

# Curvas características de una célula solar

Félix Rodríguez Lagonell  
<frodrigue1117@alumno.uned.es>  
Técnicas Experimentales IV - UNED

Septiembre 2021

## Resumen

Se lleva a cabo la caracterización de una célula solar a través del cálculo de la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto, la potencia máxima, el factor de forma y la eficiencia de la célula. Así mismo se comparan estos valores para el caso de una lámpara incandescente y bajo exposición solar.

## 1. Introducción

Una célula solar es un dispositivo capaz de convertir energía lumínica en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico.

Cuando un semiconductor como el silicio es expuesto a la luz, un fotón de energía arranca un electrón, creando a la vez un «hueco» en el átomo excitado. Normalmente, el electrón encuentra rápidamente otro hueco para volver a llenarlo, y la energía proporcionada por el fotón, por tanto, se disipa en forma de calor. El principio de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los huecos a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él: así, se producirá una diferencia de potencial y por lo tanto tensión entre las dos partes del material. Para ello se dopa el silicio (unión PN) con la intención de crear un campo eléctrico permanente, que es el que obliga a separarse a los huecos y electrones y produce así la corriente eléctrica.

Cuando iluminamos una célula que se encuentra conectada a una carga o resistencia, se produce una diferencia de potencial en los extremos de la carga y circula una corriente por ella. La corriente entregada a la carga por la célula es el resultado neto de dos componentes que se oponen, éstas son la corriente de iluminación  $I_L$  debida a portadores de carga que produce la iluminación y la corriente

de oscuridad  $I_D$  debida a la recombinación térmica de portadores

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{-qV}{mK_b T}} - 1 \right] \quad (1)$$

Donde  $V$  es el voltaje cuando se polariza el diodo,  $k_b$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura,  $m$  un factor de calidad del diodo y hace referencia a las imperfecciones en las uniones en diodos,  $I_0$  es la corriente inversa de saturación del diodo. Así pues, la corriente entregada por la célula será  $I = I_L - I_D$  y la curva característica I-V será por tanto la superposición de la curva I-V del diodo en oscuridad con la corriente inducida.

Los parámetros más importantes para la caracterización de una célula solar son entonces la corriente de cortocircuito  $I_{SC}$  (intensidad proporcionada por la célula cuando  $V = 0$ ) y corresponde con la corriente más grande que puede aportar la célula, la tensión de circuito abierto  $V_{OC}$  que sería la tensión máxima disponible de una célula cuando  $I = 0$ , la potencia máxima  $P_{max}$  que corresponde con el punto de inflexión de la curva I-V, el factor de forma  $FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} V_{OC}}$  y, por último, la eficiencia de la célula  $\eta = \frac{P_{max}}{P_L}$  (donde  $P_L$  sería la energía entrante del Sol).

## 2. Metodología

Llevaremos a cabo la caracterización de una célula fotovoltaica de  $50\text{cm}^2$ . Para la toma de medidas contamos con un dispositivo experimental basado en una fuente luminosa, un amperímetro, un voltímetro, un reostato, termopila, un cristal de vidrio y un generador de aire caliente.

En primer lugar mediremos la intensidad de luz que emite la fuente luminosa en función de

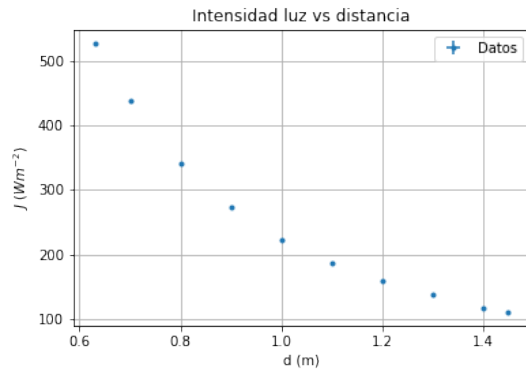


Figura 1: Dependencia de la intensidad con la distancia

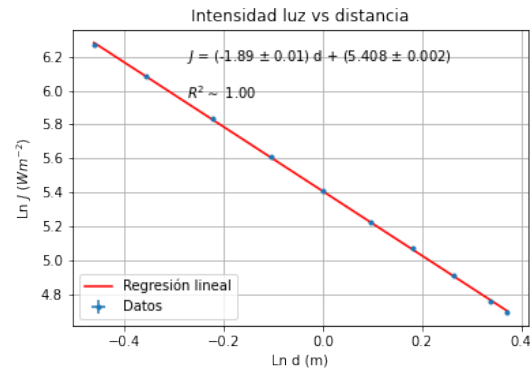


Figura 2: Dependencia del logaritmo intensidad con la distancia

la distancia. Para ello primero que nada establecemos el cero de la termopila, con sensibilidad  $22,69\mu V/Wm^{-2}$ , y tras fijar un factor de ampliación en 100 mediremos diferentes voltajes dados por la termopila  $V_{th}$  a diferentes distancias. Una vez sepamos la intensidad de luz que llega a ciertas distancias, colocaremos la célula en sendas posiciones para variar la resistencia de la carga desde  $V = V_{OC}$  (o  $I = 0$ ) hasta  $V = 0$  (o  $I_{SC}$ ) y así medir valores de intensidad y corriente. Con estos datos calcularemos los parámetros de la célula solar.

Para comprobar las desviaciones de los parámetros en función de la temperatura repetiremos el proceso situando un cristal entre la fuente luminosa y la célula en un experimento y luego aplicaremos calor gracias al generador de aire caliente en un segundo experimento.

Finalizaremos con una comparación de la eficiencia exponiendo la célula a la luz solar frente a la eficiencia calculada en el caso de la fuente luminosa.

### 3. Resultados

En primer lugar mediremos la variación de la intensidad de la luz con la distancia. Asumiremos que toda la luz que entra por la apertura de la termopila alcanza la superficie de medida, siendo la sensibilidad de la termopila de  $\sigma = 22,69\mu V/Wm^{-2}$ . Los resultados obtenidos se muestran en la figura (1), donde la intensidad será  $J = V/\sigma$ .

Como es de esperar obtenemos una dependen-

cia  $J \propto \frac{1}{r^2}$ , lo cual, si aplicamos logaritmos a nuestros datos deberíamos obtener una dependencia  $Ln(J) \propto -2Ln(r)$ , resultados que se muestran en la figura (2) además de su correspondiente regresión lineal. Vemos que hay una discrepancia entre el valor esperado (-2) y el valor de la pendiente de la regresión ya que la dependencia  $J \propto \frac{1}{r^2}$  es para una fuente ideal y sin pérdidas, realidad que no corresponde con nuestro experimento.

Una vez medida la intensidad de luz que llega a nuestra célula pasaremos a estudiar las curvas I-V a varias intensidades de luz. A las distancias de 70, 110 y 150 cm y, haciendo uso de un reostato, variamos poco a poco la resistencia de la carga desde  $V = V_{OC}$  (o  $I = I_{SC}$ ) para medir valores de intensidad y voltaje. Los resultados se muestran en la figura (3), donde además de han señalado los puntos  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y  $P_{max}$ . Con estos datos podemos calcular ciertos parámetros de interés como son el factor de llenado (factor de forma) y la eficiencia de la célula solar.

En la tabla (1) vemos como la intensidad luminosa que llega a la célula  $I_{SC}$  y  $V_{OC}$  son inversamente proporcionales a la distancia en la que se encuentra la célula. La potencia máxima alcanza un máximo cuando la célula se encuentra alrededor de los 110cm mientras que la resistencia aumenta a medida que también aumenta la distancia. El factor de forma FF se mantiene constante al ser un parámetro característico del dispositivo mientras que la eficiencia de la célula, cuyo valor bastante bajo ronda el 4%, también disminuye a medida que la célula se encuentra más alejada del foco de luz.

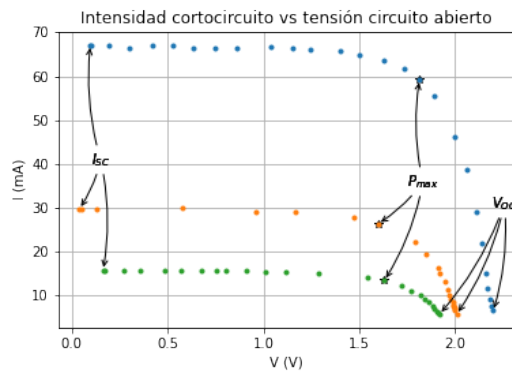


Figura 3: Dependencia de la corriente de cortocircuito con la tensión de circuito abierto para distancias de 70, 110 y 150 cm.

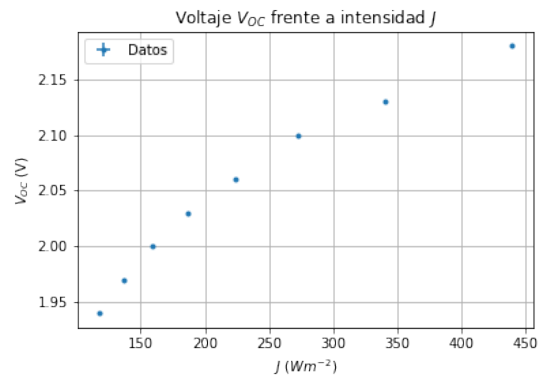


Figura 4: Voltaje  $V_{OC}$  frente a intensidad  $J$  para distancias

	Distancia (cm)		
	70,0 ± 0,1	110,0 ± 0,1	150,0 ± 0,1
$J (Wm^2)$	439,8 ± 0,4	186,4 ± 0,4	110,2 ± 0,4
$I_{SC} (\cdot 10^{-3} A)$	67,1 ± 0,1	29,8 ± 0,1	15,8 ± 0,1
$V_{OC} (\cdot 10^{-2} V)$	220,0 ± 0,1	201,0 ± 0,1	192,0 ± 0,1
$P_{max} (mW)$	107,4 ± 0,2	422,40 ± 0,19	219,99 ± 0,17
$R (\Omega)$	30,66 ± 0,07	60,6 ± 0,2	121,1 ± 0,9
$FF (\cdot 10^{-2})$	72,8 ± 0,4	70,5 ± 0,8	72,52 ± 1,5
$\eta (\cdot 10^{-3})$	48,96 ± 0,15	45,3 ± 0,3	39,9 ± 0,5

Cuadro 1: Resultados curva característica I-V

Manteniendo el montaje experimental medimos directamente  $I_{SC}$  y  $V_{OC}$  para determinar la dependencia frente a la intensidad de luz. Los resultados se visualizan en la figura (4) donde se presenta la dependencia  $V_{OC}$  frente a la intensidad de luz y en la figura (5) que muestra la dependencia lineal de  $I_{SC}$  frente a la intensidad de luz. En concreto tenemos que  $I_{SC} = \alpha J$

Para medir el efecto de la temperatura en las curvas características I-V tomaremos datos haciendo dos modificaciones. En primer lugar interpondremos un cristal de vidrio entre el foco de luz y la célula solar y, en segundo lugar, calentaremos directamente la célula de aire gracias a una corriente continua de aire a 60°C.

Podemos ver en la figura (6) estos resultados. En primera instancia vemos que la curva I-V para el cristal y el aire caliente permanecen con valores

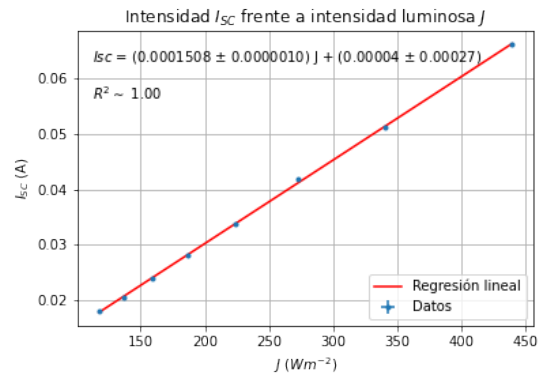


Figura 5: Intensidad  $I_{SC}$  frente a intensidad luminosa  $J$

inferiores a la curva I-V en condiciones normales (con la temperatura ambiente de 27°C). En cuanto a las modificaciones en sí mismas vemos que el valor de  $I_{SC}$  para la curva I-V del aire caliente es superior a la curva del cristal, mientras que  $V_{OC}$  ocurre al revés. Con lo cual se produce un decaimiento más pronunciado hacia  $V_{OC}$  en el caso del aire caliente.

En los datos proporcionados por el fabricante nos dice que  $\frac{\Delta V_{OC}}{\Delta T} \sim -8mV/K$ , por lo que para cada celda se debería obtener alrededor de -2mV/K (la batería está compuesta de 4 celdas en serie). En nuestro caso obtenemos  $\frac{\Delta V_{OC}}{\Delta T} = -4,8 \pm 0,6mV/K$ . Las discrepancias en estos valores pueden deberse a las diferencias en las condiciones de laboratorio entre fabricante y nosotros, pues nuestro dispositivo experimental es muy rudimentario y las

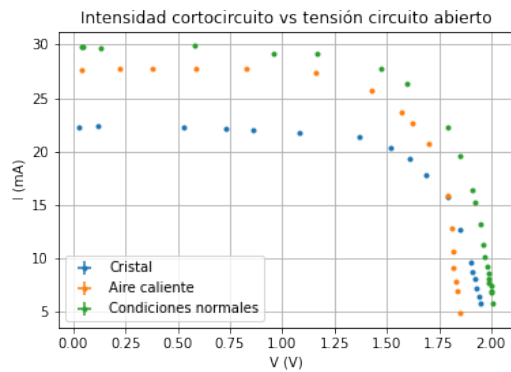


Figura 6: Efecto de la temperatura sobre la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto. Distancia de 110cm al foco de luz.

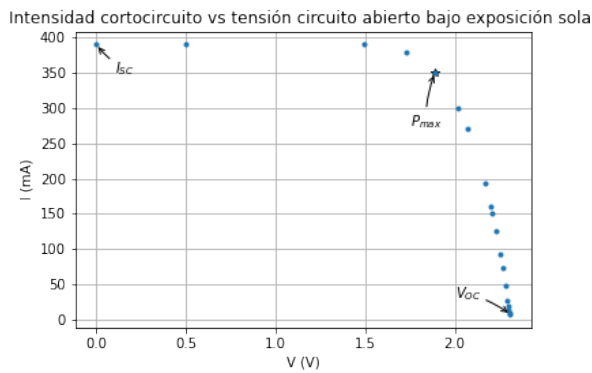


Figura 7: Dependencia de la corriente de cortocircuito con la tensión de circuito abierto bajo exposición solar.

condiciones de temperatura quizás no sean muy fehacientes. Es posible también que la dependencia con la temperatura en el rango estudiado no sea lineal. Además, tampoco sabemos las condiciones luminosas del fabricante.

Para finalizar representamos los datos I-V y parámetros relevantes de la célula bajo exposición solar en la figura (7) y la tabla (2)

En este caso podemos ver que la eficiencia de la célula solar es muy superior al foco de luz (junto con los parámetros  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $P_{max}$ ), dando casi un valor del 12 %, consecuencia directa de que contamos con una fuente luminosa mucho mayor. Si calculamos el valor de  $I_{SC}$  mediante la regresión anterior  $I_{SC} = \alpha J$  obtenemos  $I_{SC} = 0,1715 \pm 0,0012A$

	$V_{th}$
	$25,8 \pm 0,1mV$
$J (Wm^2)$	$1137,1 \pm 0,4$
$I_{SC}(\cdot 10^{-3}A)$	$390,0 \pm 0,1$
$V_{OC}(\cdot 10^{-2}V)$	$231,0 \pm 0,1$
$P_{max}(mW)$	$661,5 \pm 0,5$
$R (\Omega \cdot 10^{-2})$	$540,0 \pm 0,4$
$FF (\cdot 10^{-2})$	$73,4 \pm 0,1$
$\eta(\cdot 10^{-3})$	$116,4 \pm 0,14$

Cuadro 2: Resultados curva característica I-V bajo exposición solar

## 4. Conclusiones

Durante este experimento se han estudiado los fundamentos que subyacen al funcionamiento de una célula solar. A través de la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto se ha llevado a cabo la caracterización de la célula, así como el cálculo de parámetros importantes como son la potencia máxima, el factor de forma y la eficiencia. Nuestros experimentos han corroborado los fundamentos teóricos en cuanto a dependencia de estos valores frente a la variación de distancia entre la fuente y la célula (a través de la luminosidad que llega a la célula) y la temperatura a la que ésta está sometida.

En el caso de nuestra célula en particular, hemos verificado experimentalmente que la eficiencia es mayor cuando sobre ella incide luz solar, obteniendo un 12 % de eficiencia frente al 4 % de una lámpara incandescente. Esto es así debido a que las células solares son fabricadas de tal manera que sean capaces de aprovechar una mayor parte del espectro de la radiación solar en comparación con una lámpara incandescente.

## Referencias

- [1] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. 2005.