

FÍSICA EXPERIMENTAL I

Eficiencia y Circuitos Equivalentes de una Celda Solar

MATÍAS ROQUETA
INSTITUTO BALSEIRO

Resumen

Se estudiaron las características de una celda solar midiendo la tensión y corriente entre sus terminales en diferentes circuitos, los valores medidos son consistentes con los de una celda solar tipo B, o de calidad media. En particular, se calculó el Fill Factor de la celda, que es un indicador de la eficiencia de la misma, obteniendo un valor de $0,40 \pm 0,02$.

En base a los valores medidos para encontrar el Fill Factor se plantearon además dos circuitos equivalentes a la celda, equivalentes de Thévenin y de Norton. Se confirmó que estos dos equivalentes obtenidos son equivalentes entre si.

Se plantea la utilidad de usar estos circuitos equivalentes para el diseño de paneles solares, resaltando la importancia de extender el experimento realizado con exposición a mayores intensidad luminosa. Con el objetivo de confirmar que las tendencias encontradas de tensión, corriente, y resistencia, se mantengan para niveles de luz superiores a los que la lámpara usada en el experimento alcanzó.

Introducción

La teoría de celdas solares explica el proceso por el cual los fotones de la luz solar son convertidos en electricidad solar por el uso de un material semiconductor. Esta área de estudio predice los límites funcionales de una celda solar, permite estudiar su eficiencia, y los fenómenos que contribuyen a pérdidas.

Para analizar el comportamiento de una celda se utiliza un modelo eléctricamente equivalente de la misma, presentado en la figura 1, del cual se obtienen los parámetros característicos de la celda.

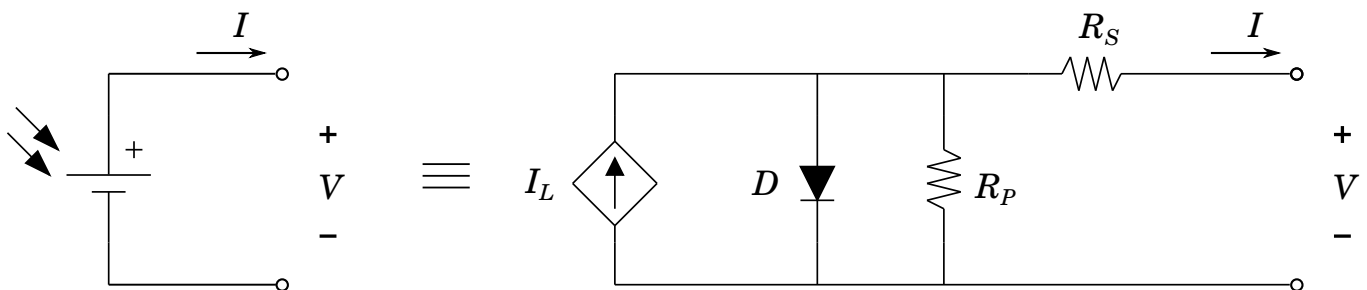


Figura 1: Modelo eléctrico equivalente de una celda solar. [1]

I_L : Corriente fotogenerada.

R_P : Resistencia en paralelo, o de *shunt*.

R_S : Resistencia en serie.

D : Diodo semiconductor regido por la ley de Shockley $I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$. [2]

I_S : Corriente de saturación en inversa.

V_T : Tensión térmica.¹

n : Factor de idealidad.²

Estos parámetros se pueden organizar en aquellos independientes de la intensidad luminosa, y los dependientes de la misma. No dependen de la intensidad luminosa las resistencias en serie y paralelo R_S y R_P ni los parámetros que caracterizan al diodo, Mientras que es función de la intensidad luminosa la corriente fotogenerada I_L .

El estudio de la eficiencia de la celda solar se centra en la medición de otras características del circuito, que por su dependencia con I_L son también función de la intensidad luminosa.

I_{CC} : Corriente de salida a cortocircuito, la máxima corriente que puede generar la celda.

V_{CA} : Tensión de salida a circuito abierto, la máxima tensión que puede generar la celda.

P_{Max} : Máxima potencia que puede transmitir la celda a la carga.

R_{Max} : Resistencia de carga para la cual la transferencia de potencia es máxima.

Los valores de I_{CC} y de V_{CA} expresan los límites máximos de tensión y corriente que puede generar la celda ante determinada iluminación. Sin embargo en condiciones tanto de circuito abierto como de cortocircuito, la potencia transmitida por la celda, $P = IV$, es nula.

Se determina el *Fill Factor* de la celda solar como un parámetro de eficiencia e idealidad de la misma, que compara la máxima potencia que puede transmitir la celda respecto a la máxima corriente y tensión que puede generar.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} V_{CA}} \quad (1)$$

Método Experimental

Se construye en el laboratorio un circuito que permita regular la intensidad luminosa a la que es expuesta una celda solar, y medir la tensión y corriente entre los bornes de la misma con un voltímetro y amperímetro midiendo a 4 puntas. El circuito se presenta en la figura 2.

La celda se ilumina con una lámpara conectada a la red eléctrica por medio de una resistencia variable que permite regular la potencia luminosa que irradia. El voltímetro y amperímetro se encuentran conectados a una computadora que adquiere y registra los valores de tensión y corriente medidos utilizando LabView.

¹ $V_T = \frac{kT}{e^-}$, con T la temperatura absoluta del diodo, e^- la carga del electrón, k la constante de Boltzmann. A temperatura ambiente, $V_T \sim 26 \text{ mV}$.

²El factor de idealidad cuantifica el ajuste del comportamiento de un diodo al esperado por la teoría, en un diodo ideal, $n = 1$.

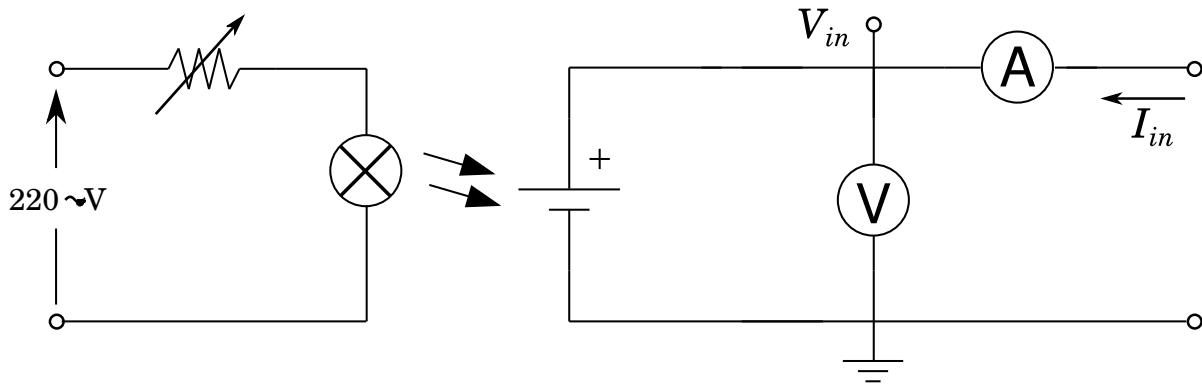


Figura 2: Circuito construido en el laboratorio para medir los parámetros de la celda solar.

Entre los terminales de el circuito de medición se conectan diferentes elementos, según lo que se desee medir, midiendo corriente y tensión de entrada a la celda permitirá encontrar todos los parámetros característicos de la misma.

Se admiten como error de tensión y de corriente medidos a la mínima cifra significativa que no varía a causa del ruido eléctrico durante la medición.

$$\sigma_V = 0,01 V$$

$$\sigma_I = 0,1 mA$$

Medición de Parámetros Independientes de la Luz

Para medir los parámetros independientes de la luz, se apaga la lámpara y se conecta una fuente de tensión externa a los bornes del circuito. Al no estar expuesta a intensidad luminosa, la celda se comportará como un circuito totalmente pasivo.

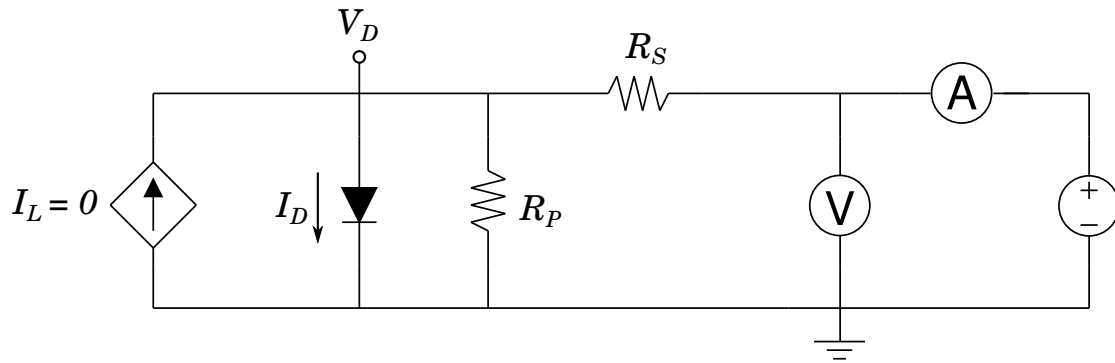


Figura 3: Circuito utilizado para medir los parámetros independientes de la luz de la celda solar.

La celda se polariza tanto en directa como en inversa, registrando una curva característica tensión-corriente de la misma. De esta curva se obtienen zonas de linealidad correspondientes a ambas polarizaciones, obteniendo rectas de regresión.

En polarización directa a altas tensiones, el diodo se comporta como cortocircuito, en polarización inversa se comporta como circuito abierto, obteniendo las siguientes pendientes en zona lineal.

$$\text{Directa: } I_{in} = \frac{1}{R_S} V_{in}.$$

$$\text{Inversa: } I_{in} = \frac{1}{R_S + R_P} V_{in}$$

Obtenidas R_S y R_P se calculan I_D y V_D en zona lineal de polarización directa.

$$V_D = V_{in} - R_S I_{in} \quad (2) \quad I_D = I_{in} - \frac{1}{R_P} V_D \quad (3)$$

Si un diodo opera tal que se cumple la aproximación $e^{\frac{V_D}{nV_T}} \gg 1$, es válido utilizar la aproximación 4 a la ecuación de Shockley.

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \simeq I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad (4)$$

Esto permite expresar la ecuación 5, ecuación lineal que relaciona la tensión y corriente en el diodo.

$$\ln I_D = \ln I_S + \frac{1}{nV_T} V_D \quad (5)$$

Medición de Corriente Fotogenerada I_L y Tensión y Corriente de Salida Máximas

Para encontrar la dependencia de I_L con la intensidad luminosa se construye el circuito representado en la figura 4. Se aplica una determinada intensidad luminosa a la celda la cual es medida con un luxímetro, generando la corriente I_L .

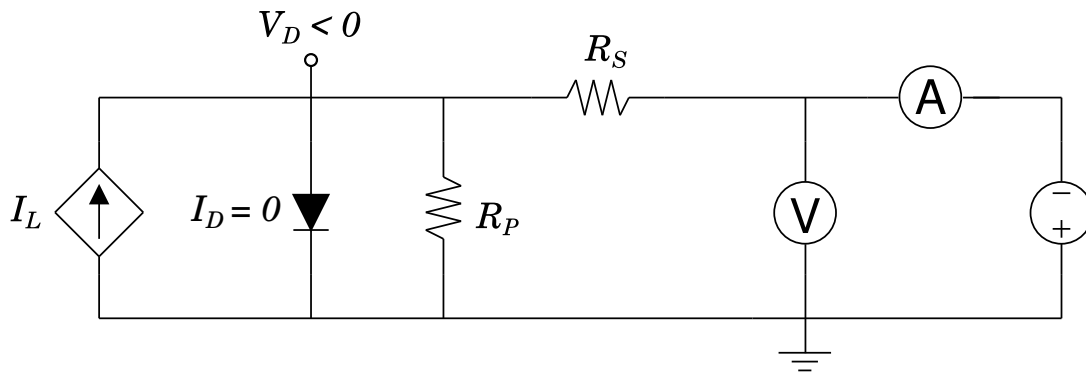


Figura 4: Circuito utilizado para medir la corriente fotogenerada en función de la intensidad luminosa.

Para medir esta corriente se aplica una tensión externa que polariza el diodo en inversa, tal que este actúe como circuito abierto, y se plantea la ecuación del nodo V_D .³

$$I_L = \frac{1}{R_P} V_D - I_{in} \quad (6) \quad V_D = V_{in} - R_S I_{in} \quad (7)$$

Este procedimiento se repite para distintos valores de iluminación, y se presentan los datos en una gráfica $I_L - L$ para la cual se busca una tendencia.

Por el efecto de las resistencias internas del voltímetro y el amperímetro, no se puede simultáneamente tener un verdadero cortocircuito ni circuito abierto a la salida de la celda y medir tensión o corriente de salida.

³Nótese que en esta polarización, V_{in} e I_{in} tendrán valor negativo.

Este circuito permite medir tensión a circuito abierto usando la fuente externa para contrarrestar la corriente que circula por las resistencias internas, y corriente a cortocircuito usándola para contrarrestar la caída de tensión sobre las mismas.

Esto se valida midiendo la potencia de salida al momento de registrar la medición, sea de tensión o de corriente, confirmando que la potencia de salida sea cero.

Se espera que la tensión a circuito abierto sea la tensión de Thévenin del circuito, y la corriente a circuito cerrado la corriente de Norton.

Medición de Máxima Transferencia de Potencia

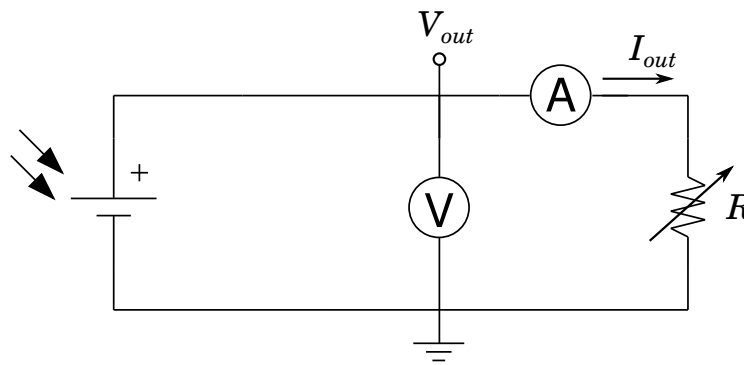


Figura 5: Circuito empleado para encontrar la máxima transferencia de potencia.

La fuente de tensión externa ahora se reemplaza con una resistencia variable, permitiendo que la celda actúe como único elemento activo del circuito. La resistencia se varía y se registran los valores de tensión y corriente de salida.

Con estos datos se calcula el valor de la resistencia de carga y de la potencia entregada por la celda.

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \qquad P = I_{out} V_{out}$$

Se grafica potencia entregada en función de resistencia de carga, y se encuentra el máximo. Por teorema de máxima transferencia de potencia, la resistencia para la cual la potencia entregada es máxima es igual a la resistencia en serie del equivalente Thévenin del circuito, o bien la resistencia en paralelo del equivalente Norton. [3]

Se usan los datos medidos para plantear equivalentes de Thévenin y Norton de la celda solar. Para poder afirmar que son simultáneamente válidos, se evalúa si los dos supuestos equivalentes obtenidos son a su vez equivalentes entre sí.

Un circuito de Thévenin y un circuito de Norton son equivalentes si se cumple la siguiente ecuación.

$$R_{Th} = R_N \qquad V_{Th} = R_N I_N \qquad (8)$$

Resultados

Parámetros Independientes de la Luz

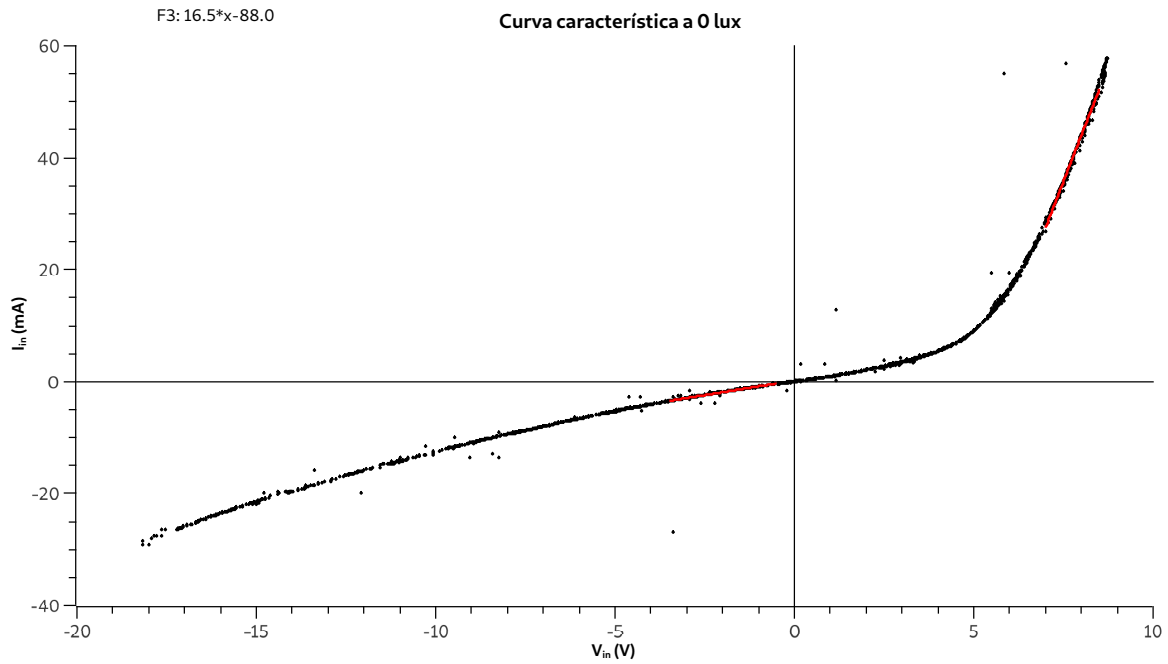


Figura 6: Curva característica de la celda solar a 0 lux y a una temperatura de $T \sim 273K$.

De la curva característica de la celda solar expuesta a 0 lux se obtuvieron las siguientes pendientes en zona lineal.

$$\text{Directa: } I_{in} = I_0 + (16,5 \pm 0,3)mS V_{in}$$

$$\text{Inversa: } I_{in} = (1,41 \pm 0,08)mS V_{in}$$

Estas pendientes corresponden a resistencias en serie y paralelo de

$$R_S = (0,050 \pm 0,003) k\Omega$$

$$R_P = (0,90 \pm 0,09) k\Omega$$

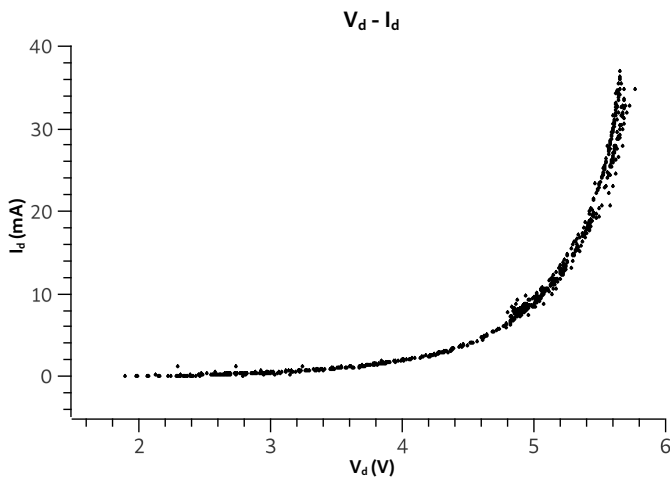


Figura 7: Curva característica tensión corriente sobre el diodo polarizado en directa.

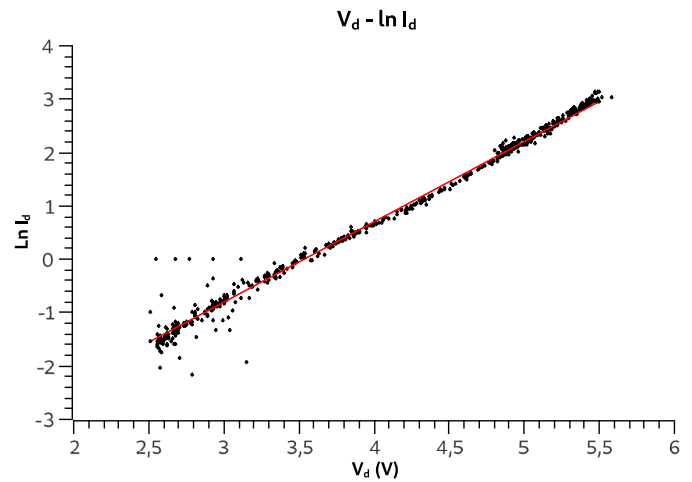


Figura 8: Curva de logaritmo de la corriente en función de la tensión.

Se usan las ecuaciones 2 y 3 para encontrar la tensión y corriente aplicadas al diodo y son presentadas en la figura 7, mostrando el comportamiento exponencial consistente con la ley de Shockley. Se grafica además el logaritmo de la corriente en función de la tensión, presentado en la gráfica 8.

De la figura 8 se obtiene la recta de regresión correspondiente a la ecuación 5, con ordenada al origen $\ln I_S = -(5,35 \pm 0,06) \ln_{mA}$, y pendiente $\frac{1}{nV_T} = (1,51 \pm 0,04) V^{-1}$.

Se concluyen los siguientes parámetros del diodo.

$$I_S = (4,75 \pm 0,05) \mu A$$

$$n = 25 \pm 1$$

Medición de I_L , I_{CC} y V_{CA}

Se polariza la celda expuesta a determinadas intensidades luminosas en inversa y se registran los siguientes valores de tensión y corriente.

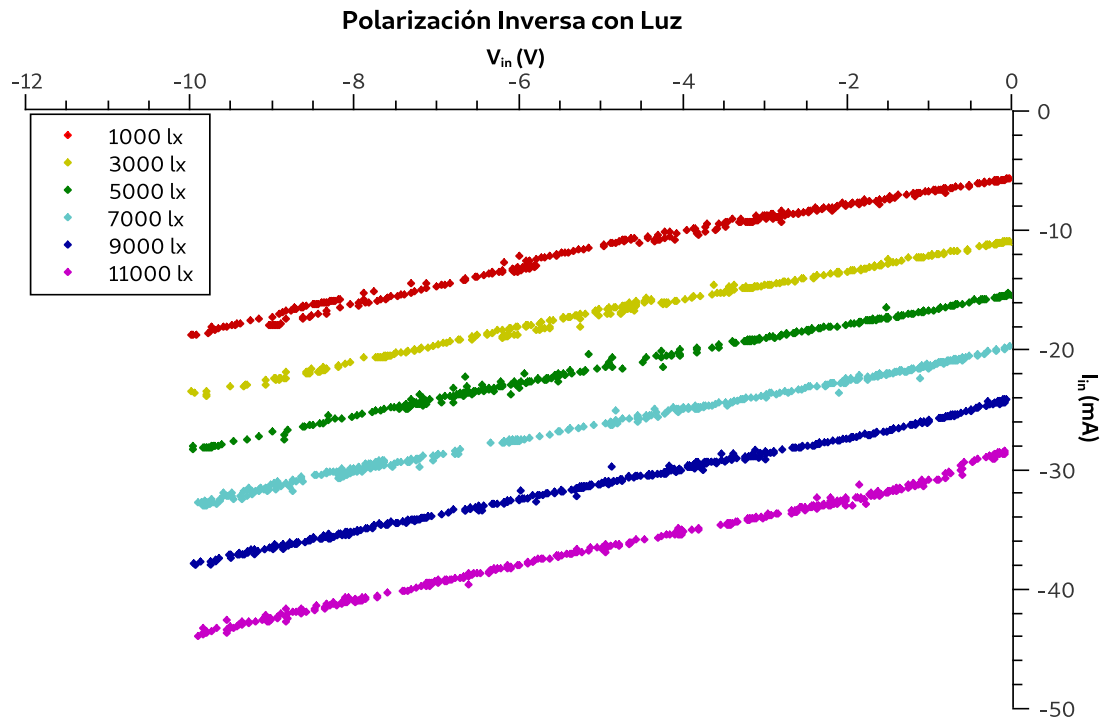


Figura 9: Curvas tensión-corriente de entrada sobre los terminales de la celda expuesta a diferentes intensidades luminosas en polarización inversa.

A partir de los datos presentados en la figura 9 se encuentran valores consistentes de I_L a partir de la ecuación 6 en zona lineal de polarización inversa. La ecuación 7 se usa para garantizar estar en polarización inversa. Estos valores se comparan con la corriente de salida en cortocircuito medidas a correspondientes intensidades luminosas y se presentan en la figura 10.

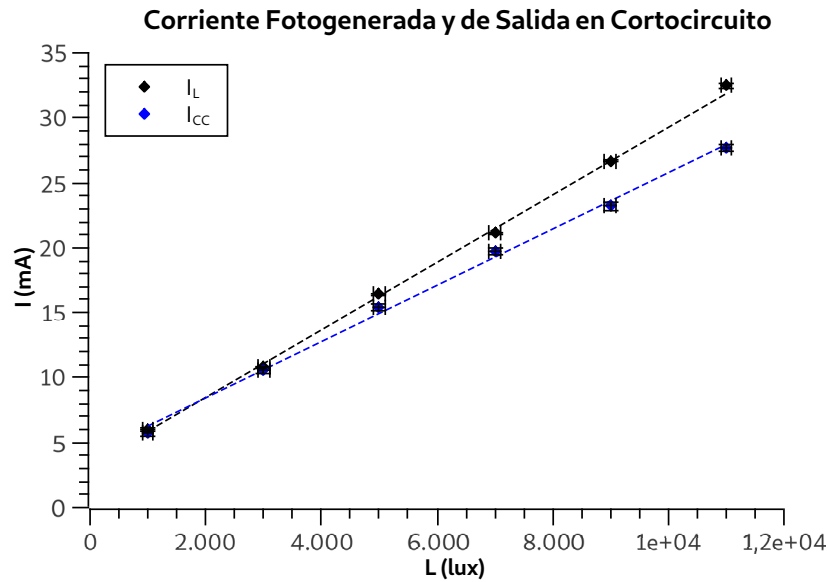


Figura 10: Comparación de I_L e I_{CC} ante diferentes intensidades luminosas, con correspondientes rectas de regresión lineal.

De las rectas de regresión presentadas se obtienen las siguientes expresiones de $I_L(L)$ e $I_{CC}(L)$

$$I_L = (2,61 \pm 0,01) \frac{mA}{lux} L + (3,2 \pm 0,1) mA$$

$$I_{CC} = (2,17 \pm 0,04) \frac{mA}{lux} L + (4,0 \pm 0,2) mA$$

Se presentan en la figura 11 los valores medidos de V_{CA} ante las mismas intensidades luminosas.

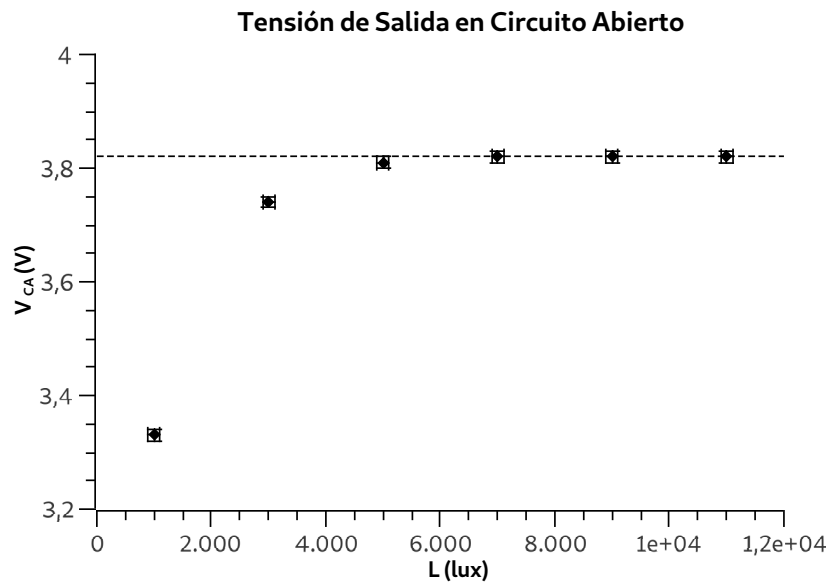


Figura 11: Tensión en circuito abierto en función de intensidad luminosa comparada con valor de convergencia.

Al incrementar la iluminación sobre los 5000 lux se observa una tendencia de V_{CA} a converger a un valor de

$$V_{CA} = (3,82 \pm 0,01) V$$

Máxima Transferencia de Potencia

La celda se conecta a una resistencia variable y se expone a luz, registrando valores de tensión y corriente de salida conforme se varía la resistencia se obtienen los datos presentados en la figura 12.

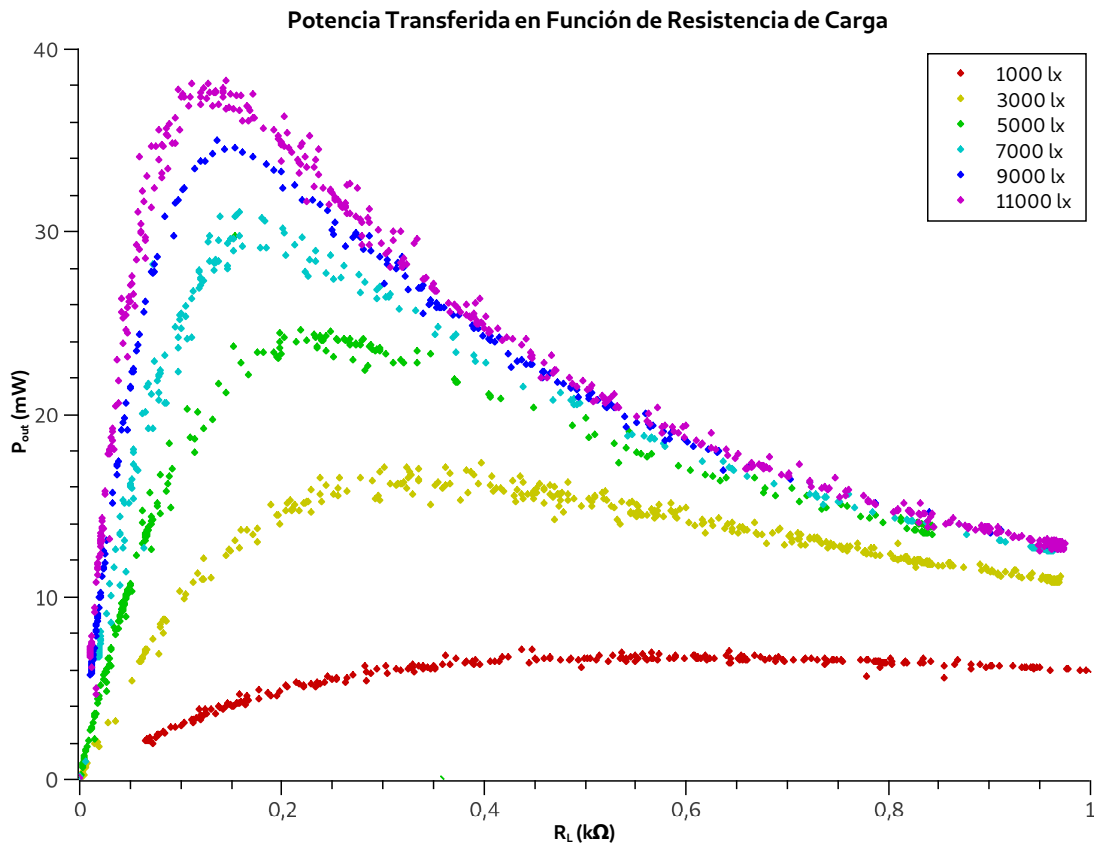


Figura 12: Curvas de potencia transferida en función de resistencia de carga ante diferentes intensidades luminosas.

En la gráfica se aprecia un incremento de la potencia transmitida con la intensidad luminosa, así como una disminución de la resistencia de carga correspondiente a esa máxima transferencia de potencia.

Se observa además la tendencia a 0 de la potencia transmitida con $R_L = 0$, la salida a cortocircuito, y el decaimiento de la potencia transferida a altas resistencias de carga, aproximándose a las condiciones de salida a circuito abierto.

Se admiten como resistencia de máxima transferencia de potencia a aquellas resistencias que hacen que la potencia caiga por debajo del 95 % del valor máximo registrado para esa intensidad luminosa.

Obtención del Fill Factor

A partir de los valores de corriente de salida a cortocircuito presentados en la figura 10, de tensión de salida a circuito abierto presentados en la figura 11, y de máxima transferencia de potencia presentados en la figura 12, se calcula el Fill Factor en función de la intensidad luminosa.

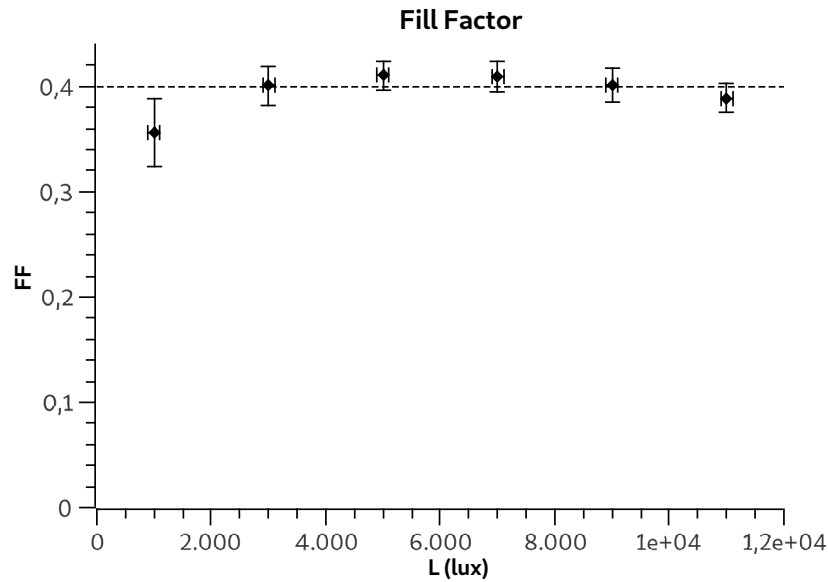


Figura 13: Fill Factor calculado en función de intensidad luminosa.

Se determina en base a estos datos que cuando la celda está iluminada sobre los 3000 lx esta presenta un Fill Factor de

$$FF = 0,40 \pm 0,02$$

Equivalentes Thévenin y Norton

Se cuenta con los valores de corriente en cortocircuito presentados en la figura 10 y de tensión a circuito abierto presentados en la figura 11.

Para plantear un equivalente de Thévenin hace falta encontrar la resistencia equivalente en serie, obtenida a partir del teorema de máxima transferencia de potencia y los datos presentados en la figura 12.

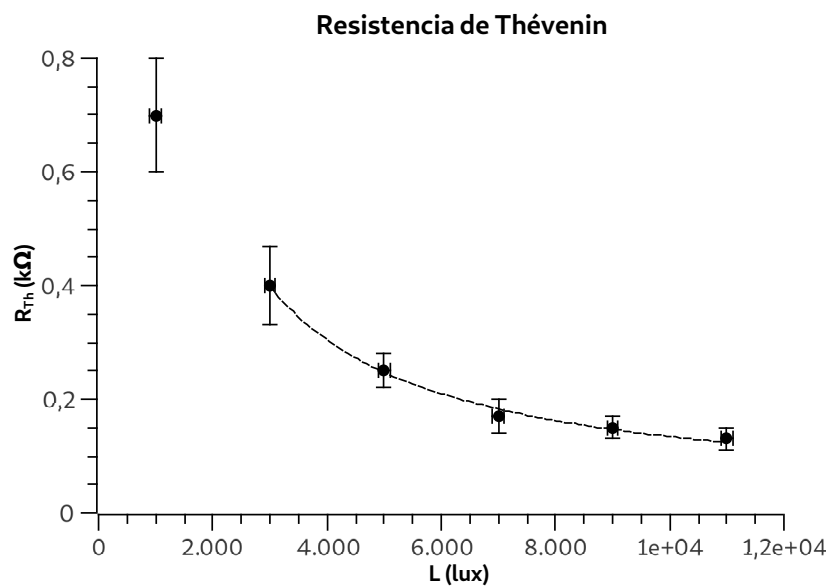
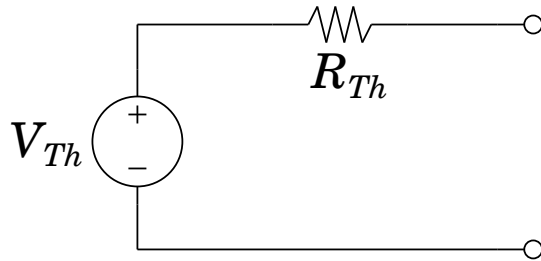


Figura 14: Resistencia de máxima transferencia de potencia medida a diferentes intensidades luminosas.

A partir de los 3000 lx , los datos medidos se ajustan a la siguiente curva de proporcionalidad inversa

$$R_{Th} = (1,13 \pm 0,04) \text{ k}\Omega \frac{1}{L} + (0,021 \pm 0,008) \text{ k}\Omega$$

Se obtiene por lo tanto el siguiente equivalente de Thévenin.

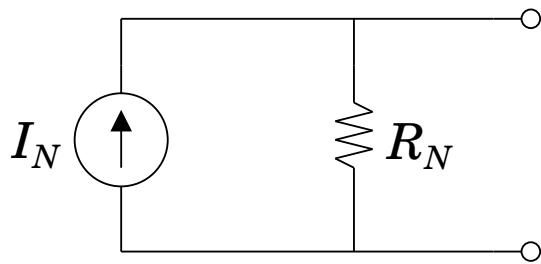


$$V_{Th} = (3,82 \pm 0,01) \text{ V}$$

$$R_{Th} = [(1,13 \pm 0,04) \text{ k}\Omega L^{-1} + (0,021 \pm 0,008)] \text{ k}\Omega$$

Figura 15: Equivalente Thévenin obtenido, válido para iluminaciones $L \geq 3000 \text{ lx}$.

Si la resistencia de máxima transferencia de potencia se toma como la resistencia equivalente en paralelo, se obtiene el siguiente equivalente Norton.



$$I_N = [(2,17 \pm 0,04) \frac{1}{\text{k}\Omega} L + (4,0 \pm 0,2)] \text{ mA}$$

$$R_N = [(1,13 \pm 0,04) \text{ k}\Omega L^{-1} + (0,021 \pm 0,008)] \text{ k}\Omega$$

Figura 16: Equivalente Norton obtenido, válido para iluminaciones $L \geq 3000 \text{ lx}$.

Es necesario determinar si los dos circuitos equivalentes obtenidos son equivalentes entre sí para afirmar que son equivalentes válidos. Para esto se comparan V_{Th} con $R_N I_N$.

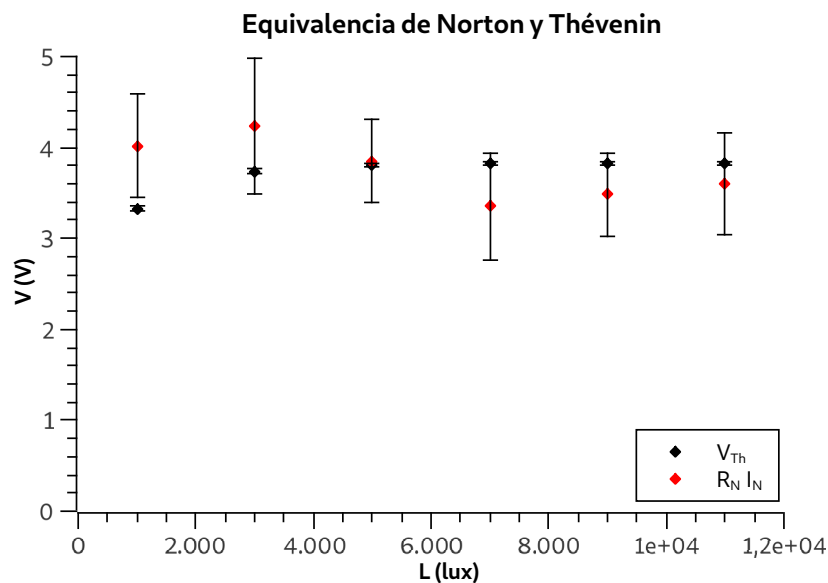


Figura 17: Evaluación de criterio de equivalencia entre circuitos de Norton y Thévenin.

Se valida por medio de la figura 17 que se cumple la ecuación 8 dentro del error experimental para valores de intensidad luminosa superiores a los 3000 lx , por lo que se puede suponer que los equivalentes de Norton y de Thévenin obtenidos son válidos para ese rango.

Discusión

La celda solar ideal tiene valores de R_S muy bajos, y valores de R_P muy altos, de ser R_P alto o R_S bajo, se producirá una disminución apreciable en la tensión de salida, disminuyendo la potencia entregada por la celda solar. [1]

La resistencia de Thévenin calculada muestra convergencia esperada a $(0,021 \pm 0,008) \text{ k}\Omega$ para altas intensidades luminosas, las cuales serían las condiciones en las que se espera que opere la celda solar. Este es el valor de resistencia de entrada para la carga de la celda que aseguraría máxima transferencia de potencia.

Tomando este valor como referencia, la resistencia en paralelo medida $R_P = (0,90 \pm 0,09) \text{ k}\Omega$ está en una orden de magnitud mayor, suficiente para considerarse alta. Sin embargo la resistencia en serie $R_S = (0,050 \pm 0,003) \text{ k}\Omega$ no puede considerarse baja, lo que significa una baja eficiencia de la celda solar bajo estudio.

Esta baja eficiencia se ve reflejada en el Fill Factor medido, de $FF = 0,40 \pm 0,02$, consistente con los límites inferiores de una celda solar de grado B. Una celda solar se considera de alta calidad o grado A si presenta un Fill Factor de $FF > 0,7$. [4]

Se midió un factor de idealidad del diodo de $n = 25 \pm 1$, lo que significa que el diodo usado en el modelo está muy lejos de ser ideal.

Sin embargo la no idealidad del diodo en el modelo no afectó la validez del estudio realizado de equivalentes de Thévenin y Norton. Dentro del error experimental no se obtuvieron evidencias para descartar la validez de los circuitos equivalentes obtenidos para niveles de iluminación mayores a los 3000 lx .

Una celda solar como elemento individual no transmite mucha potencia, se midieron potencias en el orden de los mW , las centrales solares en Argentina aportan potencias en el orden de los MW a la red eléctrica nacional. [5]

Por este motivo las celdas solares se usan en paneles solares, arreglos de múltiples celdas solares conectadas en serie o en paralelo. Para este tipo de arreglos contar con equivalentes de Thévenin o Norton resulta una herramienta útil.

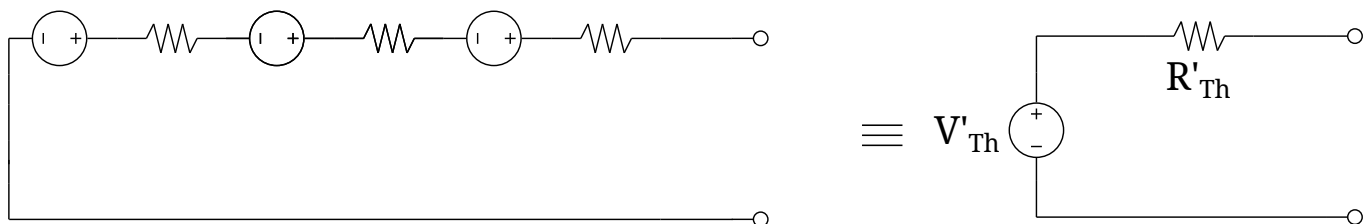


Figura 18: Arreglo de múltiples circuitos de Thévenin en serie.

Es muy fácil encontrar un equivalente Thévenin de un arreglo de múltiples circuitos de Thévenin en serie, el equivalente tendrá las siguientes características.

$$V'_{Th} = \sum_{i=0}^n V_i \qquad R'_{Th} = \sum_{i=0}^n R_i$$

Asimismo el equivalente Norton facilita asociación en paralelo.

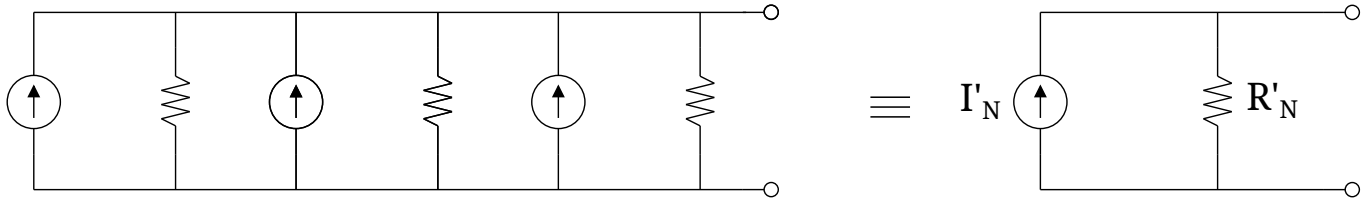


Figura 19: Arreglo de múltiples circuitos de Norton en paralelo.

El equivalente Norton del arreglo en paralelo tendrá las siguientes características

$$I'_N = \sum_{i=0}^n I_i \qquad R'^{-1}_N = \sum_{i=0}^n R_i^{-1}$$

El estudio de los circuitos equivalentes de la celda solar indica que es posible hacer uso de estas asociaciones para diseñar paneles solares de forma modular, usando el equivalente correspondiente a cada tipo de asociación.

Existe una limitación importante en el experimento realizado, y eso es la intensidad luminosa que podía alcanzar la lámpara utilizada. El valor máximo con el que se pudo iluminar a la celda utilizando la lámpara fue los 11 klx .

Como medición adicional, se usó el mismo luxímetro para medir la intensidad luminosa proveniente del sol, medida a diferentes horas del día durante varios días soleados. Se midió una intensidad luminosa de $(114 \pm 2) \text{ klx}$, una orden de magnitud superior a la intensidad que podía suministrar la lámpara.

El estudio realizado para validar los circuitos equivalentes medidos era el esperado, por ser consistente con las tendencias de I_{CC} , V_{CA} , y R_{Max} respecto a la intensidad luminosa. El que sean V_{CA} constante, I_{CC} linealmente dependiente, y R_{Max} inversamente dependiente de la intensidad luminosa es lo que permite que se cumpla la ecuación 8.

De alguna de estas tendencias ya no cumplirse cuando la intensidad luminosa supere los 11 klx , se invalidarían los circuitos equivalentes, por este motivo se requiere obtener una lámpara de mayor intensidad para poder asegurar que el estudio realizado sigue siendo válido para las escalas de luz en las que un panel solar operaría.

Referencias

- [1] E. Lorenzo, *Electricidad Solar*. Promotora General de Estudios S.A., 1994.
- [2] K. S. Adel Sedra, *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 1998.
- [3] E. Spinadel, *Circuitos Eléctricos y Magnéticos*. Nueva Librería, 1982.
- [4] TechnoSun, “¿qué es el factor de forma o fill factor?,” 2009.
- [5] J. Durán, “Energía solar fotovoltaica en argentina,” *Departamento de Energía Solar - Comisión Nacional de Energía Atómica*, 2017.