

ESTUDIO DE UN RECUBRIMIENTO DE NANOPARTÍCULAS DE SILICIO BASADO EN EL PROCESO DE CONVERSIÓN DESCENDENTE PARA EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA SOLAR DE SILICIO POLICRISTALINO

*STUDY OF A SILICON NANOPARTICLE COATING BASED ON THE
DOWNSHIFTING PROCESS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF A
POLYCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL*

Juan Antonio Martínez Zamora

Universidad de Sonora, México
juanantoniomartinez96@gmail.com

Dainet Berman Mendoza

Universidad de Sonora, México
dainet.berman@unison.mx

Antonio Ramos Carrasco

Universidad de Sonora, México
antonio.ramos@unison.mx

Hiram Jesús Higuera Valenzuela

Universidad Estatal de Sonora, México
hiram.higuera@ues.mx

Recepción: 28/octubre/2020

Aceptación: 3/diciembre/2020

Resumen

En el presente trabajo de investigación se expone el estudio de un recubrimiento de nanopartículas de silicio con el cual se busca mejorar la eficiencia de celdas solares de silicio policristalino mediante el proceso de conversión descendente (downshifting) para aprovechar energía desperdiciada en forma de calor.

Como producto de la síntesis, se obtuvo un recubrimiento para celdas solares de NPs-Si con un tamaño de 2 nm. Adicionalmente, se reportan la transmitancia de las nanopartículas de silicio en un rango desde 300 nm hasta 800 nm y su ancho de banda prohibida estimada en 2.88 eV. Finalmente, la caracterización eléctrica de celdas solares policristalinas mejoradas a través del recubrimiento de NPs-Si es analizado.

Como resultado principal, una celda solar comercial y cubierta con las nanopartículas mejoró su eficiencia total de 6.08 a un 6.73% lo que arroja un incremento del 10.69% en la eficiencia total de la celda, demostrando la capacidad de recubrimiento de conversión descendente basado en nanopartículas de silicio.

Palabras Clave: Celdas solares, nanopartículas, silicio.

Abstract

In this research work, the study of a coating of silicon nanoparticles is exposed with which it is sought to improve the efficiency of polycrystalline silicon solar cells through the process of downward conversion (downshifting) to take advantage of wasted energy in the form of heat.

As a product of the synthesis, a coating for NPs-Si solar cells with a size of 2 nm was obtained. Additionally, the transmittance of silicon nanoparticles in a range from 300nm to 800nm and their bandwidth estimated at 2.88eV are reported. Finally, the electrical characterization of polycrystalline solar cells improved through NPs-Si coating is analyzed.

As a main result, a commercial solar cell covered with the nanoparticles improved its overall efficiency from 6.08 to 6.73% which yields a 10.69% increase, demonstrating the ability of down-conversion coating based on silicon nanoparticles.

Keywords: *Nanoparticles, silicon, Solar cells.*

1. Introducción

En la actualidad, se utilizan cada vez más las celdas solares debido a la creciente demanda energética y a la abundancia de energía solar. Sin embargo, a pesar de que el espectro del sol tiene un amplio rango de longitudes de onda, desde el infrarrojo (2500nm) hasta el ultravioleta (280nm) [Ye, 2018], estos dispositivos fotovoltaicos encuentran uno de sus principales problemas en la eficiencia de conversión de energía debido al estrecho rango de absorción con el que cuentan los materiales de los que están fabricados. La investigación en torno al mejoramiento de la eficiencia de estos dispositivos ha variado desde la búsqueda de nuevos materiales, tratamiento de superficies y el apilamiento de diferentes

capas semiconductoras. Por mencionar algunos ejemplos, se pueden mencionar el uso de nanopartículas (NPs) como capa antirreflejante, celdas solares orgánicas o de polímeros, múltiples capas de materiales p-n, etc. [Wright, 2005]; [Hoppe, 2004]; [Friedman, 2013]. Cada una de las modificaciones que se le pueden hacer a la celda tendrá un impacto en la eficiencia y, específicamente hablando del caso de recubrimientos antirreflejantes, algunas investigaciones han conseguido incrementos que varían entre 0.65% y 3.7% de mejora absoluta experimental [Parlak, 2013]; [Pi, 2011]. En particular, los recubrimientos a base de nanopartículas han sido un fuerte candidato para aplicarse en celdas solares debido a que, a pesar de estar fabricadas con materiales bien estudiados en la escala macro, llegan a presentar propiedades extraordinarias. Estas características alteradas son ocasionadas gracias a que el reducido tamaño de la nanopartícula limita la movilidad de los electrones, produciendo el conocido fenómeno de confinamiento cuántico [Yadav, 2012]. Debido a las interacciones que las NPs tienen con la luz solar, algunas, entre ellas las de silicio, pueden producir un mecanismo de conversión descendente conocido como *downshifting*, el cual consiste en la absorción de fotones con alta energía y su posterior liberación en forma de fotones con una energía menor [Higuera, 2019]. Lo anterior, le permite a la celda convertir energía lumínica que antes desperdiciaba como calor, en energía eléctrica en el dispositivo. Existen muchos métodos para fabricar nanopartículas de silicio, el utilizado en este trabajo es conocido como “proceso de un solo paso” (One-Step process) el cual consiste en la mezcla de dos sustancias, una que sirve como fuente de materiales, conocida como base y otra reductora, que se encarga de romper los enlaces de la fuente para separar el silicio deseado de la estructura química [Luo, 2012]; [Sun, 2003]. Lo anterior, ha motivado el desarrollo de recubrimientos a base de nanopartículas de silicio debido a su relativamente bajo costo de producción y la posibilidad de obtenerlas a temperatura ambiente y presión atmosférica. Asimismo, la mejora que le proveen a las celdas solares puede ser una mínima cantidad, como el trabajo reportado por Chowdhury que tuvo una mejora del 0.3% o puede ser más considerable, como los estudios reportados por Antoniadis, Delgado et al y Hong-Chen et al con mejoras de 1, 1.5 y 3.93%, respectivamente [Antoniadis, 2010];

[Lopez, 2018; [Chowdhury, 2014]; [Hong-Chen, 2014] . En los últimos años, la mejora de la eficiencia a través del uso de nanopartículas en recubrimientos se ha convertido en un tema de intensa investigación. En este trabajo, el proceso experimental para la síntesis de NPs de silicio usando un método químico y amigable con el medio ambiente es presentado. Para verificar las propiedades de tamaño, absorción y valor de la banda prohibida, resultados de caracterización son presentados. Finalmente, la aplicación de estas nanoestructuras en el recubrimiento de celdas solares comerciales es analizado por medio de las curvas I-V y el cálculo de la eficiencia.

2. Métodos

Síntesis de nanopartículas de silicio

Las Nanopartículas de Silicio se sintetizaron siguiendo el método químico (Figura 1) a temperaturas de 40 C y 60 C. Las NPs-Si fueron preparadas con diferentes concentraciones de (3-aminopropil) trietoxisilano (APTES) (Tabla 1) disuelto y agitado magnéticamente con 4 ml de agua desionizada.



Figura 1 Proceso de la reacción usada para la síntesis de nanopartículas de silicio.

Tabla 1 Parámetros de síntesis.

Muestra	Tiempo	Temperatura	Volumen de agua
a)	10 y 20 minutos	40 °C	6 ml
f)	10 y 30 minutos	60 °C	8 ml
h)	10 y 20 minutos	60 °C	8 ml

Después, la agitación inicial, a la mezcla anterior se le agregan 1.25 ml de L-Ascorbato de Sodio (SA) 0.1 M y se agita de nueva cuenta por 20, 30 ó 40 minutos adicionales, según sea la combinación.

Caracterización

Dispersión Dinámica de Luz (DLS). También conocida como Espectroscopia de Correlación Fotónica (PCS), sirve para medir el tamaño de la partícula en un tamaño submicrónico utilizando su movimiento Browniano en un medio acuoso. Para realizar dicha medición, se envía irradiación láser a través de la dispersión de la nanopartícula y la luz esparcida se detecta con un fotomultiplicador que se encuentra a un ángulo de dispersión de 90° para evitar la no-linealidad de la luz (Figura 2) [Paar, 2017] . Al realizar una medición, la señal de luz dispersada se recibe en el fotomultiplicador y es procesada mediante su evaluación con respecto a una función de correlación de tal forma que, las variaciones de intensidad se transforman en variaciones de voltaje. Las partículas pequeñas provocarán mayores fluctuaciones de intensidad comparadas con las grandes [Aliofkhazraei 2015]; [Sugimoto 2001]. Para medir el tamaño promedio de las NPs-Si por medio de la técnica de dispersión dinámica de luz (DLS), se utilizó un equipo Zetasizer Nano ZS marca Malvern. La medición se realizó a presión constante y temperatura ambiente. Se procesaron de los datos mediante Origin 2019b.

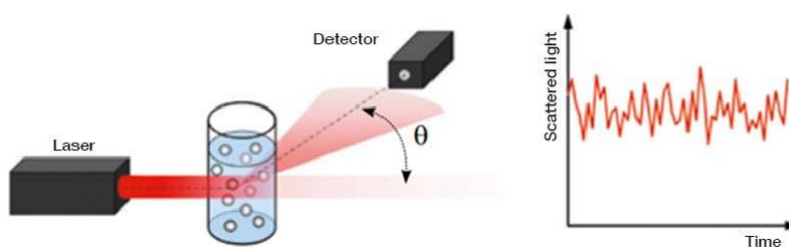


Figura 2 Esquema de DLS.

Espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-Vis)

Es un método de espectroscopios simple y económico; Su carácter es, principalmente, analítico y cuantitativo. Toma mediciones concernientes a la absorción de radiación del ultravioleta cercano (180–390 nm) y el visible (390–780 nm) por parte de especímenes químicos dentro de una solución o en fase gaseosa. La energía que brindan estas partes del espectro electromagnético provoca transiciones electrónicas. La cantidad de radiación que es absorbida está directamente relacionada con la concentración del objeto de análisis en la solución

[Worsfold, 2005]. En la figura 3 [Instruments, 2019] se puede ver el diagrama básico de un sistema para realizar mediciones UV-Vis.

Para poder determinar la absorbancia de las NPs-Si, se utilizó un equipo de espectroscopía UV-VIS Perkin Elmer UV/Vis/NIR Lambda 19, en un rango de longitudes de onda desde los 300 nm hasta los 800 nm. Después, se procesaron las mediciones obtenidas por medio del método de Tauc y con un ajuste lineal se determinó su ancho de banda.



Figura 3 Diagrama esquemático del sistema de caracterización UV-Vis.

Medición de las características eléctricas de celdas solares

Para la caracterización de las celdas se utilizó un simulador solar Oriel LCS-100 que, según los datos del fabricante, a una distancia de 8 pulgadas brinda la potencia de 100 mW/cm^2 . Así como un Keithley 4200A-SCS para la medición y recolección de datos. El procesamiento fue realizado por medio de una aplicación diseñada en Matlab App Designer 2019a (Figura 4), los resultados de dicha aplicación fueron complementados con cálculos teóricos. La aplicación fue diseñada de tal forma que es capaz de identificar el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de corto circuito (I_{sc}), así como calcular la potencia máxima (P_{max}) a partir de las tablas de datos que proporciona el Keithley 4200A-SCS en forma de documento de Excel. El factor de llenado (FF) indica qué tan cerca está la celda de ser ideal, y se calcula a partir de los datos mencionados anteriormente. Por otra parte, la eficiencia (η) se obtiene dividiendo la potencia máxima entre el estándar internacional de 1 sol (equivalente a 1000 W/m^2) el programa no permite que se modifique esta cantidad. La aplicación cuenta con un apartado llamado "Dimensiones" donde se introducen las medidas de ancho y largo de la celda, para que posteriormente se calculen el área y la densidad de corriente.

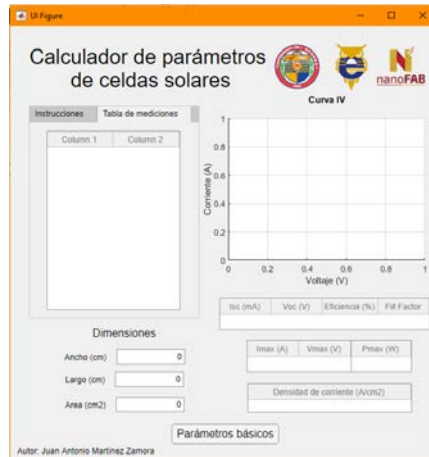
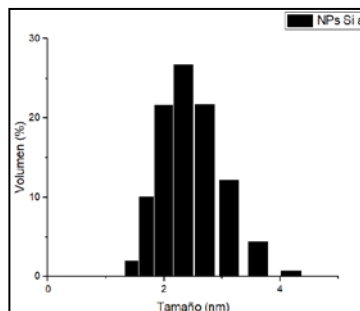


Figura 4 Interfaz de la aplicación diseñada en App Dsigner.

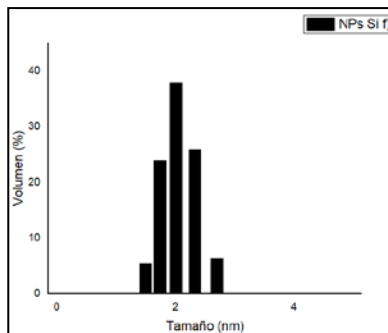
3. Resultados

Tamaño promedio de las NPs-Si

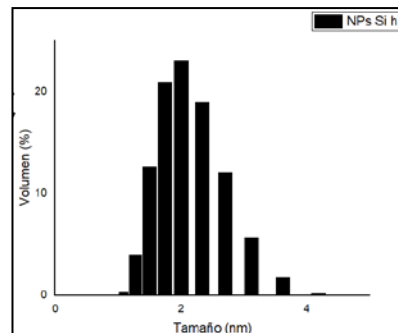
Se puede observar que la muestra (a) (Figura 5a) presenta un mayor tamaño promedio de las NPs con respecto a los que se obtuvieron en las muestras (f) y (h) (Figuras 5b y 5c).



a) NPs-Si (a).



b) NPs-Si (f).



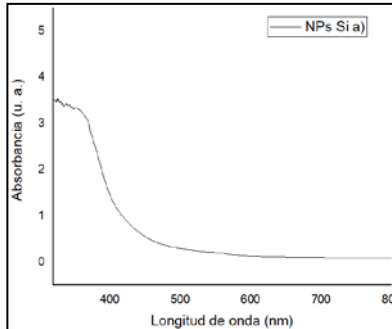
c) NPs-Si (h).

Figura 5 Tamaño promedio de la muestra.

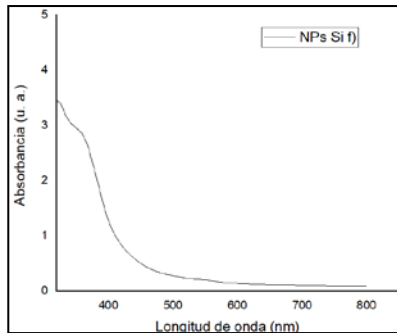
Una de las atribuciones a esto es que dicha muestra tuvo una temperatura de reacción menor a la que tuvieron las otras dos muestras. Otra de las observaciones importantes es que la muestra (f) tiene menor variación entre los tamaños de las NPs, lo cual se puede atribuir al hecho de que pasó más tiempo siendo mezclada que las otras dos muestras.

Estimación del ancho de banda prohibida y el método de Tauc

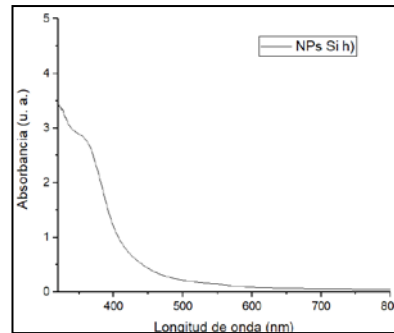
La absorbancia de las NPs-Si (a), (f) y (h) se muestra en las figuras 6a, 6b y 6c, respectivamente, donde se puede apreciar que todas presentaron una alta absorbancia desde los 400 hasta los 300 nm.



a) NPs-Si (a).



b) NPs-Si (f).



c) NPs-Si (h).

Figura 6 Absorbancia de la muestra.

El cálculo del ancho de banda se realizó mediante el método de Tauc que utiliza como base la absorbancia, como se muestra en la ecuación 1.

$$(ahv)^{1/n} = A(hv - E_g) \quad (1)$$

Donde:

h : Constante de Planck.

a : Absorbancia experimental, proporcional al coeficiente de absorción.

ν : Frecuencia de los fotones.

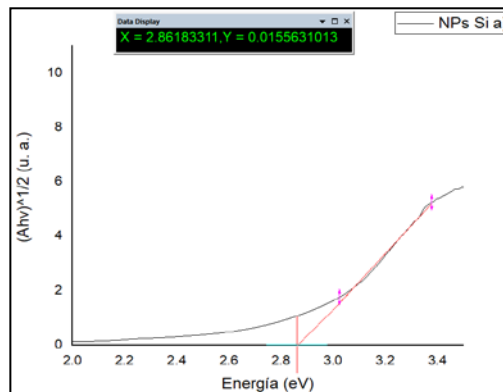
E_g : Energía de banda prohibida.

A : Constante.

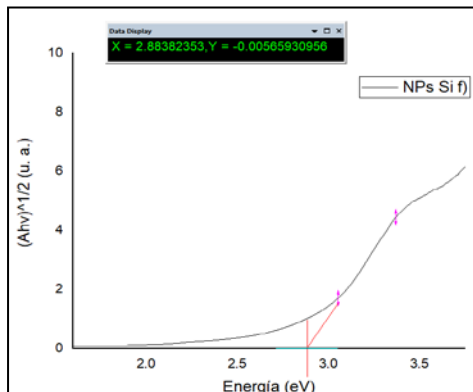
n : 2 para el caso de semiconductores con ancho de banda indirecto.

Para obtener el ancho de banda, se graficó $(ah\nu)^{1/2}$ vs $h\nu$ y después se realizó un ajuste lineal a la curva resultante para estimar su valor.

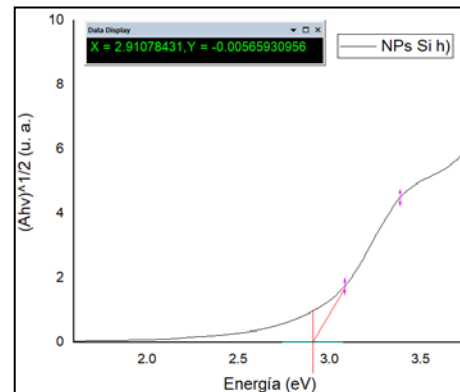
El ancho de banda varió ligeramente entre cada muestra, la de mayor tamaño, es decir (a), tuvo un valor del ancho de banda menor siendo este igual a 2.86 eV (Figura 7a), la muestra (f) obtuvo 2.88 eV (Figura 7b) y la muestra con menor tamaño, es decir (h), presentó el mayor ancho de banda con un valor de 2.91 eV (Figura 7c).



a) NPs-Si (a).



b) NPs-Si (f).



c) NPs-Si (h).

Figura 7 Absorbancia de la muestra.

Caracterización eléctrica de celdas solares

La caracterización de las celdas solares fue realizada en la aplicación diseñada en App Designer. Para comprobar los resultados, también se obtuvieron los parámetros de la celda solar usando los cálculos directos.

Para establecer una comparación, se realizó la caracterización de una celda solar de silicio comercial sin nanopartículas de silicio. Con el fin de comprobar los resultados obtenidos mediante el procesamiento en Matlab mostrados en la figura 8, se calculó el factor de llenado (FF) y la eficiencia de la celda (η), mediante la interpretación de los datos provistos por el Keithley 4200A-SCS, con los cuales fue posible determinar que la CS tiene una corriente máxima (I_{MAX}) de 109 mA y un voltaje máximo (V_{MAX}) de 410 mV. Estos datos equivalen a una potencia máxima de 45.0624 mW como se puede comprobar con la ecuación 2.

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} = 109.9084 \text{ mA} * 410 \text{ mV} = 45.0624 \text{ mW} \quad (2)$$

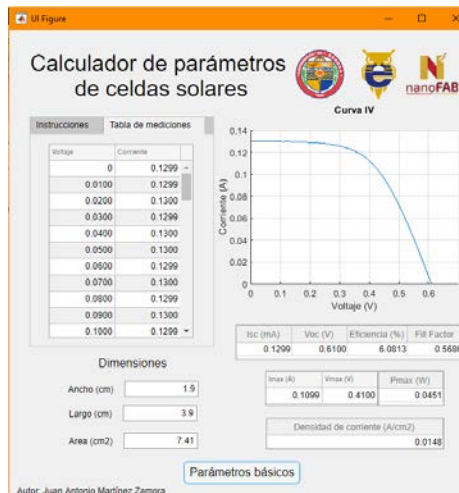


Figura 8 Parámetros principales de la celda solar sin NPs-Si.

La corriente de corto circuito (I_{SC}) y el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) representan los cruces en cero de la gráfica. Como resultado, es posible fijar el valor de I_{SC} como 129.9168 mA y de V_{OC} como 610 mV, cumpliendo ambas con la condición de ser mayores que I_{MAX} y V_{MAX} . Contando con estos parámetros se puede decir que:

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{SC} * V_{OC}} = \frac{109.9084 \text{ mA} * 410 \text{ mV}}{129.9168 \text{ mA} * 610 \text{ mV}} = 0.5686$$

La eficiencia de la celda (η) se calculó mediante la división de la potencia incidente, sobre la potencia máxima que ofreció, teniendo como resultado:

$$P_{in2} = A * P_{in1} = (3.9 \text{ cm} * 1.9 \text{ cm}) * 100 \frac{mW}{cm^2} = 741 \text{ mW}$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in2}} * 100\% = \frac{45.0624 \text{ mW}}{741 \text{ mW}} * 100\% = 6.08129\%$$

Donde:

P_{in2} : Potencia incidente en la CS.

P_{in1} : Potencia total del simulador.

A: Área de la celda solar.

Posteriormente, se aplicaron las nanopartículas de la muestra (h) a la misma celda solar, para medir sus nuevos parámetros se siguió el mismo procedimiento que con la celda solar sin las NPs-Si. Por medio de la aplicación se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 9 y detallados en la tabla 2.

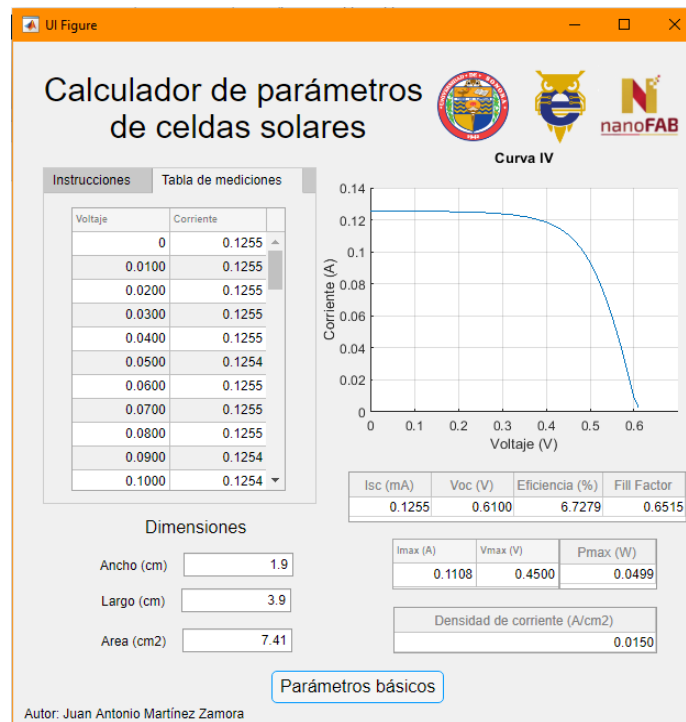


Figura 9 Parámetros principales de la celda solar con NPs-Si.

Tabla 2 Parámetros de la CS con NPs-Si obtenidos con la aplicación.

Parámetro	Valor
Corriente de corto circuito (I_{sc})	125.5mA
Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	610mV
Corriente máxima (I_{MAX})	110.8mA
Voltaje máximo (V_{MAX})	450mV
Potencia máxima (P_{MAX})	49.9mW
Densidad de corriente	15mA/cm ²
Factor de llenado	0.6515
Eficiencia	6.7279%

4. Discusión

Al comparar los resultados obtenidos en las figuras 14 y 15, es posible notar que la aplicación del recubrimiento basado en las NPs-Si causó un aumento en la eficiencia general de la celda, pasando de tener 6.08% a un 6.73%, lo que representa un incremento del 10.69% en la eficiencia de la celda. Los valores típicos de eficiencia de celdas solares comerciales se encuentran entre el 15% y el 22% [Vourvoulías, 2020], por lo que la eficiencia brindada por la celda es baja en comparación.

La potencia máxima también aumentó de 45.06 a 49.9 mW, es decir, una mejora general de 10.74%. Por otra parte, la corriente de corto circuito tuvo una mínima disminución de 129.9168 a 125.4501 mA, aunque a pesar de ello, la densidad de corriente aumentó de 14.8 a 15 mA/cm².

Donde se vio más beneficiada la celda, fue en el factor de llenado, que antes de las nanopartículas era de 0.53 y después de las NPs pasó a ser de 0.6515. Una CS comercial típicamente tiene valores de FF menores que 1 y mayores a 0.7 [Sun, 2009] (donde 1 representaría una celda solar ideal) el valor inicial de FF de la CS se encontraba muy por debajo de esa cantidad antes de la aplicación de las NPs-Si, sin embargo, después se incrementó hasta casi llegar al límite inferior de las celdas comerciales.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se exhiben los resultados obtenidos a través de una aplicación para el procesamiento de la caracterización eléctrica de una celda solar mejorada a través de un recubrimiento basado en nanopartículas de silicio. La

aplicación diseñada prueba ser apta para calcular los parámetros más importantes de una celda solar con poca intervención del usuario. Las nanopartículas que fueron aplicadas sobre la celda solar probaron mejorar su eficiencia total, así como casi todos sus aspectos más importantes.

Las principales ventajas del método de síntesis de las nanopartículas de silicio son que es ecológico, no requiere de materiales tóxicos y se puede realizar a presión constante y temperatura ambiente. Experimentos a futuro incluirán realizar cambios en el agente reductor de la síntesis con la esperanza de producir NPs-Si con diferentes diámetros, esperando recorrer la absorbancia hacia el color rojo. Adicionalmente, se busca mejorar la aplicación para que pueda albergar más funciones presentando una mayor adaptabilidad a las necesidades del usuario.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aliofkhazraei, Mahmood, (2015). Handbook of Nanoparticles. Handbook of Nanoparticles. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15338-4>.
- [2] Antoniadis, Homer, (2009). Silicon Ink High Efficiency Solar Cells. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5411597/footnotes#footnotes>.
- [3] Chowdhury, Farsad I., Aaasha Alnuaimi, Kazi Islam, and Ammar Nayfeh, (2014). Efficiency Enhancement in Thin-Film c-Si HIT Solar Cells Using Luminescent 2.85 Nm Silicon Nanoparticles. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, 2209–13. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925364>.
- [4] Higuera, Hiram, (2019). Tesis titulada: Síntesis De Nanopartículas de Silicio Para La Fabricación De Recubrimientos En Celdas Solares. Universidad de Sonora.
- [5] Hong-Chen Hao, Wei Shi, Jia-Rong Chen, Ming Lu, (2014). Mass Production of Si Quantum Dots for Commercial C-Si Solar Cell Efficiency Improvement. *Materials Letters* 133, 80–82.
- [6] Friedman, Daniel J., John F. Geisz, and Myles A. Steiner, (2013). Analysis of Multijunction Solar Cell Current-Voltage Characteristics in the Presence of

- Luminescent Coupling. *IEEE Journal of Photovoltaics* 3 (4), 1429–36. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2275189>.
- [7] Hoppe, Harald, and Niyazi Serdar Sariciftci, (2004). Organic Solar Cells: An Overview. *Journal of Materials Research* 19 (7), 1924–45. <https://doi.org/10.1557/JMR.2004.0252>.
- [8] Instruments, Edinburgh, (2019). ¿What Is a Spectrometer?. <https://www.edinst.com/blog/what-is-a-spectrometer/>.
- [9] Lopez Delgado, Rosendo, H. J. Higuera Valenzuela, A. Zazueta Raynaud, A. Ramos Carrasco, J. E. Pelayo, D. Berman Mendoza, M. E. Álvarez Ramos, and Arturo Ayon, (2018). Solar Cell Efficiency Improvement Employing Down-Shifting Silicon Quantum Dots. *Microsystem Technologies* 24 (1), 495–502. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3405-x>.
- [10] Luo, Z., R. Y. Hong, H. D. Xie, and W. G. Feng, (2012). One-Step Synthesis of Functional Silica Nanoparticles for Reinforcement of Polyurethane Coatings. *Powder Technology* 218, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.11.023>.
- [11] Paar, Anton, (2017). The Principles of Dynamic Light Scattering. <https://wiki.anton-paar.com/en/the-principles-of-dynamic-light-scattering/>.
- [12] Parlak, Elif Alturk, Tülay AslTumay, Nesrin Tore, Şerife Saroğlan, Pelin Kavak, and Figen Türksoy, (2013). Efficiency Improvement of PCDTBT Solar Cells with Silver Nanoparticles. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 110: 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.12.002>.
- [13] Pi, Xiaodong, Qing Li, Dongsheng Li, and Deren Yang, (2011). Spin-Coating Silicon-Quantum-Dot Ink to Improve Solar Cell Efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (10), 2941–45. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.06.010>.
- [14] Sugimoto, Tadao, (2001). Characterization of Products. In *Monodispersed Particles*, 1st ed., 482–519. Elsevier Science B.V.
- [15] Vourvoulis, Aris, (2020). How Efficient Are Solar Panels?, Green Match Blog: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/11/how-efficient-are-solar-panels>.

- [16] Sun, Xuping, Xiue Jiang, Shaojun Dong, and Erkang Wang, (2003). One-Step Synthesis and Size Control of Dendrimer-Protected Gold Nanoparticles: A Heat-Treatment-Based Strategy. *Macromolecular Rapid Communications* 24 (17), pp. 1024–28. <https://doi.org/10.1002/marc.200300093>.
- [17] Techno, Sun, (2009). ¿Qué Es El Factor de Forma o Fill Factor?, Techno Sun Blog. <http://blog.technosun.com/que-es-el-factor-de-forma-o-fill-factor/>.
- [18] Worsfold, Paul J., and Elias A.G. Zagatto, (2005). Spectrophotometry | Overview. In *Encyclopedia of Analytical Science*, edited by Manuel Worsfold, Pau; Townshend, Alan; Poole, Colin; Miró, 318–21. Elsevier Science B.V.
- [19] Wright, Daniel N., Erik S. Marstein, and Arve Holt, (2005). Double Layer Anti-Reflective Coatings for Silicon Solar Cells. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, no. 2027, pp. 1237–40. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2005.1488363>.
- [20] Yadav, Amar, (2012). Re: What Is Quantum Confinement Effect? ResearchGate. https://www.researchgate.net/post/What_is_Quantum_confinement_effect.
- [21] Ye, Gaoyang, (2018). Tesis titulada Thermodynamic and Structural Investigations on the Interactions between Actinides and Phosphonate-Based Ligands. Université Paris-Saclay. https://www.researchgate.net/publication/334191348_Thermodynamic_and_structural_investigations_on_the_interactions_between_actinides_and_phosphonate-based_ligands.