

Determinación experimental de la pérdida de rendimiento de paneles fotovoltaicos por material particulado depositado



<https://cu-id.com/2377/v31n1e08>

Experimental determination of the performance loss of a photovoltaic panel due to deposited particulate material

 Alina Roig Rassi^{1*},  Ariel Rodríguez Rosales¹,  Josué Benavides Esteva²,  Anita Rodríguez Roig³

¹Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CUBAENERGIA, Cuba.

²Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana, Cuba.

³Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF), Cuba.

RESUMEN: El material particulado atmosférico depositado en las superficies de los paneles solares disminuye su producción de electricidad al reducir la transmisión de energía solar a las celdas fotovoltaicas. El rendimiento del panel (o módulo) fotovoltaico se refiere a la eficiencia real una vez instalado y toma en cuenta factores como suciedad (material particulado depositado), clima, orientación, temperatura, etc. El objetivo de este trabajo es determinar experimentalmente la pérdida de rendimiento de paneles fotovoltaicos por material particulado depositado. Se realizó la curva corriente-voltaje (IU) normalizada a cuatro paneles de media celdas de silicio monocristalino, expuestos durante 8 y 13 meses, en condiciones de suciedad y luego de limpiarlos. En todos los casos se recogió el material particulado para su posterior determinación de masa y caracterización elemental. Los principales resultados preliminares que se obtuvieron fueron: relación de dependencia lineal, con pendiente negativa y $R^2 = 0.9672$, entre la pérdida de rendimiento y la masa por unidad de área del polvo depositado en el panel y para una masa depositada promedio de 0.46 g/m^2 se reduce el rendimiento de los paneles estudiados en alrededor de 1.7 % donde, si se toma como 100 % el valor de 19.85 % de referencia de eficiencia del fabricante, esto significa un 8.5 % de reducción en su generación debido a la contaminación por material particulado depositado. Se observaron incremento de la potencia máxima (PM), la corriente de corto circuito (Isc) y el voltaje a circuito abierto (Voc) en todos los casos luego de limpiar el panel.

Palabras clave: pérdida de rendimiento, contaminación ambiental, paneles solares, material particulado depositado.

ABSTRACT: Atmospheric particulate matter deposited on the surfaces of solar panels decreases their electricity production by reducing the transmission of solar energy to the photovoltaic cells. The performance of the photovoltaic panel (or module) refers to the actual efficiency once installed and takes into account factors such as dirt (deposited particulate matter), climate, orientation, temperature, etc. The objective of this work is to experimentally determine the loss of performance of photovoltaic panels due to deposited particulate material. The normalized current-voltage (IU) curve was carried out on four monocrystalline silicon half-cell panels, exposed for 8 and 13 months, in dirty conditions and after cleaning them. In all cases, the particulate material was recognized for its subsequent mass determination and elemental characterization. The main preliminary results obtained were: linear dependence relationship, with negative slope and $R^2 = 0.9672$, between the performance loss and the mass per unit area of the powder deposited on the panel and for an average deposited mass of 0.46 g/m^2 , the performance of the panels studied is reduced by around 1.7% where, if the manufacturer's efficiency reference value of 19.85% is taken as 100%, this means an 8.5% reduction in its generation due to material contamination. deposited particulate. The increase in maximum power (PM), short circuit current (Isc) and open circuit voltage (Voc) will be observed in all cases after cleaning the panel.

Key words: loss of performance, environmental pollution, solar panels, deposited particulate matter.

*Autor para correspondencia: Alina Roig Rassi. E-mail: arrassi@cubaenergia.cu

Recibido: 01/10/2024

Aceptado: 21/01/2025

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización del estudio.

Contribución de los autores: Todos los autores contribuyeron a la realización del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final. Alina Roig Rassi: Investigación, Adquisición de financiamiento, Metodología, Visualización, Redacción-borrador inicial. Ariel Rodríguez Rosales: Conceptualización, Metodología, Análisis formal. Josué Benavides Esteva: Investigación, Análisis formal. Anita Rodríguez Roig: Conservación de datos, Visualización.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El empleo de sistemas que aprovechen la energía solar para la generación de electricidad es ampliamente aplicado en muchos países de diferentes latitudes y cada vez se va generalizando más su uso, tanto por los avances tecnológicos y los menores costos de los componentes, como por las bondades y facilidades de su uso.

Sin embargo, la incidencia de la contaminación atmosférica en la generación fotovoltaica, es un problema global, que se espera que se vea exacerbado por el cambio climático con el aumento de las temperaturas globales y las sequías posteriores. La contaminación atmosférica consiste en la presencia de sustancias o de formas de energía que alteran la calidad de la atmósfera, de modo que presenta riesgos y provoca daños o molestias a las personas y al ecosistema en general (González, Hernández, López, & González, 2023). La deposición de partículas de polvo (material particulado depositado), parte de la contaminación atmosférica (que en mucha bibliografía también es llamada suciedad), en superficies inclinadas es un fenómeno complejo y multidimensional.

En el estudio del comportamiento de los sistemas fotovoltaicos en condiciones naturales se hace necesaria la evaluación de variables que inciden de forma directa e indirecta en el máximo aprovechamiento de la energía solar, así como en la deposición de la contaminación en la superficie de estos. Esta depende del grado de contaminación de la ciudad o zona de estudio, factores de instalación y factores ambientales como la lluvia y el viento (Angulo, 2020).

La capa de partículas de polvo depositado provoca pérdidas ópticas, reduciendo el número de fotones que llegan a las células solares y, en consecuencia, disminuyen el rendimiento. Aunque la contaminación depositada no se reconoce como una falla del módulo fotovoltaico (Köntges, y otros, 2014) ni se contempla su medición como un parámetro a tener en cuenta en el diseño de instalaciones fotovoltaicas es bien conocido su efecto perjudicial en la reducción de la producción eléctrica de los paneles solares fotovoltaicos.

Estudios han evaluado la disminución en la eficiencia del panel bajo distintas condiciones de polvo depositado: en Tanzania se determinó una disminución en 64 %, 42 %, 30 %, y 29 % debido a polvo depositado de carbón, agregado, yeso, y el polvo de fertilizante orgánico, respectivamente, así como una disminución de la corriente de corto circuito entre 43 y 82 % para todos los tipos de polvo (Andrea, Pogrebnaya, & Kichonge, 2019); en India

se obtuvo que la producción de energía solar se reduce actualmente entre un 17 % y un 25 % en estas regiones, con contribuciones aproximadamente iguales de PM ambiental y PM depositadas en superficies fotovoltaicas (Bergin, 2017); (Navarret, 2019), determinó a partir de evaluar la eficiencia de dos paneles, uno sucio con cantidades de polvo controladas y uno limpio, que mientras mayor era la deposición de polvo en g/m^2 de 5 a 35 se reducía la eficiencia de 12 a un 94 % aproximadamente; (Amusan & Muzan, 2020), realiza un estudio donde el porcentaje de reducción en la potencia de salida debido al polvo depositado típico de la locación geográfica de Nigeria es de 5.92 al 28.78 %.

Recientemente, en un estudio realizado por la Universidad de Moa sobre la incidencia del polvo en la eficiencia de los paneles reveló que, a pesar de que el 71 % de los días hubo una incidencia de lluvia, la cual generalmente es un limpiador natural, el efecto del polvo residual en la eficiencia fue de 1,63 % en paneles ubicados en la ciudad de Moa (Rodríguez Milián, Montero Laurencio, Batista Nuñez, & Osorio Laurencio, 2024).

En nuestro país se proyecta instalar, hasta 2028, 92 parques solares fotovoltaicos con la capacidad de generar 2 000 megawatts (MW) de potencia¹.

Como parte del proyecto “Evaluación de la disminución de la generación eléctrica a partir de energía solar por la contaminación atmosférica en zonas seleccionadas”, perteneciente al Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 05: Desarrollo Energético Integral y Sostenible, se vienen realizando distintas evaluaciones desde el 2021, para la determinación de la incidencia del material depositado en la generación del panel fotovoltaico.

En un escenario donde la energía solar fotovoltaica juega un papel crucial en la generación de energía limpia, es esencial comprender cómo la contaminación atmosférica que se deposita (partículas de polvo) impacta la generación de energía a partir de sistemas fotovoltaicos.

Es por ello que el objetivo del presente trabajo es determinar experimentalmente la pérdida de rendimiento de paneles fotovoltaicos por material particulado depositado. Para ello, se toma como referencia, la instalación fotovoltaica de CUBAENERGIA, ubicada en el municipio Playa, La Habana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Instalación de estudio

Se cuenta con una instalación compuesta por 7 arreglos de 10 paneles cada uno, la cual constituye parte de la microrred instalada en CUBAENERGIA.

¹ Periódico Granma digital, noticia 14 de marzo 2024

Cuatro arreglos están ubicados en orientación fija hacia el sur con ángulos de inclinación variable (Figura 1a) y tres en con inclinación de 10 grados y orientación este-oeste (Figura 1b). Estos paneles son de media celda de silicio monocristalino.

Los arreglos orientación sur se limpiaron periódicamente. Con el objetivo de evaluar el comportamiento de paneles expuestos y en funcionamiento sin limpiar por periodos mayores a seis meses se emplearon cuatro paneles de los arreglos orientados este-oeste, dos expuestos durante 8 meses y dos durante 13 meses. Estos no se limpiaron desde su instalación y estuvieron expuestos a lluvias intensas en diferentes ocasiones.

Procedimiento para realización de las mediciones

Inicialmente se trazó la curva IU de cada panel, que previamente se desconectó y colocó en orientación sur a 15 grados de inclinación, en condiciones de suciedad.

Se limpiaron los paneles con agua destilada, la cual fue debidamente recogida para determinar posteriormente en laboratorio el material particulado depositada (Figura 2), y luego se trazó la curva IU nuevamente en condiciones de limpieza.

En la Tabla 1 se muestran el tiempo sin limpiar para cada panel empleado en la evaluación.

Para la realización de las curvas en condiciones de suciedad y luego de la limpieza, todos los paneles se ubicaron a 15 grados en orientación sur.

Solo se emplearon 4 paneles para esta prueba porque en todos los casos el comportamiento fue igual, y de esta forma evitar la manipulación excesiva

de todos los paneles con más de un año de instalación, lo cual puede facilitar la rotura interna de celdas y por lo tanto conllevar a un deterioro acelerado de los mismos.

Estas muestras fueron analizadas en los laboratorios del Centro de estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) para determinar, luego de la evaporación del agua, la cantidad de masa sólida depositada en los paneles.

Trazado de curva IU

El sistema típico empleado para una medición de curvas IU consta de radiación solar natural o un simulador solar, un sensor de temperatura del módulo, un piranómetro o celda solar calibrada y un sistema de almacenamiento de datos para guardar las mediciones cuando el voltaje o corriente a través del módulo es variada con una carga electrónica externa o con una fuente de potencia. (IEA-PVPS, 2014)

Bajo condiciones de radiación solar natural, se puede recurrir a un trazador portátil para medir las curvas IU del módulo. El problema que presenta este tipo de inspecciones es que se realizan *in situ*, sin estar bajo las condiciones de medida estándar. Por lo tanto, los valores que se recogen deben corregirse para poder establecer una comparación de los parámetros eléctricos en condiciones OTC (operational test conditions) con los que el fabricante proporciona en su *DataSheet*² en condiciones STC nominal.

Para corregir las curvas medidas para cada panel se emplean el procedimiento descrito en la norma IEC 60891, 2da Edición 2009-2012 (IEC 60891,



Figura 1. Arreglos compuestos por módulos solares Amerisolar AS-6M30-HC-335W, (a) orientación fija hacia el sur con ángulos de inclinación variable, (b) inclinación de 10 grados y orientación este-oeste

Tabla 1. tiempo sin limpiar para cada panel

Código del Panel	Día de referencia	Día del ensayo	Cantidad de días	
1	959	24 febrero 2023	10 noviembre 2023	259 (8 meses y 14 días)
2	979			
3	899		27 marzo 2024	397 (13 meses)
4	983			

² Especificaciones Técnicas

2009-12)³ de la Comisión Electrotécnica Internacional a condiciones de cielo abierto. La curva obtenida se transforma posteriormente a condiciones de medición estándar, (temperatura 25°C, radiación solar 1000 W/m² y AM 1.5G). Este procedimiento permite analizar algunas de las posibles causas de problemas que pueden presentar estos módulos, que a su vez afectan el rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas.

En nuestro caso se empleó un trazador de curvas IU HT400 (Figura 3) al cual se acopla un sensor de radiación, se introducen los parámetros del *DataSheet* del panel y la temperatura de trabajo del mismo, y permite la obtención de curvas IU estandarizadas a 1000 W/m² y 25 grados Celsius, lo cual permite realizar la comparación del comportamiento del panel antes y después de limpiarlo, e incluso con sus datos técnicos iniciales según el fabricante.

Como las mediciones se realizaron con radiación solar natural se efectuaron en cortos intervalos de tiempo para prevenir interferencias de nubes durante las medidas realizadas en exterior.

Procesamiento de datos

A partir de las curvas IU se determinan los parámetros característicos:

- Intensidad de cortocircuito (Isc): es la máxima corriente que producirá el dispositivo bajo unas condiciones definidas de radiación y temperatura, correspondientes a un voltaje igual a cero.
- Voltaje de circuito abierto (Voc): Es el máximo voltaje del dispositivo bajo unas condiciones definidas de radiación y temperatura, correspondientes a una corriente igual a cero.



Figura 2. Frasco con muestras de un panel (derecha), frasco con agua limpia (izquierda)

- Potencia máxima (Pm): Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en unas condiciones determinadas de radiación y temperatura, correspondiente al par máximo corriente-voltaje.
- Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp): Es el valor de voltaje para Pm en unas condiciones determinadas de radiación y temperatura.
- Corriente en el punto de máxima potencia (Imp): Es el valor de la corriente para Pm en unas condiciones determinadas de radiación y temperatura.
- Factor de Forma (FF) que es el valor correspondiente al cociente entre la potencia máxima y el producto de la corriente de corto circuito con el voltaje a circuito abierto (Ecuación 1). Este nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo éste mejor cuanto más alto sea su factor de forma, más cercano a 1 o al 100% dependiendo de la forma en que se exprese.



Figura 3. Trazado de curva IU antes y después de limpiar el panel con IU HT400

³ Existe una nueva edición de octubre de 2021, pero todavía no está libre su acceso.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

Se toma como referencia la caracterización descrita en el DataSheet para poder realizar la comparación. Se debe de tener en cuenta que los datos de la hoja de características no tienen por qué coincidir exactamente con los valores del módulo fotovoltaico en cuestión, pues son valores medios obtenidos en el lote de fabricación, de tal forma que si la pérdida de potencia no es excesiva el error de cálculo puede ser mayor que la propia degradación.

Se determina el rendimiento (eficiencia real de trabajo) de cada panel según la Ecuación 2.

$$Rendimiento = \frac{Potencia\ máxima\ entregada}{Radiación\ Solar\ Incidente \cdot Area\ de\ Captación\ del\ Sistema} \cdot 100 \quad (2)$$

A partir de todos los valores muestreados se determinó el material particulado por unidad de área, se determinaron los valores de rendimiento (eficiencia instantánea real) para cada caso y se analizó la incidencia del material particulado depositada en los paneles sobre el comportamiento de los mismos a partir del estudio comparativo de la curva IU.

A partir del graficado de los valores determinados se obtuvo la relación entre la disminución del rendimiento y los gramos de material particulado depositado en el panel por unidad de área.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Figura 4 muestra el comportamiento de la curva IU para cada panel evaluado antes y después de limpiarlo.

En la Figura 4 se puede apreciar como luego de la limpieza tanto el voltaje a circuito abierto (Voc) como la corriente de corto circuito (Isc) aumentan para todos los paneles, lo cual permite suponer un aumento en la generación para todos los casos. En la Figura 5 se puede apreciar como luego de la limpieza la curva de potencia vs voltaje siempre es mayor, lo cual determina que la máxima potencia entregada aumenta en todos los casos.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para cada panel en condiciones de suciedad y limpieza. En la misma se observa que en todos los casos la eficiencia instantánea real aumentó luego de limpiar el panel, lo mismo ocurre con el Voc y la Isc.

En la Tabla 3 se muestra la masa de material particulado depositado (suciedad) acumulada sobre cada panel determinada a partir de la recogida de muestras realizadas, así como la masa por unidad de área para cada panel, para lo cual se ha tenido en cuenta que el área efectiva de los mismos es de 1.5120 m².

A partir de los resultados obtenidos se realizó el gráfico de pérdida de rendimiento contra gramos de polvo depositados en el panel por unidad de área (Figura 6). Para esto se halló la diferencia entre la eficiencia instantánea real del panel sucio menos la del panel limpio, resultado que da negativo en todos los casos, pero para nuestros análisis tomamos como convenio este valor positivo.

A partir del gráfico se obtuvo la siguiente Ecuación:

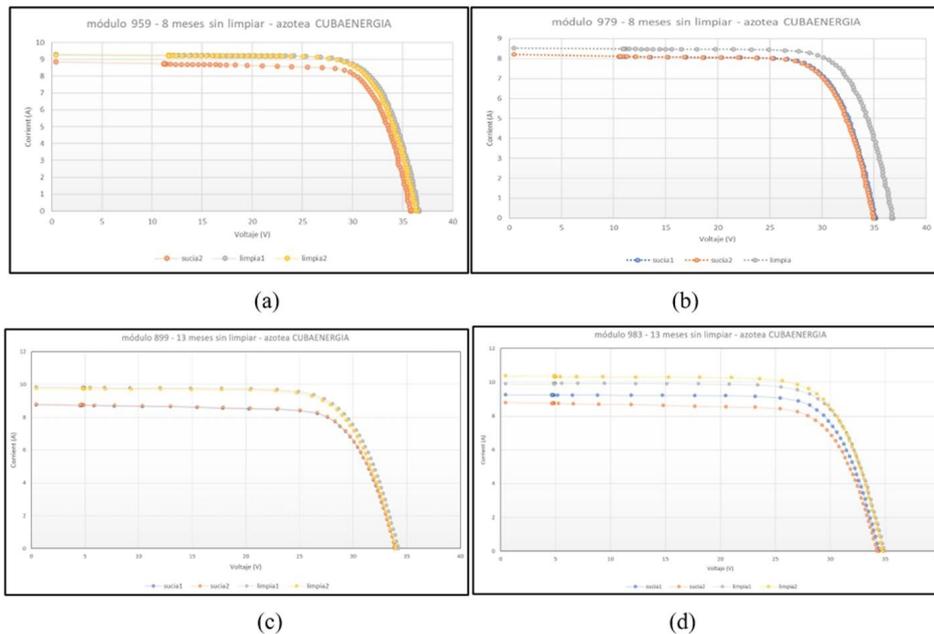


Figura 4. Curvas IU trazadas para cada panel evaluado antes y después de limpiar luego de 8 (a y b) y 13 (c y d) meses de exposición

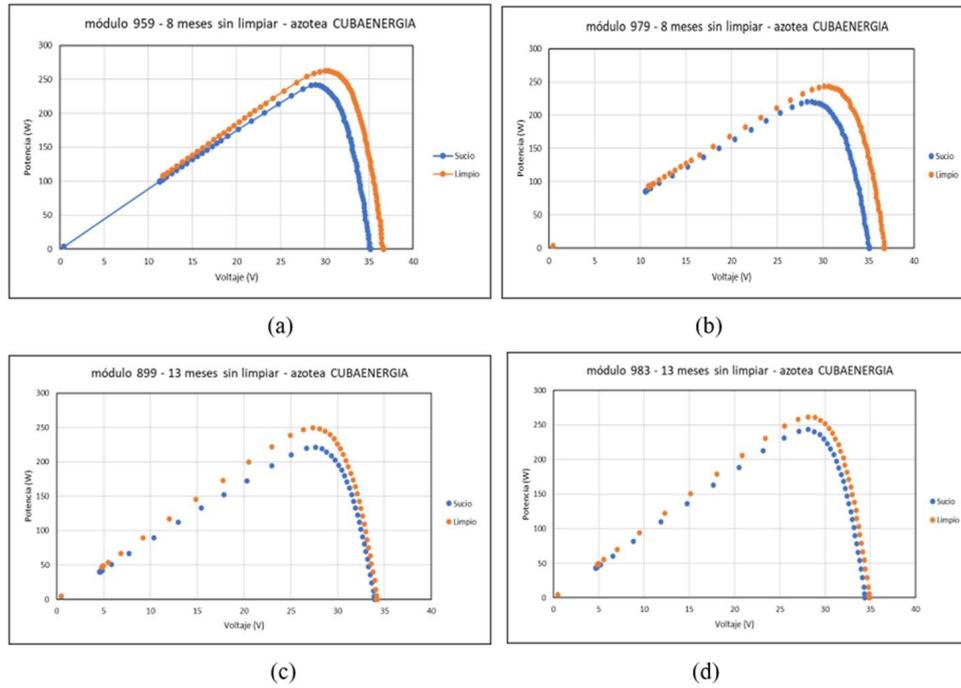


Figura 5. Curvas de potencia para cada panel evaluado antes y después de limpiar luego de 8 (a y b) y 13 (c y d) meses de exposición

Tabla 2. Resultados obtenidos para cada panel sucio y limpio a partir del trazado de curva IU, datos de referencia del fabricante del panel

Parámetros	Data Sheet		(a)		(b)			
	Panel	S**	L***1	L 2	S1	S2	L	
Efic. Instan. Real (%)	19.85*	15.74	17.35	17.63	15.50	15.33	17.83	
Vmpp(V)	34.40	29.79	30.01	29.72	28.79	28.57	30.64	
Imp(A)	9.74	8.24	8.75	8.73	7.65	7.64	7.93	
Pmpp(kW)	335.00	245.51	262.64	259.51	220.19	218.37	243.16	
Voc(V)	41.00	35.86	36.65	36.36	35.08	34.94	36.79	
Isc(A)	10.24	8.86	9.30	9.25	8.12	8.21	8.52	
FF	0.79	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76	0.78	
			(c)			(d)		
Parámetros	S1	S2	L1	L2	S1	S2	L1	L2
Efic. Instan. Real (%)	14.88	14.89	16.00	15.88	15.25	15.17	16.57	16.53
Vmpp(V)	27.63	27.63	27.33	27.16	28.16	27.98	28.15	28.04
Imp(A)	8.00	8.02	9.11	9.02	8.64	8.71	9.29	9.61
Pmpp(kW)	220.97	221.74	249.24	245.28	243.35	243.82	261.84	269.52
Voc(V)	33.95	33.95	34.25	34.01	34.42	34.36	34.95	34.77
Isc(A)	8.76	8.80	9.84	9.75	9.26	9.31	9.91	10.37
FF	0.74	0.74	0.74	0.74	0.76	0.76	0.76	0.75

*Eficiencia del fabricante

**Condición Sucio

***Condición Limpio

Tabla 3. Masa de polvo acumulado en cada panel

Panel	Masa determinada (g)	Masa por unidad de Área (g/m ²)
959	0.8385 ± 0.0012	0.5545
979	0.7762 ± 0.0013	0.5133
899	0.5346 ± 0.0016	0.3535
983	0.6379 ± 0.0019	0.4218

$$\text{PerEfic} = 3.71 \cdot \text{Pd} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right)$$

Donde:

La incertidumbre de la pendiente es de 0.39 para un 10.5 % de incertidumbre

$R^2 = 0.9673$

Coefficiente de Pearson = 0.9835

Estos resultados muestran que mientras mayor sea la masa por unidad de área de polvo depositada en el panel, mayor será la pérdida de rendimiento del mismo y en una aproximación inicial a partir de los experimentos realizados se puede estimar por la ecuación obtenida.

Los resultados obtenidos muestran que para una masa promedio de material particulado depositado de 0.46 g/m² se redujo el rendimiento de los paneles en un 1.7 %. Esta reducción pudiera parecer muy poco, al compararlo con 100, pero la eficiencia reportada por el fabricante de los paneles empleados es de un 19.85 %, por lo cual una reducción de 1.7 %, significa una disminución de un 8.5 % del rendimiento del panel debido al material particulado depositado.

Según la OMM (OMM, 1992) se clasifica en precipitación o lluvia intensa si igualan o superan un acumulado de 100 mm en 24 horas, 50 mm en 12 horas o 30 mm en una hora. Durante el tiempo de exposición de los paneles, 8 y 13 meses, estuvieron expuestos a más de 432.30 mm y 800 mm de lluvia respectivamente con varios episodios de lluvia intensa, ejemplo de ello se midieron 75 mm en 15 min y 50.1 mm en 30 min, los cuales fueron el 29 de abril y el 1ero de Mayo. Estas lluvias podrían haberse considerado que limpiaran el panel, no obstante, el valor de disminución del rendimiento es significativo debido a la acumulación de material particulado, por lo cual se requiere de limpiezas planificadas, con medios mecánicos o químicos, que deben depender del entorno y clima del lugar donde se ubiquen los mismos.

CONCLUSIONES

- La acumulación de material particulado sobre el panel depende de las condiciones del entorno donde este se ubique, las cuales incluyen el clima, las condiciones naturales del mismo y las emisiones producto de las actividades del hombre.
- El material particulado depositado sobre los paneles disminuye su rendimiento y por lo tanto la cantidad de energía entregada, una masa promedio de material particulado depositado de 0.46 g/m² disminuye en un 8.5 % del rendimiento del panel, en el caso de paneles de silicio monocristalino de media celda.
- En todos los casos estudiados luego de la limpieza todos los parámetros característicos del

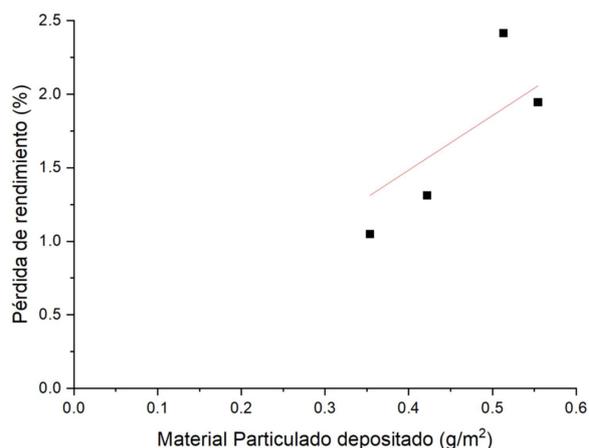


Figura 6. Pérdida de rendimiento vs polvo depositado

panel aumentan sus valores, mostrando que su rendimiento se incrementa.

- La lluvia por sí sola no ejerce una limpieza óptima del panel, se requiere de limpiezas planificadas, que deben depender del entorno y clima del lugar donde se ubiquen los mismos.
- Mientras mayor sea la masa por unidad de área de material particulado depositado en el panel, mayor será la pérdida de rendimiento del mismo y esta se puede estimar por la ecuación obtenida.

REFERENCIAS

- Amusan, J. A., & Muzan, A. I. (2020). The effect of dust on the output performance solar module. *International Journal os Sustainable Energy and Environmental Research*, 110-122.
- Andrea, Y., Pogrebnyaya, T., & Kichonge, B. (2019). Effect of industrial dust deposition on photovoltaic module performance: Experimental measurements in the Tropical Region. *Hindawi International Journal of Photoenergy*, 10.
- Angulo, J. (2020). Estudio del efecto del polvo y estimación de la portencia nominal en un string fotovoltaico. *TECNIA*, 30.
- Bergin, M. H. (2017). Large reductions in solar energy production due to dust and particulate air pollution. *Environmental Science & Technology Letters*, Vol 4, 339-344.
- González, E., Hernández, I. L., López, R., & González, C. M. (2023, enero-diciembre). Dispersión de contaminantes atmosféricos en La Habana de 1994 a 2020. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 23, 10.
- IEA PVPS. (2018). *Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Fields Applications*. IEA.
- IEA-PVPS. (2014). *Report IEA-PVPS T13-01:2014, Review of Failures of Photovoltaic Modules*.
- IEC TS 62446-3. (2017-06). *IEC TS 62446-3 Photovoltaic (PV) systems - Requirements*

- for testing, documentation and maintenance - Part 3: Photovoltaic modules and plants - Outdoor infrared thermography. Edition 1.0.
- IEC 60891. (2009-12). *INTERNATIONAL STANDARD Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*. . Edición 2.0.
- IEC TS 60904-13. (2018-08). *Photovoltaic devices - Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules*. Edition 1.0.
- IEC TS 60904-14. (2020). *Photovoltaic devices - Part 14: Guidelines for production line measurements of single-junction PV module maximum power output and reporting at standard test conditions*.
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C. E., Jahn, U., Berger, K., Kato, K., . . . Van Iseghem, M. (2014). *Review of failures of photovoltaic modules*. Report IEA PVPS T13 01:2014.
- Martín Buenaposada, Á., González Rebollo, M., & Moretón Fernández, A. (2021). Desarrollo de un prototipo para medidas de electroluminiscencia en paneles solares. *Tesis, Universidad de Valladolid*. Valladolid: Tesis para optar por el grado de Ingeniería Eléctrica.
- Navarret, K. P. (2019). Análisis técnico-económico de un sistema fotovoltaico con influencia de suciedad, viento y lluvia en Arequipa-Perú. *Tesis para Título Profesional de Ingeniera Industrial*. Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica del Perú.
- OMM. (1992). *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.
- Rodríguez Milián, Y. C., Montero Laurencio, R., Batista Nuñez, Y., & Osorio Laurencio, L. (2024). Estudio experimental del efecto del polvo sobre los paneles fotovoltaicos. *Ciencia & Futuro*, 563-582