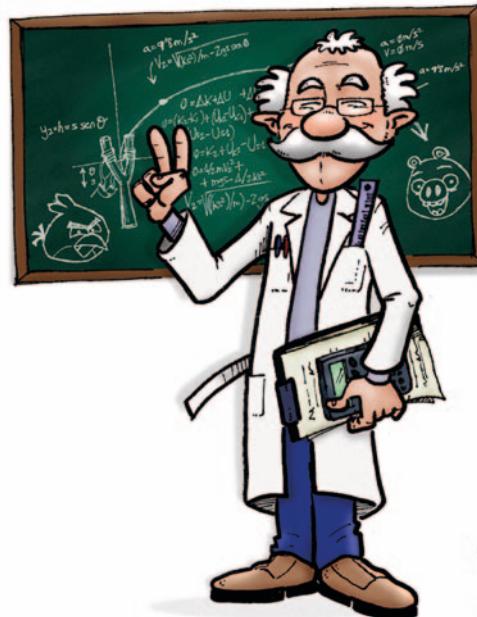


Notas de clase

Una pizarra en la que intercambiar experiencias docentes

Experimentos con un módulo fotovoltaico

Manual Iván González Martín
Dpto. de Física, Universidad de Burgos



IAS-1-13-

Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertog.com).

Tras varias décadas de titubeos, la energía solar fotovoltaica ha llegado para quedarse. Los precios de los dispositivos fotovoltaicos han caído con estrépito en la última década, y ahora mismo se cuentan entre las formas más económicas de generar electricidad, sin necesidad de recurrir a las generosas primas con que se retribuyó en el pasado a la generación eléctrica fotovoltaica en España. El nuevo marco normativo vigente facilita enormemente la conexión a la red eléctrica de instalaciones fotovoltaicas de todos los tamaños, hasta el punto de que en 2019 la producción fotovoltaica nacional creció un 18,8 %, siendo capaz de satisfacer en algunos momentos el 15 % de la demanda eléctrica peninsular [1]. Por estos motivos y por los que sin duda nos esperan en el futuro, puede ser pertinente ir adiestrando a nuestros alumnos en relación con el funcionamiento de los dispositivos fotovoltaicos.

El elemento nuclear en la generación fotovoltaica es la **célula fotovoltaica**, un dispositivo semiconductor que entrega corriente eléctrica cuando recibe luz intensa, sea de origen solar o no. Una célula fotovoltaica genera tensiones muy bajas, del orden de unas décimas de voltio en el mejor de los casos. Como estas son insuficientes para la gran mayoría de aplicaciones, se acostumbra a conectar en serie unas pocas decenas de células; el resultado es lo que se conoce como **panel o módulo fotovoltaico**.

Todo módulo fotovoltaico, antes de salir al mercado, debe ser homologado en una serie de ensayos estándar, en los que se mide su respuesta eléctrica, térmica, mecánica, etc., bajo determinadas condiciones ambientales (1.000 W/m² de **irradiancia**¹, 25 °C de temperatura de célula, etc.). Pues bien, este trabajo presenta variantes muy simplificadas de algunos de dichos ensayos, fáciles de llevar a cabo y significativas para un estudiante de física.

Material

Se requieren los siguientes dispositivos

1. Un módulo fotovoltaico. Para laboratorios de alumnos se recomiendan módulos pequeños. Uno de 5 W de potencia, plenamente funcional, tendrá un área de captación inferior a 25 × 20 cm² y un precio de menos de 20 €.
2. Material eléctrico común: cables de conexión, amperímetro, voltímetro, reóstato.

¹ La irradiancia G mide la energía radiante que incide sobre el módulo por unidad de tiempo y de superficie.

3. Termómetro digital.

4. Fuente de luz. Si los ensayos se pueden realizar con luz solar directa —mejor sin cristales interpuestos— la fuente no es necesaria. En otro caso se requerirá una fuente eléctrica intensa (por intensa se entiende capaz de hacerle llegar al módulo una irradiancia no muy distinta de los 1.000 W/m² estándar; en la práctica, tal fuente deberá asustar un poco la primera vez que se conecte), que llamaremos **simulador solar**. La Figura 1 sugiere dos opciones: un foco halógeno de 500 W provisto de reflector o bien un grupo de lámparas LED, también con reflector, tan densamente empaquetadas como sea posible (el modelo de la figura es de bricolaje y consta de 42 lámparas de 5 W y 220 V, conectadas en paralelo [2]) y que ocupen un área al menos igual a la del módulo. El foco halógeno es mucho más barato y proporciona mayor irradiancia, pero es mucho más rico en radiación infrarroja, y en este sentido el simulador LED proporciona un espectro más similar al espectro solar. Los resultados que más adelante se presentan se han obtenido con el simulador LED.

5. **Piranómetro**. Este dispositivo mide la irradiancia G sobre el módulo. Un piranómetro de calidad tal vez sea un lujo innecesario para un laboratorio de ámbito general; sin embargo, existen en el mercado sucedáneos de coste moderado, como el que se presenta en la Figura 1 [3]. Bajo determinadas condiciones, no obstante, es posible prescindir de esta medida, como se indica a continuación.

Ensayo 0. Medida o estimación de la irradiancia

Si no disponemos de piranómetro, deberemos llevar a cabo los ensayos con luz solar real. Afortunadamente, si el día es completamente despejado y tenemos la precaución de orientar el módulo en perpendicular a los rayos solares, podremos asumir sin demasiado error [4] que la irradiancia será próxima al valor estándar 1.000 W/m².

Si disponemos de piranómetro, el procedimiento es simple, y consiste en situar (Figura 2) el sensor del piranómetro sobre la superficie del módulo y a la altura de su centro. Es posible refinar el resultado midiendo en varios puntos del módulo (tal vez en el centro y en las cuatro esquinas) y dar por bueno un promedio ponderado de las lecturas obtenidas. Por otra parte, la imagen muestra claramente que el sensor

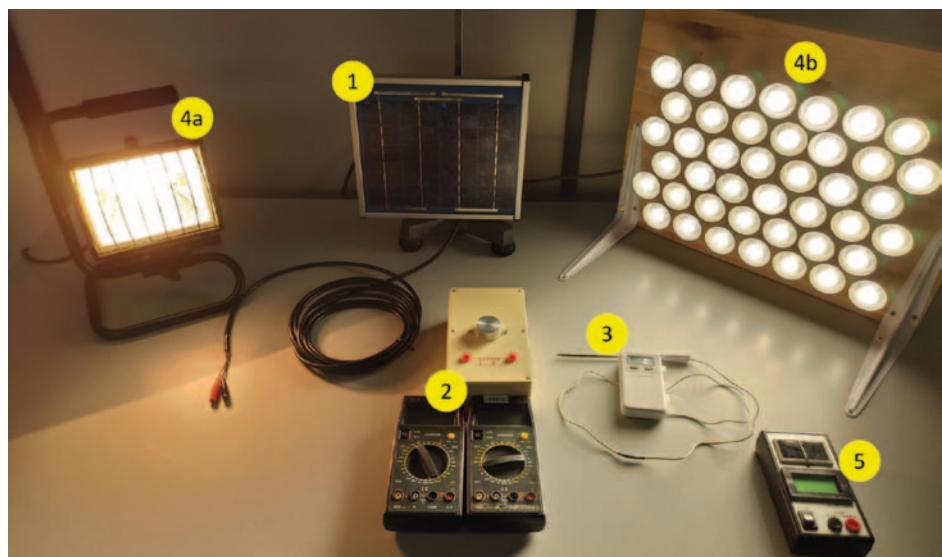


Fig. 1. Material básico necesario. (1): Módulo fotovoltaico; (2): reóstato, amperímetro y voltímetro; (3): termómetro digital; (4a): reflector halógeno o bien (4b) simulador de lámparas LED; (5): piranómetro low-cost. La sensación de brillo causada *in situ* por los simuladores es muy superior a la que sugiere esta fotografía.

de medida se halla unos centímetros por delante de la superficie del módulo, lo que nos obligará a corregir la distancia módulo-fuente tras llevar a cabo la medida.

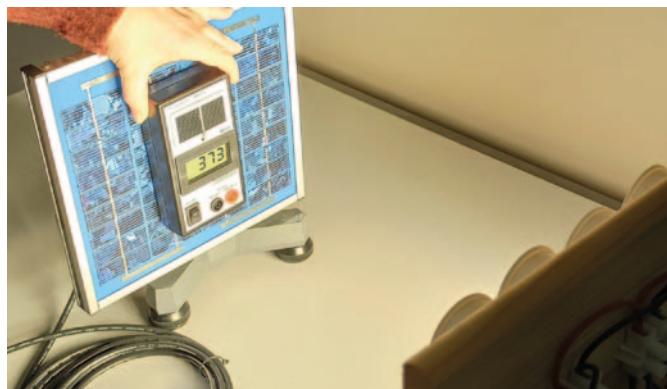


Fig. 2. Medida de irradiancia G . No todos los piranómetros dan la lectura directamente en W/m^2 , pero este ejemplar sí lo hace. La parte inferior derecha de la imagen muestra una porción del simulador LED.

Ensayo 1. Curva estándar tensión-intensidad

Las características eléctricas esenciales de todo módulo fotovoltaico se encuentran codificadas en la **curva tensión-intensidad $I(V)$** , formada todos los posibles pares de valores de tensión e intensidad de corriente que el módulo entrega. El aspecto típico de la curva se muestra en la Figura 3: a tensiones bajas el módulo entrega una intensidad de corriente más o menos constante, mientras que a tensiones altas la corriente cae rápidamente. El punto de corte de la curva con el eje horizontal se denomina **tensión de circuito abierto V_{ca}** , porque es la tensión que el módulo suministra cuando no fluye corriente alguna entre sus terminales. El otro punto de corte es la **intensidad de cortocircuito I_{cc}** , denominación igualmente obvia.

La curva tensión-intensidad nos permite determinar qué tensión e intensidad entregará el módulo en condiciones reales de funcionamiento, es decir, el llamado **punto de trabajo** del módulo. El punto de trabajo depende del aparato al que el módulo alimenta en un momento dado. Como caso más simple e instructivo consideremos que se trata de una resistencia eléctrica R ordinaria, como se aprecia en el recuadro de la Fi-

gura 3. Evidentemente, la tensión entre terminales del módulo coincide con la caída de tensión en R , y la intensidad es única en el circuito. Por otra parte, la ley de Ohm para R nos dice que $I = V/R$, por lo que la curva representativa de la resistencia es una recta de pendiente $1/R$. Por consiguiente, el punto de trabajo del módulo es el punto de corte entre ambas líneas.

El primer ensayo propuesto es la elaboración de esta curva. Todo lo que se requiere es el circuito de la Figura 4, en el que los terminales del módulo se conectan al reóstato, interponiendo un amperímetro y un voltímetro en la forma estándar. Recorriendo todo el rango del cursor del reóstato vamos tabulando pares de valores (V, I) , cuya representación gráfica es la curva buscada. La tensión de circuito abierto V_{ca} es inaccesible, porque requiere una resistencia infinita; en lugar de eso, la tenemos a nuestro alcance sin más que conectar el voltímetro directamente a los terminales del módulo.

Los resultados se muestran como círculos en la Figura 5. En concreto, el ensayo que se presenta se llevó a cabo bajo una irradiancia de 390 W/m^2 . Como se aprecia, su aspecto es el mismo que se apuntó en la Figura 3. Aun así, difiere notablemente de la curva estándar, que se ha representado mediante línea continua. El motivo es que el ensayo estándar ha de llevarse a cabo bajo una irradiancia $G_0 = 1.000 \text{ W/m}^2$,

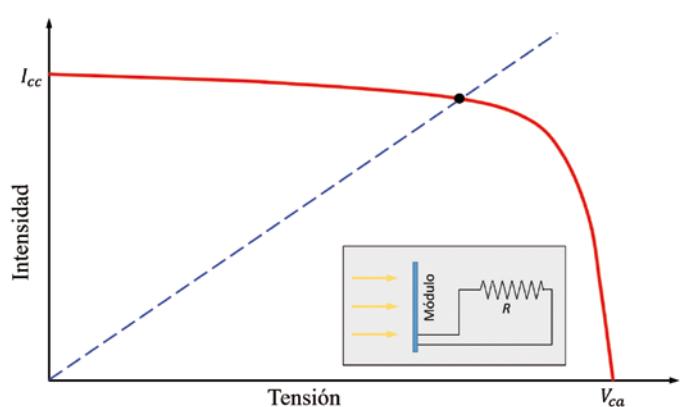


Fig. 3. (Línea continua): curva tensión-intensidad de un módulo fotovoltaico común; (**recuadro**) esquema de un módulo conectado a una resistencia R ; (**línea discontinua**): recta característica de la resistencia. El punto de corte entre ambas líneas determina la tensión e intensidad entregadas por el módulo.

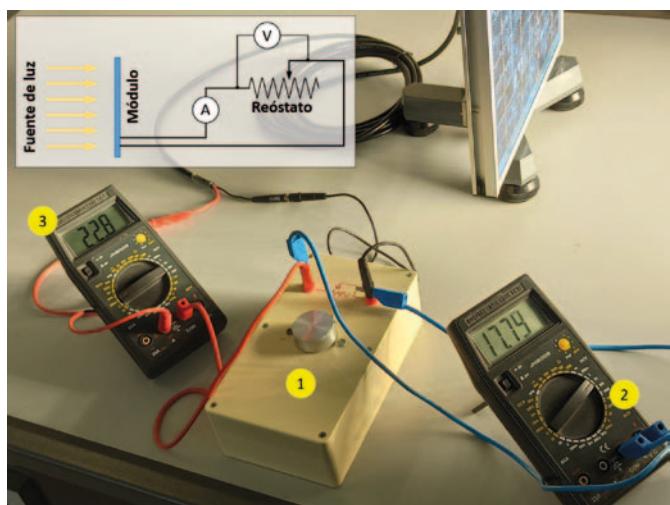


Fig. 4. Montaje para la medida de la curva V-I. El recuadro indica el esquema de conexiones. (1): Reóstato; (2): voltímetro; (3): amperímetro.

como ya se ha mencionado. La comparación es posible si se tiene en cuenta que, en primera aproximación, el módulo responde a cambios de irradiancia sin modificar la tensión en sus terminales y cambiando de forma proporcional la intensidad [5]. En otras palabras, es preciso cambiar la escala vertical de los puntos experimentales², lo que da lugar a los cuadrados de la Figura 5. Ahora sí se aprecia la similitud con la curva estándar. La discrepancia entre ambas curvas existe, pero es atribuible a factores que podríamos llamar “de segundo orden” (incertidumbres en la irradiancia experimental, diferencias de contenidopectral entre la fuente y la luz solar natural, efectos de temperatura, edad del módulo, etc.), por lo que no parece muy pertinente insistir en ella ante alumnos que no estén especialmente cualificados.

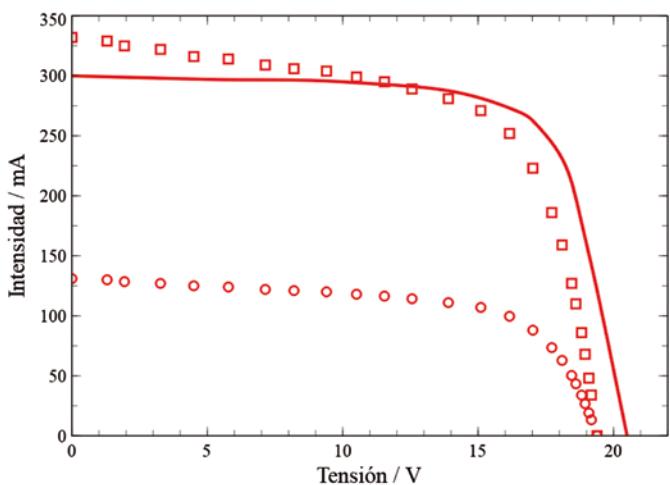


Fig. 5. Curvas (I/V) para el módulo objeto del ensayo. (Círculos): ensayo experimental, bajo una irradiancia $G = 390 \text{ W/m}^2$; (cuadrados): curva corregida a 1.000 W/m^2 ; (línea): curva estándar proporcionada por el fabricante del módulo.

Ensayo 2. Curva de potencia y eficiencia

Estrictamente hablando este apartado no describe un ensayo, sino un par de cálculos relevantes en relación con las ener-

² Como se indicó previamente, esta corrección no sería necesaria si el ensayo se llevó a cabo bajo luz solar natural un día despejado.

gías recibida y entregada por el módulo. En primer lugar, trazaremos la llamada **curva de potencia** del módulo $P(V)$, que representa la potencia eléctrica entregada por él en función de la tensión en sus terminales. Puesto que todo módulo entrega corriente continua, la potencia es simplemente $P = IV$ y los datos tabulados del ensayo anterior nos permiten elaborar de inmediato la curva de potencia. La Figura 6 muestra los resultados en los mismos tres casos consignados en la Figura 5. Todas ellas comparten el perfil característico de los módulos fotovoltaicos: un crecimiento aproximadamente lineal a tensiones bajas, un máximo —el punto de máxima potencia, en cuyos alrededores es deseable que opere el módulo— y un desplome posterior hasta la tensión de circuito abierto.

Como es natural, la potencia máxima depende de la irradiancia y es aproximadamente proporcional a ella. En particular, la potencia máxima registrada en el ensayo estándar se denomina **potencia nominal** del módulo; es el número con unidades de potencia que el fabricante proclamará en la etiqueta, en la publicidad y en la hoja de datos de su módulo. La curva estándar de la Figura 6 indica que el ensayo fue hecho sobre un módulo de 4,5 W nominales.

Una de las razones por las que la curva de potencia es importante es porque nos habla de la **eficiencia** con la que el módulo convierte energía radiante en energía eléctrica. En el ámbito fotovoltaico la eficiencia se vincula a las condiciones de máxima entrega, es decir, se entiende como eficiencia máxima. Un módulo con área de captación A sometido a una irradiancia G recibe una energía $G \cdot A$ por unidad de tiempo. Por tanto, es natural definir la eficiencia de este modo:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{G \cdot A}$$

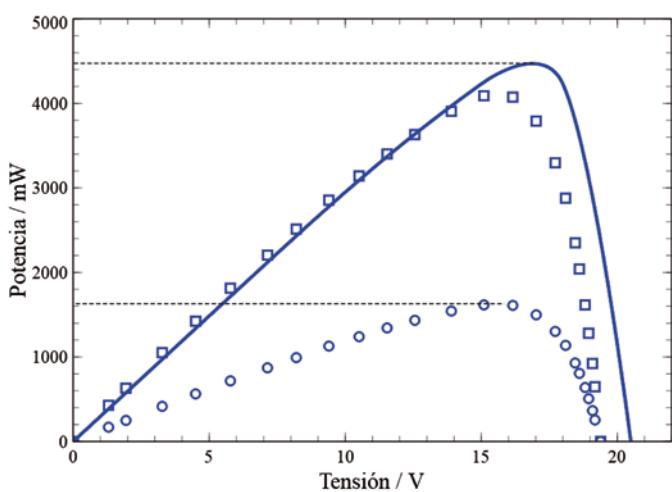


Fig. 6. Curvas $P(V)$ para el módulo objeto del ensayo. (Círculos): ensayo experimental, bajo una irradiancia $G = 390 \text{ W/m}^2$; (cuadrados): curva corregida a 1.000 W/m^2 ; (línea): curva estándar proporcionada por el fabricante. Se señalan sobre el eje vertical la potencia máxima durante el ensayo y la potencia nominal del módulo.

Teniendo en cuenta que el área de captación del módulo ensayado era de $23,5 \times 18,5 \text{ cm}^2$, la eficiencia durante el ensayo fue del 9,5 %, frente al 10,3 % que se deduce de la curva estándar. Los módulos actuales basados en silicio rondan el 15 %, bastante superior a la de nuestro ejemplar, que

tiene más de 20 años. En todo caso, quien se aproxima por primera vez a la energía fotovoltaica suele catalogar estas cifras como decepcionantes. Así es preciso presentárselo a los alumnos: hoy por hoy solo se puede convertir en electricidad útil una fracción modesta de la energía contenida en la radiación solar.

Ensayo 3. Efectos de la temperatura

Una de las consecuencias colaterales del carácter semiconductor de los dispositivos fotovoltaicos es que, a igualdad de otros factores ambientales, la potencia que entregan decrece al aumentar la temperatura de las células que los componen. En términos coloquiales, un módulo dado genera más energía eléctrica al sol de la Antártida que en un momento igualmente soleado en el Sahara. Es muy fácil comprobar el fenómeno sin ir tan lejos, e incluso evaluarlo de forma aproximada.

El ensayo que se propone es una variante del que dio lugar a la curva tensión-intensidad, con un par de modificaciones. En primer lugar, es preciso apoyar firmemente el extremo de la sonda del termómetro contra la superficie del módulo, a fin de registrar una temperatura lo más parecida posible a la temperatura de sus células; si la sonda es voluminosa y genera sombras importantes, se puede intentar el truco de apoyarla en la superficie posterior del módulo. En segundo lugar, conviene que el módulo opere en condiciones de máxima potencia, o al menos no muy lejos de ellas, como se indicará más adelante. Nada más fácil: de los datos obtenidos en el ensayo 1 se recaba el par (V, I) que dio lugar a la máxima potencia, se calcula la resistencia y se ajusta el cursor del reóstato, con ayuda de un polímetro, hasta que tenga esa resistencia $R = V/I$; todo el ensayo se llevará a cabo en esas condiciones.

Con el mismo montaje de la Figura 4 y el módulo inicialmente a temperatura ambiente, se comienza a iluminar el módulo (bien sea con luz solar o con simulador). A medida que transcurre el tiempo la superficie el módulo se irá calentando; a intervalos más o menos fijos de temperatura anotaremos ésta, la tensión, la intensidad y su producto, la potencia. Los triángulos de la Figura 7 revelan cómo decrece la potencia a medida que el módulo se calienta.

Es común en el ámbito fotovoltaico definir un **coeficiente de temperatura para la potencia** máxima del modo siguiente:

$$\alpha_t = \frac{1}{P_{\max}} \frac{dP_{\max}}{dT},$$

donde T es la temperatura de las células del módulo. Esta definición proclama que, al menos en el intervalo en que este coeficiente se pueda considerar como constante, la potencia máxima debe variar exponencialmente con la temperatura:

$$P_{\max}(T) \approx P_{\max}(T_0) \cdot \exp[\alpha_t \cdot (T - T_0)],$$

siendo T_0 la primera de las temperaturas registradas. Desde este punto de vista tiene sentido llevar a cabo un ajuste exponencial con los puntos de la Figura 7. El aspecto de la nube de puntos también invita a un ajuste lineal; ambos modelos son buenas opciones debido a que el intervalo de temperaturas explorado es muy limitado.

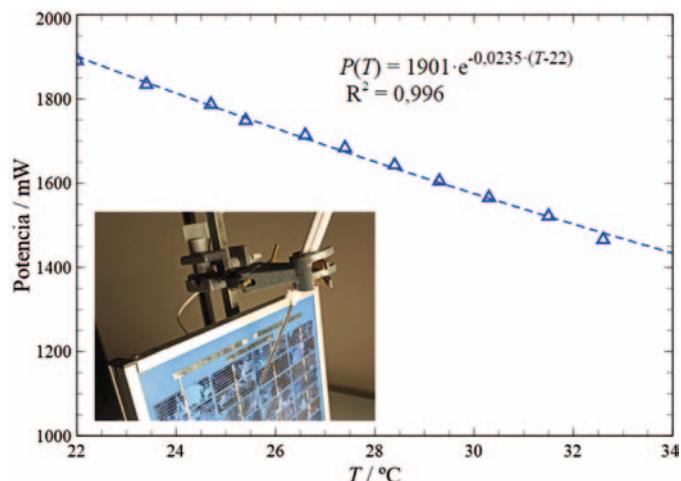


Fig. 7. Potencia en función de la temperatura en la superficie del módulo. La fotografía del recuadro sugiere una forma de apoyar el sensor del termómetro contra la superficie. (Triángulos): valores experimentales; (Línea de trazos): ajuste exponencial.

El coeficiente obtenido con arreglo al modelo exponencial, $\alpha_t = 2,35\%/\text{°C}$, es claramente superior (en valor absoluto) a los valores comunes para módulos de silicio, que oscilan entre $-0,4\%/\text{°C}$ y $-0,5\%/\text{°C}$ [6]. Aun así, no debemos ser muy severos con nuestro resultado. Para empezar, el ensayo se llevó a cabo sobre un módulo de más de dos décadas de vida; en segundo lugar, la temperatura que medimos es la temperatura en la superficie del módulo, no la de sus células; y en tercero, llevar a cabo el ensayo con resistencia fija implica que a medida que aumenta la temperatura el módulo se va apartado de sus condiciones de máxima potencia entregada.

Conclusiones

Los ensayos propuestos apenas arañan la superficie de la ciencia y la tecnología fotovoltaicas, pero pueden constituir una primera aproximación a un mundo del que, sin duda, cada vez oiremos hablar más en el futuro. El autor lleva años encomendando ensayos similares a sus alumnos de tercero o cuarto curso de ingeniería. No obstante, el nivel de los conceptos implicados (corriente y circuitos eléctricos, energía, potencia, rendimiento, etc.) es básico, lo que permite adaptarlos sin demasiadas complicaciones a primeros cursos del grado en Física y también a alumnos de Bachillerato.

Referencias

- [1] Red Eléctrica Española, nota de prensa del 23-01-2020, en <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2020/01/mejora-cualitativa-en-la-integracion-de-renovables-en-2019-se-conectaron-a-la-red-645-MW-de-nueva-generacion-renewable-6126-MW-mas-que-el-2018>.
- [2] M. I. GONZÁLEZ, "An LED Solar Simulator for Student Labs", *Phys. Educ.* 52 (2017). doi: 10.1088/1361-6552/aa5f86.
- [3] FREDERIKSEN, fabricante de material para laboratorios de física. <https://int.frederiksen.eu/shop/product/handheld-pyranometer-with-display-1>.
- [4] M. ORTEGA, *Energías Renovables* (Paraninfo, Thomson Learning, Madrid, 2002, pág. 33).
- [5] R. MESSENGER y J. VENTRE, *Photovoltaic Systems Engineering* (CRC Press, Boca Raton FL, 2000, pág. 43).
- [6] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>.