

# Anti-reflective coating of silver nanoparticles to improve the efficiency of ultra-thin amorphous silicon solar cells.

Hugo Velasquez Perez<sup>✉</sup>; Abraham Cayas Diaz<sup>✉</sup>; Luis Lopez Cabanillas<sup>✉</sup>; Carlos Castillo Correa<sup>✉</sup>

Faculty of Electrical and Electronic Engineering, National University of Engineering, Lima-Perú, [hugo.velasquez.p@uni.pe](mailto:hugo.velasquez.p@uni.pe), [abraham.cayas.d@uni.pe](mailto:abraham.cayas.d@uni.pe), [luis.lopez.c@uni.pe](mailto:luis.lopez.c@uni.pe), [ccastilloc@uni.edu.pe](mailto:ccastilloc@uni.edu.pe)

*Abstract – This study analyses the implementation of an anti-reflective coating based on silver nanoparticles to improve the efficiency of ultra-thin amorphous silicon solar cells. The absorption limits of these cells are addressed and the effect of nanoparticle induced optical scattering on the improvement of light collection is investigated. The Finite Difference Time Domain (FDTD) method is used to simulate the interaction between incident radiation and nanoparticles and to evaluate its influence on electric field enhancement and conversion efficiency. The results show that the optimal arrangement of the nanoparticles reduces the optical losses and increases the efficiency of the device. It is concluded that the integration of metallic nanoparticles is a promising strategy for optimize the performance of thin-film solar cells, opening up new possibilities for the development of more efficient and affordable photovoltaic technologies.*

*Palabras clave-- Nanopartículas de plata, celdas solares ultradelgadas, dispersión óptica, método FDTD, eficiencia fotovoltaica.*

# Recubrimiento antirreflejante de nanopartículas de plata para mejorar la eficiencia de celdas solares ultrafinas de silicio amorfo.

Hugo Velasquez Perez<sup>✉</sup>; Abraham Cayas Diaz<sup>✉</sup>; Luis Lopez Cabanillas<sup>✉</sup>; Carlos Castillo Correa<sup>✉</sup>  
Faculty of Electrical and Electronic Engineering, National University of Engineering, Lima-Perú, [hugo.velasquez.p@uni.pe](mailto:hugo.velasquez.p@uni.pe),  
[abraham.cayas.d@uni.pe](mailto:abraham.cayas.d@uni.pe), [luis.lopez.c@uni.pe](mailto:luis.lopez.c@uni.pe), [ccastilloc@uni.edu.pe](mailto:ccastilloc@uni.edu.pe)

**Resumen**– El presente estudio analiza la implementación de un recubrimiento antirreflejante basado en nanopartículas de plata para mejorar la eficiencia de las celdas solares ultradelgadas de silicio amorfo. Se abordan las limitaciones de absorción en estas celdas y se explora el impacto de la dispersión óptica inducida por las nanopartículas en la mejora de la captación de luz. A través del método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD), se simula la interacción entre la radiación incidente y las nanopartículas, evaluando su influencia en la amplificación del campo eléctrico y la eficiencia de conversión. Los resultados muestran que la disposición óptima de las nanopartículas permite reducir las pérdidas ópticas y aumentar la eficiencia del dispositivo. Se concluye que la integración de nanopartículas metálicas es una estrategia prometedora para optimizar el rendimiento de celdas solares de película delgada, lo que abre nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas más eficientes y económicamente accesibles.

**Palabras clave**-- Nanopartículas de plata, celdas solares ultradelgadas, dispersión óptica, método FDTD, eficiencia fotovoltaica.

## I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el desarrollo de los paneles experimentó avances significativos impulsado por la necesidad de fuentes de energía más limpias y sostenibles [1]. Sin embargo, este proceso también ha traído consigo desafíos importantes relacionados con los costos de fabricación de los paneles fotovoltaicos y la limitada eficiencia en la conversión de la energía solar en energía eléctrica a través del dispositivo optoelectrónico llamado celda solar.

En este artículo estudiaremos las principales propiedades eléctricas y ópticas del silicio y su efecto sobre el diseño y construcción de celdas solares ultradelgadas.

En primer lugar, tenemos las celdas de silicio monocristalino que ofrece la mejor eficiencia de conversión energética gracias a su estructura ordenada y uniforme, pero su alto costo de fabricación representa un desafío para la implementación masiva. Por otro lado, tenemos al silicio policristalino, pues, dado que tiene ciertas distorsiones estructurales logra un buen desempeño a un menor costo, sin embargo, para aumentar la eficiencia de la celda se requiere capas de material activo más gruesos (silicio), aumentando los

costos de fabricación y las pérdidas ópticas. Por último, el silicio amorfo, caracterizado por su estructura desordenada y su proceso de síntesis más sencillo, resulta más económico. Sin embargo, con una eficiencia considerablemente menor en comparación con las configuraciones anteriores. Típicamente alrededor del 6 -7%, en comparación con el 15 -18% del silicio policristalino y más del 18% del silicio monocristalino. Esto limita su uso a aplicaciones específicas, como en dispositivos de baja potencia, donde los costos bajos son más importantes que la eficiencia energética [2].

La plata se ha consolidado como el mejor candidato para el diseño de celdas solares debido a sus propiedades ópticas y eléctricas únicas, que permiten una eficiente captura y amplificación de la luz solar. Su alta conductividad eléctrica y térmica, combinada con su capacidad para generar resonancias de plasmones superficiales, la convierten en un material ideal para potenciar la absorción de fotones en celdas solares de películas delgadas. A diferencia de otros metales, la plata exhibe bajas pérdidas ópticas en el espectro visible, lo que maximiza la transmisión de luz en estructuras fotovoltaicas avanzadas. Además, las nanopartículas de plata, al ser estratégicamente dispuestas en la celda, permiten la dispersión y confinamiento de la luz dentro de la capa activa, reduciendo las pérdidas por reflexión y mejorando la conversión de energía. Su compatibilidad con diversas configuraciones de celdas solares, desde el silicio amorfo hasta dispositivos basados en perovskitas, refuerza su papel clave en el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas de alta eficiencia, asegurando un rendimiento estable y competitivo en el mercado de energías renovables. [3].

Para abordar las limitaciones de absorción y eficiencia en las celdas solares de silicio amorfo, se han investigado diversas estrategias de optimización. Una solución prometedora es la integración de nanopartículas metálicas como el oro y el cobre, que mejoran la captura y confinamiento de la luz solar dentro de la celda. Estas nanopartículas aprovechan el fenómeno de resonancia de plasmones de superficie, generando intensificaciones del campo electromagnético que amplifican la absorción óptica en la capa activa, reduciendo pérdidas energéticas y aumentando la eficiencia de conversión.

En 2022, un estudio investigó el uso de nanovarillas de oro (Au NRs) integradas en una matriz de PVDF para aplicaciones

fototérmicas solares. Los resultados mostraron que las películas compuestas de Au NRs exhibieron un rendimiento fototérmico superior en comparación con las que contenían nanósferas de oro, debido a una mayor absorción de luz y eficiencia en la conversión de energía lumínica en calor. Aunque este estudio se centró en aplicaciones fototérmicas, los hallazgos sugieren que las nanovarillas de oro podrían mejorar la eficiencia de celdas solares al ampliar el rango de absorción espectral y potenciar la conversión energética. [4]

En 2023, se destacó el uso de puntos cuánticos y nanopartículas en celdas solares para ampliar la capacidad de absorción de luz, permitiendo capturar un espectro más amplio de la radiación solar. Este enfoque mejora la eficiencia de las celdas solares al incrementar la cantidad de energía solar convertida en electricidad. [5]

En 2024, investigadores de la Universidad de Málaga, en colaboración con un consorcio internacional, desarrollaron celdas solares basadas en nanohilos semiconductores. Estas estructuras, debido a su escala nanométrica y distribución geométrica, mostraron una absorción óptica mejorada y una mayor resistencia a la radiación, lo que podría traducirse en una eficiencia potencial teórica del 47%. Aunque este proyecto se enfocó en aplicaciones espaciales, la tecnología de nanohilos presenta un camino prometedor para mejorar la eficiencia de celdas solares en diversas aplicaciones. [6]

En 2025, el proyecto ULTRA PARTICLE se centró en la preparación de nanopartículas de silicio con tamaños ajustados al límite de confinamiento cuántico. Los resultados sentaron las bases para diseñar propiedades ópticas en puntos cuánticos, permitiendo acceder a una gama más amplia de longitudes de onda y mejorando la eficiencia de conversión de luz solar en energía eléctrica. [7]

Estos avances consolidan el papel de las nanopartículas metálicas y semiconductoras en la mejora de celdas solares. Su capacidad para generar resonancias plasmónicas y modificar las propiedades ópticas de las celdas permite una distribución más eficiente de la luz dentro de la estructura fotovoltaica. Al optimizar el tamaño, forma y disposición de estas nanopartículas, se maximiza la absorción de fotones en longitudes de onda clave, resultando en un aumento significativo de la eficiencia del dispositivo. Además, la versatilidad y compatibilidad de materiales como el oro, el cobre y el silicio con diversas configuraciones de celdas solares refuerzan su potencial en el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas de nueva generación.

El artículo se organiza de la siguiente manera: En el capítulo II, se presenta la estructura y fundamento teórico de las celdas solares, En el capítulo III, se presentan y analizan los principales resultados y en el capítulo IV, se reportan las conclusiones más importantes de la investigación.

## II. DISEÑO Y TEORÍA

### A. Método de las Diferencia Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD)

El método FDTD (Finite-Difference Time-Domain) es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones diferenciales en el tiempo y el espacio, especialmente en la simulación de ondas electromagnéticas mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell. Su principal ventaja radica en su capacidad para modelar la propagación de ondas en medios complejos sin requerir transformadas en el dominio de la frecuencia, lo que lo hace particularmente útil en aplicaciones como antenas, circuitos de microondas y fotónica.

El método se basa en dividir la región de interés en una malla discreta. Generalmente, se utiliza el esquema de Yee [8], en el cual los componentes del campo eléctrico  $E$  y del campo magnético  $H$  se intercalan en una estructura tridimensional. Se representan en un cubo mallado donde los valores de los campos eléctricos ( $E$ ) se encuentran en las aristas y los valores del campo magnético ( $H$ ) en las caras de las celdas (ver figura 1). El método también discretiza el tiempo en  $n+1$  instantes donde el intervalo de tiempo entre cada instante es  $\Delta t$ .

Por lo que el campo eléctrico en cada punto  $(i, j, k)$  del espacio e instante de tiempo  $n$  se escribe como:

$$E(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = E^n(i, j, k)$$

Las discretizaciones infinitesimales tanto del espacio como del tiempo se correlacionan a través de las ecuaciones de maxwell.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \nabla \times H - J$$

Usando diferencias finitas en el tiempo y el espacio, se obtienen las ecuaciones en su forma discreta, que permiten calcular los valores de los campos en cada punto de la malla:

$$E^{n+1} = E^n + \frac{\Delta t}{\epsilon} (\nabla \times H^n)$$

$$H^{n+1} = H^n - \frac{\Delta t}{\mu} (\nabla \times E^{n+1})$$

Aquí,  $n$  representa el instante de tiempo actual y  $n+1$  el siguiente. Este esquema de actualización implica que los valores de los campos se calculan de manera alternada en cada paso de tiempo.

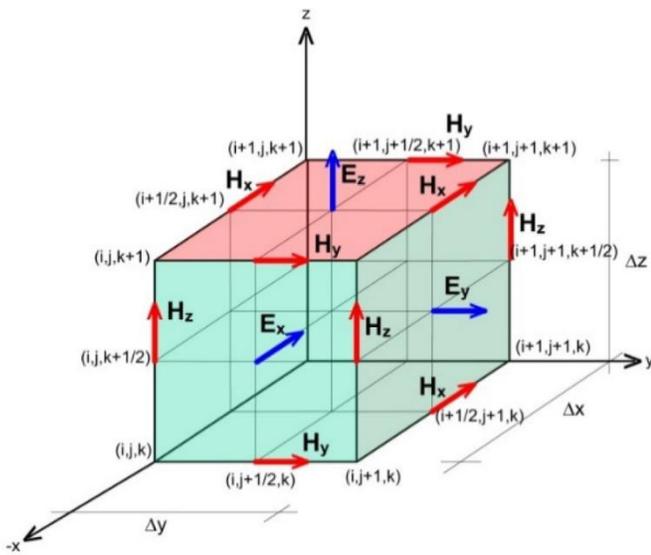


Fig. 1. Ilustración de la discretización del espacio en el método FDTD

El método FDTD es una herramienta robusta para simular fenómenos electromagnéticos mediante una malla discreta, aprovechando su facilidad de implementación computacional y su flexibilidad.

### B. Resonancia superficial de plasmones

Cuando un haz de luz incide sobre una partícula, el campo eléctrico puede hacer oscilar los electrones en la superficie del metal. La frecuencia de oscilación de los electrones depende de la frecuencia del campo externo y el tamaño de la nanopartícula. A este fenómeno se le conoce como resonancia de plasmones superficiales (ver figura 2). Las ondas de densidad de electrones que se propagan a lo largo de la interfaz semiconductor metal se pueden aprovechar para amplificar el campo electromagnético dentro del semiconductor.

La ley de Ohm se dentro del material se puede escribir mediante  $J = \sigma E$ . Donde  $E$  representa el campo eléctrico,  $J$ , la densidad de corriente,  $\sigma$ , la conductividad del material [9].

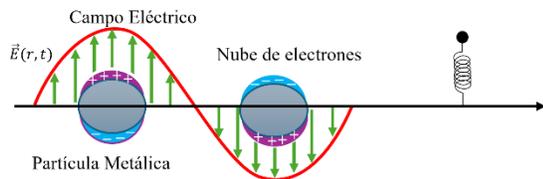


Fig. 2. Ilustración esquemática de la resonancia de plasmones de superficie

El movimiento de los electrones poder ser moved aloda mediante un movimiento armónico forzado

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + \gamma \frac{d \vec{r}}{dt} + \omega_0^2 \vec{r} = -\frac{e}{m} E_0 e^{-i\omega t}$$

Cuya solución permite encontrar el momento dipolar eléctrico del dipolo inducido  $\vec{p} = q \vec{r}$  y en consecuencia polarización eléctrica

$$\vec{p} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V} = \frac{ne^2}{m} \left( \sum \frac{f_i}{(\omega_j^2 - \omega^2) + i\gamma_j \omega} \right) \vec{E}_0$$

Donde,  $f_i$ , representa el número de electrones con frecuencia  $\omega_i$ ;  $\gamma_j$  representa el coeficiente de amortiguamiento de la molécula y  $n$ , numero de moléculas por unidad de volumen.

### C. Principio físico de las celdas solares

La estructura de la célula solar utilizada en la simulación numérica se muestra en la figura 3. Como se puede ver, las partículas metálicas causan una fuerte dispersión de la luz, atrapándola en la capa activa. El aumento del camino óptico y la amplificación de la radiación dentro del medio activo deberían aumentar la generación de pares electrón-hueco y, en consecuencia, aumentar la eficiencia de la célula solar.

Los metales se caracterizan por el hecho de que sus núcleos (positivos) están incrustados en un mar de electrones. Cuando una partícula metálica (tamaño  $\ll \lambda$ ) es iluminada por ondas electromagnéticas la nube de cargas eléctricas se hace oscilar por el campo eléctrico de la onda incidente. La carga eléctrica acelerada irradia energía electromagnética en todas las direcciones, esta radiación secundaria se llama "radiación dispersa". Por otro lado, la partícula polarizada puede convertir parte de la energía electromagnética incidente en otra forma (por ejemplo, energía térmica), este proceso se llama "absorción". Además, la nanopartícula polarizada atenúa la radiación incidente. Esta atenuación se llama "extinción". A continuación, daremos una descripción cuantitativa de cálculo de cada coeficiente.

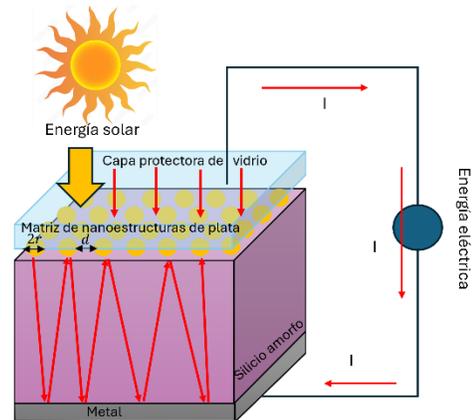


Fig. 3. Estructura de la celda solar.

El campo total cerca de la partícula  $\vec{E} = \vec{E}_{inc} + \vec{E}_{dis}$ , con esto el vector de Poynting, resulta  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  y tiene una dimensión de [energía/(tiempo x área)]

$$\vec{S} = \vec{E}_{inc} \times \vec{H}_{inc} + \vec{E}_{inc} \times \vec{H}_{dis} + (\vec{E}_{inc} \times \vec{H}_{dis} + \vec{E}_{dis} \times \vec{H}_{inc})$$

El primer término de la ecuación anterior está asociado con el flujo de energía incidente, el segundo, con el flujo de energía dispersa, y el último término está asociado con el flujo de energía amortiguado por la nanopartícula metálica.

La tasa neta a la que la energía cruza la superficie se puede calcular mediante la ecuación anterior, si la tasa neta es positiva significa que la energía entra en la partícula y en caso contrario es negativa.

$$P = \int \vec{S} \cdot d\vec{A}$$

La tasa de energía incidente, ( $P_{inc}$ ), depende del campo incidente y de las propiedades del medio, y la tasa de energía dispersa, ( $P_{dis}$ ), depende de las propiedades eléctricas, ópticas y geométricas de la partícula. La tasa de energía de absorción se puede calcular mediante,  $P_{abs} = P_{inc} - P_{dis}$ . Por lo tanto, la tasa de energía de extinción es igual a  $P_{ext} = P_{abs} + P_{dis}$ . La sección transversal de absorción, extinción y dispersión ( $\sigma$ ) se puede calcular mediante:

$$\sigma_j = \frac{P_j}{P_{inc}} \rightarrow \sigma_{ext} = \sigma_{dis} + \sigma_{abs}$$

La potencia total absorbida por unidad de volumen ( $\delta V$ ) por la capa activa proveniente de la onda incidente (radiación solar) y el campo generado por la partícula polarizada se calcula mediante [10]

$$A(y, \lambda) = \frac{1}{2} \frac{Re(V \cdot p)}{P_{inc}} = \frac{1}{2} \frac{\omega Im(\epsilon(y, \lambda)) |E(r, \lambda)|^2}{P_{inc}}$$

Donde ( $E(r, \lambda)$ ), es el campo eléctrico calculado por FDTD, ( $P_{inc}$ ), potencia incidente de la radiación solar, cuyo valor es ( $P_{inc} = 1000 \text{ W/cm}^2$ ). Considerando ( $A(\lambda) = \int A(y, \lambda) dV$ ). Se calcula la corriente fotogenerada en cortocircuito ( $I_{sc}$ )

$$I_{sc} = q \int \frac{I(\lambda)}{\lambda} A(\lambda) d\lambda$$

Donde  $q$ , es la carga de un electrón,  $I(\lambda)$ , es la intensidad de la luz incidente por longitud de onda [11]. El voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) se calcula mediante:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{J_0} + 1 \right)$$

Donde  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura absoluta, ( $kT$ ) es el voltaje térmico y  $J_0$  es la corriente oscura saturada del diodo  $\alpha$ -Si. El factor de campo se obtiene mediante

$$FF = \frac{qV_{oc}}{kT} - \ln \left( \frac{qV_{oc}}{kT} + 0.72 \right) \left( \frac{qV_{oc}}{kT} + 1 \right)$$

La eficiencia de conversión de energía de la celda solar se calcula mediante

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{inc}}$$

#### IV. RESULTADOS

Las secciones transversales representan un área hipotética que rodea a una partícula de modo que cada fotón de luz que entra en esa área puede ser dispersado o absorbido. En la figura 4 podemos ver que la dimensión de las partículas afecta la sección transversal de absorción y dispersión. Si comparamos los gráficos, podemos concluir que a medida que aumenta el tamaño de la nanopartícula, la sección transversal de absorción se vuelve dominante. Esto afecta negativamente al rendimiento del dispositivo porque la luz se pierde en la partícula en lugar de llegar a la capa activa de la celda. Idealmente, se busca un tamaño óptimo donde la dispersión sea maximizada sin que la absorción se vuelva dominante.

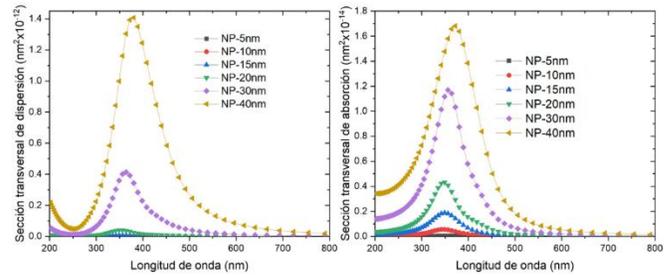


Fig. 4. Sección transversal de dispersión y absorción respectivamente.

El campo eléctrico de la luz incidente altera el movimiento de los electrones. En la figura 5(a) se muestra el dipolo eléctrico formado en una nanopartícula esférica. Si la longitud de onda de la onda incidente es mayor a 440 nm, los electrones oscilan colectivamente, y la nanopartícula se comporta como un dipolo eléctrico. Si la longitud de onda incidente está entre 340 nm y 440 nm, cada electrón de la superficie se comporta como un oscilador armónico amortiguado, alcanzando la frecuencia de resonancia superficial de plasmones, por lo que las nanopartículas se convierten en fuentes de ondas electromagnéticas. Finalmente, si la longitud de onda es inferior a 340 nm, la energía de los fotones es suficiente para excitar los electrones en la nanopartícula a niveles de energía más altos. En este caso, los electrones ya no oscilan colectivamente de manera eficiente, como lo hacen en la resonancia de plasmones. En cambio, gran parte de la energía

de la luz incidente se transfiere directamente a los electrones, lo que provoca absorción (figura 5c). La figura 5d muestra la tasa de amplificación del campo eléctrico en función de la longitud de onda incidente, evidenciando un pico pronunciado alrededor de los 364 nm, donde la amplificación es máxima. Esto sugiere que, para aplicaciones en células solares, el uso de nano esferas debe optimizarse en términos de tamaño y material, de manera que maximicen la dispersión en la región visible sin incrementar excesivamente la absorción.

El fenómeno de resonancia superficial de plasmones juega un rol predominante en la mejora del performance de las celdas solares.

Por otro lado, al introducir dos o más nano esferas en lugar de una sola, la interacción entre ellas modifica significativamente la distribución del campo eléctrico y la resonancia plasmónica. Cuando se introducen dos o más nano esferas en lugar de una sola, la interacción entre ellas modifica significativamente la distribución del campo eléctrico y la frecuencia de resonancia de los plasmónica. Esta interacción ocurre debido a la oscilación acoplada de los electrones libres en la superficie de cada nano esfera, lo que genera nuevos modos de resonancia que no aparecen en una partícula aislada y en ciertas configuraciones los campos se superponen destructivamente, anulando los efectos ganados debido a la resonancia superficial individual.

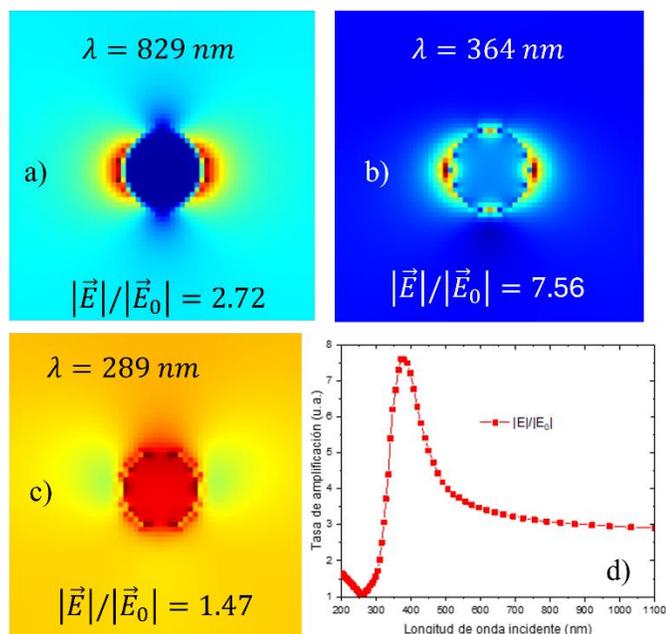


Fig. 5. Tasa de amplificación de campo por dispersión para la nanopartícula de plata

Los resultados de la Figura 6 muestran que una separación intermedia ( $d=0.25r$ ) es óptima para maximizar la amplificación del campo eléctrico. A esta distancia, la interacción plasmónica entre las nano esferas se amplifica formando un campo circundante muy intenso, favoreciendo considerablemente a la foto absorción dentro de la capa activa

de la celda. Sin embargo, cuando la separación es demasiado pequeña ( $d=0r$ ), los plasmones pueden experimentar un acoplamiento destructivo que reduce la intensidad del campo en comparación con la distancia óptima. Esto se debe, a que las simulaciones consideran a las dos nano esferas como una nano esfera de dimensiones mayores, esto modifica la frecuencia de resonancia de los plasmones superficiales y, en consecuencia, limita su acción en la amplificación de campo cercano. A medida que la separación aumenta ( $d=3r$ ), la interacción plasmónica se debilita y la amplificación del campo disminuye, acercándose al comportamiento de nano esferas aisladas. Esto se debe principalmente que el campo lejano se atenúa con la distancia, perdiéndose el efecto de acoplamiento de campo entre dipolo – dipolo, por lo que cada dipolo se comporta de forma aislada, reduciendo considerablemente el performance de la capa antirreflejante.

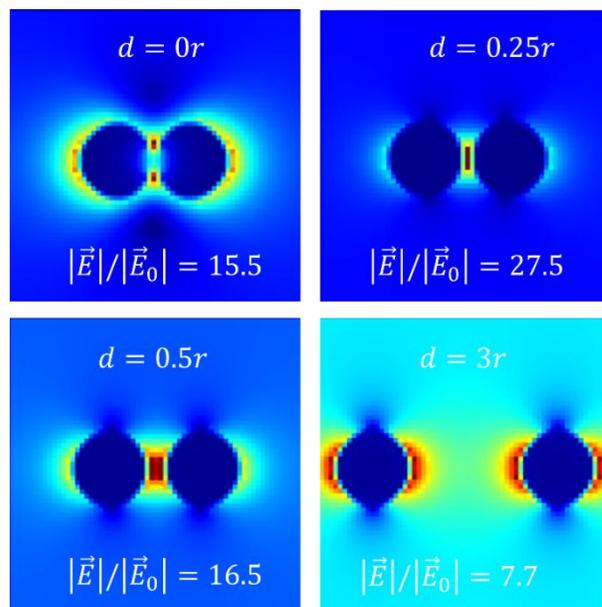


Fig. 6. Tasa de amplificación de campo por dispersión para diferentes distancias de nanopartícula de plata

El efecto de acoplamiento del campo generado por el campo de cada dipolo se ve afectado por el incremento del número de nano esferas presentes en la matriz de capa antirreflejante. En la figura 7 se estudia el efecto del número de nano esferas con una separación de  $d=0.25r$  en la amplificación del campo eléctrico respecto al caso de dos nano esferas. La distribución del campo muestra regiones de alta intensidad en las zonas de contacto entre las partículas, lo que indica un fuerte acoplamiento plasmónico, sin embargo, la simplificación no es uniforme como se puede ver en las figuras 7(a), 7(b) y 7(c), la ampliación máxima se alcanza en las interfaces entre las nano esferas, esto implica que el campo amplificado, no solamente es inyectado hacia la capa activa de la celda, sino también puede ser retro dispersado hacia el medio. En la figura 7(c) se muestra la dependencia de la ampliación de

campo vs distancia de separación entre las nano esferas de plata, en la que podemos observar que la amplificación máxima se consigue para  $d=0.25r$ , reduciéndose para valores mayores, este comportamiento se mantiene para valores menores. Además, se muestra la amplificación de campo vs el número de nano esferas con separación óptima de  $d=0.25r$ , en la que podemos observar si se mantiene la distribución periodo de las nanoestructuras en la capa antirreflejante, el campo resultante, siempre se amplifica, alcanzado un límite, en la que los efectos térmicos causados por la presencia de sombra en las nanoestructuras, reduce el performance de la celda. Sin embargo, si la distribución es aleatoria, resulta contraproducente para el dispositivo, debido a que el campo resultante es apantallado por el campo de cada dipolo.

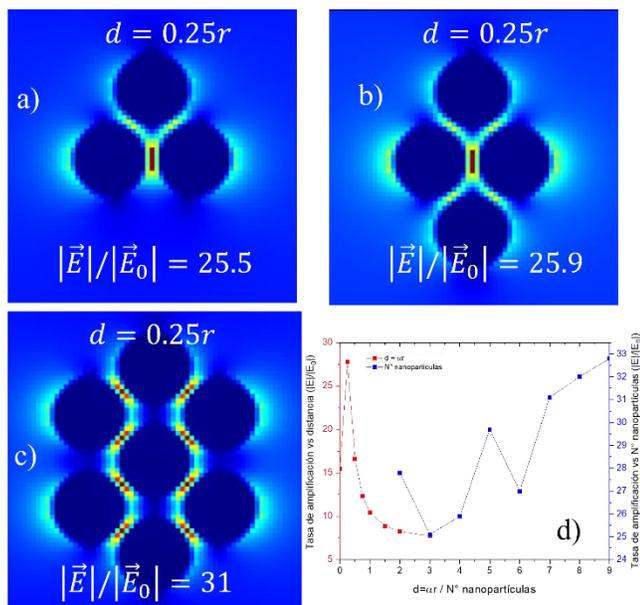


Fig. 7. Tasa de amplificación de campo vs distancia de separación

La figura 8 muestra la fotocorriente en cortocircuito vs el voltaje de la celda. En la figura podemos observar que la celda de silicio sin capa antirreflejante alcanza una fotocorriente de circuito cerrado de  $23.1 \text{ mA/cm}^2$ , este valor se incrementa a  $28.6 \text{ mA/cm}^2$ , cuando se le coloca una capa protectora de vidrio, a  $29.3 \text{ mA/cm}^2$ , cuando se le coloca una matriz de nano esferas de plata de  $30 \text{ nm}$  de radio, a  $35 \text{ mA/cm}^2$ , para la celda formado por nano esferas de radio  $50 \text{ nm}$ , a partir de esta dimensión, la capa antirreflex de nanopartículas de plata reduce la capacidad de generación de fotocorriente en la celda.

En figura 9 podemos observar que la potencia máxima de la celda se alcanza para la celda  $\alpha\text{-Si: NP}(50 \text{ nm})$ , mientras que la potencia mínima fue alcanzada para la celda  $\alpha\text{-Si: NP}(120 \text{ nm})$ , la cual es incluso menor que la potencia entregada por la celda de silicio sin capa anti reflectante ( $\alpha\text{-Si}$ ). Además, podemos observar que la película de vidrio colocado sobre la celda de silicio amorfo mejora la eficiencia de la celda, esto se

debe a que el vidrio aumenta la retrodispersión de la radiación confinada dentro de la capa activa de la celda.

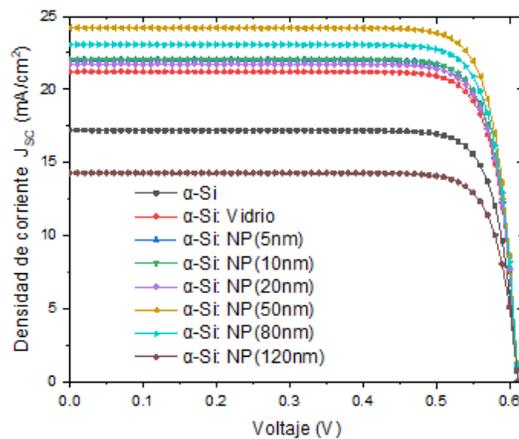


Fig. 8. Fotocorriente en circuito cerrado vs voltaje

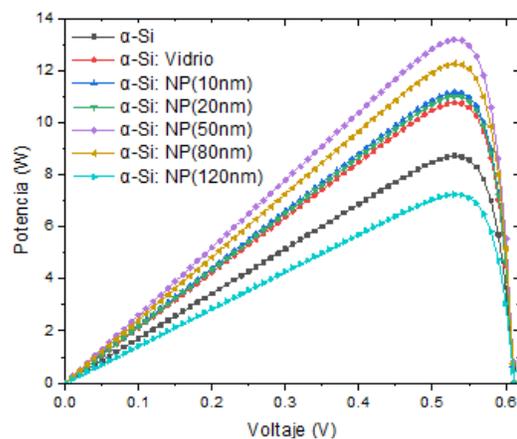


Fig. 9. Potencia eléctrica entregada por la celda vs voltaje

En la figura 10 se muestran las eficiencias alcanzadas por cada una de las celdas solares estudiadas en el presente trabajo de investigación. La estructura de la celda se muestra en la figura 3. La película de vidrio conductor (FTO) que soporta la matriz formada por las nanoestructuras de plata tiene un espesor de  $70 \text{ nm}$ , la capa activa formado por silicio amorfo, tiene un espesor de  $3 \mu\text{m}$ , y el electrodo de metal utilizado para cerrar el circuito tiene un espesor de  $0.5 \mu\text{m}$ . En la figura podemos observar que la celda de silicio ( $\alpha\text{-Si}$ ) sin capa antirreflejante tiene una eficiencia de  $8.1\%$ , esta eficiencia se incrementa en  $52\%$  si se agrega una capa antirreflejante formado por nanopartículas de plata de  $r=50 \text{ nm}$ . Sin embargo, si incrementamos el radio de la nanopartícula más allá de  $50 \text{ nm}$ , afecta negativamente el performance de la celda, esto incluso reduce la eficiencia a niveles por debajo de la celda de silicio, esto se debe a que el incremento del diámetro de la nanoestructura, esta actúa como un obstáculo entre la radiación incidente y la capa activa. Esto genera problemas técnicos al panel, porque los efectos de sombra aumentan la probabilidad

de la aparición de puntos calientes, quemando la celda expuesta y por ende deteriora la vida del panel. Por otro lado, si los radios de las nanoestructuras que forman la capa antirreflejante son menores que 50nm, la amplificación del campo esta concertada en la interfaz nano esfera – semiconductor, es decir en la superficie de la celda, esto afecta negativamente la conversión de luz incidente en corriente eléctrica fotogenerada, porque es esta zona se incrementa las pérdidas por recombinación. Por ende, para un óptimo aprovechamiento del dispositivo de captura de luz para mejorar la eficiencia de la celda, es conveniente que la luz incidente y amplificada este concentrada dentro del bulk de la capa activa, en donde favorece la eficiencia de conversión de pares electrón –hueco, reduciéndose considerablemente las perdidas por recombinación del para electrón-hueco.

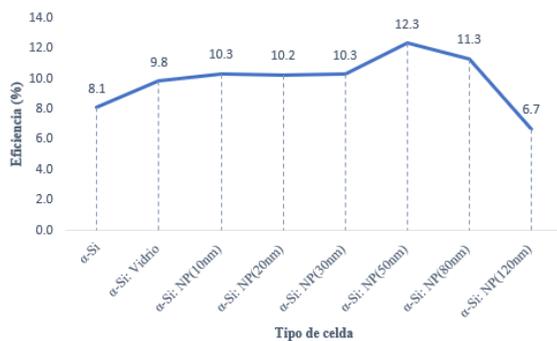


Fig. 10. Eficiencia vs tipo de celda propuesta

A partir de los resultados reportados en este artículo, las nanopartículas de plata reducen la reflexión de la luz en la superficie de la celda solar debido a redistribución angular de la luz incidente inducida por la dispersión con ángulos mayores que el ángulo crítico, confinando la luz dentro de la celda solar, mejorando la eficiencia de la celda [12], por otro lado, con el incremento de las dimensiones de la nanopartícula, se incrementa la absorción de la radiación incidente para longitudes de onda corta, esto puede ser contraproducente en el performance de la celda, especialmente cuando las transiciones electrónicas ocurre así niveles altos en la banda de conducción. A estas transiciones de se les denomina electrones calientes. El exceso de energía de los electrones calientes puede ser liberado hacia la red mediante fonones, esto causa el incremento de la temperatura de operación de celda [13] y en consecuencia reduce la eficiencia de esta [14].

La fotoactividad en el interfaz semiconductor/metal introduce propiedades dieléctricas y químicas híbridas en dicha interfaz, desencadenando procesos interfaciales microscópicos como es el caso de la generación de electrones calientes, ya sea mediante procesos coherentes, que incluyen la transferencia de carga interfacial fotoinducida y el desfase del campo plasmónico interfacial, o mediante procesos incoherentes, como la fotoemisión interna, donde los electrones calientes generados en el metal se transportan a la interfaz y se transmiten

hacia al sustrato que soporta las nanopartículas [15]. Las propiedades ópticas, electrónicas y químicas combinadas de las interfaces metal/semiconductor definen el acoplamiento de la luz a en el dispositivo optoelectrónico. En consecuencia, esto define la estabilidad de las nanopartículas, lo cual se traduce en el tiempo de vida del panel fotovoltaico. Las nanopartículas de plata modifican drásticamente tanto la parte real como la imaginaria de la función dieléctrica, causando el incremento de pérdidas ópticas en el material. Esto resulta en tres mecanismos diferentes: transiciones Inter-Banda, transiciones Intra-Banda y/o pérdidas óhmicas/de dispersión adicionales debido a defectos en la estructura cristalina. Incluso en ausencia de transiciones Inter-Banda, las transiciones Intra-Banda y las pérdidas por dispersión están presentes y, a menudo, resultan en grandes pérdidas totales [16]. Reducir la resistencia del contacto metal/semiconductor es uno de los principales medios para disminuir las pérdidas de potencia. Estas pérdidas afectan la eficiencia de la célula solar de películas delgadas; por lo tanto, es necesario reducirlas para aumentar la eficiencia de la celda solar. Por otro lado, las perdidas por área de contacto semiconductor-metal, causa el incremento de perdidas por recombinación afectan principalmente el voltaje de circuito abierto. Además, las impurezas, los defectos cristalinos y los enlaces químicos incompletos en el semiconductor actúan como trampas para los portadores foto excitados, y la recombinación en estas trampas provoca la reducción de la fotocorriente. La reducción en la concentración de impurezas y defectos puede aumentar la longitud de difusión de los portadores minoritarios, lo que puede disminuir las pérdidas por combinación en una célula solar [17].

Algunos estudios sugieren que la luz solar actúa como la fuerza impulsora de la agregación de las nanopartículas, y se cree que la fuerte interacción dipolo-dipolo oscilante es el origen de la desestabilización [18], por lo tanto, es un desafío pendiente, la exploración de métodos de estabilización de las nanopartículas con la finalidad de mejorar el rendimiento de la celda y asegurar la longevidad de los paneles solares [19].

Las nanopartículas de plata presentan prometedores resultados para ser usado como dispositivos de captura de luz, sin embargo, presentan diversos y complejos desafíos a nivel del proceso de producción, costos y estabilización. La producción de nanopartículas por medios físicos es excepcionalmente costosa, mientras que las técnicas químicas son peligrosas para el medio ambiente. Otro de los problemas, es el control de la densidad de partículas por unidad de área, debido a su reducido tamaño, estas tienden a aglomerarse, causando problemas de amplificación heterogénea del campo incidente, dentro de la capa activa de la celda, lo cual afecta negativamente el rendimiento de la celda [20].

En este artículo se reportaron los principales factores que mejoran el rendimiento de la celda solar, así como también se discutieron las principales desventajas de utilizar nanopartículas de plata en el diseño de una celda solar plasmónica, con la finalidad de ser abordados en futuras investigaciones.

## V. CONCLUSIONES

La capa antirreflejante formado por una matriz de nanopartículas de plata mejora la eficiencia de la celda solar de silicio amorfo debido a que se aprovecha la resonancia superficial de plasmones para confinar y amplificar la radiación incidente mediante los fenómenos de absorción y dispersión.

La celda de silicio amorfo con capa antirreflejante formado por una matriz de nanopartículas esféricas de radio de 50 nm alcanza una eficiencia de 12.3 %, siendo superior en un 52% a la celda de silicio sin capa antirreflejante.

La frecuencia de resonancia de los plasmones superficiales depende fuertemente de las dimensiones de la nanopartícula y las propiedades eléctricas del medio circundante. Esto afecta el performance de la celda solar, como se observa en los resultados, el incremento del radio de la nano esfera genera un corriente de la frecuencia de resonancia hacia el rojo, en consecuencia, esto sugiere un mejor aprovechamiento del espectro solar, sin embargo, este efecto está limitado por los efectos de sombra que se hacen más pronunciados con el incrementar de sus dimensiones.

### AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los investigadores expresan su agradecimiento al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de ingeniería por el financiamiento de la presente investigación.

### REFERENCES

- [1] C. J. Alonso, "Análisis comparado de la Matriz Energética Primaria de Argentina, Alemania y Chile: Identificación de oportunidades para la aplicación de energías limpias en Argentina," Tesis, Universidad Torcuato Di Tella, 2020. [En línea]. Disponible en: Repositorio UTDT.
- [2] Universitat Politècnica de Catalunya, "Energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu>.
- [3] European Commission, "Nanoparticles enhance light-to-current conversion," *CORDIS*, 21-Jul-2016. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/174974-nanoparticles-enhance-lighttoocurrent-conversion/es>. Galileo University, "Tendencias en el sector de las energías renovables," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.galileo.edu>.
- [4] Academia, "Nanovarillas de oro en aplicaciones fototérmicas solares," *Academia.edu*, 2022. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/NanovarillasOro>. [Accessed: 17-Feb-2025].
- [5] Editverse, "Puntos cuánticos y nanopartículas en celdas solares," Editverse, 2023. [Online]. Available: <https://www.editverse.com/es/puntos-cuanticos-nanoparticulas/>.
- [6] Universidad de Málaga, "Celdas solares con nanohilos semiconductores," Universidad de Málaga, 2024. [Online]. Available: <https://www.uma.es/nanohilos-solares>.
- [7] J. A. Martínez Zamora, D. B. Mendoza, A. Ramos Carrasco, y H. J. Higuera Valenzuela, "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," *Pistas Educativas*, vol. 42, pp. 1-10, julio 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/347766754\\_ESTUDIO\\_DE\\_UN\\_RECUBRIMIENTO\\_DE\\_NANOPARTICULAS\\_DE\\_SILICIO\\_BASADO\\_EN\\_EL\\_PROCESO\\_DE\\_CONVERSION\\_DESCENDENTE\\_PARA](https://www.researchgate.net/publication/347766754_ESTUDIO_DE_UN_RECUBRIMIENTO_DE_NANOPARTICULAS_DE_SILICIO_BASADO_EN_EL_PROCESO_DE_CONVERSION_DESCENDENTE_PARA)

### EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA SOLAR DE SILICIO POLICRISTALINO STUDY OF A SILI

- [8] Yee, S. K. (1966). "Numerical solution of initial boundary value problem involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14.
- [9] Griffiths, D. J. (2013). Griffiths, Introduction to Electrodynamics.
- [10] Heidarzadeh, H., Rostami, A., Dolatyari, M., and Rostami, G. (2016). Plasmon-enhanced performance of an ultrathin silicon solar cell using metal-semiconductor core-shell hemispherical nanoparticles and metallic back grating. *Applied optics*, 55(7), 1779-1785.
- [11] Shahabi, T., Heidarzadeh, H., and Bahador, H. (2023). Dual metallic based plasmonic back reflector to broaden the absorption spectra of a thin film amorphous silicon solar cell. *Optics Communications*, 544, 129623
- [12] Häggglund, C., Zäch, M., Petersson, G., & Kasemo, B. (2008). Electromagnetic coupling of light into a silicon solar cell by nanodisk plasmons. *Applied physics letters*, 92(5).
- [13] Khurgin, J. B. (2015). How to deal with the loss in plasmonics and metamaterials. *Nature nanotechnology*, 10(1), 2-6.
- [14] Singh, P., & Ravindra, N. M. (2012). Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar energy materials and solar cells*, 101, 36-45.
- [15] Tan, S., Argondizzo, A., Ren, J., Liu, L., Zhao, J., & Petek, H. (2017). Plasmonic coupling at a metal/semiconductor interface. *Nature Photonics*, 11(12), 806-812.
- [16] Novaković, M., Popović, M., Noga, P., Vaña, D., & Ronning, C. (2022). Low optical losses in plasmonic TiN thin films implanted with silver and gold. *Optical Materials*, 123, 111936.
- [17] Dhankhar, M., Singh, O. P., & Singh, V. N. (2014). Physical principles of losses in thin film solar cells and efficiency enhancement methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 214-223.
- [18] Cheng, Y., Yin, L., Lin, S., Wiesner, M., Bernhardt, E., & Liu, J. (2011). Toxicity reduction of polymer-stabilized silver nanoparticles by sunlight. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(11), 4425-4432.
- [19] Rajukkannu, S., Bunpheng, W., Dhairiyasamy, R., & Gopinath, V. (2025). Efficiency improvement in silicon and perovskite solar cells through nanofluid cooling using citrate and PVP stabilized silver nanoparticles. *Scientific Reports*, 15(1), 833.
- [20] Mourad, A., Aissa, A., Said, Z., Younis, O., Iqbal, M., & Alazzam, A. (2022). Recent advances on the applications of phase change materials for solar collectors, practical limitations, and challenges: A critical review. *Journal of Energy Storage*, 49, 104186.