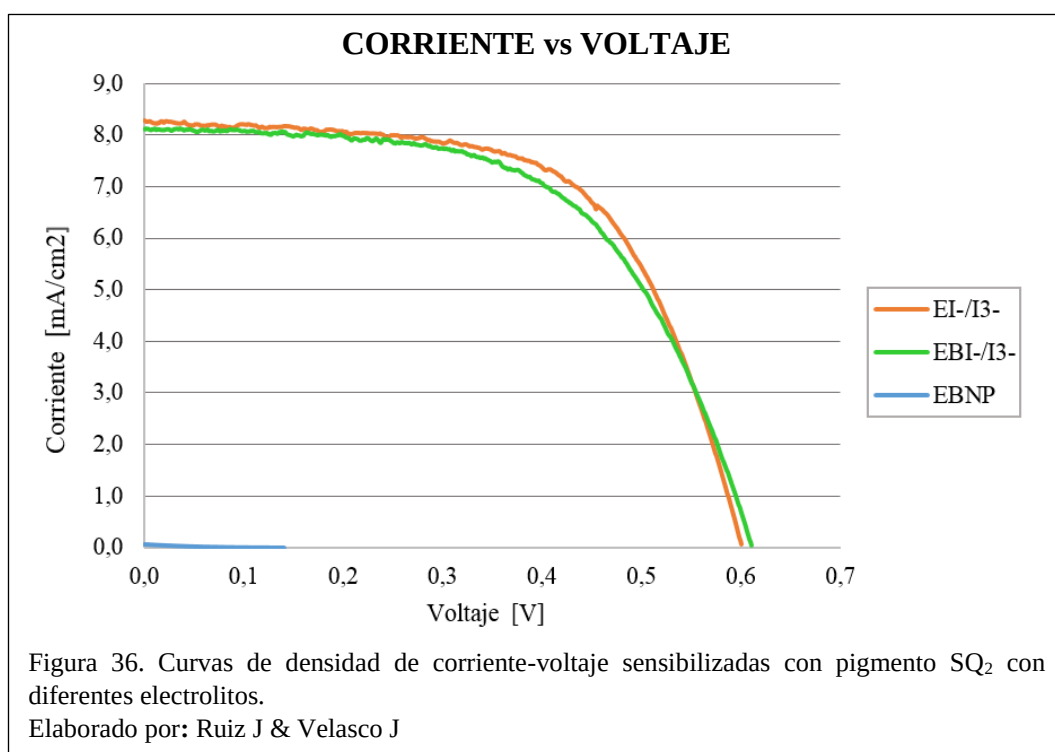
El espectro de absorción del pigmento SQ₂ en etanol se presenta en la Figura 34, donde se observa una absorción de la luz en el rango de longitud de onda de 500 a 700 [nm], indicando que el pico de absorción máxima se da a una longitud de onda de 655 [nm]. En comparación con los estudios realizados por Chang et al. (2013) y Lin et al. (2014) el espectro de absorción máxima del tinte SQ₂ se da a los 662 [nm], siendo este valor similar al obtenido en este estudio.

Espectro de absorción del pigmento SQ₂ con TiO₂



En la Figura 35 se puede observar la absorción de la película de TiO₂ transparente sensibilizada con SQ₂ por un tiempo de 21 horas, donde se presenta una absorción de la luz en el rango de longitud de onda entre 500 y 750 [nm]. Este rango de longitud de onda del SQ₂ en la película de TiO₂ permanece en el mismo rango de absorción que la del espectro de la solución del pigmento SQ₂ presentado anteriormente. Los rangos del espectro de absorción del SQ₂ en la película de TiO₂ obtenidos en el presente estudio son semejantes a los valores reportados por Lin et al. (2014).

Resultados del comportamiento de las DSSC's



En la Figura 36 se presenta las curvas características de corriente-voltaje para las DSSC's con SQ₂ y diferentes electrolitos. Se observa que el EI/I₃⁻ y EBI/I₃⁻ presentan voltajes idénticos de 0,6 [V]. En cuanto a la I_{sc} se puede apreciar que los valores para el EI/I₃⁻ y EBI/I₃⁻ son de 7,359 y 8,015 [mA/cm^2] respectivamente. Estos valores son similares a los reportados por Geiger et al. (2009), donde las características de V_{oc} y I_{sc} de las DSSC's basadas en SQ₂ son de 0,679 [V] y 8,87 [mA/cm^2]. Además, mediante la Figura 36 se comprobó que el uso de diferentes solventes para la formación del EI/I₃⁻ y EBI/I₃⁻ no alteran los parámetros de rendimiento antes mencionados.

Por otro lado, el EBNP-L presentó valores de V_{oc} y I_{sc} de 0,136 [V] y 0,068 [mA/cm^2] respectivamente, siendo valores menores a los obtenidos con los otros electrolitos. Además, este electrolito no presentó características adecuadas para ser utilizado en la construcción de las DSSC's, lo cual se ratificó mediante la prueba de voltametría cíclica, en donde se mostró que a pesar de tener propiedades capacitivas no dispone de propiedades de óxido-reducción.

Tabla 7.

Parámetros fotovoltaicos de las DSSC's con SQ₂ y diferentes electrolitos.

Electrolitos	Eficiencia [%]	Voltaje [V]	Isc [mA/cm ²]	FF
EBNP	0,001	0,136	0,068	0,133
EI/I₃⁻	2,782	0,600	7,359	0,630
EBI/I₃⁻	2,911	0,602	8,015	0,603

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

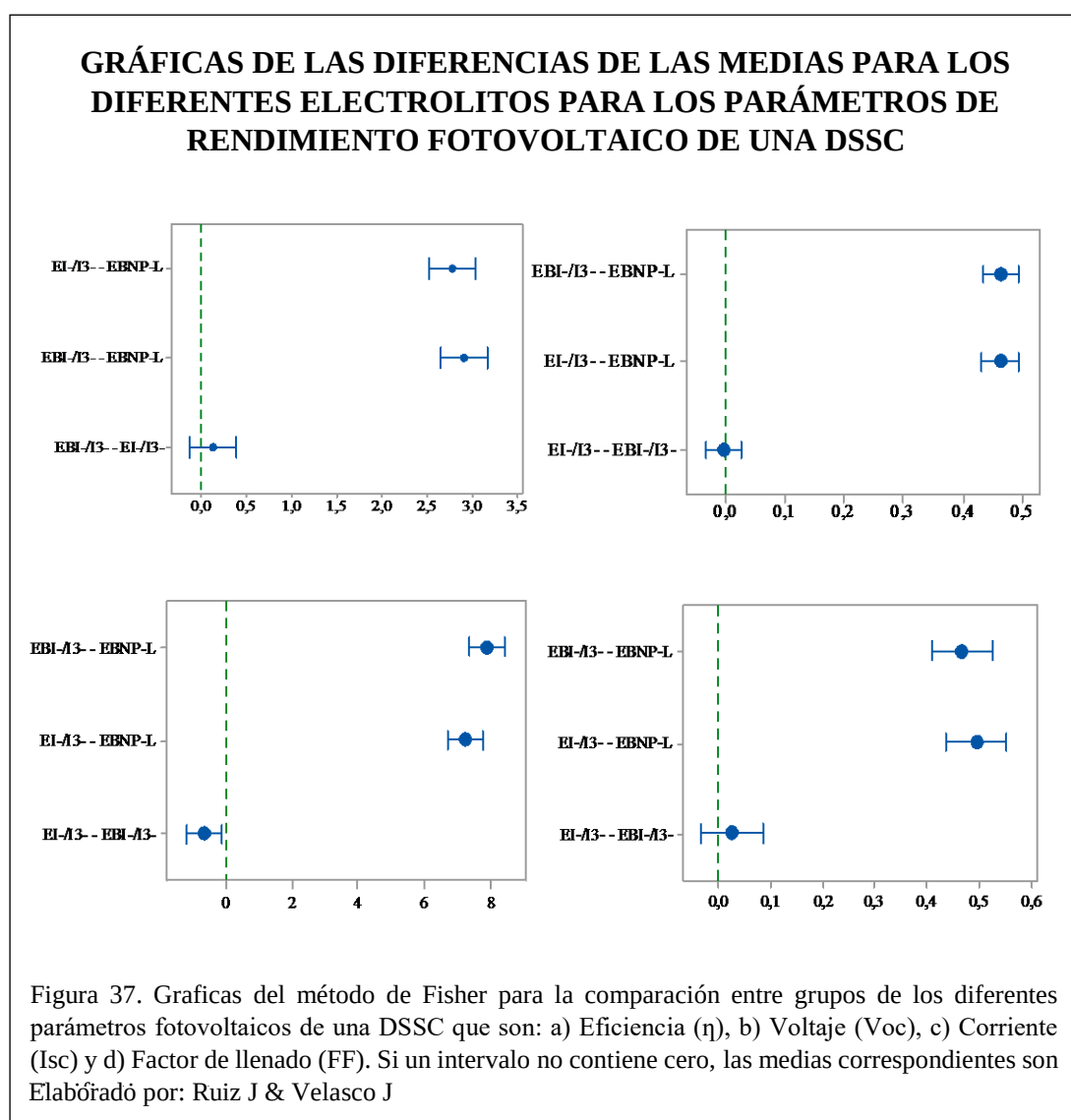
La Tabla 7 proporciona los parámetros de rendimiento de las DSSC's obtenidos a partir de su caracterización. Donde se obtuvo una η y FF de 2,782 [%] y 0,630 para el EI/I₃⁻ y 2,911[%] y 0,603 para el EBI/I₃⁻. Sin embargo, en el estudio realizado por Geiger et al. (2009) se tiene una mayor η en DSSC's con SQ₂ de 4,10 [%] y un FF de 0,70. Esto se debe a que utilizan un espesor de pasta de TiO₂ de 7 [μm], siendo este superior a los 6[μm] utilizados en este estudio. Por otro lado, el EBNP-L presenta una η de 0,001 [%] y un FF de 0,133, lo que demuestra que no tiene una respuesta fotovoltaica.

Se realizó el análisis estadístico de los resultados del comportamiento de las DSSC's con los diferentes electrolitos, cuya finalidad fue verificar la confiabilidad de los datos obtenidos, para la cual se utilizó la herramienta de análisis de datos STATGRAPHICS Centurion y Minitab 17.

Se realizaron un total de nueve repeticiones, teniendo tres ensayos por cada electrolito, los valores de cada uno de estos se observan en el Anexo 8. Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza ANOVA (Ver Anexo 9) con un nivel de significancia del 95%. En este análisis se determinó que los diferentes electrolitos presentan una diferencia estadísticamente significativa entre un nivel de electrolito y otro, debido a que el valor p es de 0,000, menor al nivel de significancia

establecido de 0,05, por lo que influyen en los parámetros de rendimiento fotovoltaicos (η , V_{oc} , I_{sc} y FF).

Sin embargo, para verificar que electrolitos intervienen en los parámetros de rendimiento fotovoltaicos se empleó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD Fisher) con un 95% de confianza, mismo que nos permite discriminar entre las medias de los parámetros de los electrolitos.



El LSD Fisher que se muestra en la Figura 37, nos indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los pares EI/I₃⁻ - EBNP-L y EBI/I₃⁻ - EBNP-L, ya que estos influyen directamente en los parámetros de rendimiento fotovoltaico.

Mientras que el par $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$ - EI^-/I_3^- no presenta diferencia estadísticamente significativa para la η , V_{oc} . y FF, puesto que sus tratamientos son estadísticamente iguales de acuerdo a sus medias. Al utilizar el $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$ y EI^-/I_3^- en la construcción de las DSSC's no existe una alteración en el rendimiento fotovoltaico.

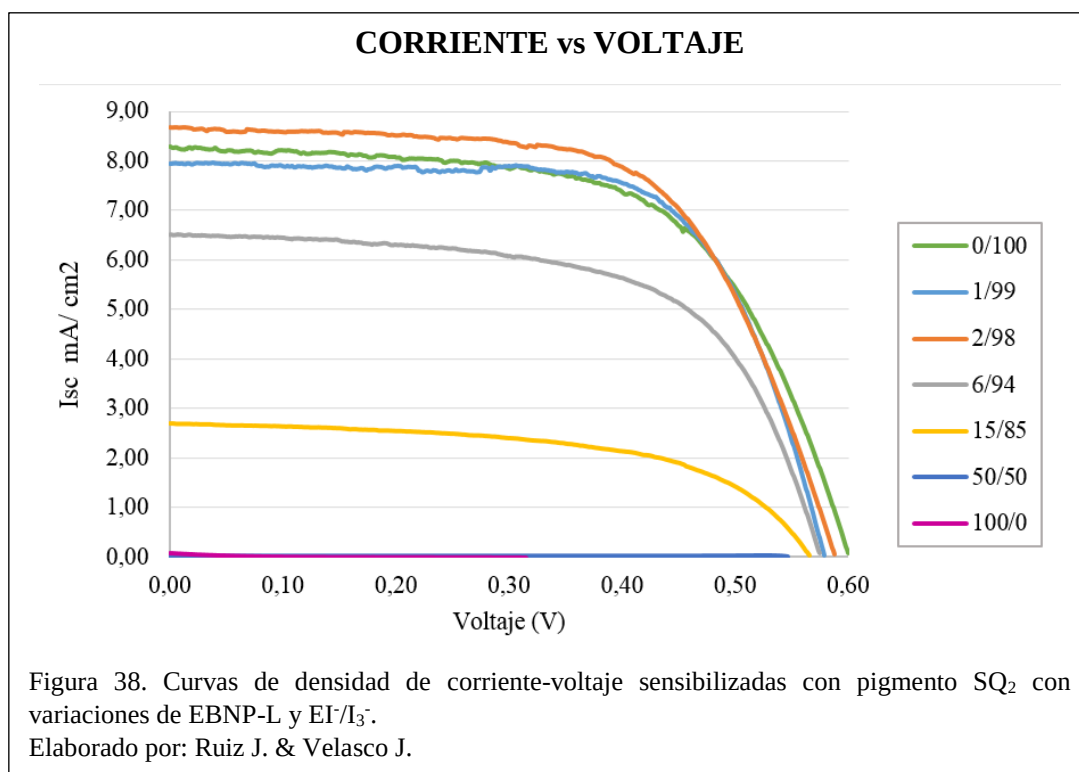
Resultados del comportamiento de las DSSC's con variaciones de EBNP y EI^-/I_3^-

Tabla 8.

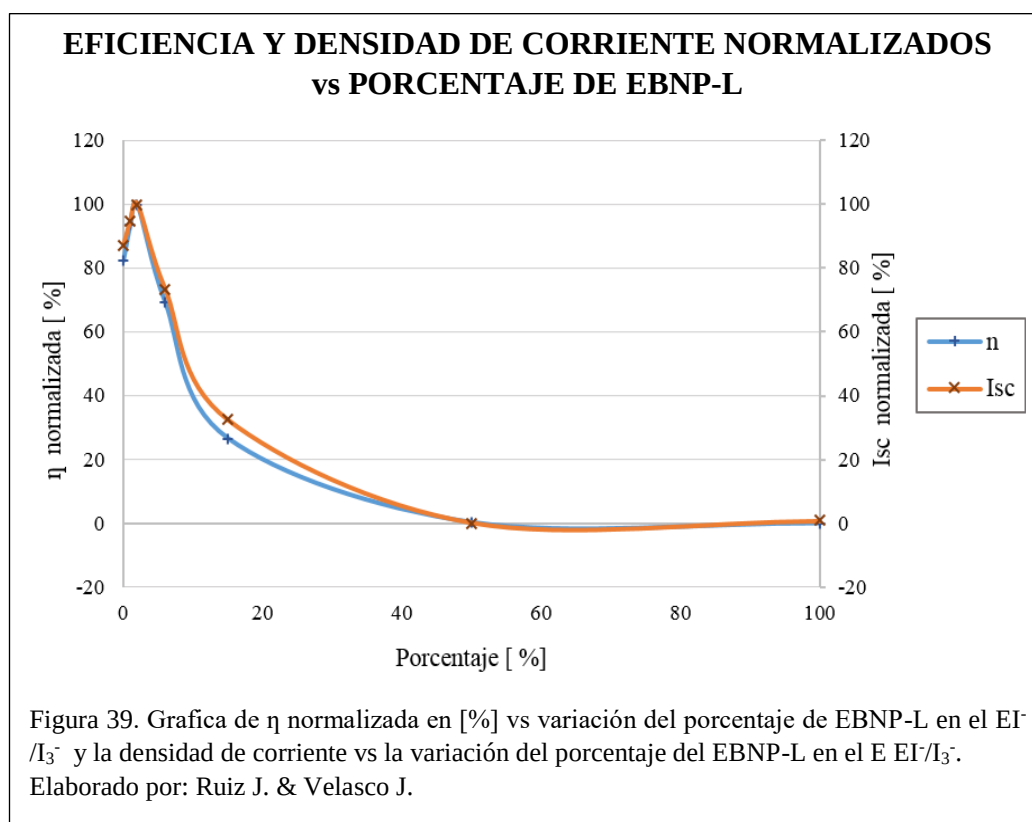
Parámetros fotovoltaicos de las DSSC's con SQ_2 y diferentes variaciones de electrolitos

EBNP/ EI^-/I_3^- [%]	η [%]	Voltaje [V]	Isc [mA/cm ²]	FF
0/100	2,782	0,600	7,359	0,630
1/99	3,162	0,587	8,012	0,675
2/98	3,381	0,583	8,462	0,653
6/94	2,345	0,584	6,210	0,648
15/85	0,902	0,576	2,747	0,567
50/50	0,010	0,405	0,020	1,253
100/0	0,001	0,136	0,068	0,133

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.



En la Figura 38 se observan las curvas de corriente vs voltaje para las diferentes variaciones de concentración entre el EBNP-L y EI^-/I_3^- . Los mayores valores para los parámetros de rendimiento de I_{sc} y V_{oc} se dan para la mezcla de 2/98 [%] y 1/99[%]. El menor valor corresponde a la mezcla de 50/50 [%], cuyos valores se observan en la tabla 8. Además, se presentan los valores de FF mismos que se mantienen en todas las condiciones de variación. Este efecto se debe a las propiedades capacitivas presentes en el EBNP-L.



En la Figura 39 se muestra cómo influye la variación de la concentración del EBNP-L y EI^-/I_3^- en la η y I_{sc} . Se observa que en porcentajes de concentraciones menores al 10 [%] existe un aumento aproximado del 20 [%] en η y I_{sc} , teniendo un mayor incremento al aplicar una concentración del 2/98 [%]. Mientras que en porcentajes mayores al 10 [%] la η y I_{sc} decaen considerablemente. Este comportamiento se debe a que el EBNP-L al ser un electrolito acuoso contribuye al incremento de la conductividad del EI^-/I_3^- . Sin embargo, se corroboró que a variaciones mayores al

10 [%] pierde esta propiedad, debido a que el EBNP-L contiene agua, por lo que no es útil para implementar en celdas solares.

Se realizó el análisis estadístico de los resultados del comportamiento de las DSSC's con variaciones de EBNP-L y Et^+/I_3^- , cuya finalidad fue verificar la confiabilidad de los datos obtenidos, para la cual se utilizó la herramienta de análisis de datos STATGRAPHICS Centurion y Minitab 17.

Se realizaron un total de veintiuno repeticiones, teniendo tres ensayos por cada electrolito, los valores de cada uno de estos se observan en el Anexo 10. Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) (Ver Anexo 11) con un nivel de significancia del 95%. En la tabla de ANOVA, el valor p es de 0,000 para los diferentes parámetros de rendimiento fotovoltaico de las DSSC's, lo cual indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre un nivel de variaciones del EBNP-L y Et^+/I_3^- en comparación con otros niveles. El valor p es menor al del nivel de significancia que se establece en 0,05 y esto indica que existe una afectación directa en los parámetros de rendimiento fotovoltaico con las diferentes variaciones.

Para determinar las medias que son significativamente diferentes de otras se realizó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD Fisher) con un 95% de confianza, mismo que nos permite discriminar entre las medias de los parámetros de las variaciones de electrolitos.

Además con los resultados obtenidos de las variaciones de concentraciones de EBNP-L y Et^+/I_3^- se realizó una gráfica de medias la cual se observa en el Anexo 12.

DIFERENCIA DE LAS MEDIAS DE LAS VARIACIONES DE EBNNP-L & EI/I_3^- PARA EFICIENCIA

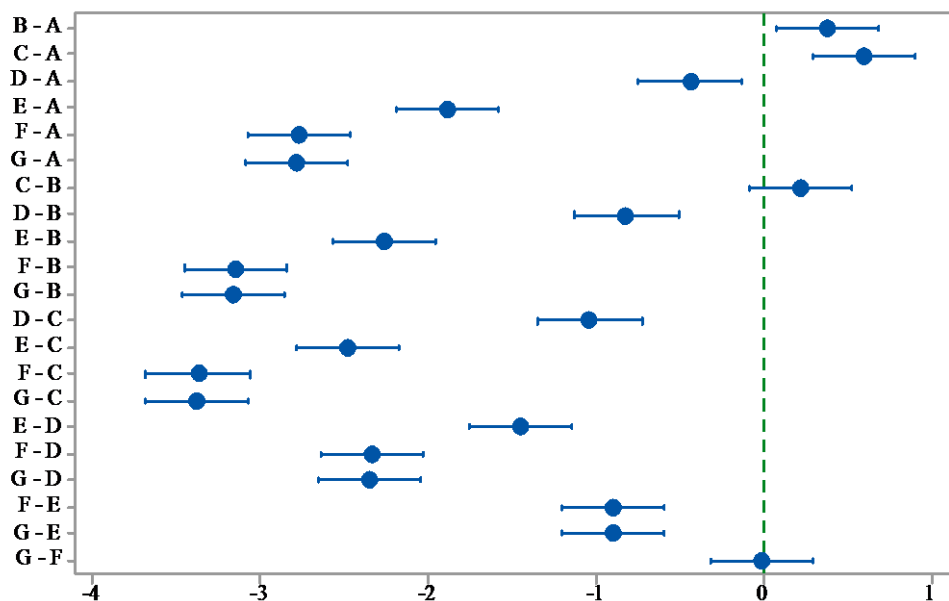


Figura 40. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para eficiencia (η).
Nota: A:0/100, B: 1/99, C:2/98, D: 6/94, E: 15/85, F: 50/50 G: 100/0. Si un intervalo no contiene
cero, las medias correspondientes presentan diferencias estadísticamente significativas.
Elaborado por: Ruiz J & Velasco J

En la Figura 40 se observa que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los pares C:2/98 - B:1/99 y G: 100/0 – F: 50/50, sin embargo, se han identificado 5 grupos homogéneos para los cuales existen diferencias estadísticamente significativas. Por lo tanto, las variaciones de electrolito B:1/99 y C:2/98 no interfieren en los valores de eficiencia de las DSSC's y el par G: 100/0 – F: 50/50 a pesar de que no influyen en la eficiencia de las DSSC's estos valores no se consideraron apropiados para el rendimiento común de una celda.

DIFERENCIA DE LAS MEDIAS DE LAS VARIACIONES DE EBNP-L & EI/I_3^- PARA VOLTAJE

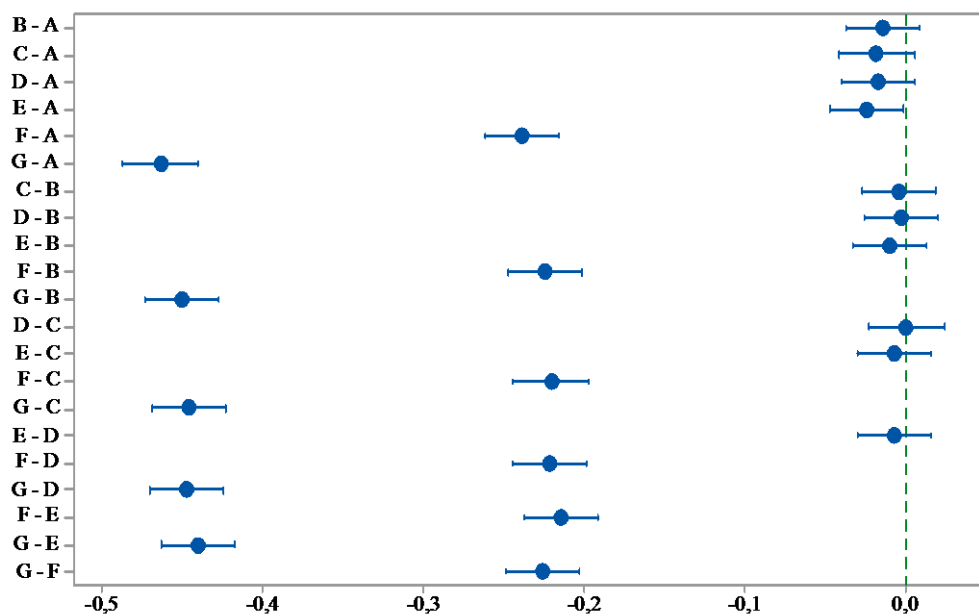


Figura 41. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para voltaje (Voc).

Nota: A:0/100, B: 1/99, C:2/98, D: 6/94, E: 15/85, F: 50/50 G: 100/0. Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes presentan diferencias estadísticamente significativas.

Elaborado por: Ruiz J & Velasco J

Como lo indica la Figura 41 las variaciones de EBNP-L y EI/I_3^- en su mayoría influyen en el voltaje de las DSSC's, sin embargo, existen varios grupos de las variaciones que no presentan una diferencia estadísticamente significativa. Los grupos A: 0/100, B: 1/99, C: 2/98 y D: 6/94 no interfieren en los resultados de voltaje de una DSSC's.

DIFERENCIA DE LAS MEDIAS DE LAS VARIACIONES DE EBNNP-L & EI/I_3^- PARA CORRIENTE

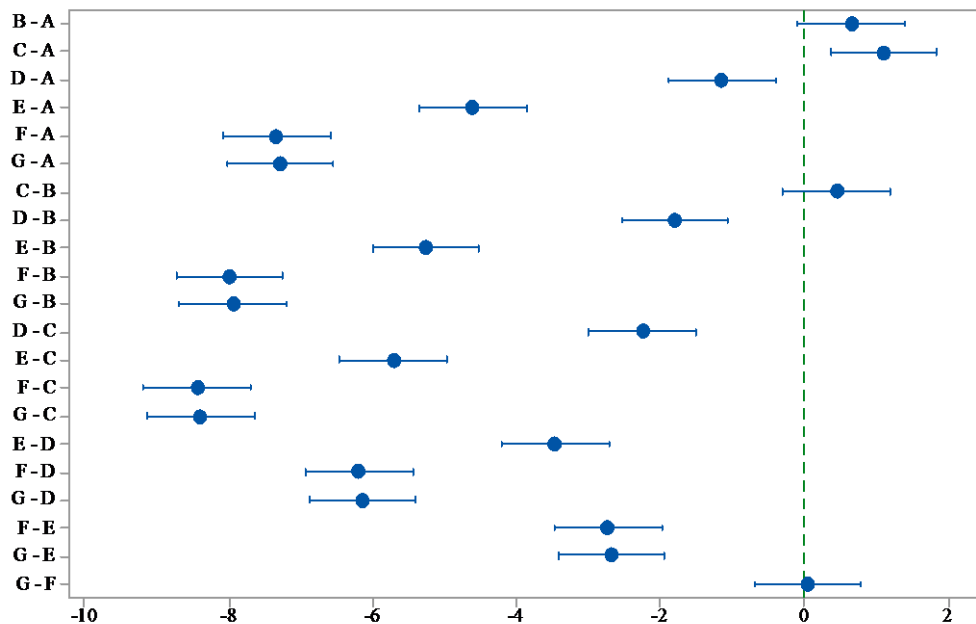


Figura 42. Graficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para corriente (I_{sc}).
Nota: A:0/100, B: 1/99, C:2/98, D: 6/94, E: 15/85, F: 50/50 G: 100/0. Si un intervalo no contiene
cero, las medias correspondientes presentan diferencias estadísticamente significativas.
Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Se aprecia en la Figura 42 que hay 18 pares que muestran diferencias estadísticamente significativas, mientras que los 5 grupos conformados por: A:0/100, B: 1/99, C:2/98, F: 50/50 y G: 100/0, no representan una diferencia estadísticamente significativa, por lo cual, las variaciones de electrolitos no influyen directamente en la corriente de las DSSC's.

DIFERENCIA DE LAS MEDIAS DE LAS VARIACIONES DE EBNNP-L & Et/I_3^- PARA FACTOR DE LLENADO

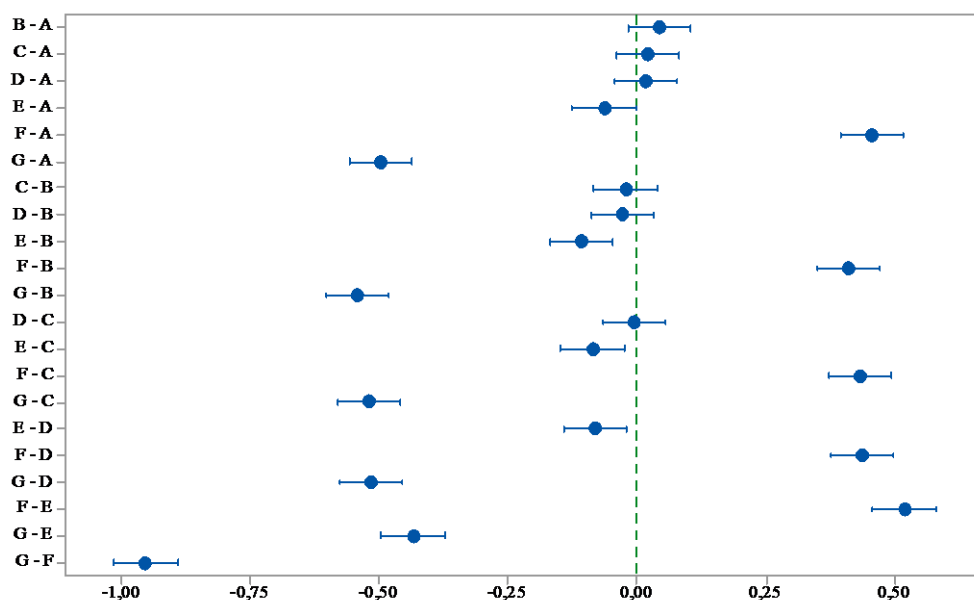


Figura 43. Gráficas del método de Fisher para la comparación entre grupos para el factor de llenado (FF).

Nota: A:0/100, B: 1/99, C:2/98, D: 6/94, E: 15/85, F: 50/50 G: 100/0. Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes presentan diferencias estadísticamente significativas.

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

En cuanto al parámetro de factor de llenado, el análisis de la Figura 43 indica que existe diferencia estadísticamente significativa en 15 pares de las variaciones de electrolitos, sin embargo, se han identificado 4 grupos homogéneos que no presentan diferencia estadísticamente significativa. Es decir, los grupos A:0/100, B: 1/99, C:2/98 y D: 6/94, no influyen en el factor de llenado de las DSSC's, ya que presentan valores similares al variar las concentraciones de electrolitos.

CONCLUSIONES

- Al utilizar el EBNP-L los parámetros de rendimiento fotovoltaico de las DSSC's con SQ₂ son cercanos a cero, lo que indica que este electrolito no es viable para este tipo de aplicaciones.
- Mediante la caracterización electroquímica con voltimetría cíclica, se determinó que el EBNP-V y EBNP-L tienen un comportamiento pseudo capacitivo y carecen de propiedades de óxido-reducción, por lo que no es posible que este regenere al pigmento.
- El comportamiento electroquímico del EI/I₃⁻ y EBI/I₃⁻ es cuasi reversible de acuerdo a los estándares establecidos por Nicholson, por lo que se puede construir DSSC's utilizando este tipo de electrolitos.
- La prueba de carga y descarga determinó que la capacitancia de los capacitores contruidos con EBNP-V y EBNP-L por su inestabilidad electroquímica no presentan valores constantes, mientras que la capacitancia del EI/I₃⁻ y EBI/I₃⁻ es mayor en comparación con los anteriores.
- En la prueba de carga y descarga se presentó un envejecimiento del electrolito al aplicar voltajes superiores a los 2 [V].
- En la caracterización de las DSSC's con SQ₂ se determinó un pequeño incremento en el rendimiento al utilizar el EBI/I₃⁻.
- Los parámetros de rendimiento fotovoltaicos (η , I_{sc}, V_{oc} y FF) de las DSSC's con el EI/I₃⁻ y EBI/I₃⁻ no se ven afectados al utilizar diferentes solventes con el mismo par redox.

- Mediante la prueba LSD de Fisher El EBNP-L se determinó que los parámetros de η , I_{sc} , V y FF de las DSSC's utilizando EBNP-L presenta una diferencia estadísticamente significativa, lo cual indica que influye directamente en los mismos, por otro lado, el EI/I_3^- y EBI/I_3^- presentan valores semejantes por lo que no tiene una afectación estadísticamente significativa.
- A una concentración de 2/98 [%] de las variaciones entre el EBNP-L y EI/I_3^- se obtuvo la mayor eficiencia de 3,38 [%] en comparación con las demás variaciones utilizadas.
- El procedimiento estadístico LSD de Fisher indicó que las variaciones de: 0/100, 1/99, 2/99 y 6/94 [%] no influyen en los parámetros de V_{oc} y FF de una DSSC.
- En el parámetro de I_{sc} las variaciones 0/100, 1/99, 2/99, 6/94, 50/50 y 100/0 [%] no presentan variaciones significativas, lo cual se comprobó mediante la prueba LSD de Fisher.

RECOMENDACIONES

- Profundizar la investigación del electrolito biodegradable viscoso, para mejorar sus propiedades electroquímicas de óxido - reducción e implementarlo en las DSSC's.
- Buscar una alternativa al ensamblaje e inyección del electrolito en las DSSC's para mejorar su eficiencia.
- Elaborar electrolitos con solventes biodegradables que tenga fácil extracción y bajo costo.
- Estudiar los componentes de las DSSC's con la finalidad de mejorarlas e incrementar su rendimiento fotovoltaico.

REFERENCIAS

- Abdel-Latif, M. S., Abuiriban, M. B., El-Agez, T. M., & Taya, S. A. (2015). Dye-sensitized solar cells using dyes extracted from flowers, leaves, parks, and roots of three trees. *International Journal of Renewable Energy Research*, 5(1), 294–298.
- Al-Alwani, M. A. M., Mohamad, A. B., Ludin, N. A., Kadhum, A. A. H., & Sopian, K. (2016). Dye-sensitised solar cells: Development, structure, operation principles, electron kinetics, characterisation, synthesis materials and natural photosensitisers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 183–213. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.045>
- Arévalo, E., Espinoza, F., & Jaramillo, J. L. (2013). Una metodología básica para la construcción de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) tipo Grätzel. Retrieved from <http://www.utpl.edu.ec/jorgeluisjaramillo/?p=1295>
- Aristov, N., & Habekost, A. (2015). Cyclic Voltammetry - A Versatile Electrochemical Method Investigating Electron Transfer Processes. *World Journal of Chemical Education*, 3(5), 115–119. <http://doi.org/10.12691/wjce-3-5-2>
- Brennan, L. J., Barwich, S. T., Satti, A., Faure, A., & Gun'ko, Y. K. (2013). Graphene–ionic liquid electrolytes for dye sensitised solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(29), 8379. <http://doi.org/10.1039/c3ta11609c>
- Calero Armas, M. C. (2016). *Contrucción y caracterización de celdas solares sensibilizadas por pigmentos naturales extraídos de plantas existentes en el Ecuador y determinación de la eficiencia de conversión energética*. Escuela Politécnica Nacional. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15320/1/CD-7036.pdf>
- Carbó, P., & Rocha, E. (2012, December). Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural. *Investigación Y Ciencia de La Universidad de Aguascalientes*, 56, 3–10. Retrieved from http://www.uaa.mx/investigacion/revista/Hemeroteca/REVISTA_56.pdf
- Cerda, M. F., & Enciso, P. (2014, October). Caracterización de las antocianinas de la flor de ceibo como sensibilizadores naturales para su uso en celdas fotovoltaicas. *Revista Del Laboratorio Tecnológico de Uruguay*, 9, 91–97. Retrieved from <http://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC/article/view/253>
- Chang, J., Lee, C.-P., Kumar, D., Chen, P.-W., Lin, L.-Y., Thomas, K. R. J., & Ho, K.-C. (2013). Co-sensitization promoted light harvesting for organic dye-sensitized solar cells using unsymmetrical squaraine dye and novel pyrenoimidazole-based dye. *Journal of Power Sources*, 240, 779–785. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.075>
- Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., & Han, L. (2006). Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1%. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(No. 25), L638–L640. <http://doi.org/10.1143/JJAP.45.L638>

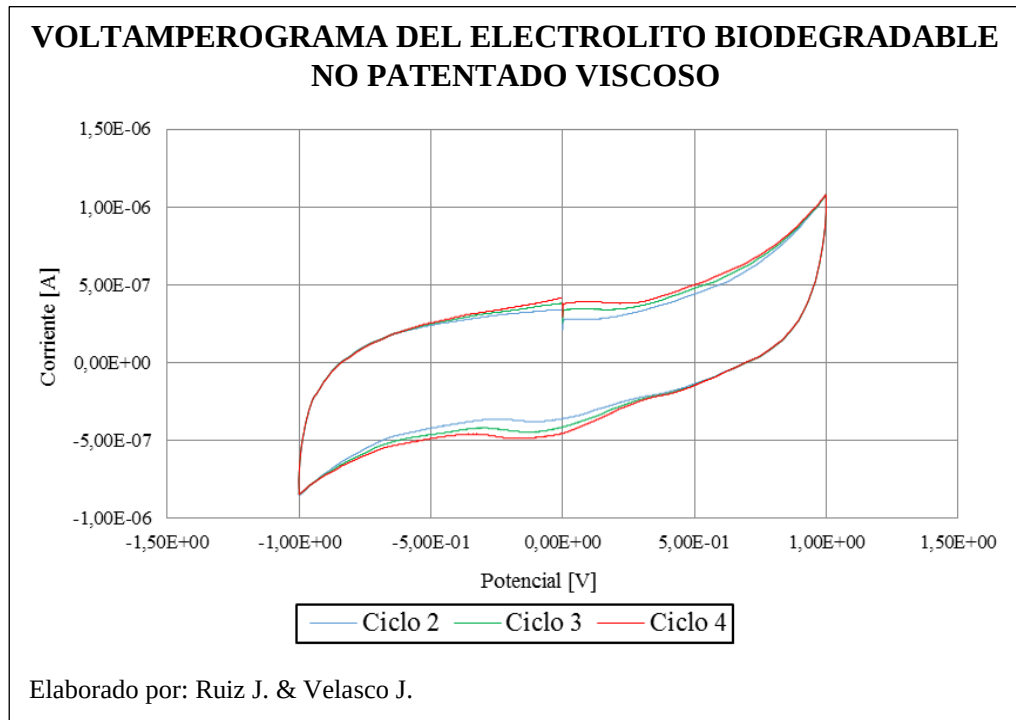
- Clifford, J. N., Martínez-Ferrero, E., & Palomares, E. (2012). Dye mediated charge recombination dynamics in nanocrystalline TiO₂ dye sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 22(25), 12415. <http://doi.org/10.1039/c2jm16107a>
- Cong, J., Yang, X., Kloo, L., & Sun, L. (2012). Iodine/iodide-free redox shuttles for liquid electrolyte-based dye-sensitized solar cells. *Energy & Environmental Science*, 5(11), 9180. <http://doi.org/10.1039/c2ee22095d>
- Duval Lara, J. (2010). *Tesis*. Instituto Politécnico Nacional.
- Estévez Hernández, O. L. (2007). *Furoiltioureas: Naturaleza de sus complejos con CdCl₂ Y HgCl₂ y su utilización en sensores electroquímicos*. Universidad de Cádiz.
- Gallego, H. A., & Cortés, C. A. (2008, June). Carga y descarga de un condensador utilizando PIC16F877. *Scientia et Technica*, (38), 25–30. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903805>
- Geiger, T., Kuster, S., Yum, J.-H., Moon, S.-J., Nazeeruddin, M. K., Grätzel, M., & Nüesch, F. (2009). Molecular Design of Unsymmetrical Squaraine Dyes for High Efficiency Conversion of Low Energy Photons into Electrons Using TiO₂ Nanocrystalline Films. *Advanced Functional Materials*, 19(17), 2720–2727. <http://doi.org/10.1002/adfm.200900231>
- Hallyday, D., Resnick, R., & S. Krane, K. (1999). *Física* (CONTINENTA, Vol. 2). México.
- Kissinger, P. T., & Heineman, W. R. (1983). Cyclic voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 60(9), 702–706. <http://doi.org/10.1021/ed060p702>
- Kofman, H. A., Lucero, P., & Culzoni, C. (2009). Experimentos remotos de circuitos eléctricos con fenómenos transitorios. *IE Comunicaciones (Internet)*, (9), 3–9. Retrieved from <http://161.67.140.29/iecom/index.php/IECom/article/download/13/8>
- Kusumawati, Y. (2015). *Oxide and composite electron transport layers for efficient dye-sensitized solar cells* Université Pierre et Marie Curie Insitut Teknologi Bandung. Université Pierre etMarie Curie. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01232187/document>
- Lin, L.-Y., Yeh, M.-H., Lee, C.-P., Chang, J., Baheti, A., Vittal, R., ... Ho, K.-C. (2014). Insights into the co-sensitizer adsorption kinetics for complementary organic dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources*, 247(February), 906–914. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.127>
- Narayan, M. R. (2011). Review: Dye sensitized solar cells based on natural photosensitizers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 208–215. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.148>
- O'Regan, B., & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353(6346), 737–740. <http://doi.org/10.1038/353737a0>
- Ribeiro, P. F., Johnson, B. K., Crow, M. L., Arsoy, A., & Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*,

89(12), 1744–1756. <http://doi.org/10.1109/5.975900>

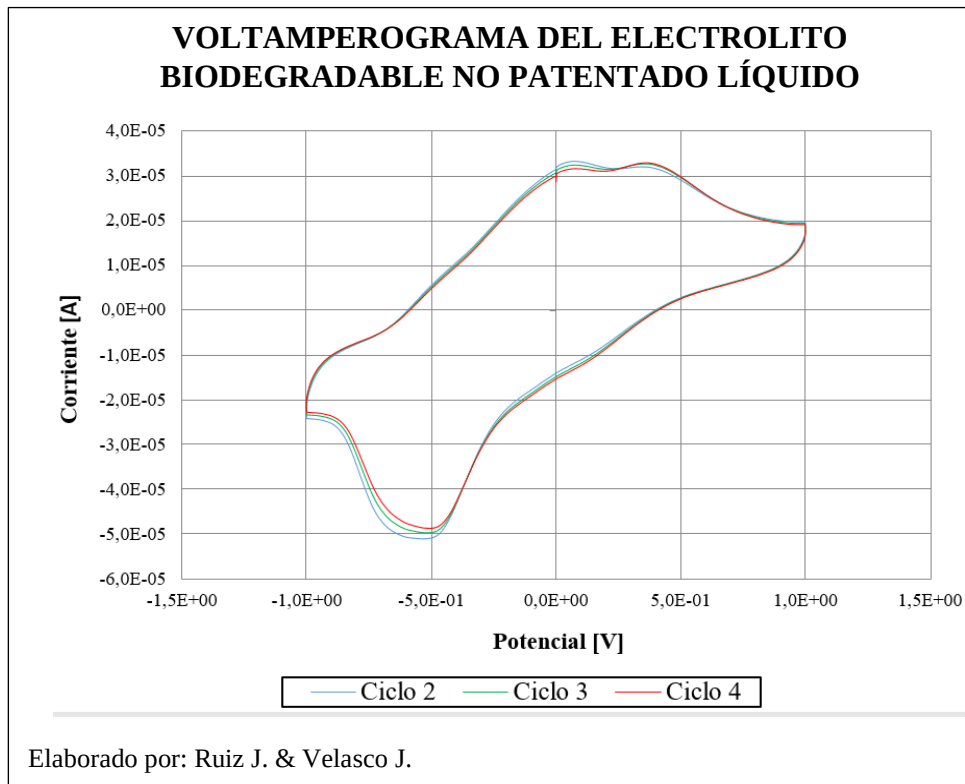
- Sengupta, D., Das, P., Mondal, B., & Mukherjee, K. (2016). Effects of doping, morphology and film-thickness of photo-anode materials for dye sensitized solar cell application – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 356–376. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.104>
- Shalini, S., Balasundara prabhu, R., Prasanna, S., Mallick, T. K., & Senthilarasu, S. (2015). Review on natural dye sensitized solar cells: Operation, materials and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1306–1325. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.052>
- Solaronix. (2012). The assembly guide for making your own solar cells.
- Solaronix. (2013). Chenodeoxycholic Acid, 1–3.
- Stathatos, E. (2011). Dye Sensitized Solar Cells as an Alternative Approach to the Conventional Photovoltaic Technology Based on Silicon - Recent Developments in the Field and Large Scale Applications. In *Solar Cells - Dye-Sensitized Devices* (pp. 471–492). Greece: InTech. <http://doi.org/10.5772/23650>
- Torres, C. (2014). Celdas solares orgánicas : energía alternativa ecológica. *Universidad de Los Andes*, 7–9.
- Vaquero, S. (2015). *Diseño y Caracterización de Supercondensadores de Alta Energía Basados en Materiales Carbonosos*. Universidad Autónoma de Madrid. Retrieved from <https://repositorio.uam.es/handle/10486/666387>
- Vázquez, J. L. (2007). *Empleo de la técnica de espectroscopía de impedancias electroquímicas para la caracterización de biomateriales. Aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/12346>
- Wang, J. (2001). *Analytical Electrochemistry. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 2).
- Wang, M., Grätzel, C., Zakeeruddin, S. M., & Grätzel, M. (2012). Recent developments in redox electrolytes for dye-sensitized solar cells. *Energy & Environmental Science*, 5(11), 9394. <http://doi.org/10.1039/c2ee23081j>
- Yu, Z. (2012). *Liquid Redox Electrolytes for Dye-Sensitized Solar Cells*. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm. Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:483008&dswid=2162>

ANEXOS

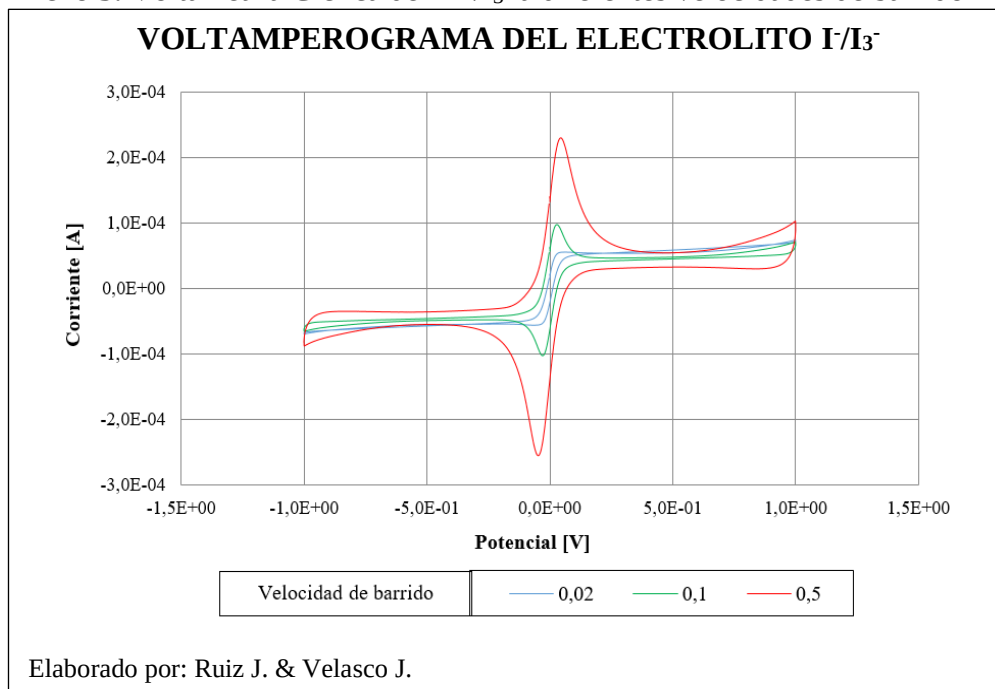
Anexo 1. Voltamperograma del EBNP-V a un barrido de potencial de 1 a -1 y una velocidad de barrido de 0,5 [V/s]



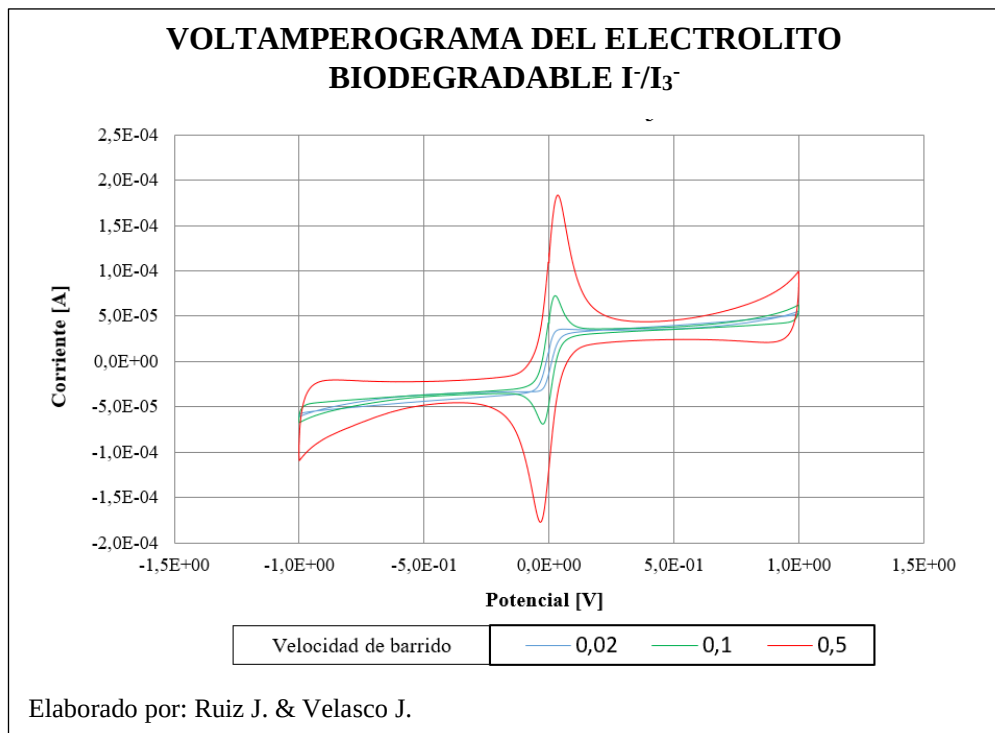
Anexo 2. Voltamperograma del EBNP-L a un barrido de potencial de 1 a -1 y una velocidad de barrido de 0,5 [V/s]



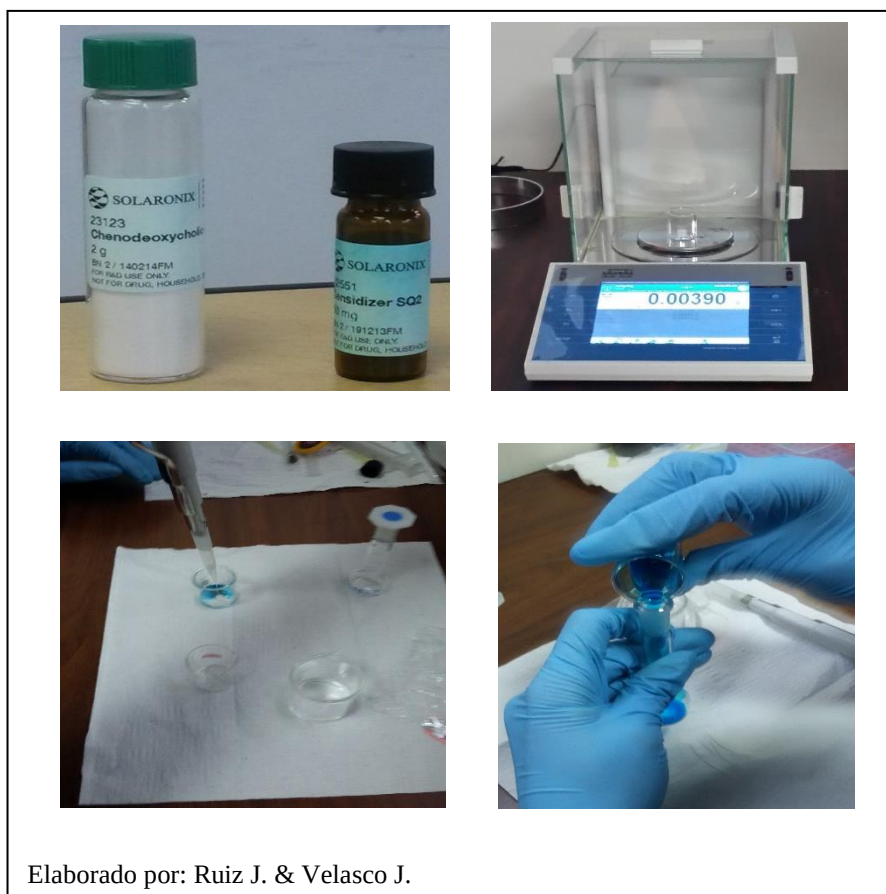
Anexo 3. Voltametría Cíclica del EI/I_3^- a diferentes velocidades de barrido



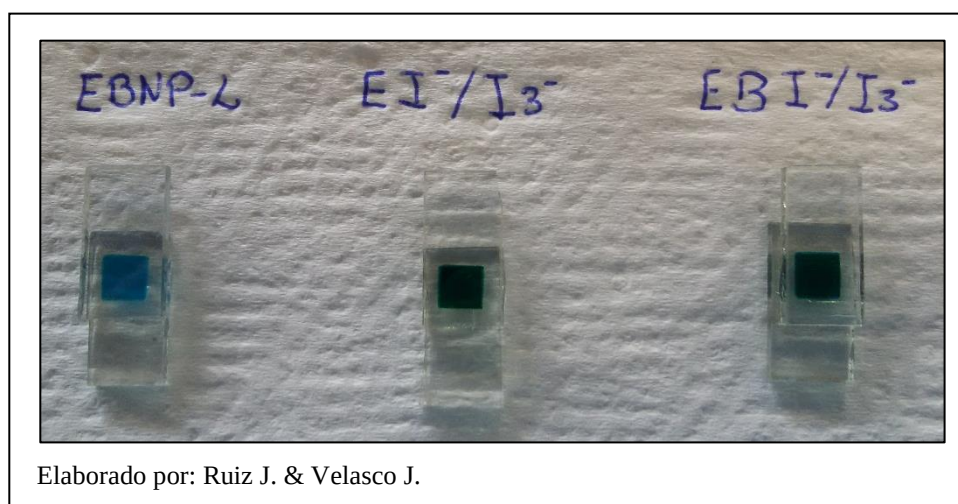
Anexo 4. Voltametría Cíclica del $\text{EBI}^-/\text{I}_3^-$ a diferentes velocidades de barrido



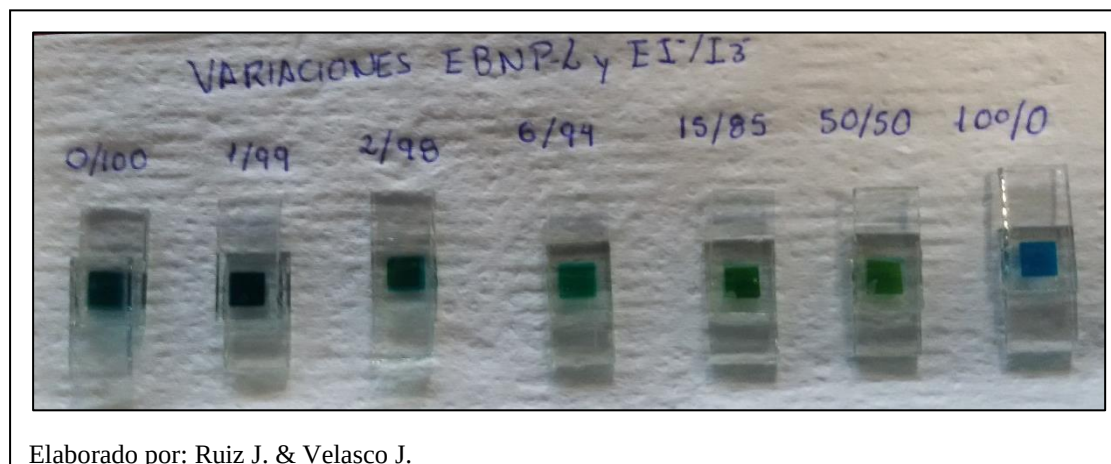
Anexo 5. Preparación del pigmento SQ₂ y ácido Quenodeoxicolico en Etanol



Anexo 6. DSSC's con SQ₂ y diferentes electrolitos



Anexo 7. DSSC's con SQ₂ y diferentes variaciones de electrolito



Anexo 8. Resultados obtenidos de las diferentes muestras con diferentes electrolitos para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's

Electrolito	Eficiencia [%]			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L	0,00138	0,00084	0,00134	0,00119	0,00030
EBI-/I3-	2,80041	3,05117	2,88062	2,91073	0,12806
E I-/I ⁻³	2,78197	2,96800	2,59670	2,78222	0,18565
Electrolito	Voltaje [V]			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L	0,15180	0,10880	0,14720	0,13593	0,02361
EBI-/I3-	0,59480	0,60040	0,61060	0,60193	0,00801
E I-/I ⁻³	0,60180	0,59060	0,60880	0,60040	0,00918
Electrolito	Isc [mA/cm2]			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L	0,07489	0,05518	0,07333	0,06780	0,01096
EBI-/I3-	7,65140	8,28346	8,11043	7,35874	0,32664
E I-/I ⁻³	7,01890	7,66475	7,39257	7,35874	0,32425
Electrolito	FF			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L	0,12810	0,14359	0,12603	0,13257	0,00959
EBI-/I3-	0,61512	0,61340	0,58166	0,60340	0,01884
EI/I3 ⁻	0,65854	0,65554	0,57711	0,63039	0,04617

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Anexo 9. Tabla de ANOVA para los resultados obtenidos de las diferentes muestras con diferentes electrolitos para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's

Eficiencia [%]					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	38,5898	6	6,43163	208,54	0,0000
Intra grupos	0,431787	14	0,0308419		
Total (Corr.)	39,0216	20			
Voltaje [V]					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,564512	6	0,0940853	539,13	0,0000
Intra grupos	0,00244317	14	0,000174512		
Total (Corr.)	0,566955	20			
Isc [mA/cm2]					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	244,986	6	40,831	226,72	0,0000
Intra grupos	2,52136	14	0,180097		
Total (Corr.)	247,507	20			
FF					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,38602	6	0,231004	188,97	0,0000
Intra grupos	0,0171144	14	0,00122245		
Total (Corr.)	1,40314	20			

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Anexo 10. Resultados obtenidos de las diferentes muestras con variaciones de concentraciones de EBNP-L y E I/T^{-3} para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's

Porcentaje de Mezcla	e%			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L 0%+100%EI-/I3-	2,782	2,968	2,597	2,782	0,186
EBNP-L 1%+99%EI-/I3-	3,140	3,305	3,041	3,162	0,133
EBNP-L 2%+98%EI-/I3-	3,731	3,427	2,984	3,381	0,376
EBNP-L 6%+94%EI-/I3-	2,498	2,317	2,221	2,345	0,140
EBNP-L 15%+85%EI-/I3-	0,866	0,963	0,877	0,902	0,053
EBNP-L 50%+50%EI-/I3-	0,012	0,008	0,010	0,010	0,002
EBNP-L 100%+0%EI-/I3-	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000

Porcentaje de Mezcla	Voltaje [V]			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L 0%+100%EI-/I3-	0,602	0,591	0,609	0,600	0,009
EBNP-L 1%+99%EI-/I3-	0,579	0,578	0,603	0,587	0,014
EBNP-L 2%+98%EI-/I3-	0,588	0,580	0,580	0,583	0,005
EBNP-L 6%+94%EI-/I3-	0,593	0,575	0,583	0,584	0,009
EBNP-L 15%+85%EI-/I3-	0,566	0,585	0,578	0,576	0,010
EBNP-L 50%+50%EI-/I3-	0,546	0,396	0,272	0,405	0,137
EBNP-L 100%+0%EI-/I3-	0,152	0,109	0,147	0,136	0,024

Porcentaje de Mezcla	Isc [mA/cm2]			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L 0%+100%EI-/I3-	7,019	7,665	7,393	7,359	0,324
EBNP-L 1%+99%EI-/I3-	7,952	8,767	7,316	8,012	0,728
EBNP-L 2%+98%EI-/I3-	8,686	9,066	7,635	8,462	0,741
EBNP-L 6%+94%EI-/I3-	6,155	6,504	5,969	6,210	0,272
EBNP-L 15%+85%EI-/I3-	2,684	2,787	2,770	2,747	0,055
EBNP-L 50%+50%EI-/I3-	0,014	0,020	0,027	0,020	0,007
EBNP-L 100%+0%EI-/I3-	0,075	0,055	0,073	0,068	0,011
Porcentaje de Mezcla	FF			Promedio	Desviación
	Repeticiones				
	R1	R2	R3		
EBNP-L 0%+100%EI-/I3-	0,659	0,656	0,577	0,630	0,046
EBNP-L 1%+99%EI-/I3-	0,682	0,652	0,690	0,675	0,020
EBNP-L 2%+98%EI-/I3-	0,632	0,653	0,673	0,653	0,021
EBNP-L 6%+94%EI-/I3-	0,685	0,620	0,639	0,648	0,033
EBNP-L 15%+85%EI-/I3-	0,568	0,585	0,547	0,567	0,019
EBNP-L 50%+50%EI-/I3-	1,633	1,014	1,111	1,253	0,333
EBNP-L 100%+0%EI-/I3-	0,128	0,144	0,126	0,133	0,010

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Anexo 11. Tabla de ANOVA para los resultados obtenidos de las diferentes muestras con variaciones de concentraciones de EBNP-L y $E/I/T^3$ para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's

Eficiencia [%]					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	38,5898	6	6,43163	208,54	0,0000
Intra grupos	0,431787	14	0,0308419		
Total (Corr.)	39,0216	20			

Voltaje [V]					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,564512	6	0,0940853	539,13	0,0000
Intra grupos	0,00244317	14	0,000174512		
Total (Corr.)	0,566955	20			

Isc [mA/cm ²]					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	244,986	6	40,831	226,72	0,0000
Intra grupos	2,52136	14	0,180097		
Total (Corr.)	247,507	20			

FF					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,38602	6	0,231004	188,97	0,0000
Intra grupos	0,0171144	14	0,00122245		
Total (Corr.)	1,40314	20			

Elaborado por: Ruiz J. & Velasco J.

Anexo 12. Grafica de medias de los resultados obtenidos con variaciones de concentraciones de EBNP-L y $E I/T^3$ para los parámetros fotovoltaicos de las DSSC's

