






Theoretical calculation of energy conversion efficiency of an InGaN/InN quantum well intermediate band bifacial solar cell






Herman Chavarry Mori, Student¹ , Johel Sobrados Usquiano, Student² , Angel E. Obispo, Dr.³ ,
Joel Villavicencio Gastelu Dr.⁴  y Andrés G. Jirón, Msc.⁵ 
^{1,5} Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú,
aobispo@utp.edu.pe

Abstract— In this work, a simple mathematical model is introduced for the theoretical evaluation of energy conversion efficiency in InGaN/GaN/InGaN intermediate-band bifacial solar cells, highlighting the impact of well size and effective albedo. The variation in the efficiency with the width of the quantum well and under different albedo conditions, including green grass and pavement, was investigated. The results show that the solar cell efficiency can reach 65% for green grass albedo and 52% for pavement albedo at an optimal well width, surpassing the efficiency under standard AM 1.5G conditions without albedo reflection. This study underscores the effect of effective albedo on the conversion efficiency of bifacial solar cells and provides insights for the design and optimization of these systems in urban environments.

Keywords—Bifacial solar cell, Intermediate band, Quantum well

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Cálculo teórico de la eficiencia de conversión de energía de una celda solar bifacial de banda intermedia de pozo cuántico InGaN/InN

Herman Chavarri Mori, Estudiante¹ , Johel Sobrados Usquiano, Estudiante² , Angel E. Obispo, Dr.³ ,
Joel Villavicencio Gastelu Dr.⁴  y Andrés G. Jirón, Mg.⁵ 
^{1,5} Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú,
aobispo@utp.edu.pe

Resumen— En este trabajo se introduce un modelo matemático simple para la evaluación teórica de la eficiencia de conversión de energía en celdas solares bifaciales de banda intermedia de pozo cuántico InGaN/InN/InGaN, destacando el impacto del tamaño del pozo y el albedo efectivo. Se investiga cómo varía la eficiencia con el ancho del pozo cuántico y bajo diferentes condiciones de albedo, incluyendo pasto verde y pavimento. Los resultados muestran que la eficiencia de la celda solar puede alcanzar hasta un 65% para albedo de pasto verde y un 52% para albedo de pavimento a un ancho de pozo óptimo, superando la eficiencia bajo condiciones estándar AM 1.5G sin reflexión del albedo. Este estudio subraya el efecto que el albedo efectivo tiene sobre la eficiencia de conversión de celdas solares bifaciales, proporcionando insights para el diseño y la optimización de estos sistemas en entornos urbanos.

Palabras—Celda solar bifacial, Banda intermedia, Pozos cuánticos.

I. INTRODUCCIÓN

A. Contextualización y Planteamiento del Problema

En la actualidad, la producción en masa de celdas solares ha experimentado un notable impulso en la industria fotovoltaica, promoviendo así la generación de energía limpia. Parte de este avance se atribuye a la transición hacia el uso de celdas de doble capa en lugar de las convencionales celdas de silicio cristalino [1]. Las celdas solares de emisor pasivado y contacto trasero (siglas en inglés, PERC), fueron uno de los primeros prototipos comerciales de celdas solares bifaciales, cuya disminución en los costos de fabricación ha propiciado el resurgimiento comercial de los modernos paneles fotovoltaicos bifaciales.

En resumen, una celda solar bifacial captura la radiación solar tanto desde su parte frontal como posterior, lo que le permite aprovechar tanto la luz solar directa como la reflejada desde superficies cercanas [2]. Esta capacidad dual de absorción a menudo se traduce en una generación de energía más eficiente que la de las celdas solares convencionales (monofaciales), llegando incluso a alcanzar valores sorprendentes de hasta 50 %. En ese contexto, en [3] se ha demostrado que las ganancias de potencia en sistemas bifaciales varían entre el 40% y el 70% en días nublados, dependiendo de la altura sobre el suelo. Sin embargo, determinar la eficiencia de una celda solar bifacial fuera del entorno experimental resulta complicado debido a que factores como el albedo del entorno y otras características propias de las celdas solares influyen significativamente en su rendimiento.

B. Revisión Literaria

Investigaciones recientes en tecnologías fotovoltaicas sugieren que las simulaciones computacionales son útiles para mejorar el rendimiento de los dispositivos existentes y perfeccionarlos, evitando así costosos procesos de fabricación. Por ejemplo, en [4], se emplearon simulaciones computacionales para evaluar la eficacia de una celda solar de perovskita, resaltando la precisión de los resultados obtenidos en relación con los datos experimentales. Además, en [5], se subraya la valiosa contribución de modelos matemáticos y computacionales en el avance de celdas solares que poseen características deseables, como ser livianas, duraderas, flexibles, eficientes y de bajo costo. Estos estudios evidencian la utilidad de emplear herramientas que no requieran experimentación directa para comprender el comportamiento de estos dispositivos fotovoltaicos.

Por otro lado, en [6], se realiza un análisis del rendimiento de estas celdas, destacando su capacidad de aprovechar la radiación solar tanto desde el frente como desde la parte posterior. Esta investigación abarca diversas metodologías de evaluación, subrayando la importancia de la simulación computacional para comprender y potenciar su eficiencia. Asimismo, se exploran las tendencias más recientes en tecnologías y diseños, ofreciendo una perspectiva crítica de la investigación en la energía solar fotovoltaica. Por otra parte, en [7], se aborda de manera exhaustiva las simulaciones de rendimiento en relación con los factores de diseño, proporcionando una perspectiva detallada y equilibrada de los retos y oportunidades en la aplicación de tecnologías bifaciales en sistemas fotovoltaicos. El estudio resalta la importancia de considerar no solo las simulaciones teóricas, sino también los factores prácticos de diseño al evaluar el rendimiento de los módulos bifaciales en aplicaciones del mundo real.

En [8], la investigación resalta la relevancia de tomar en cuenta factores como el diseño de inclinación fija o seguidores de un solo eje, así como la ubicación geográfica, al analizar tanto el rendimiento como la rentabilidad de estas instalaciones. Se abordan aspectos clave vinculados con la eficiencia de captura bifacial en diversos escenarios, proporcionando una visión completa de las consideraciones técnicas y económicas que inciden en la implementación exitosa de sistemas fotovoltaicos bifaciales a gran escala.

Siguiendo los antecedentes mencionados, en la presente investigación se pretende idear una metodología capaz de

incorporar las llamadas bandas intermedias a una celda solar bifacial. La idea de introducir bandas intermedias para incrementar la eficiencia de conversión de energía de las celdas solares se origina a finales de los años 80, con los estudios de Burnham y Duggan [9]. Los autores demostraron que, mediante el uso de puntos cuánticos distribuidos, es posible mejorar la capacidad de absorción de fotones en todo el espectro solar, logrando una eficiencia de 63.1%. Las celdas solares con puntos cuánticos (QDSC) son prometedoras debido a sus propiedades cuánticas, que permiten ajustar la absorción de luz al modificar el tamaño de los puntos cuánticos, lo cual resulta esencial para optimizar la absorción de fotones en el espectro solar.

Por otra parte, existe un enfoque alternativo para incorporar una banda intermedia entre las bandas de energía en una celda solar, el cual consiste en la introducción de placas semiconductoras capaces de generar pozos cuánticos en el diagrama de energías. En relación con esto, en [10], se analizó la eficiencia de la energía fotovoltaica de una celda de banda intermedia con múltiples pozos cuánticos, considerando la inclusión de impurezas semiconductoras InGaN/GaN en la región intrínseca. Se utilizó una metodología basada en cálculos numéricos, revelando que la eficiencia de la celda aumentaba para ciertas condiciones estructurales. En el estudio [11], se exploró la eficiencia teórica de celdas solares de banda intermedia con el uso de puntos cuánticos. Para ello, se empleó un enfoque matemático fundamentado en la ecuación de Kronig-Penney [6], lo que facilitó la determinación de los dos estados energéticos más bajos y, por ende, la identificación de los límites de la banda intermedia creada por el GaAs. La eficacia en la conversión de energía se calculó y se examinó cómo es afectada por la concentración de As, el tamaño de los puntos cuánticos y su separación. En el documento [12], se investigó la capacidad de conversión fotovoltaica de celdas solares con una única banda intermedia, integrando una configuración de múltiples pozos cuánticos dobles GaAs/InAs/GaAs/InAs/GaAs dentro de una estructura p-i-n tradicional. Mediante la solución de la ecuación de Schrödinger con dos impurezas utilizando el método de Numerov, se estimó la amplitud de la banda intermedia y se hallaron soluciones para los dos estados de menor energía. Los hallazgos de ambas investigaciones señalaron un incremento en la eficiencia bajo ciertas condiciones de los parámetros analizados.

En relación con la inclusión de bandas intermedias en celdas bifaciales, resulta evidente que podría conducir a un aumento en la eficiencia energética. Sin embargo, es importante señalar que este escenario aún se encuentra en proceso de investigación, especialmente en lo que respecta a las simulaciones aplicadas a celdas solares bifaciales [13].

C. Contribución

El presente trabajo propone una metodología teórico-computacional para optimizar la eficiencia de conversión energética en este tipo de celdas. Una de las contribuciones más significativas de esta investigación es la creación de un modelo matemático que permite representar de manera precisa las características de las celdas solares bifaciales con banda

intermedia. Este modelo proporciona una herramienta invaluable para comprender el funcionamiento de estas celdas y explorar formas de mejorar su eficiencia. Al desarrollar este modelo, el objetivo principal es mostrar una representación simple y efectiva que capture los aspectos clave de estas celdas, permitiendo así realizar simulaciones detalladas y precisas. Además, al proporcionar una representación matemática clara, se establece una sólida base para futuras investigaciones en el campo de la energía solar.

II. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Para describir la dinámica de los fotoelectrones en una celda solar bifacial con una banda intermedia, se utiliza un modelo de celda que incorpora una placa semiconductor de InN de grosor L , posicionada simétricamente en una matriz de InGaN a lo largo de la dirección [100], como se ilustra en la Fig. 1. La banda intermedia surge debido a estados adicionales que quedan atrapados en el pozo potencial, los cuales son inducidos por la inclusión de InN. Esta estructura se identifica como Celda Solar Bifacial de Banda Intermedia de Pozo Cuántico (QW-IBBSC, por sus siglas en inglés).

Para evaluar el rendimiento de una celda solar, específicamente su eficiencia de conversión de energía (η), es esencial tener en cuenta los siguientes criterios [10-12]:

- Cada fotón que llega a la celda solar debe generar únicamente un par electrón-hueco.
- La celda debe ser lo suficientemente gruesa y extensa para capturar todos los fotones emitidos por el sol.
- La recombinación debería producirse principalmente por medio de transiciones radiativas, asegurando así la máxima eficiencia de conversión en el menor tiempo posible.
- Debe haber una absorción de fotones sin superposición en dos de las tres bandas.
- Se asumió que la temperatura de la superficie solar era $T_s = 6000$ K, mientras que la temperatura ambiente era $T_r = T_c = 300$ K.

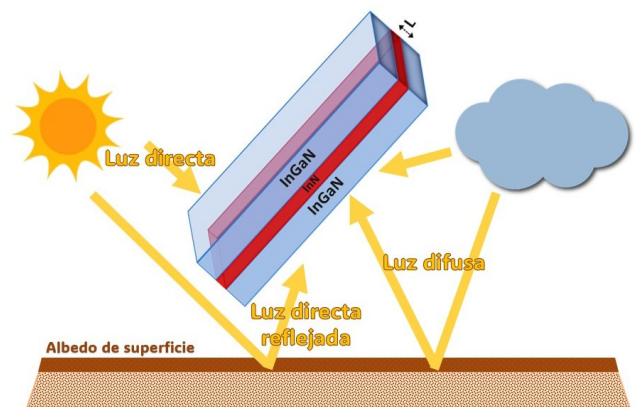


Fig. 1 Celda solar bifacial de banda intermedia de pozo cuántico InGaN/InN/InGaN.

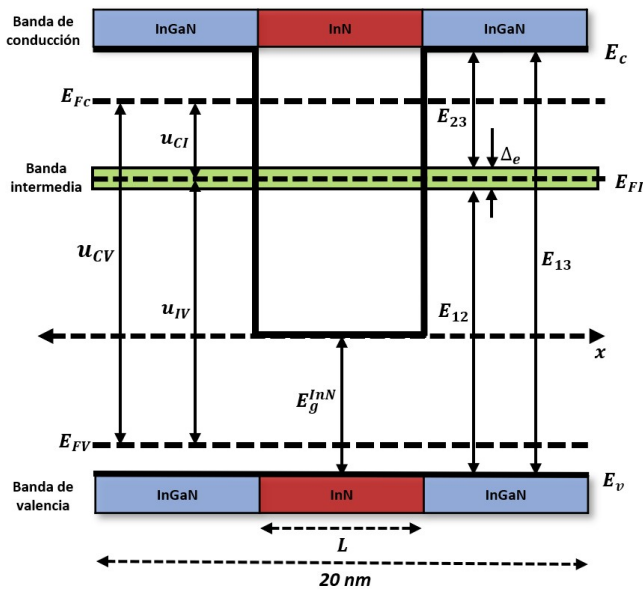


Fig. 2 Diagrama de bandas de energía del QW-IBBSC InGaN/InN/InGaN en la dirección cristalográfica [100].

Importantes estudios teóricos [14,15] y experimentales [16-18], destacan que las películas delgadas inmersas en un material semiconductor son capaces de generar niveles de energía discretos, tanto para los estados electrónicos, como para los de hueco. En esta investigación, se adopta una metodología que introduce un enfoque teórico no antes aplicado en el contexto del estudio de celdas solares bifaciales con bandas intermedias. Esta metodología propone el confinamiento efectivo de estados electrónicos adicionales, logrado mediante la incorporación de un pozo cuántico de InN. Esta configuración conduce a la creación de una banda intermedia adicional, que sirve como un escalón energético que permite pasar entre las bandas de conducción y valencia (como se ilustra en la Fig. 2), con menos gasto de energía. Este pozo cuántico, cuyo ancho se denota por L , es incorporado entre dos barreras de potencial de anchura finita. Estas barreras están formadas por la matriz de InGaN.

III. FORMALISMO GENERAL

A. Cálculo del albedo efectivo

Como se mencionó anteriormente, las celdas solares bifaciales aprovechan la luz desde ambos lados. La cara frontal se expone a la radiación global del espectro AM 1.5G (ASTM G-173-03) [19], con una potencia normalizada de 1000 W/m². Por otro lado, la cara posterior capta la luz reflejada por la superficie situada debajo, un fenómeno conocido como albedo. En este estudio, asumimos que el albedo del suelo es uniforme e independiente del espectro, es decir, el suelo presenta un albedo efectivo (R_A). El albedo efectivo se puede determinar a partir de su albedo espectral $R(\lambda)$ de la siguiente manera:

$$R_A = \frac{\int_0^\infty R(\lambda) \cdot AM\ 1.5G(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty AM\ 1.5G(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

El albedo espectral describe cómo la reflectividad de una superficie varía con diferentes longitudes de onda (λ) del espectro luminoso. Para este estudio, seleccionamos dos superficies comunes: pasto verde y pavimento de construcción, utilizando datos de la Biblioteca Espectral ASTER, versión 2.0, del Jet Propulsion Laboratory [20]. El perfil de cada albedo espectral, en función de λ es mostrado en la Fig. 3.

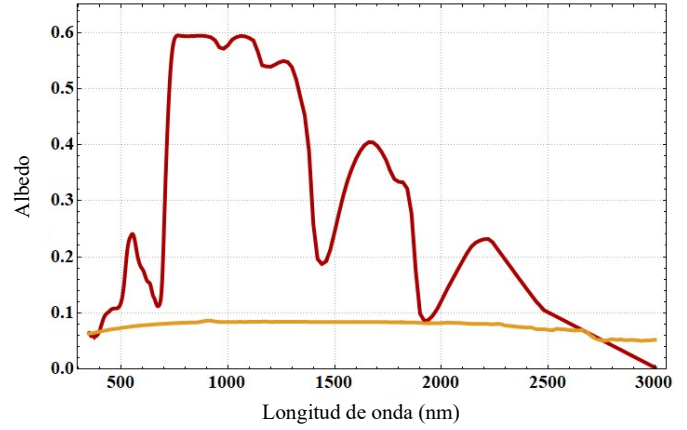


Fig. 3 Albedo espectral del pasto verde (línea marrón) y del pavimento (línea amarilla).

Optamos por el albedo efectivo para simplificar el análisis, permitiendo una evaluación general de la reflectividad sin la complejidad de desglosarla por longitudes de onda específicas, lo cual resulta conveniente para aplicaciones prácticas y comparaciones directas entre superficies. De esta forma, usando la ecuación (1), se obtuvieron los siguientes valores:

Tipo de superficie	Albedo efectivo
Pavimento	0.079
Pasto verde	0.347

B. Descripción del modelo

La dinámica de un solo fotoelectrón en presencia de estados adicionales en la banda intermedia se describe mediante la ecuación de Schrödinger, ($H\Psi = E\Psi$), donde (Ψ) es la función de onda y (E) representa la energía. En este análisis, el Hamiltoniano (H) incorpora los efectos de la banda intermedia del InN, ajustando así las interacciones electrónicas del material. Este Hamiltoniano se define de la siguiente manera:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*} \frac{d}{dx} \right) + V(x) \quad (2)$$

donde \hbar es la constante de Planck reducida y m^* es la masa efectiva del electrón dentro de la celda. Dado que el pozo cuántico de la unión InGaN/InN se orienta a lo largo de la dirección cristalográfica [100], el potencial efectivo $V(x)$

depende exclusivamente de la coordenada x . La zona intrínseca de InN está representada por un pozo potencial cuadrado finito de ancho L , equivalente al grosor de la placa de InN. Este potencial está definido como:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_0, & |x| > \frac{L}{2}, \\ V(x) &= 0, & |x| \leq \frac{L}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

Aquí V_0 es la constante que indica el desplazamiento de la banda de conducción, reflejando la profundidad del pozo cuántico de InN. Según la Fig. 2, esta profundidad es proporcional a la diferencia entre las energías de la banda prohibida E_g del InGaN y InN (ver Tabla 1):

$$V_0 = g \left(E_g(\text{InGaN}) - E_g(\text{InN}) \right) \quad (4)$$

donde g representa la razón de bandas, que para el caso de electrones se considera $g = 0.7$. Por otro lado, para comprender la distribución de la masa efectiva en el dispositivo, es necesario definir m^* según la posición relativa a las placas semiconductoras. Según la Fig. 2, se especifica que:

$$\begin{aligned} m^* &= m_g^*(\text{InGaN}), & \text{para } |x| > \frac{L}{2}, \\ m^* &= m_g^*(\text{InN}), & \text{para } |x| \leq \frac{L}{2}, \end{aligned} \quad (5)$$

Es importante señalar que la estructura de la ecuación (2) impide la obtención de soluciones exactas para el espectro de energía, lo cual requiere la utilización de técnicas de cálculo numérico para resolverla. Uno de los métodos más usados es el método de Numerov [12], que transforma la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo en una versión discretizada. En este estudio, determinamos el número de pasos, N , mediante el siguiente cálculo:

$$N = \frac{x_{max} - x_{min}}{s}, \quad (6)$$

donde $x_{max} = +10 \text{ nm}$, $x_{min} = -10 \text{ nm}$, y un valor de paso de $s = 0.01 \text{ (nm)}$.

C. Densidad de corriente y la eficiencia de conversión fotovoltaica

La densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) está directamente relacionada con la diferencia entre los fotones absorbidos y los emitidos por el dispositivo. En nuestro análisis, se considera la distribución espectral de la radiación solar, evaluando el contenido energético en cada banda de longitud de onda específica. Se adopta un modelo de absorción tipo función escalón, donde no se absorben fotones con energías inferiores a la brecha de banda, mientras que se logra una absorción del 100% para aquellos fotones con energías superiores a esta. Adicionalmente, considerando un albedo efectivo, el número de fotones por encima de la brecha de banda se incrementa por un

factor $(1+R_A)$, lo que resulta en un aumento de la densidad de corriente de cortocircuito. Este incremento tiene, a su vez, un impacto indirecto en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y en el factor de llenado (FF).

De esta forma, en base al diagrama de bandas de energía ilustrado en la Fig. 2, la densidad de corriente de cortocircuito J_{sc} de una QW-IBBSC se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{J_{sc}}{|e|} &= [N(E_{13}, \infty, T_s, 0) - N(E_{13}, \infty, T_c, u_{CV})] + \\ &[N(E_{23}, E_{12}, T_s, 0) - N(E_{23}, E_{12}, T_c, u_{CI})], \end{aligned} \quad (7)$$

donde u_{CV} y u_{CI} son los potenciales químicos relacionados con las transiciones entre la banda de valencia (E_v) y la banda de conducción (E_c) y entre la banda de conducción y la banda intermedia (BI), respectivamente. La primera parte entre corchetes en la ecuación (7) refleja la cantidad de fotones generados en una célula solar tradicional, resultado de la transición directa de los fotoelectrones de la banda de valencia a la banda de conducción. En contraste, la segunda parte contenida en corchetes representa la densidad de fotones producida por la transición de electrones desde la banda intermedia hacia la banda de conducción.

Este flujo de fotones $N(E_a, E_b, T, u)$ se puede calcular utilizando la fórmula de Roosbroeck-Shockley [22]:

$$N(E_a, E_b, T, u) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_b}^{E_a} \frac{E^2 (1+R_A) dE}{\exp\left[\frac{E-u}{k_B T}\right] - 1}, \quad (8)$$

donde E_a y E_b representan las fronteras de la banda de absorción, c es la velocidad de la luz, u es el potencial químico, y k_B es la constante de Boltzmann. El término R_A es el albedo efectivo y representa la fracción de la radiación que es reflejada por la superficie en comparación con la radiación total incidente, teniendo un impacto directo en la eficiencia de absorción y, por ende, en la eficiencia general de la celda solar bifacial.

Por otro lado, a partir de la Fig. 2, es posible identificar las relaciones entre los potenciales químicos:

$$u_{CV} = u_{CI} + u_{IV}, \quad (9)$$

donde u_{CV} representa el potencial químico vinculado a la transición entre las bandas de valencia y conducción. Adicionalmente, se pueden establecer las correlaciones entre los potenciales u_{CI} y u_{IV} con las energías E_{12} y E_{23} :

$$u_{CI} = E_{23} + 0.5\Delta_e - E_c + E_{FC}, \quad (10)$$

$$u_{IV} = E_{12} + 0.5\Delta_e - E_{FV} + E_v. \quad (11)$$

Aquí, Δ_e representa el ancho de la banda intermedia, mientras que E_{FC} y E_{FV} representan las energías de los niveles cuasi-

Fermi en las bandas de conducción y valencia, respectivamente. Al mismo tiempo, estas energías pueden calcularse utilizando las siguientes expresiones:

$$E_c - E_{FC} = k_B T \cdot \ln\left(\frac{N_c}{n}\right), \quad (12)$$

$$E_{FV} - E_v = k_B T \cdot \ln\left(\frac{N_v}{p}\right), \quad (13)$$

donde N_c y N_v son las densidades de partículas en las bandas de conducción y valencia, respectivamente. Las concentraciones de electrones (n) y huecos (p) se dan en [17]:

$$n = N_c \cdot \exp\left(-\frac{g\Delta_e}{k_B T_c}\right), \quad (14)$$

$$p = N_v \cdot \exp\left(-\frac{(1-g)\Delta_e}{k_B T_c}\right). \quad (15)$$

Obsérvese que los valores de E_{13} , E_{12} , y E_{23} son necesarios tanto en la Ecuación (10) como en la (11) para calcular los potenciales efectivos y la densidad de corriente de cortocircuito J_{sc} en la ecuación (7). Conforme a la Figura 2, se establece que:

$$E_{13} = E_{12} + E_{23} + \Delta_e, \quad (16)$$

donde E_{13} corresponde a la brecha de energía E_g de la matriz de InGaN. Además:

$$E_{12} = E_g(\text{InN}) + E_l, \quad (17)$$

donde $E_g(\text{InN})$ representa la brecha de energía de InN (ver Tabla 1) y E_l es el límite inferior de la banda intermedia (ver Fig. 2), que, junto con el límite superior E_u , permite determinar el ancho de la banda intermedia Δ_e , de la siguiente manera:

$$\Delta_e = E_u - E_l. \quad (18)$$

Como se indicó anteriormente, E_u y E_l se calcularán numéricamente resolviendo la ecuación de Schrödinger (1). De esta forma, siguiendo las ecuaciones (7) a (18), es posible calcular el valor de J_{sc} .

Por otro lado, el voltaje de circuito abierto V_{oc} está relacionado a J_{sc} , a través de la siguiente ecuación:

$$V_{oc} = \frac{kT}{|e|} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right), \quad (19)$$

donde J_0 (mA/cm^2) es la densidad de corriente de saturación, y es dada por siguiente expresión [23]:

$$J_0 = 1.5 \cdot 10^8 \cdot e^{-\frac{V_0}{k_B T_c}}. \quad (20)$$

En este contexto, la intensidad de la luz en la QW-IBBSC se define por el número de soles. Un sol, o un factor de concentración solar de $f_s = 1$, representa la radiación estándar, que es luz no concentrada en la superficie de la atmósfera terrestre. No obstante, aquí analizamos las eficiencias del QW-IBBSC bajo condiciones de luz completamente concentrada, que corresponde a un factor de concentración de $f_s = 1/n_s = 46296$ [24]. Bajo estas condiciones, la densidad de potencia incidente alcanza un valor de $P_{in} = f_s \cdot n_s \cdot \sigma T_s^4 = f_s \cdot 1587.2 \text{ W}/\text{m}^2$, donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y $n_s = 2.16 \times 10^{-5}$ es un factor geométrico.

Finalmente, el factor de llenado (FF) puede determinarse como una función dependiente tanto del voltaje como de la temperatura de la celda [25,26]:

$$FF = \frac{\frac{qV_{oc}}{k_B T} - \ln\left(\frac{qV_{oc}}{k_B T} + 0.72\right)}{1 + \frac{qV_{oc}}{k_B T}}. \quad (21)$$

De esta forma, es posible obtener la eficiencia de conversión de energía fotovoltaica para una QW-IBBSC de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{f_s \cdot 1587.2}. \quad (22)$$

Note que, al integrar el efecto del albedo efectivo en el análisis, la eficiencia de la celda solar puede verse automáticamente influenciada de manera positiva. Este fenómeno se debe a que el albedo efectivo incrementa la cantidad de luz reflejada hacia la celda, mejorando así la disponibilidad de fotones para generar pares electrón-hueco. Este aumento en la generación de carga no solo potencia la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), sino que también puede mejorar la tensión de circuito abierto (V_{oc}) y el factor de llenado (FF), contribuyendo todos estos factores a una mayor eficiencia de conversión de energía solar. Por lo tanto, el albedo efectivo actúa como un multiplicador en la ecuación de eficiencia, amplificando el rendimiento general de la celda solar sin necesidad de modificar otros parámetros físicos o químicos de la misma.

En la sección siguiente, comparamos la eficiencia de conversión energética teniendo en cuenta el albedo efectivo de dos superficies específicas: pasto verde ($R_A = 0.347$) y pavimento ($R_A = 0.079$). Estos resultados se contrastarán con la eficiencia obtenida bajo condiciones AM 1.5G ($R_A = 0$), donde la eficiencia se evalúa únicamente con base en la luz incidente en el lado frontal de la celda solar, excluyendo cualquier contribución de luz reflejada hacia el lado posterior o la recaptura de fotones no absorbidos inicialmente.

TABLA I
FÓRMULAS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS
ELECTRÓNICOS.

Parámetro Electrónico	Fórmula
Brecha de energía ($In_yGa_{1-y}N$) y : concentración de N	$E_g(InGaN) = yE_g(InN) + (1 - y)E_g(GaN) - 1.43x(1 - y)$
Masa efectiva del electrón ($In_yGa_{1-y}N$)	$m(InGaN) = ym^*(InN) + (1 - y)m^*(GaN)$
Brecha de energía (InN)	$E_g(InN) = 0.78 \text{ eV}$
Brecha de energía (GaN)	$E_g(GaN) = 3.42 \text{ eV}$
Masa efectiva del electrón (InN)	$m^*(InN) = 0.05 m_0$
Masa efectiva del electrón (GaN)	$m^*(GaN) = 0.20 m_0$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este estudio, nuestro objetivo principal es evaluar la eficiencia de conversión de energía de la celda solar bifacial de banda intermedia de pozo cuántico GaN/InGaN/GaN, considerando el tamaño de la celda $L = 10 \text{ nm}$ y su concentración y . Antes de discutir los resultados obtenidos en términos de eficiencia de la QW-IBBSC, es esencial analizar los cálculos numéricos relacionados con el ancho de banda intermedia y la densidad de corriente de cortocircuito.

Como se mencionó previamente, la evaluación del ancho de la banda intermedia es crucial en el análisis realizado en este estudio. Según los hallazgos reportados en la referencia [11,12], la existencia del ancho de esta banda facilita la captura de un mayor número de estados localizados de fotoelectrones, lo que se traduce en un aumento de la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}). Por lo tanto, tal incremento jugaría un papel significativo en la mejora de la eficiencia de conversión de energía (η) en cualquier celda solar, incluyendo celdas bifaciales, como se verifica en la ecuación (20).

En la Fig. 4 se examina la variación del ancho de la banda intermedia (Δ_e) en relación con el ancho del pozo cuántico (L) para dos concentraciones representativas de indio, específicamente $y = 0.3$ y $y = 0.6$. Cabe destacar que este ancho de banda está determinado exclusivamente por las propiedades del material y la geometría de la celda solar, no viéndose afectado por el tipo de albedo. Además, se observa que el ancho de la banda intermedia, Δ_e , aumenta con la concentración hasta alcanzar un pico máximo. Para una concentración de $y = 0.3$, este pico se encuentra en $L \approx 5.0$

nm, mientras que para $y = 0.6$, el máximo se sitúa en torno a $L \approx 6.5 \text{ nm}$. Después de alcanzar estos puntos, el ancho de banda para ambas concentraciones empieza a decrecer progresivamente, sugiriendo que tiende a anularse para longitudes mayores a 12 nm . Este comportamiento indica que, al disminuir los efectos característicos de la banda intermedia por un aumento en L , una QW-IBBSC empieza a comportarse de manera similar a una celda bifacial tradicional cuando se utiliza una placa semiconductor de gran espesor.

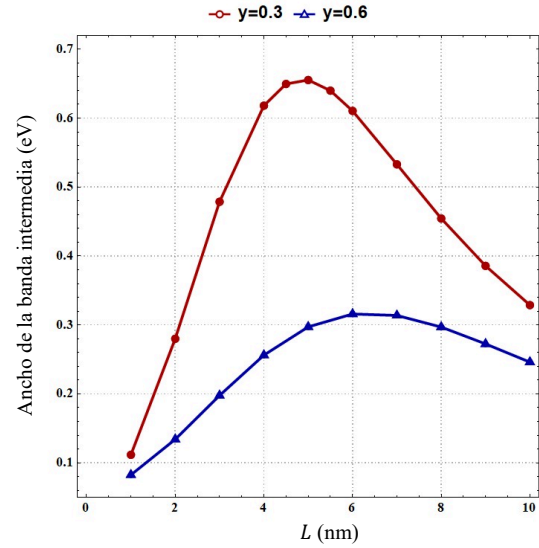


Fig. 4 Ancho de banda intermedia Δ_e como función del ancho del pozo cuántico (L), para concentraciones de indio $y = 0.3$ e $y = 0.6$.

Con respecto a la eficiencia de conversión de energía (η), la Fig. 5 examina su variación con el ancho del pozo cuántico (L) para concentraciones de $y = 0.3$ (panel a) y $y = 0.6$ (panel b). Se evalúa el impacto del albedo de pasto verde (curva roja) y pavimento (curva azul), comparándolos con las condiciones estándar AM 1.5G (curva verde). Específicamente, en la Fig. 5a, la eficiencia η alcanza 62 % y 51 % para pasto verde y pavimento, respectivamente, a $L = 1 \text{ nm}$. Estos valores superan a los 49% obtenidos bajo AM 1.5G sin reflexión del albedo, considerando el mismo ancho L . Los correspondientes valores de la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y el factor de llenado (FF), son mostrados en las Tablas II-V. De manera similar, la Figura 5b muestra incrementos en η , registrando 27.5 % y 22 % para pasto verde y pavimento, respectivamente, a $L = 1 \text{ nm}$, superando el valor de 20 % obtenido sin reflexión del albedo bajo AM 1.5G. Además, note que, para una concentración $y = 0.3$, las curvas decrecen exponencialmente con el incremento de L , convergiendo a valores altos de L para una placa de InN de espesor considerable. En el caso de la concentración $y = 0.6$ (ver Fig. 5b), se observa la misma tendencia, con la particularidad de que, en este caso, las curvas de eficiencias se encuentran más próximas una de la otra. En resumen, la eficiencia de conversión de energía en la QW-IBBSC con

albedo de pasto verde es mayor en todos sus puntos que en la del pavimento, y esta a su vez es superior al caso AM 1.5G.

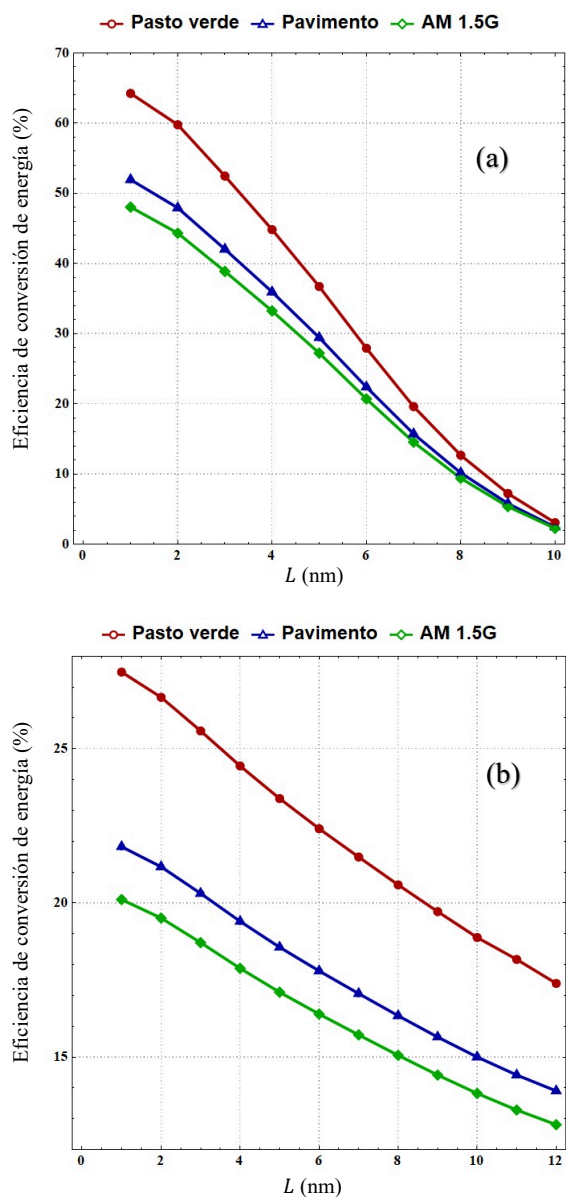


Fig. 5 Eficiencia de conversión de energía η como función del ancho del pozo cuántico (L), considerando concentraciones de indio $y = 0.3$ (panel a) y $y = 0.6$ (panel b).

Es relevante destacar que, aplicando esta metodología y omitiendo los efectos del albedo (es decir, en el escenario AM 1.5G), se logran mejorar los índices de eficiencia previamente reportados por otras celdas solares monofaciales que incorporan pozos cuánticos y se basan en InGaN. Por ejemplo, según se reporta en la referencia [27], una celda QW-IBSC de InGaN/GaN alcanza una eficiencia del 61%, mientras que mediante nuestro modelo se puede alcanzar y hasta superar el 65% de eficiencia, especialmente en concentraciones bajas. En

contraste, al considerar el albedo de pasto verde, las eficiencias que se obtienen indican una mejora notable respecto a los datos comparativos de la referencia [28].

Para finalizar, se presenta parte la data usada para la realización de las figuras, incluyendo la de los parámetros más relevantes. Esto es mostrado en las Tablas II-V.

TABLA II
ALGUNOS DATOS DE LA SIMULACIÓN CONSIDERANDO EL ALBEDO DE PASTO VERDE ($y = 0.3$)

L (nm)	Eficiencia (η)	J_{sc} (kA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF
1	64.2474	5.36773	0.99727	0.881943
5	36.7227	3.11652	0.98321	0.880655
9	7.22898	0.642931	0.942392	0.876735

TABLA III
ALGUNOS DATOS DE LA SIMULACIÓN CONSIDERANDO EL ALBEDO DE PAVIMENTO ($y = 0.3$)

L (nm)	Eficiencia (η)	J_{sc} (kA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF
1	51.9516	4.36621	0.99193	0.881458
5	29.4394	2.51409	0.977656	0.880138
9	5.79393	0.518684	0.936839	0.87618

TABLA IV
ALGUNOS DATOS DE LA SIMULACIÓN CONSIDERANDO EL ALBEDO DE PASTO VERDE ($y = 0.6$)

L (nm)	Eficiencia (η)	J_{sc} (kA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF
1	27.4873	6.24105	0.416738	0.776603
5	23.385	5.36966	0.41285	0.775152
9	19.7184	4.58233	0.408749	0.773599

TABLA V
ALGUNOS DATOS DE LA SIMULACIÓN CONSIDERANDO EL ALBEDO DE PAVIMENTO ($y = 0.6$)

L (nm)	Eficiencia (η)	J_{sc} (kA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF
1	21.8223	5.03518	0.411186	0.774525
5	18.5624	4.33219	0.407298	0.773043
9	15.6489	3.69695	0.403197	0.771457

IV. CONCLUSIONES

Este estudio introduce un modelo matemático simple pero novedoso para evaluar la eficiencia de conversión de energía en celdas solares bifaciales de banda intermedia de pozo cuántico InGaN/GaN/InGaN. Los resultados obtenidos subrayan la importancia del ancho de la banda intermedia y la densidad de corriente de cortocircuito, destacando un incremento notable en la eficiencia con la reducción del ancho del pozo cuántico L . En particular, en la Fig. 5 se evidencia una mejora en la eficiencia hasta un 65% y 52% para albedos de pasto verde y pavimento, respectivamente, a un ancho de pozo cuántico de 1 nm, superando el 48% obtenido bajo condiciones estándar AM 1.5G sin reflexión del albedo.

Además, este análisis revela que el entorno, específicamente el albedo como el de pasto verde y pavimento, juega un papel significativo en la eficiencia de las celdas, con un efecto más pronunciado observado para el pasto verde. Estos hallazgos no solo superan las eficiencias previamente reportadas en celdas solares monofaciales que incorporan pozos cuánticos y se basan en InGaN, que alcanzan hasta un 61%, sino que también, mediante nuestro modelo, se puede alcanzar y hasta superar el 65% de eficiencia, especialmente en concentraciones bajas y bajo influencias de albedos favorables. Cabe destacar que los albedos de pasto verde y pavimento fueron escogidos únicamente para probar la aplicabilidad y la flexibilidad del modelo, subrayando que este puede adaptarse y aplicarse a cualquier tipo de superficie reflejante. Esto demuestra la versatilidad del modelo propuesto y su potencial para ser utilizado en una amplia gama de entornos y condiciones de albedo, ampliando significativamente su aplicabilidad en el diseño y optimización de celdas solares bifaciales.

Finalmente, es importante mencionar que, aunque el modelo actual utiliza el albedo efectivo para sus cálculos, un análisis más preciso se obtendría al emplear el albedo espectral. Esto permitiría una evaluación más detallada de cómo diferentes longitudes de onda reflejadas por diversas superficies impactan en la eficiencia de las celdas solares bifaciales. Sin embargo, la implementación y estudio del albedo espectral representa un desafío significativo y queda como una valiosa dirección para futuros trabajos. Este enfoque avanzado promete refinar aún más nuestra comprensión y capacidad para optimizar el rendimiento de las celdas solares en una variedad aún más amplia de entornos aplicativos.

REFERENCIAS

- [1] T. Dullweber, et al., "PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 24, no 12, pp. 1487-1498, 2016.
- [2] M. Hiroshi, "Radiation energy transducing device," US Patent 3278811 A, 11 de octubre, 1966.
- [3] C. E. Valdivia, et al., "Bifacial photovoltaic module energy yield calculation and análisis", *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, p. 1094-1099, 2017.
- [4] Iakobson, Olga D., et al. "A common optical approach to thickness optimization in polymer and perovskite solar cells." *Scientific Reports*, vol. 11.1, pp. 1-6, 2021.

- [5] Lewis, N. S. "Research opportunities to advance solar energy utilization." *Science*, vol. 351, pp. 6271, 2016.
- [6] T. S. Liang et al. "A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation." *Energy & Environmental Science* 12.1,116-148, 2019.
- [7] L. Kreinin, A. Karsenty, D. Grobeld, and N. Eisenberg, "PV systems based on bifacial modules: Performance simulation vs. design factors," *Proc. 2016 IEEE 43rd Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 2688-2691, 2016.
- [8] D. Chudinow, M. Klenk, and L. Eltrop. "Impact of field design and location on the technoeconomic performance of fixed-tilt and single-axis tracked bifacial photovoltaic power plants," *Solar Energy*, vol. 207, pp. 564-578, 2020.
- [9] K. W. J. Barnham, G. Duggan, "A new approach to high efficiency multi-band-gap solar cells", *Journal of Applied Physics*, vol. 67, no 7, pp. 3490, 1990.
- [10] Abboudi, Hassan, et al. "Impurity-related photovoltaic efficiency of (In, Ga) N/GaN quantum well-single intermediate band solar cell considering heavy hole impact", *Superlattices and Microstructures*, vol. 150, pp. 106756, 2021.
- [11] A. E. Obispo et al. (2021, 16-18 de febrero). "Theoretical estimation of the conversion efficiency of a GaAsP/GaAs quantum dots intermediate-band solar cell". 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, Buenos Aires, Argentina.
- [12] A. E. Obispo, C. Zuñiga Vargas, and W. C. Algoner, "Boosting Photovoltaic Efficiency in Double Quantum Well Intermediate Band-Solar Cells through Impurity Positioning", *Energies*, vol. 16, no 23, pp. 7722, 2023.
- [13] X. Guo, et al., "Highly efficient interfacial layer using SILAR-derived Ag₂S quantum dots for solid-state bifacial dye-sensitized solar cells", *Materials Today Energy*, vol. 5, 320-330, 2017.
- [14] M. Paxman, et al., "Modeling the spectral response of the quantum well solar cell", *Journal of Applied Physics*, vol. 74, no 1, pp. 614-621, 1993.
- [15] N. G. Anderson, "Ideal theory of quantum well solar cells", *Journal of applied physics*, vol. 78, no 3, pp. 1850-1861, 1995.
- [16] M. Albaladejo-Siguan, et al., "Stability of quantum dot solar cells: A matter of (life) time", *Advanced Energy Materials*, vol. 11, no 12, pp. 2003457, 2021.
- [17] E. C. Cho, et al., "Silicon quantum dot/crystalline silicon solar cells", *Nanotechnology*, vol. 19, no 24, pp. 245201, 2008.
- [18] E. Vadiee, et al., "Evaluating the performance of InGaN/GaN multi-quantum-well solar cells operated at elevated temperatures via DC and small-signal AC analysis", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 58, no 10, pp. 101003, 2019.
- [19] ASTM G-173-03. *Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation* (American Society for Testing Materials (ASTM) International, West Conshohocken).
- [20] A.M. Baldridge, S. J. Hook, C. I. Grove, and G. Rivera, "The ASTER spectral library version 2.0", *Remote Sens Environ*, vol. 113, pp. 711-715, 2009.
- [21] M. Ryyan Khan and Muhammad A. Alam, "Thermodynamic limit of bifacial double-junction tandem solar cells", vol. 107, pp. 223502, 2015.
- [22] J. E. Parrott, "Radiative recombination and photon recycling in photovoltaic solar cells", *Solar energy materials and solar cells*, vol. 30, no 3, pp. 221-231, 1993.
- [23] P. Singh, and N. M. Ravindra, "Temperature dependence of solar cell performance-an analysis", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 101, pp. 36-45, 2012.
- [24] A.E.-M.M. Aly and A. Nas, "Theoretical performance of solar cell based on mini-bands quantum dots", *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no 11, 2014.
- [25] M.A. Green, "Solar cells: operating principles, technology, and system applications", Englewood Cliffs, 1982.
- [26] S. R. Díaz, "A generalized theoretical approach for solar cells fill factors by using Shockley diode model and Lambert W-function: A review comparing theory and experimental data", *Physica B: Condensed Matter*, vol. 624, pp. 413427, 2022.
- [27] Yuji Zhao, "Toward High Efficiency at High Temperatures: Recent Progress and Prospects on InGaNBased Solar Cells", *Materials Today Energy*, vol. 31, pp. 101229, 2023.

- [28] T. C. Russel, R. Saive and H. A. Atwater, "Thermodynamic efficiency limit of bifacial solar cells for various spectral albedos", IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE, pp. 1531-1536, 2017.