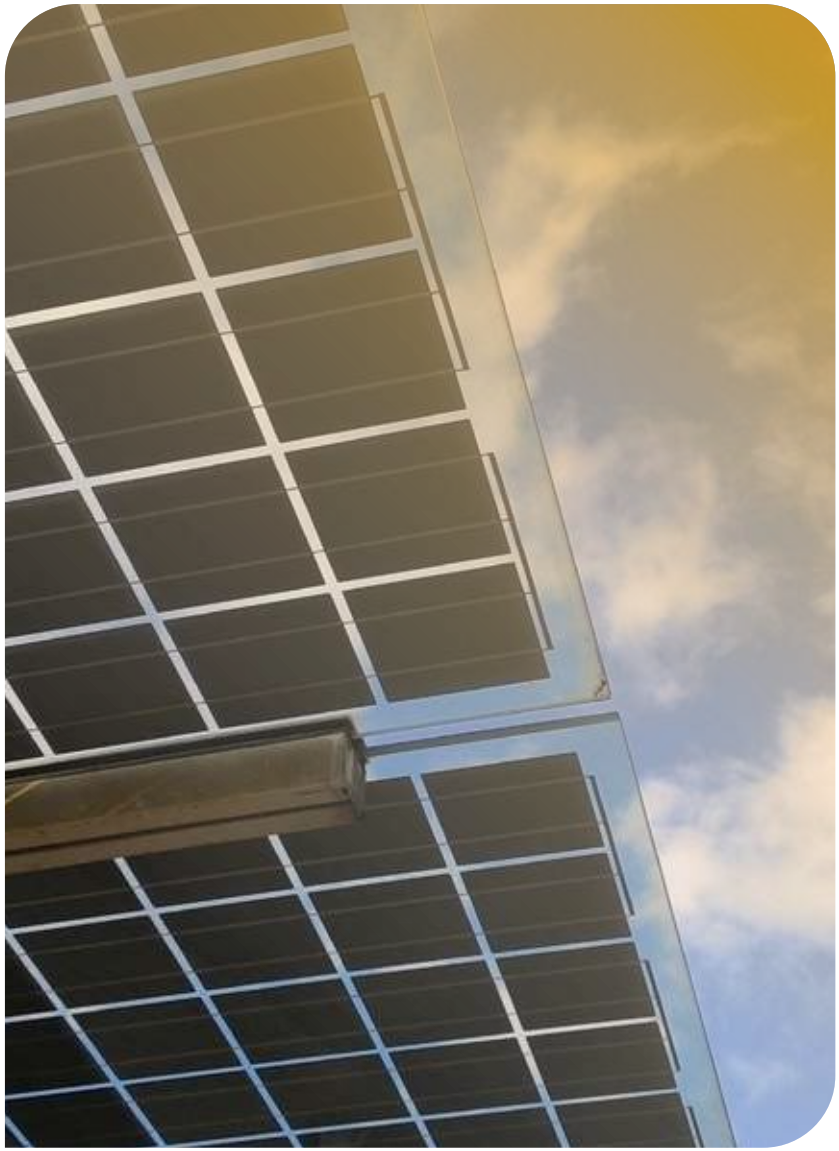

ENTEC
SOLAR
CASO DE ÉXITO
Medición precisa de curvas I-V en módulos bifaciales:
Norma IEC TS 60904-1-2 y mejores prácticas



Introducción

Los módulos bifaciales capturan radiación tanto por su parte frontal como por la posterior, siendo el albedo, o radiación reflejada desde el suelo, un factor clave en las estimaciones energéticas. Ignorar este parámetro puede llevar a sobreestimaciones u ocultación de fallos, afectando tanto a la productividad como la vida útil de la planta.

En este artículo exploramos la importancia de medir correctamente el albedo utilizando una o dos células de referencia, siguiendo las directrices de la norma IEC TS 60904-1-2. Además, destacamos cómo el trazador de curvas E-1500, con capacidad de medir módulos bifaciales con hasta dos células de referencia de albedo y hasta 200 curvas I-V por hora, se convierte en una herramienta indispensable para garantizar la precisión de las mediciones y maximizar el rendimiento de las plantas solares.

Los 2 retos principales al medir curvas I-V en módulos bifaciales:

1. Medida del albedo

Para asegurar resultados fiables en la extrapolación de curvas I-V, es crucial medir la irradiancia de manera fiable y precisa. En el caso de módulos bifaciales la irradiancia total está compuesta de la irradiancia frontal más el albedo. Por tanto, es esencial medir con exactitud el albedo y su impacto en la producción de la cara posterior.

2. Impacto de la ubicación de células posteriores en la precisión de medidas de albedo

El albedo es menos homogéneo que la irradiancia frontal, con diferencias notables entre puntos cercanos. La ubicación de las células en la parte posterior del módulo influye significativamente en la medición, especialmente en sistemas con trackers donde la inclinación varía. Según se coloquen en la parte superior, inferior, o en distintos puntos del string, los resultados pueden variar considerablemente, introduciendo una variabilidad inherente en las mediciones (ver figura 1).

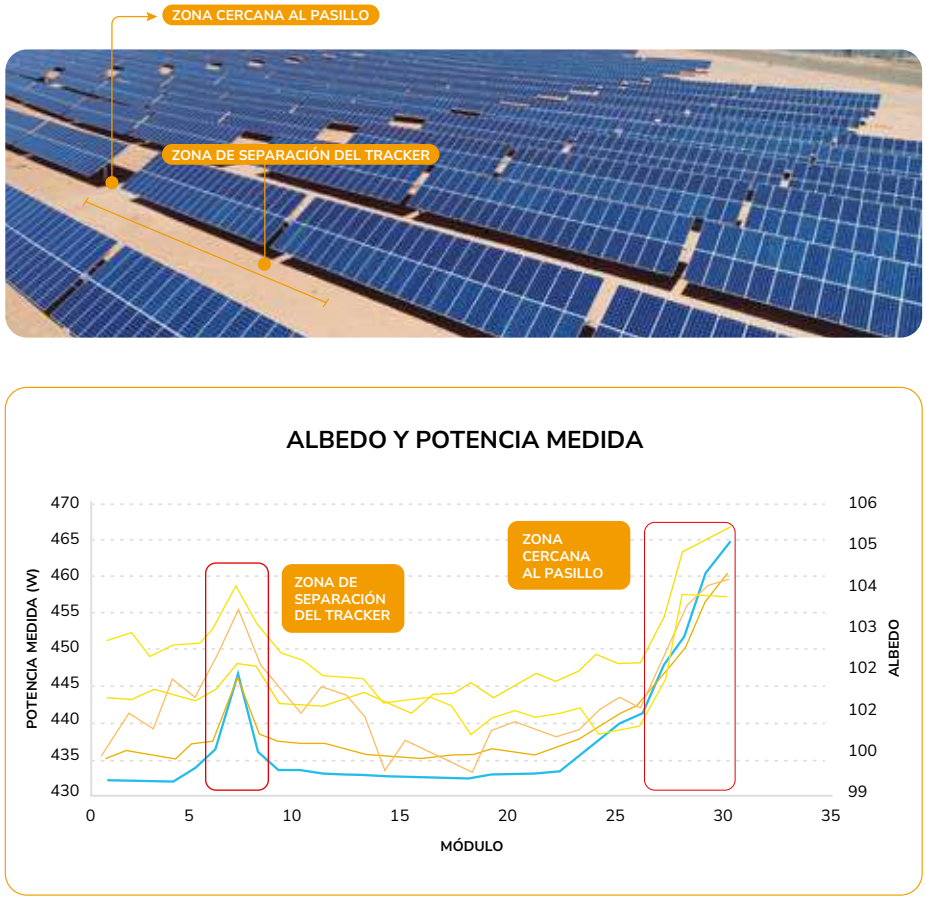
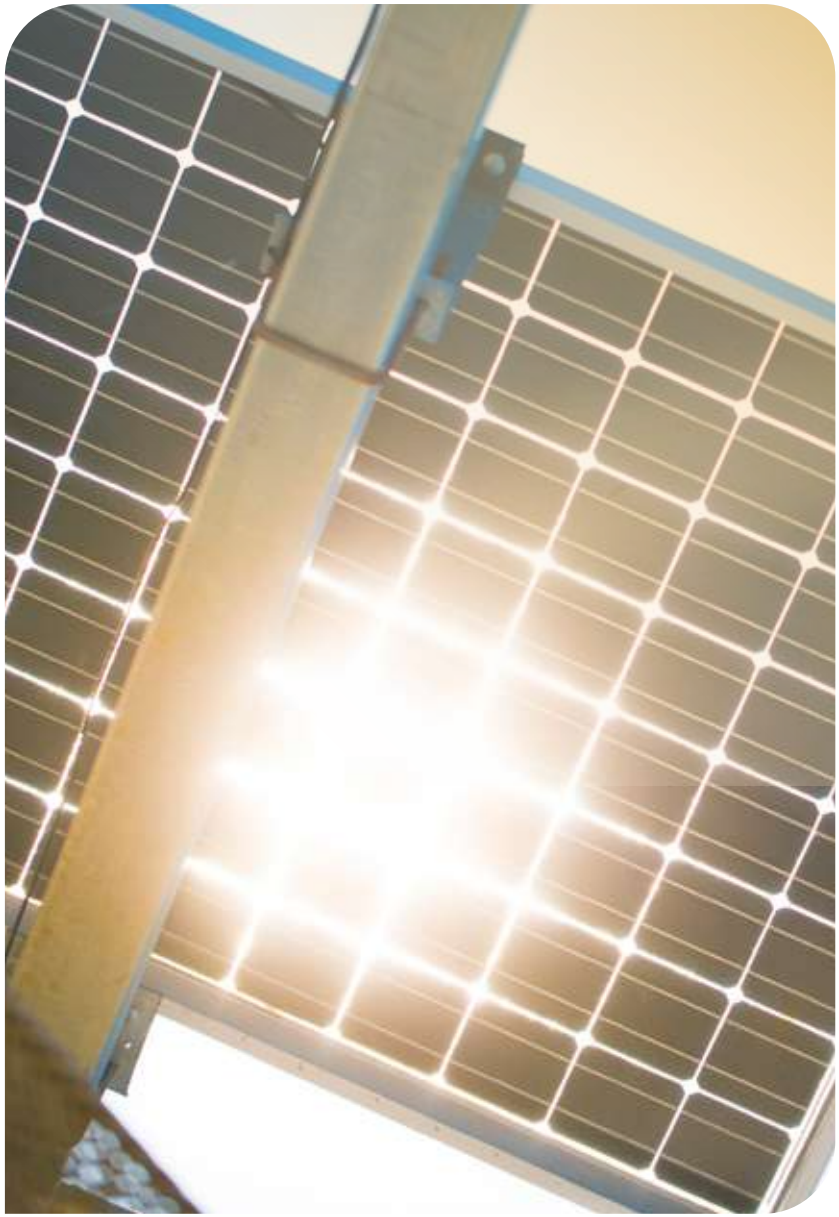


Figura 1: Impacto de la ubicación de células posteriores en la medida de albedo. La línea de color azul corresponde al albedo.

En la anterior figura se observa que en los módulos del 6 al 8, hay un incremento en los valores de albedo debido a la mayor cantidad de luz que penetra en la separación del tracker. De manera similar, en los módulos del 26 al 30, los valores de albedo también son más altos, ya que están ubicados cerca de la zona del pasillo, donde la reflexión de la luz es más intensa.



Extrapolación a condiciones estándar de medida (STC) de curvas I-V

A diferencia de la medida de curvas I-V en condiciones controladas, como puede ser mediante un flash-tester, la medida de curvas I-V en campo y a condiciones de operación variables exige la extrapolación de las curvas medidas a condiciones estándar de medida (CEM o STC en inglés), para obtener su valor nominal.

Esta extrapolación a STC no solo permite evaluar el rendimiento del sistema, sino también comparar los valores medidos (Voc, Isc, Vmp, Imp) con los especificados por el fabricante. Desviaciones significativas pueden señalar problemas o degradación excesiva de los módulos.

En el caso de las mediciones de curvas I-V con el dispositivo E-1500, la extrapolación a STC se realiza de acuerdo con la norma IEC 60891:2021. Este proceso es complejo e involucra muchas variables, como los coeficientes de variación de corriente y voltaje con la temperatura, la resistencia en serie, el coeficiente de temperatura de esta resistencia y la tensión térmica del diodo.

Para simplificar el análisis, en este caso asumimos que la temperatura de la célula durante las mediciones es de 25°C y que los efectos de la resistencia en serie y la tensión térmica del diodo son despreciables. Aunque estas suposiciones no son completamente realistas, el efecto sería el mismo para un módulo monofacial o bifacial, sin alterar el propósito de la explicación.

Con estas suposiciones, las ecuaciones se simplifican, de modo que la potencia depende linealmente solo de la irradiancia, afectando principalmente la corriente. A continuación, se presentan el cálculo y las variables asociadas a este procedimiento.

1. La ecuación para extrapolar la corriente es la siguiente, donde se observa que al asumir una temperatura de 25° se elimina una parte de la misma:

$$I_{SC,STC} = \frac{1.000 Wm^{-2}}{G_1} X \frac{I_{SC}}{[1+\alpha_{rel} \times (T_1 - 25ºC)]}$$

Quedando, la ecuación simplificada de la siguiente manera:

$$I_{mpp_STC} \approx I_{mpp_measured} X \frac{G_{STC}}{G_{measured}}$$

donde:

- Isc_STC es la corriente de cortocircuito a STC
- Impp_STC es la corriente en el punto de máxima potencia medida a STC
- Impp_measured es la corriente medida en el punto de máxima potencia
- α, es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito (normalmente en % / °C)
- G_STC es la irradiancia a STC
- G_measured es la irradiancia medida

2. En el caso de la temperatura tenemos la siguiente ecuación que también pierde muchos términos según las asunciones hechas.

$$V_2 = V_1 = R_s \times (I_2 - I_1) = K \times I_2 \times (T_2 - T_1) + \beta \times (T_2 - T_1)$$

Quedando, la ecuación simplificada de la siguiente manera:

$$V_{mpp_STC} \approx V_{mpp_measured}$$

donde:

- Vmpp_STC es la tensión en el punto de máxima potencia medida a STC
- Vmpp_measured es la tensión medida en el punto de máxima potencia



3. Y, por tanto, como la potencia es Vmpp*Impp, se tiene la siguiente ecuación simplificada donde la potencia únicamente depende de la irradiancia.

$$P_{mpp_STC} \approx P_{mpp_measured} \; X \; \frac{G_{STC}}{G_{measured}}$$

donde:

- Pmpp_STC es la potencia máxima a STC
- Pmpp_measured es la potencia máxima medida

Nota: Durante el desarrollo de los ejemplos y casos aplicados del presente artículo se utilizará esta última ecuación. Volvemos a recordar que esto es así al asumir una temperatura de módulo de 25ºC y una simplificación de las ecuaciones.



Para facilitar la comprensión del procedimiento de extrapolación a CEM de curvas I-V se presenta el siguiente ejemplo: Se lleva a cabo la medición de un módulo de valor nominal de 600W con un trazador de curvas E-1500 ([1]) y a una irradiancia (G) de 800W/m2 y una temperatura de célula de 25ºC.

[1] *El trazador de curvas E-1500 lleva a cabo esta extrapolación de manera automática según el procedimiento descrito en la norma IEC 61829.*

El E-1500 mide 464W **y al extrapolar a STC, se obtiene una potencia de 580W,** resultado de:

$$464W \; X \; \frac{1.000W/m2}{800W/m2} = 580W$$

siendo este el valor real del módulo en condiciones STC. Este resultado se encuentra **un 3,3% por debajo del valor nominal.** Esto muestra la importancia de extrapolar los valores para compararlos con la hoja de especificaciones y evitar interpretaciones erróneas sobre la potencia real del módulo.

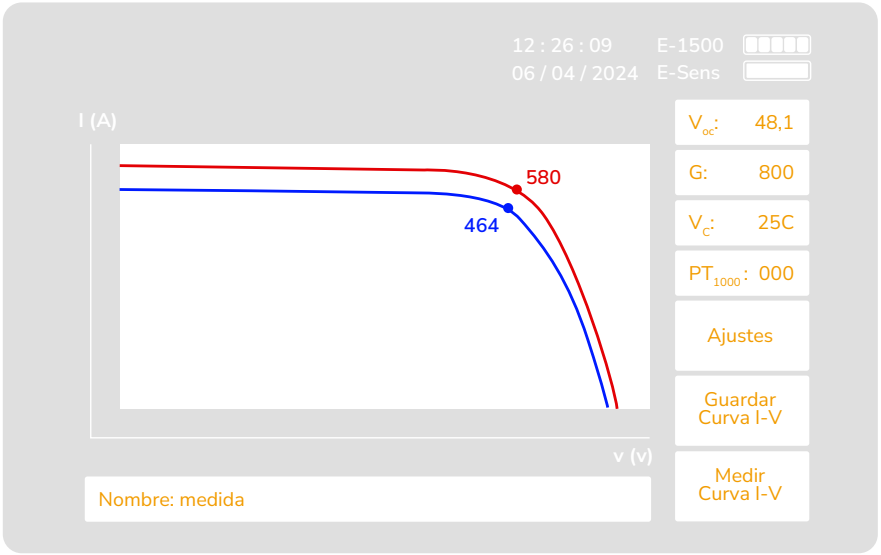


Figura 2: Pantalla medición curvas I-V, trazador de curvas E-1500.

Ahora bien, en el caso de los módulos bifaciales, el caso se vuelve más complejo puesto que hay que incorporar la medida de la irradiancia frontal y la medida del albedo.

¿Por qué considerar el albedo al medir curvas I-V en módulos bifaciales?

El albedo es un factor crucial al medir curvas I-V en módulos bifaciales porque estos módulos generan energía no solo a partir de la radiación directa en su cara frontal, sino también de la radiación reflejada por el suelo en su cara posterior. Superficies como terrenos blancos o nevados con alto albedo aumentan significativamente la generación de energía. Por lo tanto, omitir este factor en las mediciones podría derivar en estimaciones inexactas de la potencia efectiva de los módulos. A continuación, veremos la importancia del albedo en un caso aplicado.

Caso aplicado: Control de calidad en grandes plantas solares

La empresa propietaria de un parque solar sospecha que algo está mal en su planta ya que no rinde como esperaba y ha contratado un equipo de Laboratorio de Ensayos para medir la potencia de los módulos (todos ellos módulos bifaciales con 600W de potencia nominal dada por el fabricante). *NOTA: La realidad es que estos módulos están defectuosos y tienen una potencia media de 550W, aunque todavía ni el propietario ni la empresa de servicios lo saben y para ello se lleva a cabo una campaña de medidas.*

Para mostrar la importancia del albedo vamos a tomar como ejemplo una medida puntual de la campaña con las siguientes condiciones meteorológicas:

- **G Frontal: 800W/m2**
- **G Trasera: 80W/m2**
- **G Total: 880W/m2**
- **Temperatura de célula 25ºC (temperatura irreal solo para facilitar la comprensión del ejemplo)**

Bajo las condiciones mencionadas al medir los módulos de 550W de la planta estos dieron un resultado en la medida de **484W** resultado de 550W * (880W/m2 /1000W/m2). A continuación, se muestran los resultados que se obtendrían al extrapolar a STC, con y sin la medida de albedo.

1. Potencia extrapolada solo considerando G Frontal de 800W/m2, es de 484W * (1000W/m2 / 800W/m2) = **605W**. Es decir, un 1,0% por encima de la nominal. En este caso el Laboratorio de ensayos concluiría que los módulos están en óptimas condiciones, lo cual impulsaría a investigar el origen del problema en otros componentes, ignorando que su causa está justo en frente.

2. Potencia extrapolada tomando la G Frontal de 800W/m2 y la G Trasera de 80W/m2, es de 484W * (1000W/m2 / 880W/m2)= **550W.**

Este es el valor real de los módulos el cual está un 8,3% por debajo de la nominal. Es aquí donde el control de calidad detecta una baja potencia de módulo y el origen del problema.

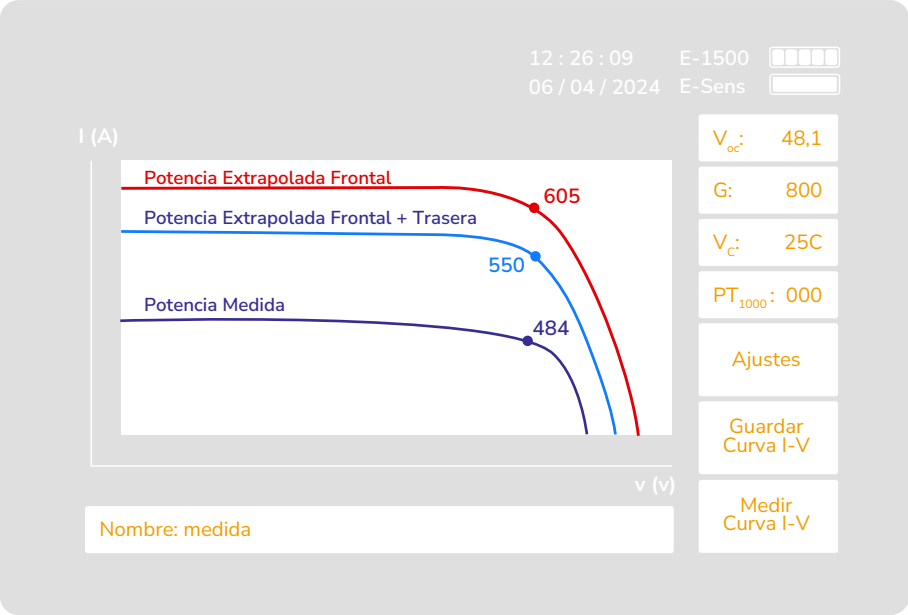


Figura 3: Pantalla medición curvas I-V, trazador de curvas E-1500, módulo bifacial.



Este ejemplo muestra la importancia de incorporar tanto la irradiancia frontal como la trasera para extrapolar correctamente las curvas I-V a STC y al comparar los valores de potencia se concluye lo siguiente:

Considerar la potencia del panel solo extrapolando la medida de la G Frontal (sin considerar la medición de la G Trasera) arroja una sobreestimación de la potencia extrapolada, pudiendo estar incluso por encima del valor nominal.

La potencia calculada utilizando la irradiancia frontal y trasera, y extrapolando el valor obtenido da como resultado el valor real de la potencia del módulo. En este caso, con una potencia real extrapolada de 550W, **el módulo alcanza un 92% de su capacidad de producción, lo que significa que está fuera de los límites de la garantía.**

Ignorar la medición del albedo arroja resultados sobreestimados, pudiéndose pasar por alto defectos en los módulos. En este ejemplo en concreto, la diferencia entre medir con o sin la célula de albedo **arroja una diferencia del 10% entre resultados.**

Medición del albedo con una o dos células según la norma IEC TS 60904-1-2

El apartado anterior ha mostrado la importancia de medir el albedo. Sin embargo, la medida del albedo, a diferencia de la irradiancia frontal, es compleja debido a que el mismo varía según las características del terreno, la ubicación en la planta o la inclinación de los módulos. Es por tanto que el correcto posicionamiento de las células de referencia es crucial para evitar errores en los resultados.

El albedo puede medirse utilizando una o dos células, siendo la opción de dos células más precisa y representativa. El método de una célula es adecuado en terrenos homogéneos, donde las variaciones en el albedo son mínimas. Sin embargo, en terrenos irregulares o en sistemas con trackers, que cambian constantemente el ángulo de inclinación de los módulos, este método puede no ser suficiente.

Para la medición de strings, es importante elegir un punto promedio en el string. Si se mide con una sola célula, esta debe colocarse al menos a tres módulos de distancia del inicio del mismo y en el punto intermedio de altura.

Por otro lado, el uso de dos células – una en la parte superior y otra en la parte inferior del módulo – ofrece una visión más detallada del comportamiento del albedo. Esta configuración permite promediar dicho albedo medido en diferentes zonas del módulo, reduciendo la incertidumbre y mejorando la precisión en el cálculo del rendimiento. La norma IEC TS 60904-1-2 complementa este enfoque al especificar la importancia de medir la irradiancia en ambas caras de los módulos bifaciales y recomienda el uso de al menos dos células para la captación de la irradiancia en la cara posterior. Esto garantiza que la medición del albedo sea representativa, especialmente en terrenos heterogéneos o en sistemas con seguimiento solar, donde la variabilidad del albedo puede ser considerable. **La IEC TS 60904-1-2 sugiere que las células deben colocarse a una altura similar a la del plano del módulo bifacial puesto que incide en el valor obtenido de irradiancia.** A continuación, un ejemplo:

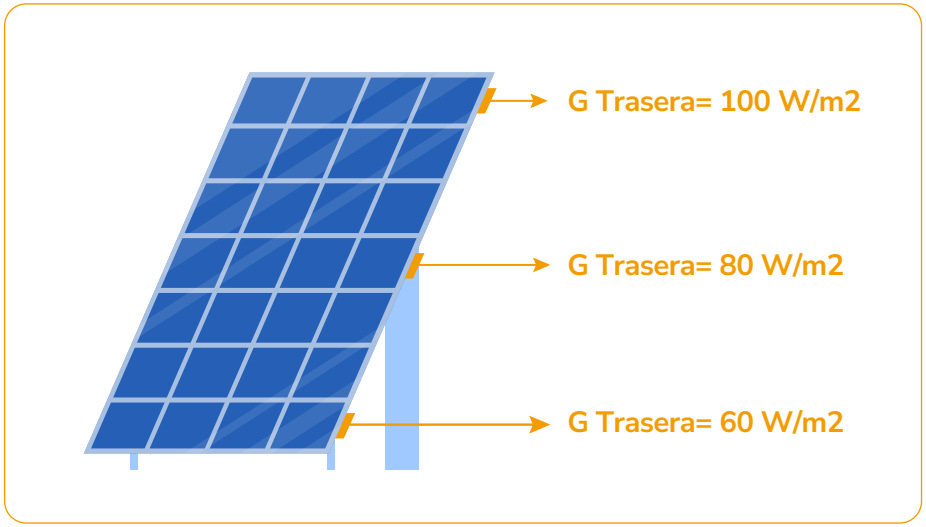


Figura 4: Medición de G trasera con posiciones diferentes de la célula.

De acuerdo a los distintos valores obtenidos de la G Trasera de acuerdo a la ubicación de la célula en la cara posterior del módulo (Figura 3), se puede obtener un nuevo cálculo de la potencia real extrapolada.

Retomando el ejemplo anterior, si tomamos tres posibles medidas de albedo de 100W/m2, 80W/m2 y 60W/m2 (siendo 80W/m2 el valor real), y una G Frontal de 800W/m2, se tienen los siguientes resultados:

- **G Trasera:** 100W/m2; G Total: 900W/m2; Potencia real extrapolada es igual a 538W, resultado de 484W *(1000W/m2 / 900W/m2) o un error de **- 2,2%** respecto a la potencia real.

- **G Trasera:** 80W/m2; G Total: 880W/m2; Potencia real extrapolada es igual a 550W, resultado de 484W * (1000W/m2 / 880W/m2).

- **G Trasera:** 60W/m2, G Total: 860W/m2; Potencia real extrapolada es igual a 563W, resultado de 484W * (1000W/m2 / 860W/m2) o un error de **+2,4%** respecto a la potencia real.

El ejemplo anterior muestra la sensibilidad en la medida del albedo en los resultados finales de la potencia extrapolada y muestra como la colocación de la célula de albedo puede influir en el resultado final.

No obstante, el error cometido por una mala colocación de la célula (2,4%) es mucho menor que el error cometido por ni siquiera colocar la célula (10%).



Nuevas directrices para las mediciones del albedo en tierra

El artículo publicado en PV Magazine, "Nuevas directrices para las mediciones del albedo en tierra", refuerza la importancia de establecer mejores prácticas en la medición del albedo en plantas solares bifaciales. Investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid y expertos de nuestra compañía Qualifying Photovoltaics han propuesto directrices prácticas que reducen la incertidumbre en la medición del albedo a solo un 1,5%, lo cual es crucial para obtener estimaciones precisas del rendimiento de plantas solares bifaciales a escala de servicio público.

Estas recomendaciones, que se alinean con las mejores prácticas mencionadas en la norma IEC TS 60904-1-2, destacan la necesidad de utilizar dos sensores o células de medición para capturar adecuadamente la variabilidad del albedo. El uso de configuraciones con una célula de referencia y un piranómetro, como se sugiere en el artículo, es una solución efectiva para reducir los costes sin comprometer la precisión de las mediciones.

Para medir el albedo en un string, la célula debe colocarse en el centro del mismo para obtener valores que representen mejor las condiciones reales. Esto se debe a que, al colocar la célula en los extremos del string, los módulos situados en estas posiciones reciben más irradiancia, lo que genera valores que no son representativos para toda la cadena de módulos.

La gráfica que se muestra a continuación evidencia las mediciones de cuatro casos reales ([2]) y diferentes en los que se llevó a cabo la medición de las curvas de módulos individuales ubicando las células tanto en los módulos que están al extremo de la cadena, como en el centro.

Se confirmó que aquellos que están en los extremos (25-28) así como los que están en la intersección entre do seguidores (6-8) aumenta mucho el albedo, y por tanto la potencia medida del módulo, y conforme se ubica la célula más hacia al centro, el albedo se hace más estable.

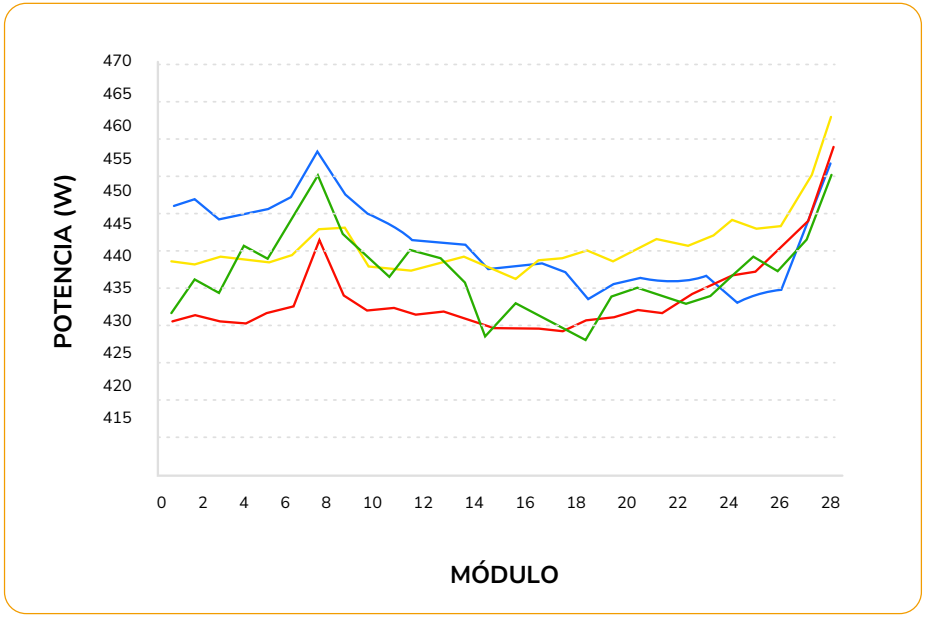


Figura 5: Medición de curvas en un string de cuatro casos reales.

[2] Mediciones reales de proyectos ejecutados en campo por el equipo de Consultoría y Laboratorio de Ensayos de Qualifying Photovoltaics.

Observaciones finales

Este artículo no solo informa sobre la importancia técnica de la medición del albedo, sino que refuerza la necesidad de un enfoque más riguroso y normativo en la gestión de plantas solares bifaciales para maximizar su rendimiento y longevidad. La norma IEC TS 60904-1-2 proporciona una guía clara para garantizar que estas mediciones sean representativas, lo cual es crucial para optimizar la producción de energía en plantas solares.



Importancia de medir el albedo:

El albedo puede representar una parte significativa de la irradiancia en la parte trasera de los módulos bifaciales, y omitirlo puede llevar a sobreestimaciones en la potencia y errores en el diagnóstico. **En el ejemplo aplicado de control de calidad, el error por no considerar el albedo fue del 10%,** un valor que podría ser aún mayor en suelos con mayor reflectividad. Es fundamental extrapolar estos datos a STC para obtener valores que reflejen el rendimiento real de los módulos.

Medición precisa del albedo:

En el ejemplo de medición del albedo con una o dos células, un error de colocación incorrecta de las células puede ser del 2,4%, menor que si no se usara ninguna célula. **La norma IEC TS60904-1-2 sugiere una colocación precisa o el uso de dos células para minimizar este error.**

Impacto en la gestión de activos solares:

Herramientas como el trazador I-V E-1500 permiten detectar fallos en los módulos y mejorar la toma de decisiones. Su capacidad para medir hasta 200 curvas por hora y la integración de mediciones de albedo con una o dos células aumentan la precisión y la fiabilidad en el control de calidad.

Acerca de Entec Solar

Fue fundada en el año 2016 por un grupo de doctores en ingeniería solar con más de 15 años de experiencia en fotovoltaica. Desde su inicio, el enfoque de Entec Solar ha sido desarrollar y llevar al mercado los equipos más avanzados para la monitorización de plantas fotovoltaicas, incluyendo sistemas SCADA, registradores de datos y soluciones IoT, diseñados para maximizar la eficiencia operativa y asegurar un rendimiento óptimo de los activos solares.

Trazador de curvas I-V, E-1500

El E-1500 es un equipo de medición de curvas I-V diseñado para ofrecer una precisión del 0,5% en el punto de máxima potencia (MPP) y menor al 3% en el resultado final en CEM. Este instrumento de alta precisión permite la medida de hasta 200 curvas I-V por hora de trabajo, bien de módulos fotovoltaicos o strings de hasta 1500V y 35A.

Cuenta con funcionalidades que permiten capturar tanto la irradiancia directa como la reflejada en condiciones cambiantes, garantizando que las curvas I-V medidas sean precisas y puedan extrapolarse a condiciones estándar de medida. Gracias a su avanzada tecnología, no solo es capaz de medir con precisión los parámetros eléctricos de módulos bifaciales, sino que también permite cumplir con las normativas IEC TS 60904-1-2 en lo que respecta a la medición del albedo.





Sensor de Suciedad E-Dust

E-Dust calcula las pérdidas por suciedad basándose en las pérdidas reales de potencia en plantas fotovoltaicas, a diferencia de los métodos tradicionales que se basan únicamente en mediciones de corriente de cortocircuito. Al comparar la potencia máxima entre módulos fotovoltaicos limpios y sucios, determinamos con precisión los momentos óptimos para la limpieza, siguiendo la norma IEC61724-1.

Todos los datos se procesan automáticamente y están disponibles en nuestra plataforma en línea PVET®, lo que permite la monitorización de estas pérdidas de forma diaria, semanal y anual.

Dataloggers para módulos de referencia E-Ref/01 y E-Ref/03

Mediante el uso combinado de un E-Ref y un módulo de referencia, puede obtener la medición más precisa de las condiciones de funcionamiento de sus centrales fotovoltaicas: irradiancia efectiva, irradiancia frontal y posterior, y temperatura de las células.

El E-ref mide la corriente de cortocircuito (ISC) y la tensión de circuito abierto (VOC) de un módulo de referencia, calcula los valores correspondientes de irradiancia y temperatura de la célula y los comunica directamente a SCADA a través de ModBus. Está disponible para módulos de referencia monofaciales (E-Ref/01) y bifaciales (E-Ref/03).



PONTE EN CONTACTO HOY CON NOSOTROS EN CONTACT@ENTECSOLAR.ES