



Caracterización de celdas fotovoltaicas de tecnología de pozo cuántico usando desarrollos en software libre

Characterization of quantum well photovoltaic cells using developments in free software

Gloria Carvalho

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Fotónica

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7082-6600>

gcarvalho@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Luis Santos

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Fotónica

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6788-2629>

lsantos@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Jarson Manjarres

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica

Universidad Central de Venezuela

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7150-3311>

jmanjarres@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Héctor Núñez

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica / Laboratorio de Fotónica

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0908-6002>

hnunez@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Carlelines Gavidia

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica

Universidad Central de Venezuela

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0446-621X>

cgavidia@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Dino Di Rosa Ulloa

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Electrónica

Universidad Central de Venezuela

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8452-2804>

dinodirosa@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Yaremi Gamboa

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Medios Guiados y Antenas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0697-3951>

ygamboa@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Orlando Villarroel

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Medios Guiados y Antenas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8099-5366>

ovillarroel@cendit.gob.ve

Caracas-Venezuela

Freddy Brito

Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Telecomunicaciones Laboratorio de Medios Guiados y Antenas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9578-8442>

fbritoucv@gmail.com

Caracas-Venezuela

Resumen

La caracterización de las celdas fotovoltaicas resulta un tópico de interés para verificar y mejorar la eficiencia de las mismas, así como maximizar la generación de energía eléctrica, tomando en cuenta, que esta fuente alterna depende de ciertos factores geográficos como la irradiación solar y la temperatura. En este artículo se presenta la descripción de los desarrollos de sistemas basados en *software* libre y con estándares abiertos, que permiten estimar con una precisión alrededor del 99,99 %, el desempeño de celdas fotovoltaicas de pozos cuánticos, las cuales son estructuras semiconductoras nanométricas que confinan los electrones en dos dimensiones, mejorando así la eficiencia de la conversión fotovoltaica respecto a las celdas convencionales. Adicionalmente, usando la plataforma "Scilab" se puede evaluar la eficiencia cuántica de estas celdas, a partir del modelo físico y de las ecuaciones asociadas. Los resultados obtenidos en *software* libre se comparan con los obtenidos con herramientas de *software* comercial, siendo posible así, con los desarrollos mostrados, caracterizar el desempeño y eficiencia cuántica de una celda fotovoltaica basada en tecnología de pozo cuántico para diferentes condiciones de temperatura e irradiancia solar, en tiempo real sabiendo las condiciones geográficas del entorno.

Palabras clave:

Celda fotovoltaica; pozo cuántico; curva I-V; curva P-V; eficiencia cuántica; factor de forma; Scilab

Abstract

The characterization of photovoltaic cells is a topic of interest, with the aim of verifying and improving their efficiency, as well as maximizing the generation of electrical energy, considering that this alternative source depends on certain geographical factors such as solar irradiation and temperature. In this article, the authors present the description of the development of systems based on free software and open standards, which allow for the estimation, with an accuracy of around 99.99%, of the performance of quantum well photovoltaic cells, which are nanometric semiconductor structures that confine electrons in two dimensions, thus improving the efficiency of photovoltaic conversion compared to conventional cells. Additionally, using the Scilab platform, the quantum efficiency of these photovoltaic cells can be evaluated, based on the physical model and the associated equations. The results obtained with free software are compared with those obtained with commercial software tools. With the developments shown, it is possible to characterize the performance and quantum efficiency of a photovoltaic cell based on quantum well technology for different temperature and solar irradiance conditions, in real-time knowing the geographical conditions of the environment.

Keywords:

Photovoltaic cell; quantum well; I-V curve; P-V curve; quantum efficiency; fill factor; Scilab



Introducción

La evolución de las tecnologías de fabricación de celdas fotovoltaicas permite mejorar la eficiencia en la generación de energía eléctrica, pues las ventajas en comparación con otras fuentes de energía, siendo generalmente sistemas fijos, no requieren insumos ni combustibles para operar, solo la luz solar, que geográficamente está disponible con regularidad durante una fracción del día. Esta investigación muestra la adaptación de las herramientas en *software* libre, bajo estándares abiertos desarrolladas para celdas de tecnología cuántica (Núñez, *et al.*, 2018, 2019). La mayoría de las herramientas computacionales utilizadas hoy en día para la caracterización requieren el pago de la licencia para que el código fuente se puede modificar (Tin *et al.*, 2024; France *et al.*, 2022). Sin embargo, este trabajo muestra los resultados a partir de desarrollos en Scilab, considerando el modelo físico de tres diodos (Quai *et al.*, 2022), para determinar el desempeño y eficiencia de una celda de pozo cuántico en condiciones específicas de operación. El modelo físico utilizado permite determinar la corriente de portadores bajo el fenómeno fotovoltaico mediante ecuaciones no lineales, que son resueltas usando el proceso descrito en la metodología. Los coeficientes de las ecuaciones se han determinado a través de los parámetros más importantes de cualquier celda fotovoltaica: densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}), voltaje en circuito abierto (V_{oc}), corriente máxima (I_{max}) y voltaje (V_{max}), a partir de las especificaciones que dan los laboratorios fabricantes y de los datos analizados en el Laboratorio de Fotónica de la Fundación Centro Nacional de Investigaciones Tecnológicas (Cendit). Una vez se resuelven las ecuaciones, se obtienen las curvas corrientes – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V) de la celda fotovoltaica bajo prueba y se comparan con los resultados obtenidos con Matlab y con los datos del fabricante de la celda en estudio (simulador solar). El sistema *software* desarrollado muestra no solo las curvas antes indicadas, también muestra la eficiencia de conversión, la eficiencia cuántica y el factor de forma (Fill Factor o FF) de las celdas fotovoltaicas de tecnología cuántica. El siguiente trabajo

se desarrolla en tres partes para su mejor comprensión: metodología, resultados y conclusiones.

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se definió el modelo físico y matemático de las celdas fotovoltaicas de pozo cuántico, así como el desarrollo *software* requerido para poder caracterizar a las mismas.

Modelado físico y matemático

Las celdas fotovoltaicas se fabrican a partir de materiales semiconductores intrínsecos y/o extrínsecos. El modelo del diodo permite representar las corrientes asociadas a la celda generalmente constituida por la unión de material tipo *n* (con exceso de portadores negativos) y un material tipo *p* (con exceso de portadores positivos). Estas corrientes son:

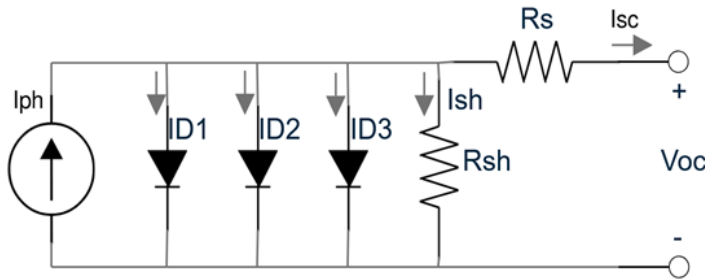
- La corriente por la absorción de los fotones en el material, lo cual genera los pares electrón–hueco, principales responsables de la corriente eléctrica que estos generan. En el modelo físico va representada por una fuente de corriente.
- Las corrientes asociadas a la región de agotamiento y a la región cuasineutral que forman parte de la unión. En el modelo físico van representadas por uno o varios diodos.

Aunque los estudios recientes sigue prevaleciendo el uso del circuito de dos diodos en paralelo para modelar el comportamiento de las celdas fotovoltaicas, el modelo a tres diodos, como se ve en la Figura N° 1, permite contemplar fenómenos adicionales, por la modificación de la estructura del material, como sucede en el caso de las celdas con pozo cuántico, en las cuales entre la unión de material *n* y *p*, se introducen capas delgadas denominadas pozos cuánticos, que permiten confinar los portadores, lo cual reduce los niveles de energía del material, específicamente la brecha de energía, facilitando así la absorción de los fotones como se observa en la Figura N° 2. Dado que la absorción depende de ese nivel de energía, y esta a su vez



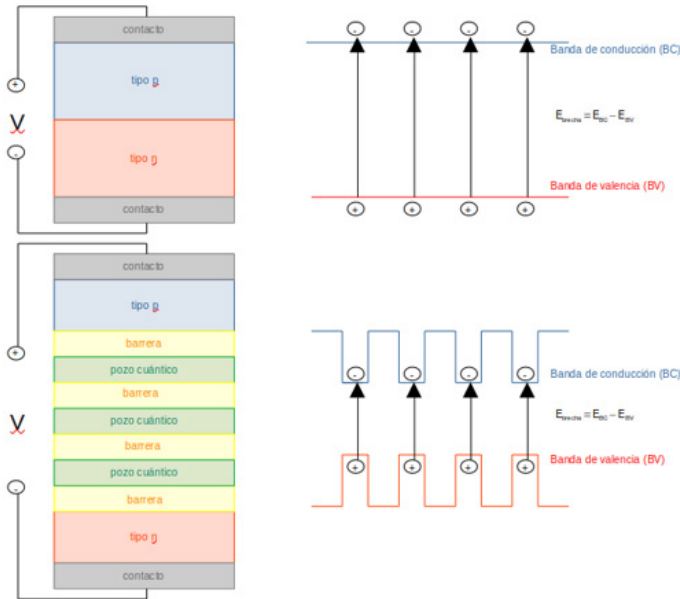
depende de la longitud de onda de los fotones, al reducir la brecha de energía, fotones de menor longitud de onda pueden generar pares de electrón-hueco lo que aumenta la eficiencia por el aumento de la corriente eléctrica que se produce en el proceso.

Figura N° 1. Modelo físico de celda fotovoltaica a tres diodos



Fuente: Quai et al., (2022).

Figura N° 2. Diferencia entre celda convencional y celda con pozo cuántico



Fuente: Elaboración propia (2025).

La ecuación que permite modelar el circuito de la Figura N° 1 se muestra en la expresión (1)

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{D1} * (e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_1 V_t}} - 1) - I_{D2} * (e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_2 V_t}} - 1) - I_{D3} * (e^{\frac{I_{sc} R_s}{n_3 V_t}} - 1) - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Donde: I_{sc} la corriente de cortocircuito; I_{ph} es la corriente de foto-generación; I_{D1} , I_{D2} , I_{D3} , son las corriente de los diodos (representa las corriente en zona de agotamiento y en zonas cuasineutral); R_s representa las pérdidas óhmicas en los extremos debido a los contactos metálicos de la celda y R_{sh} representa las pérdidas óhmicas por la unión $n-p$ de los materiales que forman parte de la celda. Adicionalmente n_1 , n_2 , n_3 , representan los factores de idealidad entre los diodos.

Para resolver esta ecuación, se ha seguido el procedimiento descrito según Núñez et al., (2018, 2019).

Adicionalmente, para poder obtener la eficiencia cuántica (η_{QE}) de las celdas fotovoltaicas se hizo uso de la expresión (2):

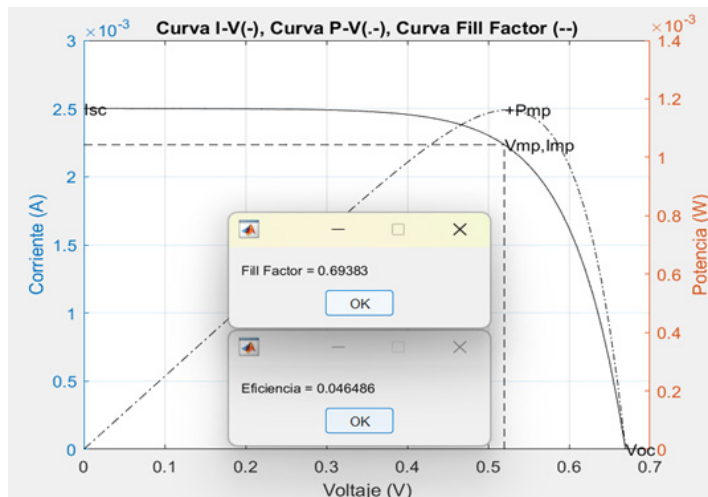
$$\eta_{QE} = \frac{I_{ph}}{q} \frac{h \frac{c}{\lambda}}{P_{inc}} \quad (2)$$

Donde: I_{ph} es la corriente de fotogeneración; q es la carga del electrón, h es la constante de Planck, λ es la longitud de onda de los fotones, P_{inc} es la potencia incidente de los fotones.

Desarrollo software

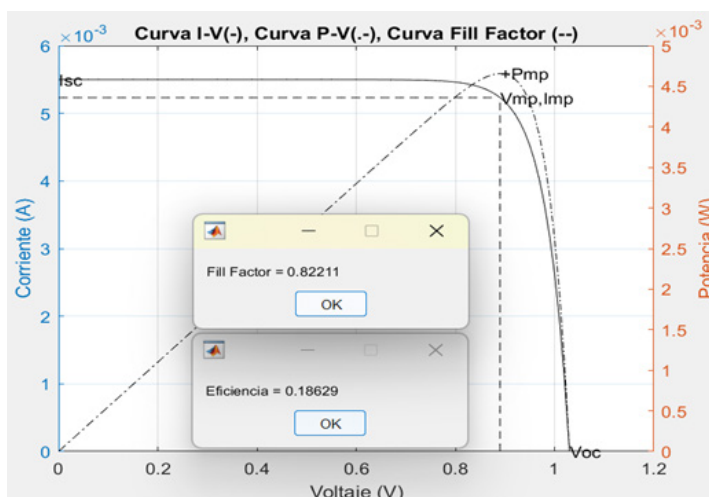
Se desarrollaron rutinas en Scilab para resolver el sistema de ecuaciones no lineales constituido a partir de la expresión trascendental (1) los parámetros obtenidos para las celdas fotovoltaicas bajo estudio. Las curvas I-V, P-V y FF generadas en Scilab, bajo condiciones estándares de operación, en este caso 1.000 W/m² y 25 °C, a partir del modelo matemático de tres diodos y resuelto para cada celda fotovoltaica de pozo cuántico bajo estudio, tal como se muestran en las Figuras N° 3, N° 4 y N° 5.

Figura N° 3. Curvas I-V y P-V de celda pozo cuántico desarrollada según Tin *et al.*, (2024) bajo caracterización en *software* libre
(Parámetros: $V_{oc} = 0,67$ V; $J_{sc} = 10$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF= 69,35 %)



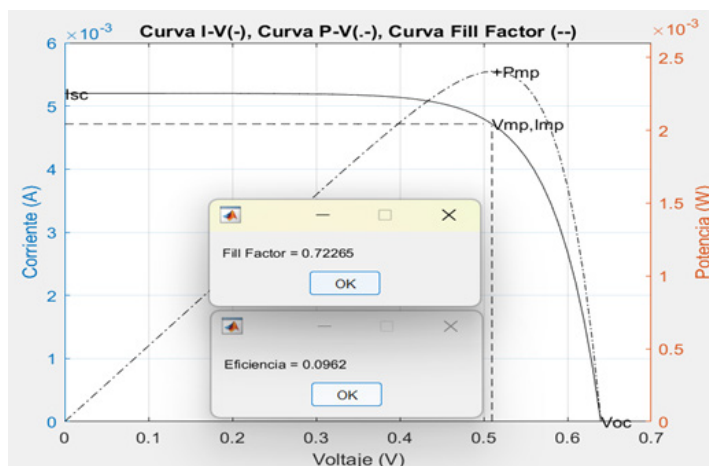
Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 5. Curvas I-V y P-V de celda pozo cuántico desarrollada según France *et al.*, (2022) bajo caracterización en *software* libre
(Parámetros: $V_{oc} = 1,03$ V; $J_{sc} = 22$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF= 82 %)



Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 4. Curvas I-V y P-V de celda pozo cuántico desarrollada según Xutao *et al.*, (2023) bajo caracterización en *software* libre
(Parámetros: $V_{oc} = 0,64$ V; $J_{sc} = 20,80$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF=72,25 %)

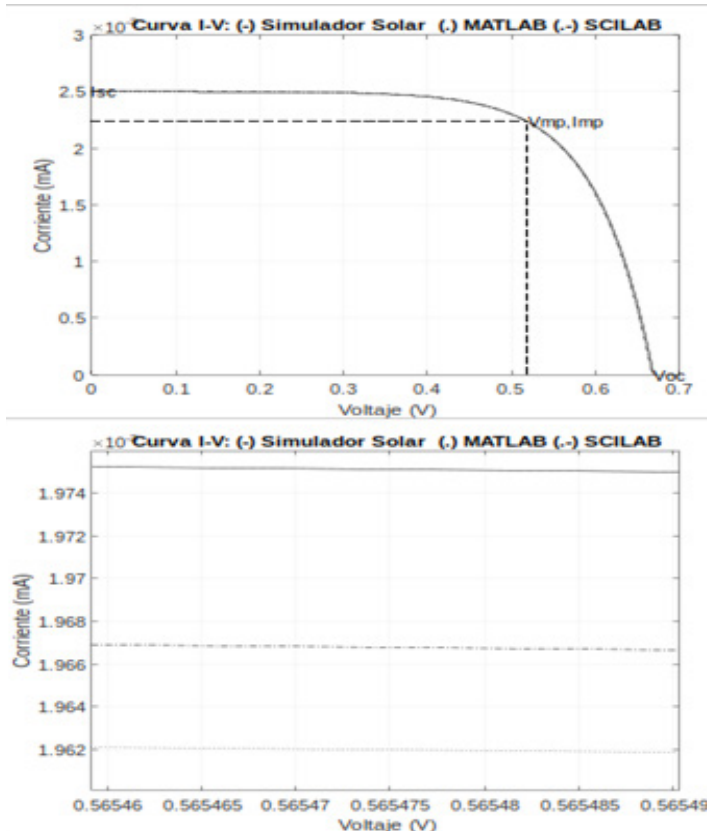


Fuente: Elaboración propia (2025).

Resultados

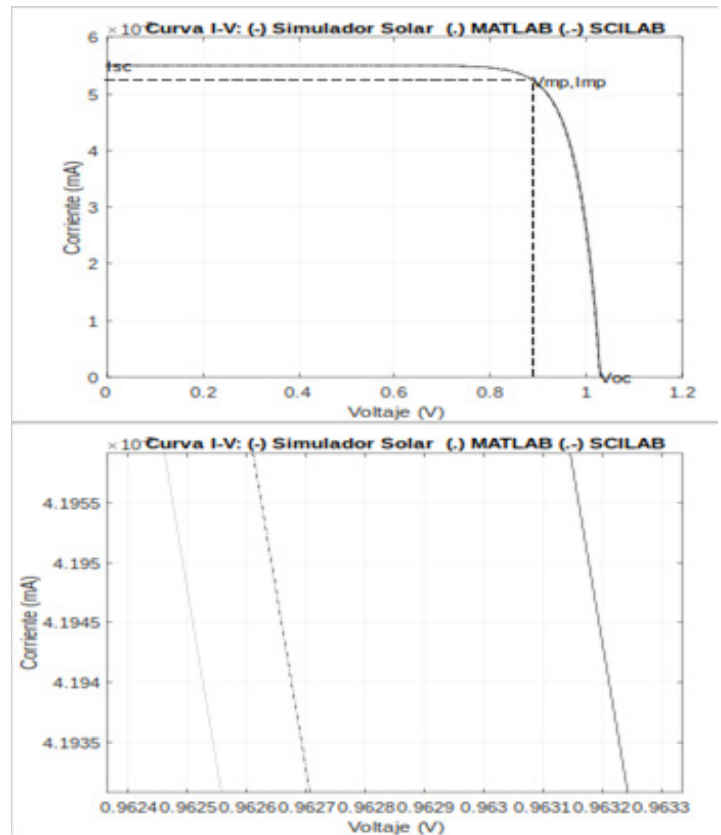
Las curvas I-V para las diferentes celdas fotovoltaicas estudiadas, se muestran en las Figuras N° 6, N° 7 y N° 8. Se muestra la comparación entre la curva obtenida en el laboratorio fabricante (simulador solar), contra los resultados en Matlab y Scilab, bajo Condiciones Estándares de Operación o STC (1000 W/m², 25 °C). Dada que las tres curvas obtenidas para celda estudiada, no se distinguen, fue necesario en cada caso colocar una ampliación, con la finalidad de estimar la desviación respecto a los valores obtenidos en laboratorio.

Figura N° 6. Curvas I-V de celda pozo cuántico desarrollada según Tin *et al.*, (2024) bajo caracterización en *software* libre: figura superior curva completa, figura inferior ampliación para detalle.
(Parámetros: $V_{oc} = 0,67$ V; $J_{sc} = 10$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF=69,35 %)



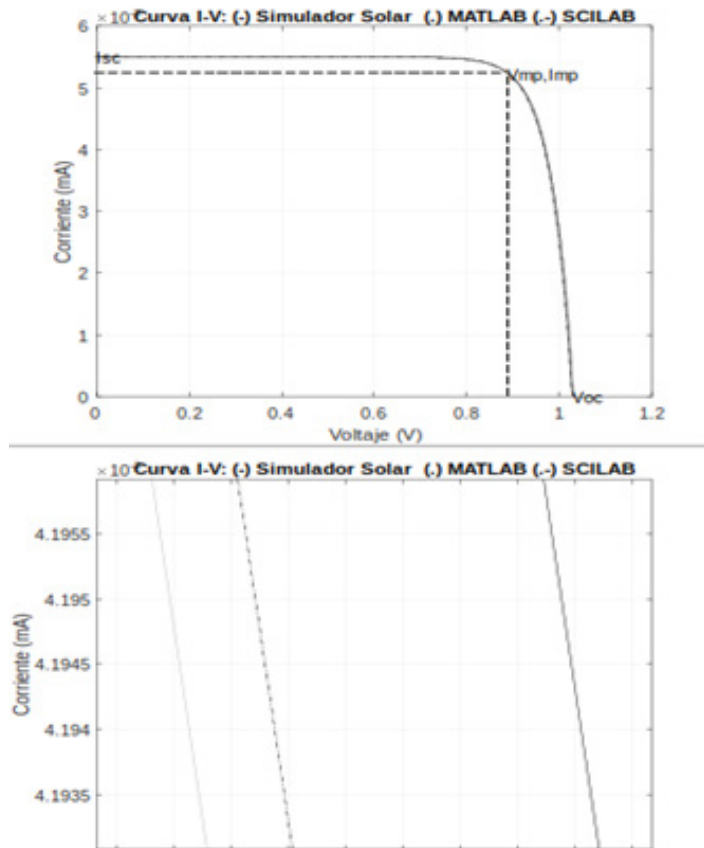
Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 7. Curvas I-V de celda pozo cuántico desarrollada según Xutao *et al.*, (2023), bajo caracterización en *software* libre: figura superior curva completa, figura inferior ampliación para detalle.
(Parámetros: $V_{oc} = 0,64$ V; $J_{sc} = 20,80$ mA/cm², Área = 0,25 cm², FF=72,25 %)



Fuente: Elaboración propia (2025).

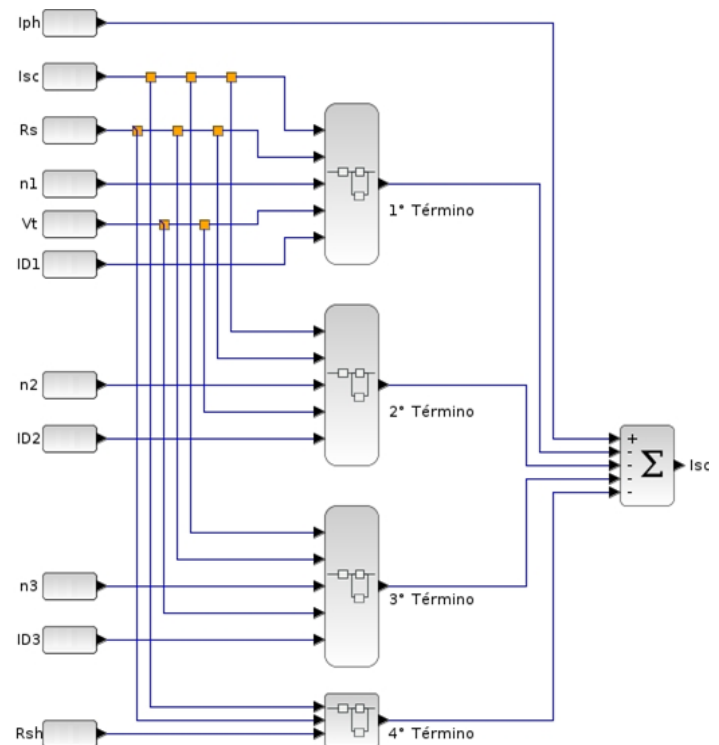
Figura N° 8. Curvas de celda pozo cuántico desarrollada según France *et al.*, (2022) bajo caracterización en *software* libre: figura superior curva completa, figura inferior ampliación para detalle
(Parámetros: $V_{oc} = 1,03 \text{ V}$; $J_{sc} = 22 \text{ mA/cm}^2$, Área = $0,25 \text{ cm}^2$, $FF = 82 \%$)



Fuente: Elaboración propia (2025).

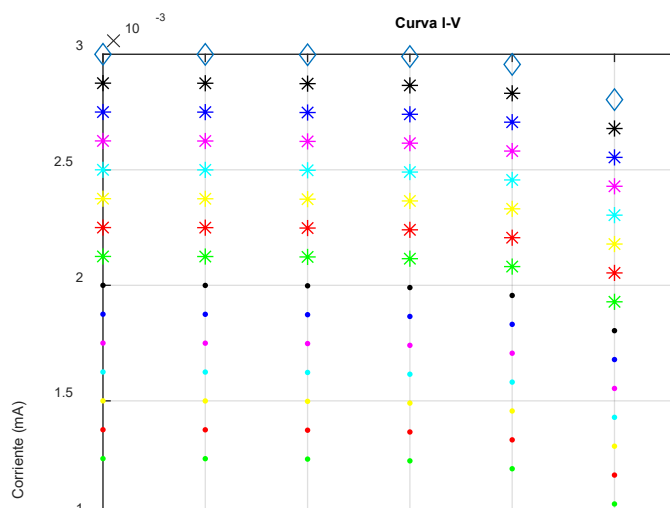
Las curvas I-V para varios niveles de irradiación solar y de temperatura se obtuvieron programando el módulo Xcos de Scilab (ver Figura N° 9) para la celda fotovoltaica en estudio, con los resultados que se aprecian en las Figuras N° 10 y N° 11.

Figura N° 9. Diagrama en bloques para resolver la ecuación trascendental (1) usando Xcos de Scilab



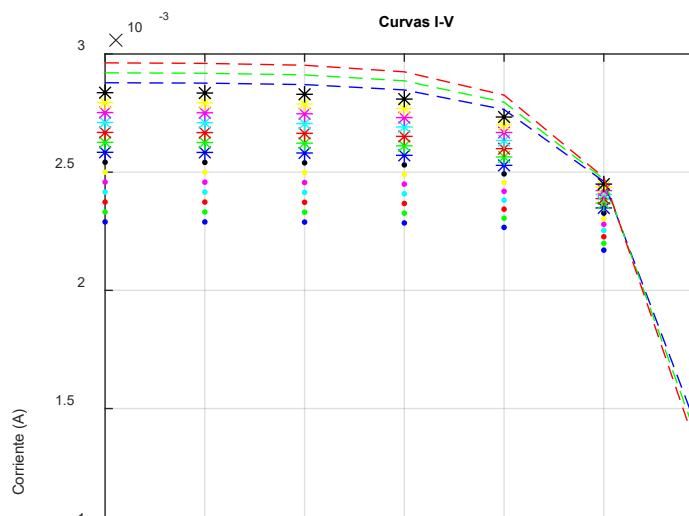
Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura N° 10. Curvas I-V para diferentes condiciones de irradiancia de celda desarrollada según Tin *et al.*, (2024)



Fuente: Elaboración propia (2025).

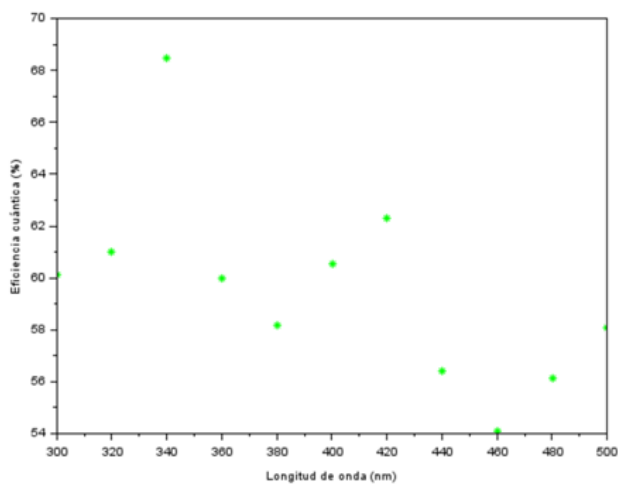
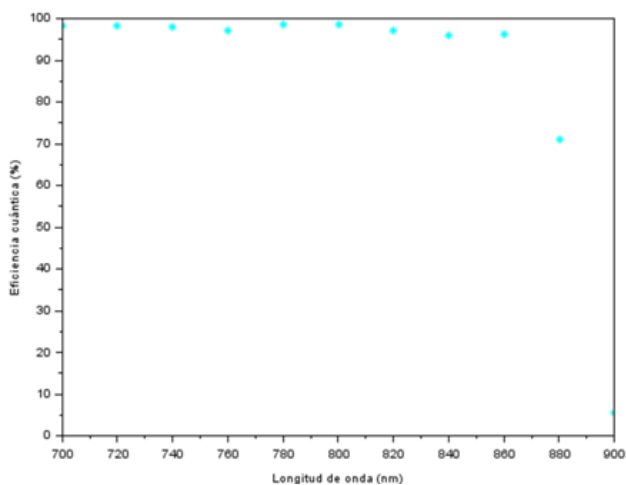
Figura N° 11. Curvas I-V para diferentes condiciones de temperatura de celda desarrollada según Tin *et al.*, (2024)



Fuente: Elaboración propia (2025).

Resolviendo la expresión (2) en Scilab, fue posible verificar la eficiencia cuántica de las celdas descritas en Xutao *et al.*, (2023) y France *et al.*, (2022), como se muestra en la Figura N° 12.

Figura N° 12. Eficiencia cuántica de las celdas desarrolladas en Xutao *et al.*, (2023) (izquierda) y France *et al.*, (2022) (derecha) en función de la longitud de onda



Fuente: Elaboración propia (2025).

Conclusión

Se ha puesto a prueba en laboratorio varias soluciones en *software*, basadas en una plataforma libre y con estándares abiertos como es Scilab, permitiendo evaluar en tiempo real el comportamiento y eficiencia de celdas fotovoltaicas de tecnología cuántica. Los resultados se aplicaron a tres modelos de celdas fotovoltaicas de pozo cuántico, de distintos laboratorios de procedencia, conociendo sus parámetros principales, lo que permitió obtener las curvas I-V, P-V, FF con una precisión del 99.99 %, así como la eficiencia de las mismas. Esto permite, la optimización de celdas de tecnología cuántica, en un entorno real, según las condiciones geográficas y los parámetros asociados: irradiancia, temperatura, entre otros, para así mejorar la eficiencia en la generación eléctrica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (Mincyt) y al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Fonacyt), por los recursos que permitieron mostrar los resultados de este trabajo.

Referencias

Núñez, H., et al., (2018). *Highly Accurate and Inexpensive Computational Tool for Improving Photovoltaic Arrays Performance and Efficiency Measures*. En Proceedings of the IEEE 2018 Open Innovations Conference (OI), Johannesburg, Sudáfrica. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/OI.2018.8535899>.

Núñez, H., et al., (2019). *Low-Cost and Accurate Computational System for Efficiency Measures over Photovoltaic Arrays*. En Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. 4(5), 39-45. Disponible en: <https://doi.org/10.25046/aj040505>.

Tin, H., et al., (2024). *Analysis of Third-Generation Solar Cell Design with Physics of Semiconductor*. En Journal of Novel Engineering Science and Technology, 3(02). Disponible en: <https://doi.org/10.56741/jnest.v3i02.525>.

Xutao, Y., et al., (2023). *High Efficient Solar Cell Based on Heterostructure Constructed by Graphene and GaAs Quantum Wells*. En Advanced Science, 10, 2204058. Disponible en: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/advs.202204058>.

France, R., et al., (2022). *Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices*. En Joule 6, 1121-1135. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.024>.

Quai, M., et al., (2022). *Accurate Three-Diode model estimation of Photovoltaic modules using a novel circle search algorithm*. En Ain Shams Engineering Journal de Science Direct, 13. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101824>.