

¡La potencia de la irradiante energía solar! Eficiencia Cuántica

R. Escalante, D. Pourjafari, D. Peralta, A. Riquelme, P. Sánchez-Fernández

Resumen—Se definirá la eficiencia cuántica de una celda solar a partir de la energía que el sol emite, permitiendo al lector la realización de los cálculos por su propia cuenta. En el camino, se hablará de los procesos básicos del funcionamiento de la celda solar y se sentarán las bases para el manejo correcto de las unidades de energía, potencia e irradiancia.

Palabras Claves— Eficiencia Cuántica, Irradiancia, Energía, Potencia, Celda Solar.

1. INTRODUCCIÓN

¿Pero qué? ¿El título tiene sentido para ti? En la enseñanza de la física se muestra que la energía tiene unidades de Julios (J), y que cuando se mantiene la energía en un periodo de tiempo entonces estamos hablando de potencia (W). Pero, y entonces ¿qué queremos decir con irradiancia? ¿Qué es la eficiencia cuántica? Y ¿Qué tiene que ver con la luz?

2. ¿DE DÓNDE PROVIENE LA ENERGÍA?

2.1. Del Sol a la Tierra

La reacción nuclear que sucede en el Sol le hace expulsar 3.8×10^{26} J de energía por cada segundo, lo que entonces nos dice que la potencia solar es de 3.8×10^{26} W. Sin embargo, tal magnitud de potencia es emitida en todas direcciones desde el Sol. Para saber cuánto de esa potencia se puede aprovechar en nuestro planeta, es necesario calcularla, solo debemos tomar en cuenta la distancia entre el Sol y la Tierra considerando la superficie del planeta azul que recibe la luz proveniente del astro rey. La potencia emitida por el Sol inicia su "viaje" en la superficie de esta estrella y comienza a extenderse en forma de esfera (el astro en su centro) hasta alcanzar la Tierra. Dado que nuestra roca se encuentra a 150 millones de kilómetros del Sol, la potencia total se distribuye en toda la "superficie" extendida de la esfera de radio 150×10^6 km. Recordando que el área de la superficie de una esfera es $4\pi r^2$ podremos encontrar que la potencia solar de 3.8×10^{26} W se encuentra distribuida en 2.83×10^{23} m² (para la distancia Sol-Tierra). Lo que significa que por cada metro cuadrado se tiene una potencia de 1342 Vatios, es decir 1342 W/m^2 . Esto es a lo que realmente se llama irradiancia, erróneamente conocido como densidad de potencia, por ser sus unidades de W/m^2 . Dicha irradiancia se ha medido por la "American Society Testing Materials" (ASTM) siendo la constante solar 1366 W/m^2 [1] para el exterior de nuestra atmósfera y se puede encontrar una explicación sencilla en la página PVEducation.[2]

Si quisieras saber cuál es la potencia de luz de la que dispone la Tierra, solo tendrías que multiplicar la irradiancia solar por el área iluminada del planeta. Podríamos realizar el cálculo considerando la forma de esferoide oblato del planeta, pero por razones prácticas vamos a considerar la superficie de la Tierra que recibe la luz solar como "plana" ... Y pidámosle perdón a Copérnico, Galileo, Colón, Newton y otros tantos. La consideración puede hacerse debido al diámetro de la Tierra y la gran distancia que hay al Sol.

Luego de realizar una búsqueda rápida en internet, seguramente encontrarás que el diámetro de la Tierra es de 12742 km, y fácilmente calcularemos el área como πr^2 : 127 millones de km². Por lo que nuestro planeta al menos recibe 1.72×10^{17} W, sin considerar ciertas pérdidas debidas a la atmósfera. Aprovechando que andamos buscando en internet, podrías calcular de una vez el consumo energético mundial, considerando la población total en la Tierra (Census) [3] y el promedio de consumo energético *per cápita* (Banco Mundial), [4] ojo a las unidades.

2.2. ¿Qué es la luz?

Teniendo toda esa capacidad energética disponible en la luz solar, ¿qué necesitamos para darle uso en nuestra civilización? Obvio, sin considerar todas las formas naturales en la que es necesaria, por ejemplo, la fotosíntesis. La respuesta es muy sencilla, ¡se necesitan dispositivos fotovoltaicos! Mejor conocidos como celdas o paneles solares. Sin embargo, a esa respuesta le falta información sobre cómo utilizar verdaderamente la energía proveniente del Sol en forma de luz.

Los dispositivos fotovoltaicos son capaces de convertir la luz en electricidad. Se cree que la electricidad se empezó a estudiar desde tiempos de Benjamin Franklin, pero primero hubieron otros tantos [5] (aunque algunos aseguran que incluso desde antes, busca "La pila de Bagdag" [6]), y con los descubrimientos e inventos desarrollados por Edison y Tesla se ha convertido en el corazón de nuestra sociedad. Ahora es hasta obvio el entendimiento de que los electrones en movimiento son

electricidad. Sin embargo, ¿qué es la luz? El ser humano lleva miles de años tratando de entender la luz. En el documental de la UNED "La luz a través del tiempo" [7][8][9] se presenta un recorrido histórico por las diferentes teorías, llegando a la que aceptamos ahora. La luz se produce en los átomos en forma de fotones, pero se propaga en forma de ondas, aunque es detectada nuevamente en forma de fotones... Sí, estamos hablando de la dualidad onda-partícula. Saludos a Planck y el experimento de la doble rendija, que dio un empujón a Einstein para justificar el efecto fotoeléctrico.[10]

3. EFICIENCIA CUÁNTICA

Para los fines de este artículo, es importante saber que la energía no se transmite de forma continua sino en paquetes energéticos, estos reciben el nombre de *cuantos*. El estudio de los *cuantos* forma parte de la historia de la mecánica cuántica, para nosotros basta con saber que la luz está compuesta por fotones y cada fotón posee un *cuanto* de energía. La energía de un fotón está definida por la relación:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

En donde h es la constante de Planck [Js] y c es la velocidad de la luz en el vacío [m/s] mientras que λ es la longitud de la onda (de propagación). Debemos tener claro que esta energía no es una constante, sino que depende claramente de la longitud de onda. Dado que la luz se propaga como una onda, su energía asociada es definida por la longitud de onda.

La luz del Sol abarca en el espectro electromagnético desde los 300 hasta los 4000 nm, siendo su espectro el que se ve en la figura 1 (línea negra). La ASTM [1] es reconocida por establecer el espectro solar, donde se puede ver la irradiancia del Sol en cada longitud de onda. El ojo humano puede ver en el rango de los 300 – 700 nm, de modo que se considera la luz visible a esta parte del espectro que es precisamente el rango donde la mayoría de las celdas solares son capaces de "absorber". En la investigación y para la simplificación de las mediciones, el espectro solar se ha escalado (línea roja), de forma que la contribución de cada longitud de onda suma 1000 W/m² (línea roja punteada); que para términos prácticos es el estándar de la irradiancia de 1 Sol en la Tierra.

Cuando los fotones inciden en el átomo, si tienen la energía suficiente, son capaces de "excitar" a un electrón. Esta es la clave del funcionamiento de toda celda solar. Los electrones excitados por la energía de los fotones, al desplazarse, son corriente eléctrica.[11] Ahora, lo que necesitamos visualizar es el potencial de este conocimiento. Partamos desde la definición de la eficiencia (η):

$$\eta = \frac{\text{lo que sale}}{\text{lo que entra}} \quad (2)$$

Lo que entra es una cantidad de fotones, y lo que sale es una cantidad de electrones, ambas cantidades son magnitudes adimensionales, pero necesitamos considerar su paso al entrar y/o salir, por lo tanto, se debe considerar su flujo en un área en una unidad de tiempo, de acuerdo con el Sistema Internacional: 1/(m²*s). Si una celda solar transforma un flujo de fotones (Φ_{fotones}) en un flujo de electrones ($\Phi_{\text{electrones}}$), como buen

pensador seguro estás interesado en el flujo de fotones que el Sol irradia y es que lo podemos calcular a partir de la irradiancia (H):

$$\Phi_{\text{fotones}} = \frac{H\lambda}{hc} \quad (3)$$

En donde se hace evidente que el flujo de fotones varía en función de la longitud de onda y, por lo tanto, la energía. Si queremos calcular el flujo de electrones que salen del dispositivo solo es necesario conocer la carga del electrón (q) y medir la corriente (I) producida en el área activa del dispositivo (A):

$$\Phi_{\text{electrones}} = \frac{I}{Aq} \quad (4)$$

La relación de fotones incidentes que se convierten en energía eléctrica es conocida como eficiencia cuántica QE "Quantum Efficiency", EQE "External Quantum Efficiency" o IPCE "Incident Photon-to-current Conversion Efficiency":

$$IPCE(\lambda) = \frac{\Phi_{\text{electrones}}}{\Phi_{\text{fotones}}(\lambda)} \quad (5)$$

Es decir, que la eficiencia cuántica será calculada para cada longitud de onda, debido a que el cociente entre el flujo de electrones y el flujo de fotones dependerá de la longitud de onda de los fotones; en otras palabras, de la energía del fotón.

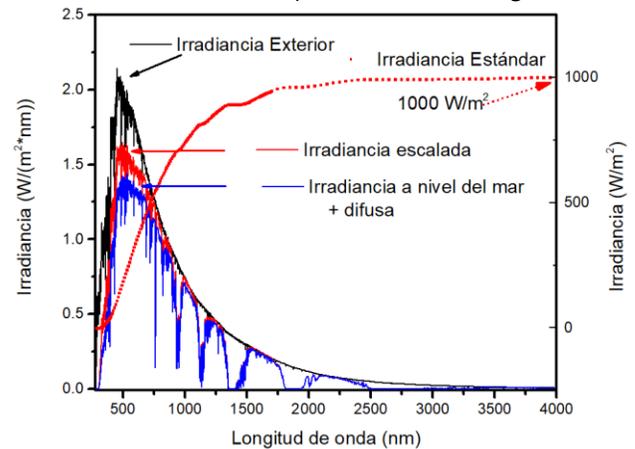


Figura 1. Espectros de irradiancia solar. En negro, el espectro solar fuera de la atmósfera. En rojo, el espectro solar que se considera en la superficie de la Tierra. En azul, la irradiancia directa más la difusa a nivel del mar. En rojo punteado la integración de la irradiancia por longitud de onda en la superficie terrestre. En la Tierra se considera 1000 W/m² como 1 Sol

Ahora que conocemos la eficiencia cuántica de la celda solar, podemos integrar (sumar el área bajo la curva) y encontrar la corriente máxima que será capaz de convertir. Esto se hace multiplicando el flujo de fotones por el IPCE(%). [12]

$$J_{SC} = q \int \Phi_{\text{fotones}}(\lambda) * IPCE(\lambda) * d\lambda \quad (6)$$

Si consideramos un dispositivo fotovoltaico con una eficiencia del 100% (es decir, que todos los fotones que incidan producirán un electrón libre y que cada electrón saldrá como corriente eléctrica) y definimos que es capaz de absorber en el rango conocido para las celdas solares (300 – 1100 nm) la corriente máxima que podría convertir sería de 430 A/m² recibiendo 1 sol de luz.

Espera, ¿me estás diciendo que la energía en la luz que va de los 1100 – 4000 nm es desperdiciada? Sí. Por el momento no hay celdas solares que puedan aprovechar ese rango del espectro, pero si se pudiera utilizar se podrían sumar otros 270 A/m² a la conversión, llegando hasta un máximo de 700 A/m² que se podría convertir en corriente eléctrica, si y solo si, existiera una celda solar con una eficiencia cuántica del 100%.

El análisis teórico en los límites de los dispositivos solares debido a la física en su interior ha sido calculado desde 1960 en el artículo: "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells" que es más conocido como el límite de Shockley-Queisser.[13] En dicho artículo se establece que la máxima eficiencia de conversión (PCE – "Power Conversion Efficiency") posible es un poco superior al 30%; en relación de la máxima potencia de salida entregada por la celda entre la potencia de luz incidente recibida por la celda solar. Si consideramos la irradiancia solar en la superficie terrestre como 1000 W/m², la potencia máxima que una celda solar podría entregar sería de 300 W/m² equivalente a 30 mW/cm². Atención, no debemos confundir PCE con IPCE, no son lo mismo. Aunque ambas son eficiencias, PCE mide la potencia de salida partido por la potencia de entrada, mientras que IPCE mide el flujo de electrones partido por el flujo de fotones.

En la caracterización de las celdas solares, la medición del IPCE y el PCE permiten una comparación de la densidad de corriente que la celda es capaz de entregar. En la figura 2, se puede ver la curva densidad de corriente vs voltaje (JV) (negro) comparada con la eficiencia cuántica (azul) y la respectiva densidad de corriente integrada (rojo) para una celda de silicio (a), perovskita de triple-stack (b) y una celda sensibilizada por colorante (DSSC) (c). Estas celdas se han hecho como parte de los proyectos a los que los autores agradecen en la respectiva sección de este documento. Se puede ver que, para la celda de silicio, la densidad de corriente integrada (proveniente de la IPCE) será mayor que la densidad de corriente a voltaje cero de la curva JV, esto debido a que aun puede absorber entre los 800 - 1100 nm. En contraste, la celda sensibilizada por colorante aparenta tener menor densidad de corriente integrada, sin embargo, no se ha considerado la contribución a la QE entre los 300 - 350 nm. Por otro lado, la celda de perovskita de triple-stack tiene coincidencia al comparar ambas mediciones. En la investigación es importante darle soporte a cada medición a través de observaciones u otras mediciones. La caracterización por eficiencia cuántica es de gran ayuda para confirmar la eficiencia de conversión de potencia calculada desde la curva JV.

4. CONCLUSIONES

La eficiencia de los dispositivos solares tiene mucho por delante para mejorar. Nuestro Sol es nuestra mayor fuente de energía, debemos desarrollar tecnología que pueda utilizar un mayor rango en el espectro de la irradiancia que nos llega de la potencia emitida de la energía del Sol. Debes lograr que cada *cuanto* cuente y no olvidar: cuando cuentas *cuantos*, fíjate bien cuántos *cuantos* cuentas, para que no pierdas ninguno de los *cuantos* en las cuentas.

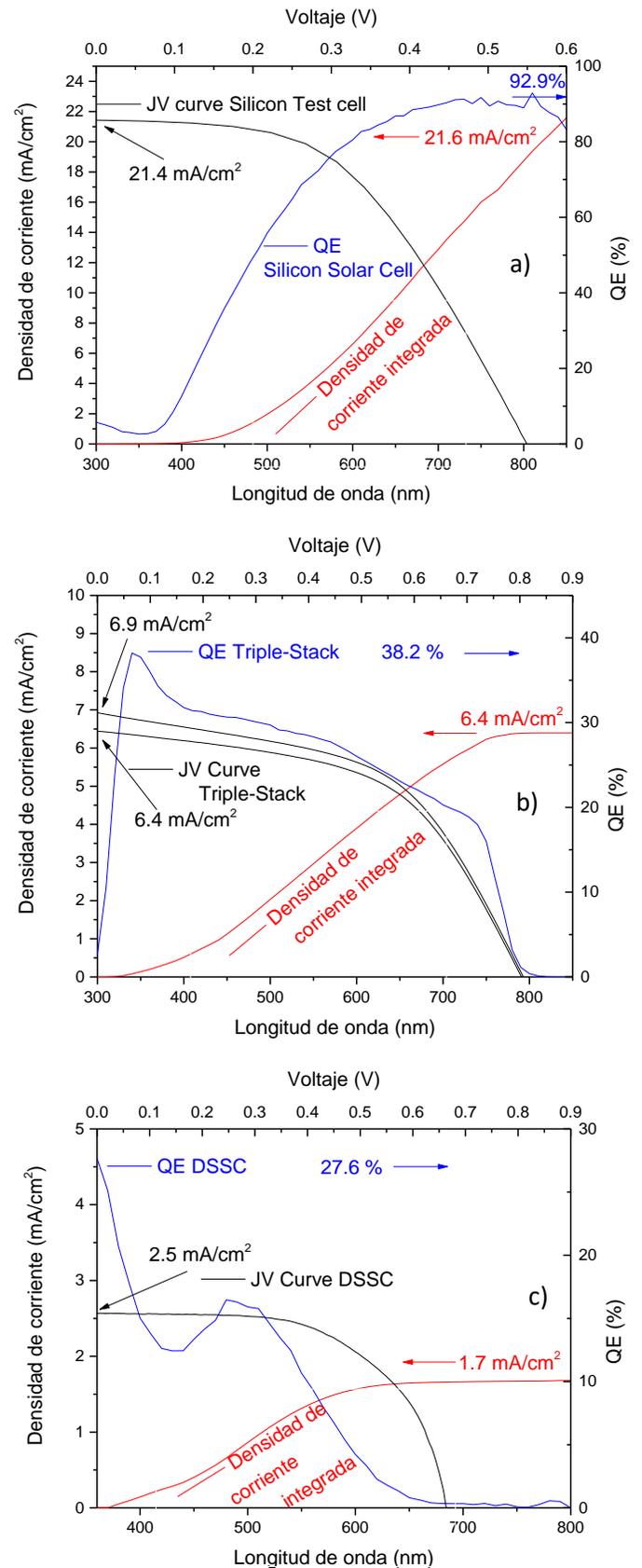


Figura 2. Comparación de las curvas JV (negro) e IPCE (azul) con la densidad de corriente integrada (rojo) para una celda de silicio (a), perovskita de triple-stack (b) y una celda solar sensibilizada por colorante para baja intensidad de luz (c)

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Ciencia e Innovación de España, Agencia Estatal de Investigación (AEI) y EU (FEDER) con fondos del PID2019-110430GB-C22 y PCI2019-111839-2 (SCALEUP) y la Junta de Andalucía con los fondos del SOLARFORCE (UPO-1259175). También se ha recibido apoyo por parte del GRCF-GRTA project "Power to the people: Democratizing energy through decentralised manufacture and production of affordable, reliable, sustainable solar power", y de la Royal Society a través del proyecto ICA-R1-191321 "Textiles to TeraWatts: exploring the global opportunity for screen printed photovoltaics". AJR agradece al Ministerio de Educación Española, Cultura y Deporte por la beca de doctorado (FPU2017-03684). REQ agradece al CONACyT por la beca de estancia posdoctoral en el extranjero (487953). Gracias al Sol. Y a los doctores Juan Antonio Anta y Gerko Oskam por su guía y consejo en todo tiempo.

REFERENCIAS

- [1] ASTM G173-03(2020), Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, doi: 10.1520/G0173-03R20 [www.astm.org](https://www.astm.org/Standards/G173.htm)
<https://www.astm.org/Standards/G173.htm>
- [2] PVEducation.org "Constante Solar".
<https://www.pveducation.org/pvc/drom/properties-of-sunlight/solar-radiation-outside-the-earths-atmosphere>. 2012. Activo al 1 de mayo de 2021.
- [3] United States Census Bureau. <https://www.census.gov/popclock/>
- [4] Banco Mundial.
<https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2014&start=1960&view=chart>
- [5] Educación.Es "Historia de la electricidad y sus personajes", http://recursos.tic.educacion.es/eda/web/tic_2_0/informes/perez_freire_carlos/temas/personajes.htm. Activo al 1 de mayo de 2021.
- [6] La UNED. "La pila de Bagdad". https://www2.uned.es/geo-1-historia-antigua-universal/new%20website/EGIPTO/MISTERIOS/PILA_BAGDAD.htm
Activo al 1 de mayo de 2021
- [7] La UNED Documentos. 1995. "La luz a través de la historia I. De los griegos a Newton". <https://www.youtube.com/watch?v=rqh6azo9Kel>
- [8] La UNED Documentos. 1995. "La luz a través de la historia II. El siglo de las ondas". <https://www.youtube.com/watch?v=4ERlpzynYo>
- [9] La UNED Documentos. 1955. "La luz a través de la historia III. La dualidad onda-partícula".
https://www.youtube.com/watch?v=8heB_yXcvzM
- [10] La BBC. "Física cuántica: qué es la dualidad partícula-onda de la luz y cómo su descubrimiento revolucionó la ciencia".
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-52815076> Activo al 1 de mayo de 2021
- [11] Khan Academy. "El efecto fotoeléctrico".
<https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/photoelectric-effect>
Activo al 1 de mayo de 2021.
- [12] ASTM E1021-15(2019), Standard Test Method for Spectral Responsivity Measurements of Photovoltaic Devices, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, doi: 10.1520/E1021-15R19 www.astm.org
<https://www.astm.org/Standards/E1021.htm>
- [13] William Shockley and Hans J. Queisser. "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", Journal of Applied Physics, vol 32, no. 510, 1961, doi: 10.1063/1.1736034.
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1736034>



Renán Escalante Quijano es Ingeniero Físico por la Universidad Autónoma de Yucatán (2011), Doctor en Ciencias Físicoquímicas por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (2019). Participa de forma activa en la divulgación científica. Actualmente hace un posdoctorado en la Universidad Pablo de Olavide dentro del grupo de Células Solares Nanoestructuradas investigando la reproducibilidad de los dispositivos con vistas al escalamiento de los procesos y la caracterización por pequeñas perturbaciones.



Dena Pourjafari es investigadora posdoctoral en el CINVESTAV-Mérida, México. Recibió su licenciatura en ingeniería química (Irán), maestría en materiales para la conversión y almacenamiento de energía (Francia) y doctorado en química de los materiales (México). Su trabajo de investigación se centra en el desarrollo de celdas solares sensibilizadas con colorante y de perovskita, con un enfoque en escalamiento de los dispositivos y el uso de materiales verdes de bajo costo.



Diecena Peralta Dominguez estudió la Licenciatura en ciencias Físico-Matemáticas en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Ciudad Universitaria (UMICH-CU), Morelia Michoacán, posteriormente estudió la Maestría y Doctorado en Ciencias Ópticas en el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C, en León Gto. Su grado de doctor lo obtuvo con la tesis titulada: Materiales orgánicos aplicados como sensores colorimétricos y plasmónicos para la detección de metales en agua.



Antonio Jesús Riquelme Expósito es graduado en Ciencias Ambientales por la Universidad Pablo de Olavide desde 2014. Actualmente se encuentra realizando su doctorado en el grupo de Celdas Solares Nanoestructuradas de la UPO sobre estudios fundamentales de dinámica electrónica en dispositivos fotovoltaicos de nueva generación



Patricia Sánchez-Fernández es estudiante de TFG del Grado en Ciencias Ambientales en la Universidad Pablo de Olavide y alumna interna en el Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales en la Universidad Pablo de Olavide (2020-2021).