



Taller de Energía Fotovoltaica

Guía para las actividades en exteriores

Laboratorio de Energía Solar

CENUR Litoral Norte (Salto)



Guía preparada por: Agustín Laguarda, Gonzalo Abal

Versión del 25 de octubre de 2018

1. Introducción

El Taller de Energía Solar Fotovoltaica es uno de los nuevos cursos de posgrado creados bajo el Programa ERASMUS+ DIEGO (Development of a Quality System through Energy Efficiency Courses) en el que participa la UDELAR a través de su Facultad de Ingeniería.

Éste documento orienta las actividades prácticas a desarrollarse en el marco del Taller Fotovoltaico *en exteriores*. Encontrará manuales, enlaces e información complementaria en la página del Taller <https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=1213>. Estas actividades son una continuación de las realizadas en la primer parte del Taller en el Laboratorio Caracterización Óptica de Materiales del IFFI. Las actividades se desarrollarán en grupos de hasta 3 personas y se dividen en dos actividades de campo: caracterización de paneles (Sección 3) y medidas sobre un sistema autónomo (Sección 4). En la Sección 5 se dan algunas pautas para el informe final, donde se registrará el trabajo de campo, y se mostrarán los resultados obtenidos luego del pos-procesamiento de los datos adquiridos. Siendo esta una actividad de posgrado, lo que se indica en este documento son *pautas*, se espera que los participantes hagan uso de su criterio y de su iniciativa para producir un informe adecuado.

Las medidas en exteriores se desarrollarán en dos días y dependen de las condiciones climáticas, por lo que en caso de condiciones de nubosidad parcial (las más frecuentes en Uruguay), se recomienda aprovechar los intervalos de sol cuando se presentan para tomar medidas, dejando las actividades auxiliares para otros momentos. Es conveniente contar con al menos una computadora portátil por grupo con sistema operativo Windows 10 para la instalación del software del equipo Solmetric de relevamiento de curvas de paneles, ya que será usado recurrentemente.

2. Materiales disponibles

Para realizar las prácticas se cuentan con los siguientes materiales.

a) Sistema fotovoltaico autónomo (24 vdc)

- 6 módulos Kyocera KD140SX-UFBS de 140 W (Si cristalino) de la Facultad de Ingeniería. Especificaciones del fabricante en Tabla 1.
- 2 baterías Motive Power 6GFM200 (solares de ciclo largo) 12 vdc, 200 Ah. Dimensiones 522x240x220 mm (de la Facultad de Ingeniería).

Marca Modelo Celda	Kyocera KD140SX-UFSB Si cristalino	Sanyo/Panasonic VBHN215AJ51 Si HIT (heterojuntura)	Ecosolar SA100-72P Si policristalino
P_{max} (W)	140	215	100
V_{mp} (V)	17.7	42.0	18.9
I_{mp} (A)	7.91	5.13	5.3
V_{oc} (V)	22.1	51.6	22.7
I_{sc} (A)	8.68	5.61	5.8
dim. (mm)	FALTA	1580x812	1032x676

Cuadro 1: Paneles de mediano porte: especificaciones brindadas por los fabricantes en las condiciones nominales (1000 W/m^2 , $AM = 1,5$, $T = 25^\circ\text{C}$)

- 1 regulador de voltaje Pro-Star 30 (PS 30) de Morningstar Co. 12/24 v, 30 A (de la Facultad de Ciencias) <https://www.morningstarcorp.com/products/prostar/>
- Carga ajustable compuesta por 4 focos LED de 100 W cada uno. Se puede generar un consumo de 100, 200, 300 o 400 W (del LES).

b) Paneles aislados disponibles para caracterizar

- 6 módulos Kyocera KD140SX-UFSB de 140 W (Si cristalino) de la Facultad de Ingeniería. Especificaciones del fabricante en Tabla 1.
- 2 paneles Panasonic/Sanyo VBHN 215AJ51 (ex-Planta Asahi, propiedad de UTE), de 215 W. Uno usado (3 años y dañado) y otro nuevo sin uso significativo, para comparar las curvas I-V. Estos paneles usan tecnología HIT de Sanyo (celdas de heterojuntura que alcanzan alta eficiencia). Especificaciones del fabricante en Tabla 1.
- 3 Paneles Ecosolar SA100-72P, SA50, SA40 de Silicio policristalino (españoles) de 100 W, 50W y 40W, respectivamente. Especificaciones del fabricante en Tabla 1. Propiedad del LES.
- 1 panel Solartec de 12 W para medidas de dependencia con la temperatura. Propiedad del LES. Especificaciones en el Cuadro 2.
- 1 panel Eastech de 5 W para medidas de dependencia con la temperatura. Propiedad del LES. Especificaciones en el Cuadro 2.

c) Otros equipos disponibles

- Analizador Solmetric PVA-1000S para relevamiento de paneles y sistemas PV con extensión para 30 A. Propiedad de la facultad de Ingeniería, adquirido por el proyecto DIEGO para este taller. Incluye accesorio para registrar irradiancia solar global en el plano del panel, 2 sensores de temperatura y de inclinación del panel. Especificaciones y documentación en <http://www.solmetric.com/pva1000s.html> o en la página del Taller www.eva.fing.edu.uy
- Cámara IR Flir E8 para determinar puntos calientes (hot spots) en paneles con fallos. Especificaciones en <https://www.flir.com/products/e8/>
- Termocuplas varias para medidas de temperatura.
- Testers varios de campo Extech, alguno con capacidad de registro y envío de datos.

Marca	Solartec	Eastech
Modelo	KS12T	ESF-5PA SPM/P36
Celda	Si cristalino	Si cristalino
P_{max} (W)	12.0	5.0
V_{mp} (V)	16.9	17.49
I_{mp} (A)	0.71	0.28
V_{oc} (V)	21.5	21.67
I_{sc} (A)	0.73	0.30
dim (mm)	FALTA	200x320

Cuadro 2: Paneles pequeños: especificaciones brindadas por los fabricantes en las condiciones nominales (1000 W/m^2 , $AM = 1,5$, $T = 25^\circ\text{C}$)

- 1 Pinza amperimétrica YF-8030A.
- Clinómetro con precisión de 0.2 grado.
- Consulte por adquisidores o Notebooks de campo para registro de datos.
- Recurso Solar: el LES pone a disposición mediciones con cadencia minutil de irradiancia global, directa y difusa sobre plano horizontal, a partir de las cuales se puede estimar la irradiancia en plano inclinado utilizando modelos de transposición. Se cuenta además con medidas auxiliares de las variables meteorológicas usuales, pyrgeómetro, irradiancia UVA, UVB y Erithema, entre otras medidas implementadas. También se cuenta con una cámara All-Sky para registrar la distribución de las nubes en la bóveda celeste, con cadencia minutil.

3. Caracterización y análisis de operación de diferentes paneles fotovoltaicos

Las ideas que se aportan en esta Sección son sugerencias de trabajo. Puede realizar otras medidas o comparaciones que Ud. considere de interés. Existe un solo analizador Solmetric, por lo que debe coordinarse que un equipo trabaje sobre esta parte, en tanto el otro trabaja sobre el sistema autónomo.

El objetivo es determinar los parámetros importantes de cada panel en condiciones nominales y su variación en función de variables ambientales como la irradiancia solar en el plano del panel, la temperatura del mismo o incluso si aprecia variación de la eficiencia en condiciones nubladas o despejadas o en función del viento. Se utilizará el equipo Solmetric para relevar las curvas características y sus parámetros. Este es un proceso rápido y se puede repetir en diferentes condiciones. Este equipo incluye un sensor basado en un fotodiodo (Licor 200) que permite registrar la irradiancia global en el plano del panel, además de la temperatura del panel y su inclinación. Se recomienda en cada medición registrar hora, irradiancia en el plano del panel y temperatura del panel, así como llevar un registro fotográfico de las prácticas.

3.1. Caracterización

- Caracterización de diferentes paneles fotovoltaicos:
Durante esta actividad se relevarán las curvas características I-V de diferentes paneles bajo condiciones ambientales similares o al menos comparables. Se comparan los resultados obtenidos con los reportados por el fabricante en cada caso bajo condiciones nominales. Además, se determinará la eficiencia del panel, y se compararán entre sí las eficiencias de las diferentes tecnologías (Si cristalino, policristalino, HIT, etc). Use los paneles medianos para este fin.
- Dependencia de los parámetros relevantes con la irradiancia:
A lo largo del día se pueden tomar medidas del panel utilizando los equipos Solmetric, de forma de registrar valores para diferentes valores de irradiancia. Luego se puede estudiar como varían los parámetros principales con G_t . Dicha actividad puede llevarse a cabo utilizando uno de los paneles medianos por cada equipo.
- Dependencia de los parámetros relevantes con la temperatura:
Éste objetivo puede llevarse a cabo con uno de los paneles pequeños (Cuadro 2) Eastech o Solartec. Por sus pequeñas dimensiones, estos paneles pueden ponerse en una cámara de refrigeración para bajar su temperatura al entorno de los -5°C . Al ponerlos al Sol, bajo una buena irradiancia, se relevan los datos con alta frecuencia (por ejemplo, una medición por minuto) mientras el panel se calienta y alcanza el equilibrio térmico en el ambiente. De este modo puede observar la variación de los parámetros (V_{oc} , I_{sc} , coeficientes térmicos, P_{mp} , eficiencia, FF, etc.) en un amplio rango de temperaturas (de hasta 50°C). Esta variación se puede contrastar con la predicción de los modelos ideales en el informe final.

3.2. Anomalías y condiciones atípicas

- Efectos de sombreado sobre el panel: Estudiar cualitativamente las curvas imponiendo diferentes sombras sobre el panel. Por ejemplo, tapando una celda, una línea de celdas transversal, o una longitudinal. Utilizando la cámara IR verificar la aparición de puntos calientes al haber sombreamientos parciales sobre el panel.
- Paneles dañados: Realice la comparación de los dos paneles Sanyo (HIT), uno sano y el otro impactado por un proyectil y con daño parcial. Relevar las curvas I-V y apreciar los defectos. Buscar posibles puntos calientes con cámara Infrarroja. Como se comparan las eficiencias ?
- Soiling: Puede simular el efecto del polvo sobre el panel y estudiar el impacto en su desempeño. Para ello, es necesario rociar un panel con tierra y medir su desempeño en las mismas condiciones que un panel gemelo, bien limpio. En Uruguay el efecto de Soiling es relativamente menor, dado que el régimen de lluvias es lo bastante frecuente como para mantener niveles de limpieza razonables. En climas desérticos puede ser un problema importante que afecta significativamente el desempeño de una planta o incrementa los costos de operación por limpiezas frecuentes.

4. Estudio y caracterización de un sistema autónomo

Se estudiará el sistema fotovoltaico autónomo de 24 vdc formado por 2 strings de 2 paneles Kyocera en serie (4 paneles en total) conectado al regulador Pro-Star 30. Los paneles se conectan a un banco de baterías de 24 v formado por 2 baterías de 12 v en serie, a través del regulador PS30. Al sistema se le puede conectar una carga aislada que demanda corriente continua. La carga disponible es un conjunto de fuentes LED que pueden demandar al sistema potencias de 100 W, 200 W, 300 W o 400 W.

- Verificar o realizar la conexión del sistema. Tome la precaución de cubrir los módulos si hay Sol, para reducir el riesgo de shock eléctrico. Registrar los valores nominales de los módulos. Verificar que el sensor de irradiancia mide correctamente.
- Obtenga las curvas características del array utilizando el equipo Solmetric, y en condiciones similares, caracterize la curva I-V de un panel Kyocera en solitario. Existe una relación entre estas curvas que podrá estudiar en su informe.
- descarga solar del banco de baterías sin aporte solar (noche simulada): con los paneles desconectados y con carga en el regulador (entre 100 a 400 W) descargar las baterías durante 10/20 minutos. Monitorear tensión y corriente de descarga del banco durante ese período.
- carga del banco de baterías (quitando la carga continua y reconectando el arreglo): monitorear tensiones y corrientes en el banco de baterías, y en el arreglo de paneles, y medir la caída de tensión en el regulador de carga.
- Con el sistema cercano al régimen, con carga continua y buena irradiancia, medir la tensión y corriente en el banco de baterías, y en el arreglo de paneles. Evalúe la eficiencia instantánea del sistema (potencia útil / potencia solar incidente). Potencia útil = potencia utilizada por la carga + potencia a la batería. Estimar para diferentes cargas.

5. Realización de Informe

Cada grupo deberá entregar un informe antes del 26 de Noviembre (aproximadamente un mes) describiendo las actividades desarrolladas y fundamentando los resultados obtenidos. El informe deberá contar con la descripción de las medidas realizadas de acuerdo a lo expresado en las Secciones 3 y 4 y su discusión, y los siguientes puntos para la actividad del sistema autónomo:

- Verificar el dimensionamiento del sistema
- Mostrar la relación entre la curva I-V de un módulo individual y la del arreglo. Contrastar las medidas con lo esperado de acuerdo a las conexiones y lo estipulado para cada módulo en la hoja del fabricante.
- Analizar el desempeño del sistema. El cociente entre la potencia real obtenida y la máxima posible en las condiciones dadas (punto de máxima potencia).
- Considerando una demanda de 100 W constante durante las horas nocturnas, estimar la autonomía del banco de baterías. Considere que el banco de baterías no se descarga a menos del 20% de su carga nominal.

- Suponiendo que el sistema se utiliza para iluminación durante horas nocturnas en Montevideo con un consumo de 100 W, utilizando datos del Año Meteorológico Típico AMT (<http://les.edu.uy/productos/amtues-2/>) y las características del sistema, determinar si es posible satisfacer la demanda en los meses de invierno. En caso negativo: qué parámetro del sistema cambiaría para que funcione? En caso positivo: cuál es la demanda máxima (constante durante a noche) que soportaría este sistema?

5.1. Observaciones

- La temperatura de operación de celda utilizada por el modelo Solmetric es calculada (Pág 6-11 del manual solmetric): a partir del promedio de las 2 temperaturas medidas de termocupla detrás del panel si la irradiancia es menor a $400\text{W}/\text{m}^2$. Si es mayor a $800\text{W}/\text{m}^2$, la calcula ajustando V_{oc} esperada y la medida con el coeficiente térmico. Entre 400 y 800, es una combinación lineal de los dos métodos
- Los coeficientes térmicos que aparecen expresados como porcentajes están referidos al valor de referencia obtenido de la hoja del fabricante.

5.2. Algunas definiciones

- Fill Factor: medida de la calidad del panel: $V_{mp} * I_{mp} / (V_{oc} * I_{sc})$
- Yield: cociente entre la energía generada en un período de tiempo y la potencia instalada (tiene unidades de tiempo)
- Performance factor/factor de rendimiento: energía generada en un período de tiempo / la energía que se espera que genere en ese período. (80 %). Representa pérdidas del sistema por cableado, mismatch, etc.
- Factor de planta/ factor de capacidad: es el cociente entre la energía que genera el sistema en un período de tiempo (típicamente un año) y la energía que generaría si trabajara a máxima potencia todo el tiempo (15 %)
- Eficiencia: es la eficiencia en el sentido físico: energía generada / energía que ingresa al sistema

6. ANEXO

En este anexo incluimos algunos resultados preliminares obtenidos con el equipamiento disponible, a modo de ejemplo.

6.1. Dependencia con la temperatura

Se enfría el panel Eastech de 5 W (Cuadro 2) de forma controlada. Cuando llegue a una temperatura alrededor de 0 grados Celsius, se coloca rápidamente en exteriores en una base fija en un momento de buena irradiancia. La inclinación del panel durante las medidas fue de $47,5^\circ$. Se relevan los parámetros del panel durante unos minutos hasta que alcanza el equilibrio térmico. Todas las medidas que se muestran fueron tomadas el 11/9/2018 entre la hora 10:58



Figura 1: Panel Eastech utilizado en la Sección 6.1

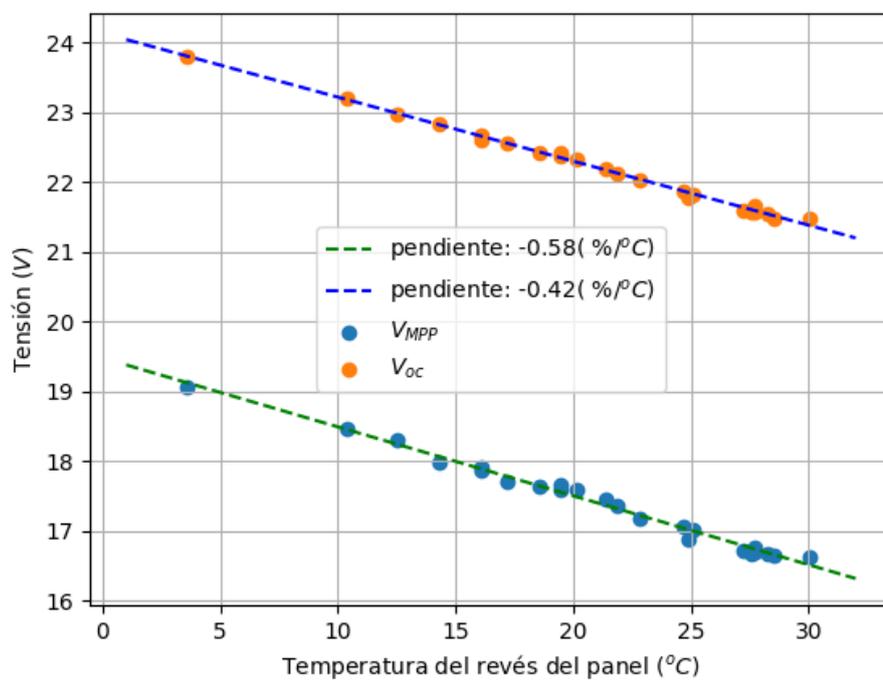


Figura 2: Se muestra la dependencia de la tensión en máxima potencia y de circuito abierto en función de la temperatura del panel.

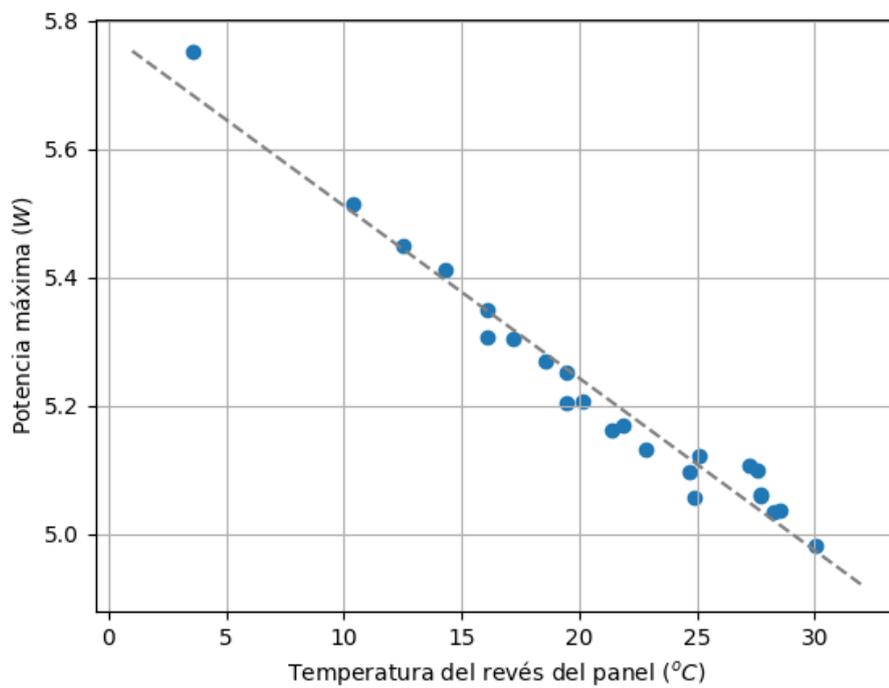


Figura 3: Se muestra la dependencia de la Potencia en el punto de máxima potencia en función de la temperatura

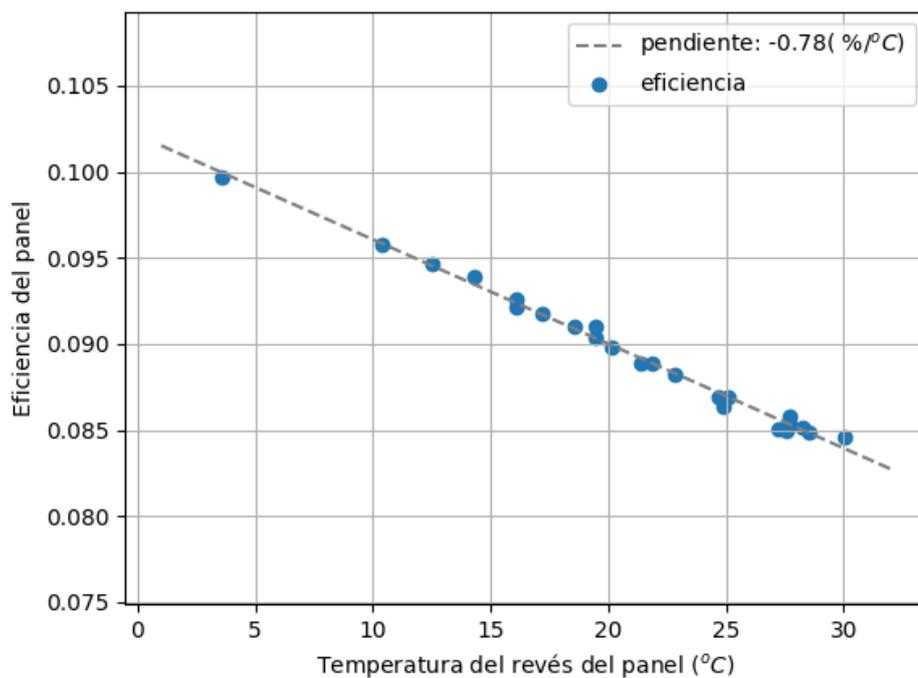


Figura 4: Se muestra la dependencia de la eficiencia (considerando máxima potencia) en función de la temperatura

Eastech ESF-5PA SPM/P36-5W			
	Resultado obtenido	Resultado en %	Hoja del fabricante
Coefficiente térmico V_{oc}	$-91.6 \text{ mV}/^\circ\text{C}$	$-0,42\% \text{ } 1/^\circ\text{C}$	$-0,38\% \text{ } 1/^\circ\text{C}$
Coefficiente térmico I_{sc}	$0.42 \text{ mA}/^\circ\text{C}$	$+0,14\% \text{ } 1/^\circ\text{C}$	$+0,04\% \text{ } 1/^\circ\text{C}$
Coefficiente térmico P_{mpp}	$-26.8 \text{ mW}/^\circ\text{C}$	$-0,54\% \text{ } 1/^\circ\text{C}$	$-0,47\% \text{ } 1/^\circ\text{C}$
Coefficiente térmico η	$-0.61 \times 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$	$-0,78\% \text{ } 1/^\circ\text{C}$	–

Cuadro 3: Resultados de la Sección 6.1. Los resultados expresados en porcentaje se refieren a los datos correspondientes de la Tabla 2

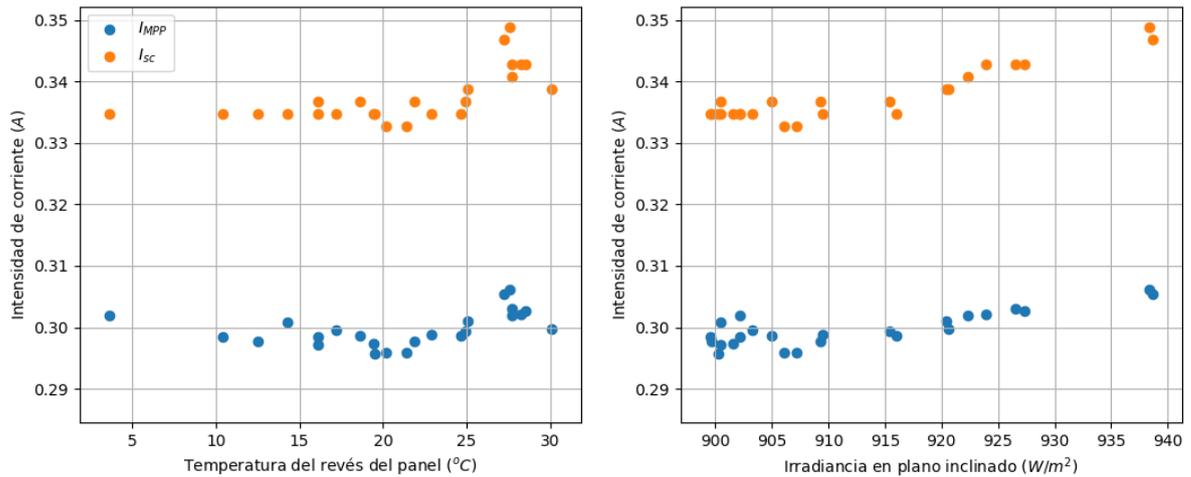


Figura 5: Dependencia de I_{sc} e I_{mp} en función de la temperatura (izquierda) y de la irradiancia incidente (derecha)

y las 11:11. Las irradiancias registradas oscilaron entre $900 \text{ W}/\text{m}^2$ y $939 \text{ W}/\text{m}^2$ (con una media de $912 \text{ W}/\text{m}^2$).

No se observa una dependencia clara de η con la irradiancia. Se observa que I_{sc} no depende significativamente de la temperatura, mientras que si lo hace de la irradiancia incidente. Por más que no se cuenta con medidas a G_t constante, variando T (o con T constante variando G_t) para este panel.

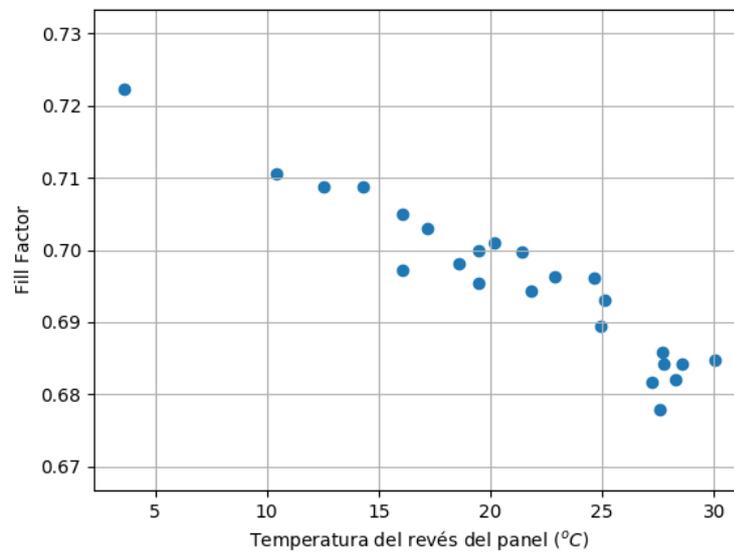


Figura 6: Dependencia del Factor de Forma con la temperatura)