

Estudio experimental del efecto del polvo sobre los paneles fotovoltaicos

Yank Carlos Rodríguez Milián yankrlos99@gmail.com

Reineris Montero Laurencio rmontero@ismm.edu.cu

Yanisel Batista Núñez ybatistan@ismm.edu.cu

Liomnis Osorio Laurencio losorio@ismm.edu.cu

Universidad de Moa (Cuba)

Resumen: Se analizó la incidencia del polvo en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos tomando como referencia la cubierta de un edificio de la Universidad de Moa. Se realizaron dos experimentos relacionados con la determinación del efecto de la acumulación del polvo bajo determinadas condiciones ambientales y la medición de la eficiencia de paneles fotovoltaicos bajo la deposición del polvo en un ambiente semi-controlado. Se llevó a cabo un análisis químico del polvo, lo cual evidenció que el 60 % del cúmulo de partículas están referidas a Mg, SiO₂, Fe, Ni, Al₂O₃. Se obtuvo la ecuación que relaciona la incidencia del volumen de acumulación del polvo hasta 21g en la eficiencia de un panel fotovoltaico. En las condiciones ambientales analizadas, se demostró que el polvo debe integrarse adecuadamente en el análisis de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y que cada localidad tiene características particulares en relación con este factor.

Palabras clave: deposición de polvo; contaminación ambiental; paneles solares; partículas sólidas

Experimental study of the effect of dust on photovoltaic panels

Abstract: The impact of dust on the efficiency of photovoltaic panels was analyzed taking the roof of a building at the University of Moa as a reference. Two experiments related to the determination of the effect of dust accumulation under certain environmental conditions and measurement of the efficiency of photovoltaic panels under dust deposition in a semi-controlled environment were carried out. A chemical analysis of the dust showed that 60% of the cluster of particles refers to Mg, SiO₂, Fe, Ni, and Al₂O₃. The equation that relates the incidence of dust accumulation volume up to 21g on the efficiency of a photovoltaic panel was obtained. Through the analysis of environmental conditions this research showed that dust must be properly integrated into the efficiency analysis of photovoltaic systems and that, each territory has particular characteristics related to this factor.

Keywords: dust deposition; environmental pollution; solar panels; solid particles

Introducción

Las energías renovables a pesar de ser utilizadas desde la antigüedad, en los últimos años han adquirido gran importancia al devenir una vía efectiva para lograr suplir, de forma progresiva, las crecientes demandas energéticas de la humanidad. Este término, de manera general, se refiere a aquellas fuentes de energía que se caracterizan por reponerse a un ritmo igual o más rápido al que son consumidas (Velasco, 2009), como la solar. La mayor parte de los sistemas ideados como procedimientos para la explotación de fuentes de energía renovables están relacionados con la radiación solar. Para su conversión directa en electricidad, se utilizan dispositivos electrónicos, denominados, celdas solares o fotovoltaicas que hacen uso de un proceso físico denominado efecto fotovoltaico (Laborde & Williams, 2016).

Las acciones en Cuba por el cambio de la matriz energética, con una mayor presencia de las fuentes renovables de energía (FRE), involucran distintos sectores, incluyendo las universidades. En la Universidad de Moa se impulsa la preparación de los nuevos egresados con cierto grado de especialización en materia de FRE, dadas las condiciones que se han ido creando para mejorar la enseñanza y la investigación alrededor de estas temáticas. Consecuentemente, en la institución se han realizado estudios que demuestran la incidencia de múltiples factores en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos (Pedroso, 2019).

Estas investigaciones parten de aspectos como la información técnica que proporcionan los fabricantes. No obstante, esos datos se corresponden a condiciones que generalmente no se ajustan a los variables escenarios climáticas reales de los lugares donde se encuentren los paneles fotovoltaicos. Los materiales con que se fabrican, la radiación solar y la temperatura en las celdas fotovoltaicas, tienen una alta influencia directa en la eficiencia energética y dependen de las condiciones climáticas y meteorológicas que circundan (Zhang *et al.*, 2018).

La eficiencia energética es la medida del porcentaje de potencia con la cual las celdas absorben la radiación solar para producir electricidad. Por tal motivo, depende de variables ambientales como son: el polvo, la temperatura de las celdas y la irradiancia, lo que conlleva a cambios en las variables eléctricas como el voltaje y la corriente (Tiwari, Tiwari & Springer, 2016).

A nivel internacional se han realizado múltiples estudios que no solo abordan las potencialidades de la utilización de la energía fotovoltaica, sino también los factores que inciden en la eficiencia energética de los paneles solares. Tal es el caso de la irradiancia y la temperatura (Zhang *et al.*, 2018; Rodríguez, 2022). Se han documentado otros estudios que hacen énfasis en la incidencia del polvo. (Hachicha, Al-Sawafta & Said, 2019; Chanchangi *et al.*, 2020; Konyu, Ketjoy & Sirisamphanwong, 2020; Fan *et al.*, 2021; Huanca, 2022). Sin embargo, durante la sistematización bibliográfica, no se encontraron trabajos realizados en el contexto nacional que hayan estudiado la manera en que este afecta la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

Uno de los principales factores que afecta la eficiencia de los paneles fotovoltaicos es la deposición de suciedad (polvo, heces fecales de aves, fragmentos de plantas u otros elementos ajenos a los componentes del panel). Generalmente, son la gravedad, la fuerza electrostática o efectos mecánicos provocados por el viento o el agua los elementos que estimulan la adherencia de las partículas a la superficie de las células.

La deposición de suciedad y, en particular, de polvo, no es un efecto aislado, sino que afecta a todos los paneles fotovoltaicos de una manera diferente en dependencia principalmente del ambiente en donde se encuentran ubicados. Es por eso que el valor de las pérdidas de producción anual estimados por suciedad suele oscilar entre un 5 % en ambientes con climas de lluvia moderada y templados, y hasta un 40 % en climas secos, áridos o desérticos (Gostein, Caron & Littmann, 2014).

No obstante, el entorno no es el único factor determinante en la deposición del polvo. Existen aspectos de carácter externo o interno, natural o antrópico, como el rocío o la cubierta del propio panel, que contribuyen a la cementación y adhesión de la suciedad, dificultando su eliminación y motivando un replanteamiento de las técnicas de limpieza tradicionales (Castro, 2019).

El efecto del polvo sobre los paneles fotovoltaicos instalados en el municipio Moa es un tema que debe estudiarse en profundidad. Esto se debe a las numerosas labores de minería a cielo abierto que se desarrollan en esta zona de Cuba que, de conjunto con las dos plantas metalúrgicas para procesar el mineral laterítico, producen un efecto apreciable en las emisiones polvo al medioambiente que se esparcen en menor o mayor medida en todo el territorio municipal.

Es por ello que el objetivo del presente trabajo es determinar el efecto del polvo sobre la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Para ello, se toma como referencia, un punto de la localidad situado en la cubierta de un edificio de la Universidad de Moa.

Metodología

Los principales aspectos a tener en cuenta son:

Humedad relativa y rocío: La formación de rocío ocurre por la condensación, en forma de gotas pequeñas, de la humedad (vapor de agua) acumulado en el aire durante el día (Mahecha-Vanegas, 2021). Durante la noche la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico, al igual que la del suelo, desciende, especialmente cuando las noches son despejadas y frías debido a la pérdida neta de energía por emisión de radiación infrarroja (Figgis *et al.*, 2018; Hülsmann, Heck & Köhl, 2013; Javed, Guo & Figgis, 2017; Ilse *et al.*, 2018).

Esto permite que la humedad relativa (vínculo entre la cantidad de vapor de H₂O en el aire y la cantidad máxima de H₂O que podría haber con la misma temperatura) alcance el 100 %, parámetro se le conoce como punto de saturación y da paso a la formación del rocío en la superficie del panel. Su presencia incrementa la tasa de deposición de suciedad sobre la superficie del panel fotovoltaico debido a que el agua puede interactuar con las partículas de polvo y la superficie de cristal hasta que se evapora completamente con el incremento de la temperatura durante el día.

Esta interacción potencia la ocurrencia de diferentes procesos que incrementa la adhesión de partículas tales como la cementación, aglutinamiento de las partículas y envejecimiento capilar que, generalmente, ocurren de manera simultánea. Asimismo, se pueden desarrollar independientemente de las características que tenga el polvo (Ilse *et al.*, 2018). Ante tales resultados, hay que tener en cuenta que la región de Moa cuenta con un clima particularmente húmedo, con valores de humedad relativa que, generalmente, supera el 80 % durante todo el año y frecuentemente alcanzan su punto de saturación, especialmente en el periodo comprendido entre marzo y noviembre.

Cementación: Se efectúa en condiciones húmedas, cuando las fracciones húmedas del polvo depositado se disuelven parcial o completamente en el agua presente en una superficie (Ilse *et al.*, 2018). Posteriormente, ocurre el proceso de secado, donde el material disuelto precipita y forma puentes sólidos entre las partículas insolubles y la

superficie de cristal, lo que aumenta la fuerza de adhesión de las partículas (Ilse *et al.*, 2016; Perkins, Muller & Simpson, 2017; Ilse *et al.*, 2018).

Aglutinamiento de partículas: Reorganización, aglomeración y compactación de las partículas que ocurre durante el fenómeno del rocío y que incrementa la adherencia de las partículas a la superficie. El rocío que se forma en la superficie del vidrio da lugar a pequeñas suspensiones de partículas en las gotas, separándolas de la superficie. Al tiempo en que la gota se seca, estas partículas suspendidas se concentran en volúmenes más pequeños hasta que se vuelven a colocar en la superficie. Lo anterior ocurre primero con las más grandes y luego las de menor tamaño que, por su mayor capacidad de movilidad, pueden cubrir los espacios o cavidades que permanezcan entre las partículas de mayor volumen y la superficie durante la evaporación. De esta manera, se reduce cuantiosamente el área de contacto entre estos últimos elementos (Ilse *et al.*, 2018).

Envejecimiento capilar: Durante el secado de los puentes líquidos existentes entre las partículas y las superficies, las correspondientes fuerzas capilares (presión de Laplace y tensión superficial) presionan las partículas contra la superficie. Subsiguientemente, los vacíos en la zona de contacto se contraen o las partículas eventualmente se deforman.

Como resultado, se incrementa el área de contacto efectivo y la adhesión (D'amour *et al.*, 2006; Knotter & Wali, 2010,). Después de este proceso, las fuerzas de adhesión de corto alcance que escalan con el área de contacto se incrementan significativamente (Kazmerski *et al.*, 2016).

El envejecimiento capilar puede ocurrir aunque no se detecte la formación de rocío porque se pueden formar películas microscópicas de agua entre partículas y superficies, a niveles de humedad relativa bajos, debido a la condensación capilar. Este proceso no solo se desarrolla entre partículas y superficie, sino también entre partícula y que puede promover la cementación a nanoescala e inhibir eficazmente la eliminación de partículas por la fuerza del viento (Ilse *et al.*, 2018).

Tamaño de partícula: Es un elemento que ejerce influencia en la magnitud de la fuerza Van der Waals (F_{vdw}) que aparece entre la interacción dipolar en dos superficies en contacto (Angulo *et al.*, 2020). Además, a diferencia de las partículas de polvo de gran dimensión, las de menor tamaño ejercen una mayor influencia en la transmisión

del espectro solar y la luz debido a que cubren una mayor área (Abderrezek & Fathi, 2017). Entre más pequeña sea la partícula, mayor será el efecto deteriorante, puesto que se distribuyen de manera más uniforme, lo que permite minimizar los vacíos entre partículas que permiten pasar la luz (Cabanillas, Munguía & Energy, 2011).

Inclinación del panel: En la Figura 1 se muestra como a menor ángulo de inclinación, mayor será la cantidad de suciedad que se acumule en la superficie del panel, mientras que con un mayor ángulo sucede el efecto contrario. La deposición de polvo ha sido analizada en ambientes no controlados y controlados, mostrando como resultado que representa un mayor inconveniente conforme disminuye el ángulo de inclinación, puesto que tiene a incrementar los niveles de acumulación y, como consecuencia, disminuye considerablemente la transmitancia (Appels *et al.*, 2012).

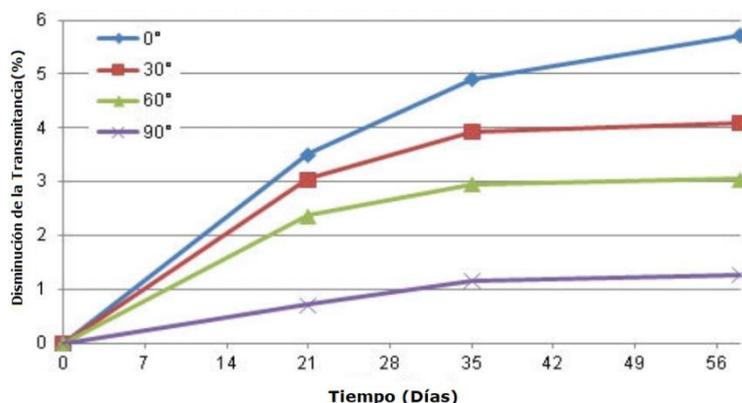


Figura 1. Disminución de la transmitancia según el grado de inclinación y el aumento de la acumulación de polvo (Appels *et al.*, 2012).

No uniformidad de la suciedad: Produce pérdidas por *mismatch* entre las celdas de un mismo módulo y en el resto del *string* fotovoltaico o, en algún caso, una instalación de mayor escala. Esta acumulación es el resultado de una compleja combinación entre el viento, los marcos del módulo y sus estructuras de soporte (Figura 2a). Los patrones no uniformes de polvo dan lugar a puntos calientes (Figura 2b) que reducen considerablemente la vida útil del panel fotovoltaico debido a que las celdas con esta afectación sufrirán una degradación térmica a un ritmo más elevado que el resto. Los depósitos de polvo actúan como sombras parciales que pueden ser permanentes (Lorenzo, Moretón & Luque, 2014).

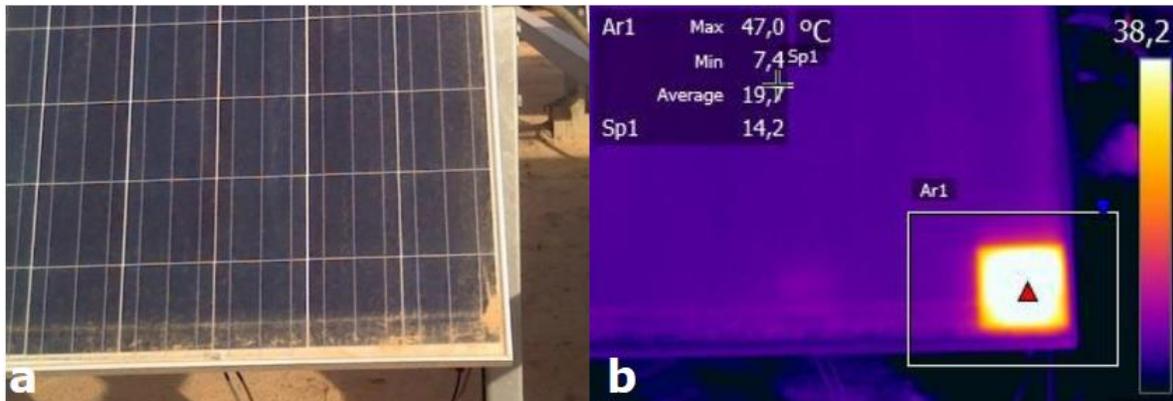


Figura 2. a) Acumulación de polvo en una esquina de un panel fotovoltaico. b) Imagen infrarroja que muestra la formación de un punto caliente (Castro, 2019).

Ángulo de incidencia de la radiación: La acumulación de polvo en la superficie de los módulos fotovoltaicos reduce considerablemente la energía recibida. Las pérdidas no son constantes durante todo el día, sino que dependen del ángulo con que recibe la radiación (Zorrilla *et al.*, 2011). Las pérdidas relativas por irradiancia GI (%) se calculan según la ecuación:

$$GI(\%) = 100 \cdot \left(\frac{G_{CC} - G_{DC}}{G_{CC}} \right)$$

Dónde:

G_{CC} : irradiancia instantánea de la célula limpia (W/m^2)

G_{DC} : irradiancia instantánea de la célula sucia (W/m^2).

La presencia de la suciedad modifica la dependencia angular de la irradiancia, la cual es diferente para la célula limpia y la sucia. Cuando el módulo fotovoltaico está limpio, las pérdidas son constantes durante el día con cielos despejados. Mientras que cuando los módulos poseen algún tipo de suciedad como el polvo, las pérdidas no son constantes durante el día porque dependen del ángulo de incidencia (Figura 3).

Esto ocurre debido a que en las primeras horas de la mañana y en las últimas del día existe una mayor cantidad de radiación difusa, la cual, al no tener una dirección fija, no provoca tantas pérdidas como la radiación directa con altos ángulos de incidencia (Zorrilla *et al.*, 2011).

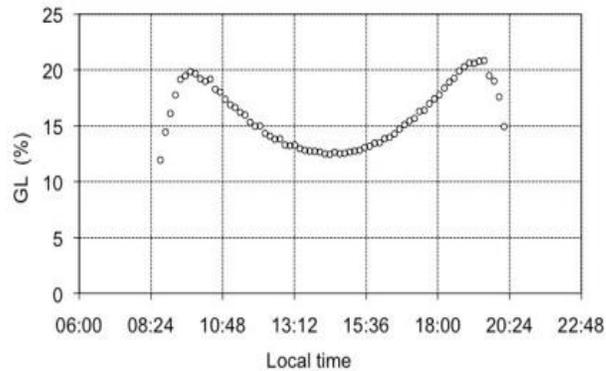


Figura 3. Evolución de las pérdidas por suciedad en un día (Zorrilla *et al.*, 2011).

Acumulación del polvo de Moa sobre el rendimiento de los paneles fotovoltaicos

Para determinar cómo el polvo de Moa incide en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, se desarrollaron dos experimentos. Se utilizó la estación climatológica WatchDog (Figura 4) que permite conocer de forma precisa y tiempo real los parámetros dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar e índice de pluviosidad. Este dispositivo posee una memoria donde puede almacenar los datos.



Figura 4. Estación climatológica WatchDog.

Se empleó un trazador de curvas desarrollado por el Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM), conformado por un capacitor que se carga y se descarga a través de la conmutación de dos relés, los cuales se activan con 5V DC a través de transistores para controlarlo. También posee un divisor de tensión y una resistencia *shunt*, los cuales se utilizan para el registrar los valores de voltaje y

corriente respectivamente. Además, este circuito cuenta con una resistencia de drenaje permitiendo que el capacitor se descargue por completo.

El sistema de adquisición está compuesto por Arduino UNO. Es la unidad principal de este ya que es el encargado del procesamiento y transmisión de las variables medidas para obtener las curvas características de I-V del panel fotovoltaico y parámetros significativos como $P_{max}(W)$, $V_{oc}(V)$, $V_{mpp}(V)$, $I_{mpp}(A)$, $I_{sc}(A)$ (Figura 5).



Figura 5. Trazador de Curvas IV.

El cual acciona a través del software de adquisición de datos y un interruptor virtual para la toma de las mediciones puntuales gracias a la aplicación desarrollada utilizando el software Matlab (Figura 6).

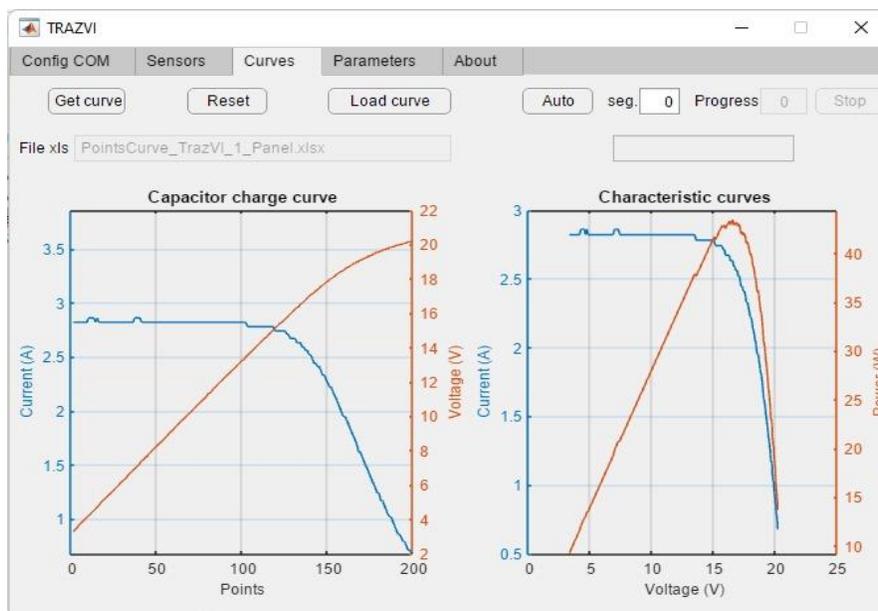


Figura 6. Aplicación basada en Matlab.

Se utilizó el panel solar policristalino del Entrenador Modular De Energía Fotovoltaica MINI-EESF/M de 66 Wp de potencia que posee una estructura de aluminio anodizado, con ruedas para su movilidad. Asimismo, contiene 36 células en serie (Edibon, 2018).

También, se empleó el panel solar SW 150 poly R6A/D. Este presenta una unión del marco con el cristal más plana que mide un total de 31 mm de altura y garantiza un mejor efecto autolimpiante (SolarWorld, 2015). Estos módulos eficaces para alimentar el alumbrado público como para accionar bombas de agua o para electrificar zonas rurales, los robustos módulos aislados son la solución perfecta para cualquier ámbito de aplicación (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros eléctricos de los paneles fotovoltaicos

Tipo de Panel fotovoltaico	Panel del módulo MINI-EESF/M	SW 150 poly R6A/D
Potencia máxima (Pmax)	66 Wp	150 Wp
Tensión de circuito abierto (Voc)	22,25 V	22,5 V
Tensión de potencia máxima (Vmpp)	17,8 V	18,8 V
Corriente de Cortocircuito(Isc.)	4,05 A	8,81 A
Corriente de potencia máxima (Impp)	3,70 A	8,27 A

Para el experimento se tomaron muestras de polvo de diferentes puntos de la cubierta del edificio de la Facultad de Metalurgia y Electromecánica de la Universidad de Moa, por ser uno de los lugares de la institución donde existe mayor acumulación de suciedad. Se homogenizaron para separar cuatro muestras pequeñas (muestras 1, 2, 3 y 4). De ellas, tres (muestra 1, 2 y 3) se utilizaron en el experimento uno y una (muestra 4) se analizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar su composición química y se tamizó para definir los valores de granulometría de las partículas de polvo.

Descripción del experimento 1

Para el experimento se utilizó el panel solar policristalino del "Entrenador Modular De Energía Fotovoltaica MINI-EESF/M" de EDIBON. Se realizó en el mes de octubre, en días de cielo despejado, con radiación promedio de 800 W/m^2 y en un ambiente semicontrolado.

Se ubicó a la intemperie, en la Facultad de Metalurgia y Electromecánica y se orientó hacia el sur. Se ajustó su ángulo de inclinación en 15° por ser el valor que los especialistas de la Empresa de Ingeniería Eléctrica proponen para la proyección de los parques fotovoltaicos de Cuba (Díaz *et al.*, 2018).

Se realizó una primera medición con el panel limpio para así obtener sus parámetros de operación en condiciones reales. Posteriormente, se realizaron tres mediciones más. Antes de realizar cada medición, se adicionó alrededor de 7 g del polvo recolectado, hasta alcanzar un total de 21 g sobre la superficie del panel fotovoltaico (Figura 7).



Figura 7. Panel con 21 g de polvo depositado en su superficie, trazador de curvas, laptop con aplicación para la toma de datos y estación climatológica.

Descripción del experimento 2

El segundo experimento se efectuó mediante el uso de un Módulo Fotovoltaico SW 150 poly R6A/D. Se colocó en la azotea del edificio de la Facultad de Metalurgia y Electromecánica. De la misma manera, se orientó hacia el sur y se ajustó su ángulo de inclinación en 15° (Díaz *et al.*, 2018). Se limpió adecuadamente 10 días después de iniciado el experimento y se realizaron mediciones para obtener sus parámetros de operación.

A partir del mismo día se dejó a la intemperie por un periodo de 2 meses y 9 días, expuesto a condiciones climáticas presentes en la localidad de Moa. 40 días después se monitoreó la degradación de sus parámetros por la acumulación de suciedad.

Resultados e interpretación

Al someter una de las muestras (muestra 4) del polvo recolectado a la prueba de fluorescencia de rayos x (FRX), se obtuvieron los diferentes elementos químicos que lo componen. Estos se corresponden con las características de las menas existentes en la región, lo que demuestra la correspondencia de las muestras con el polvo que se eleva y recorre el espacio aéreo del entorno de Moa.

Los componentes hierro, cromo y manganeso son los que poseen las coloraciones más oscuras, por lo que provocan la mayor opacidad y tienen una mayor incidencia en el rendimiento del panel. Hay que tener en cuenta que existen elementos no reflejados en la muestra (ya que la maquinaria empleada no lo permitía) como son las trazas de petróleo y el hollín que dan un carácter grasoso al polvo producto de la calcinación las presas de cola y de las minas existentes en la región.

Tabla 2. Composición química de la muestra analizada en ppm

Muestra	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr	Mn
1	1,000	0,068	27,900	21,090	11,530	8,630	1,149	0,251

A través del tamizado, se evidenció, la mayor cantidad de las partículas del polvo recolectado presentan un tamaño superior a los 200 mesh ya que estos son restos de impermeabilizantes, (Tabla 3). Las partículas menores de 200 mesh tienen menos probabilidad de ser arrastradas fuera de la superficie del panel por la fuerza del viento y promueven la formación de vacíos y puentes líquidos entre las partículas y la superficie, lo que potencia la ocurrencia de procesos como el envejecimiento (Ilse *et al.*, 2018).

Tabla 3. Granulometría de la muestra

MESH		
200	-200	Total
29,2g	15,2g	44,4g
65,76 %	34,23 %	99,99 %

El primer experimento evidenció que, a medida que aumenta la acumulación de polvo en el módulo, su potencia decrece a un ritmo acelerado, lo cual se refleja en decrecimiento considerable en sus curvas características (Figura 8). Esto indica la influencia que ejerce la acumulación de polvo sobre el rendimiento de los paneles fotovoltaicos en Moa con sus carteristas específicas.

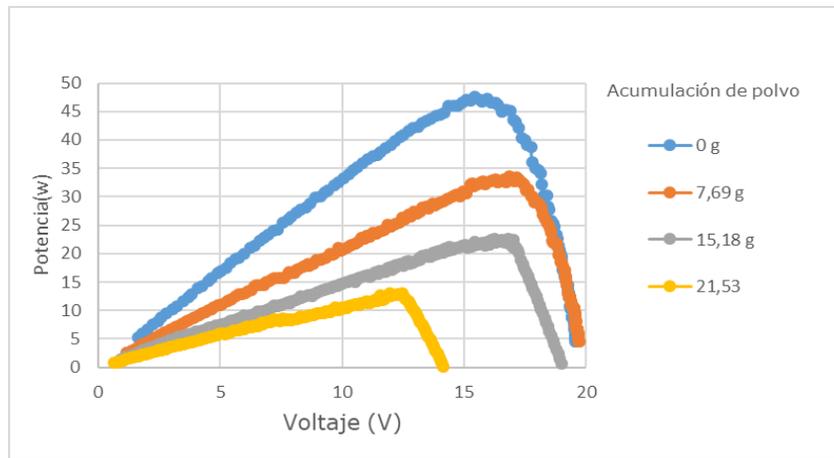


Figura 8. Gráfico de P/V del módulo de Edibon aumentando la cantidad de polvo depositado.

A partir de lo anterior, se obtuvo un modelo básico que explica el comportamiento del módulo fotovoltaico de Edibom ante la acumulación de polvo dado por la ecuación:

$$P = -1,5751Pd + 46,783$$

Dónde

P: potencia máxima del panel (W)

Pd: cantidad de polvo depositado (g).

En la Figura 9 se muestra el modelo matemático graficado, el cual posee un coeficiente de determinación de un 0,9967, lo que demuestra su nivel de exactitud, por lo tanto, servirá para futuras investigaciones.

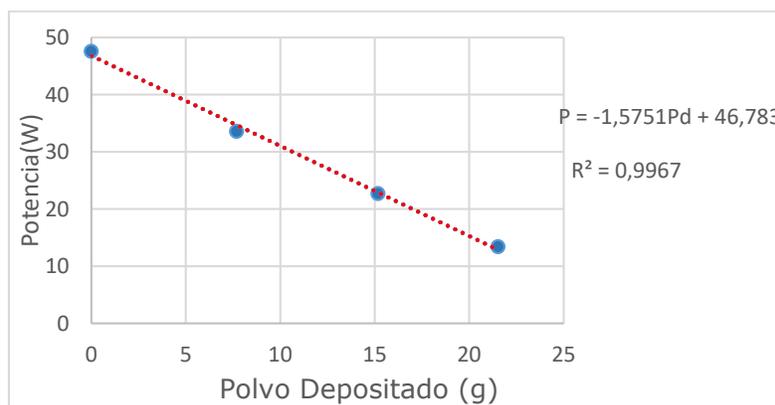


Figura 9. Modelación matemática.

El segundo estudio demostró que, a pesar de la incidencia de la lluvia como factor que ejerce un gran impacto en la limpieza de los módulos. No evita la degradación de los parámetros por la acumulación polvo en el panel Fotovoltaico SW 150 poly R6A/D al

ser expuesto a condiciones climáticas reales, de los días que estuvo expuesto el 71 por ciento hubo precipitaciones en nuestra localidad (Figura 10).

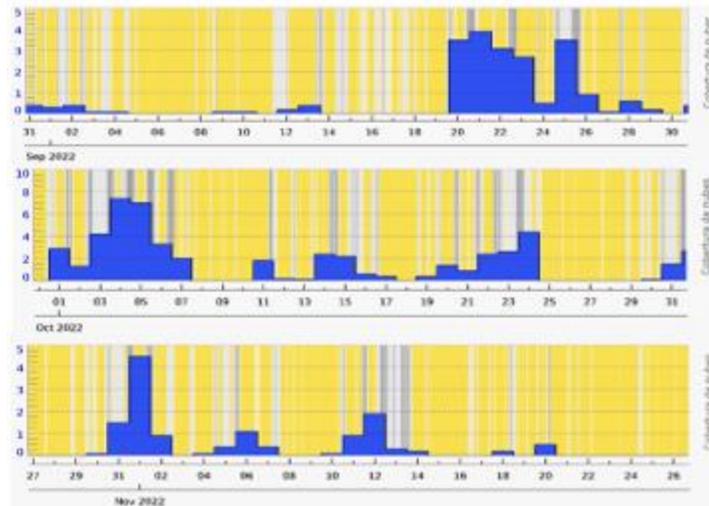


Figura 10. Media diaria de precipitaciones en Moa, Cuba (Weather Spark, 2022).

A pesar de las constantes precipitaciones, se muestra un incremento paulatino de los niveles de deposición de polvo que inciden negativamente en la eficiencia del panel fotovoltaico (Figura 11) logrando así disminuir la potencia de este en 1,6 por ciento.

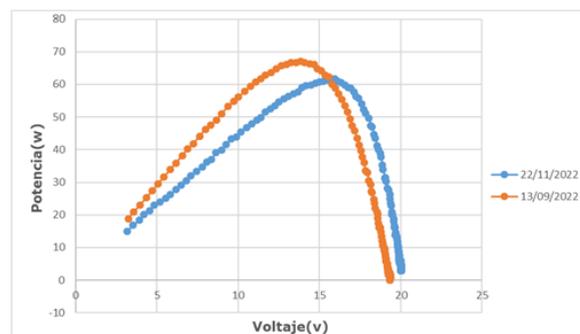


Figura 11. Degradación de los parámetros del módulo fotovoltaico SW 150 poly R6A/D debido a la acumulación de polvo.

Se observan patrones no uniformes de polvo en zona inferior, de manera distinta a la superior donde se observa a simple vista la acumulación de polvo de una forma más homogénea. Esto pueda ser el resultado de la incidencia del viento y da lugar a la formación de puntos calientes en las celdas del módulo (Figura 12).



Figura 12. Acumulación de polvo resultado de la exposición del módulo SW 150 poly R6A/D a las condiciones climáticas de Moa.

Conclusiones

El proceso de acumulación de polvo sobre los paneles fotovoltaicos responde principalmente a características medioambientales. Los dos experimentos relacionados con la determinación del efecto de la acumulación del polvo en determinadas condiciones ambientales y la medición de la eficiencia de paneles fotovoltaicos bajo la deposición del polvo en un ambiente semi-controlado demostraron que es necesario estudiarlo sobre la base de las particularidades de territorio donde se instalan los módulos y en función de hacer un uso eficiente de la tecnología fotovoltaica. Por lo tanto, el polvo debe integrarse adecuadamente en el análisis de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

En el caso de Moa, un análisis químico del polvo evidenció que el 60 % del cúmulo de partículas están referidas a Mg, SiO₂, Fe, Ni, Al₂O₃. Ello demuestra que en el municipio circunda un polvo con características específicas que inciden de manera negativa en sus parámetros de eficiencia energética. Los elementos químicos que tienen mayor presencia absorben la luz proporcionada por el sol o la reflejan omitiendo así el paso de esta a través del cristal protector para que así se produzca el efecto fotovoltaico.

Durante el periodo de 70 días a partir del 3 de septiembre de 2022 en que se llevó a cabo el segundo estudio, 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 %. Esto reafirma la necesidad de tomar en consideración todos factores típicos de los territorios que facilitan la adhesión de

partículas la superficie del panel fotovoltaico tales como la humedad, el rocío y características físicas y químicas del polvo.

El desarrollo de la ecuación que relaciona la incidencia del volumen de acumulación del polvo hasta 21g en la eficiencia de un panel fotovoltaico demostró que al aumentar la cantidad de polvo acumulada en la superficie, la eficiencia del panel decrece.

Referencias bibliográficas

- Abderrezek, M. & Fathi, M. (2017). Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. *Solar Energy*, 142, 308-320. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017SoEn.142.308A/abstract>.
- Angulo, J., Calsi, B., Alfaro, E., Conde, L., Muñoz, E., Grieseler, R. & Casa, J. (2020). Estudio del efecto del polvo y estimación de la potencia nominal en un string fotovoltaico. *Tecnia*, 30(1), 27-33. <https://www.revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnica/article/view/832>.
- Appels, R., Muthirayan, B., Beerten, A., Paesen, R., Driesen, J. & Poortmans, J. (2012). *The effect of dust deposition on photovoltaic modules*. 38th IEEE photovoltaic specialists conference.
- Cabanillas, R., Munguía, H. & Energy, S. (2011). Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 3(4). <https://doi-org/10-1063/1.3622609>.
- Castro, J. (2019). *Análisis de pérdidas por suciedad en plantas fotovoltaicas*. (Tesis de Maestría). Universidad Carlos III Madrid. <https://e-archivo-uc3m.es/handle/10016/29375>.
- Chanchangi, Y. N., Ghosh, A., Sundaram, S. & Mallick, T. K. (2020). An analytical indoor experimental study on the effect of soiling on PV, focusing on dust properties and PV surface material. *J Solar Energy*, 203, 46-68.
- D'amour, J., Stålgren, J. R., Kanazawa, K., Frank, C., Rodahl, M. & Johannsmann, D. (2006). Capillary aging of the contacts between glass spheres and a quartz resonator surface. *Cartas de revisión física*, 96(5). <https://doi-org/10-11103/physrevlett.96.058301>.

- Díaz, R., Castro, M., Santos, A. & Vilaragut, M. J. (2018). Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica. *Ingeniería Energética*, 39(3), 146-156.
- Edibon. (2018). *Entrenadores Modulares de Energía*. <https://www.edibon.com/es/equipo-modular-de-energia-solar-fotovoltaica-version-completa>.
- Fan, S., Wang, Y., Cao, S., Sun, T. & Liu, P. (2021). A novel method for analyzing the effect of dust accumulation on energy efficiency loss in photovoltaic (PV) system. *Energy*, 234, 121112. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221013608>.
- Gostein, M., Caron, J. R. & Littmann, B. (2014, June). Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants. In *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* (pp. 0885-0890). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6925056/>.
- Hachicha, A., Al-Sawafta, I. & Said, Z. (2019). Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. *Renewable Energy*, 141, 287-297. <https://doi-org/10-1016/j.renene.2019.04.004>.
- Huanca, R. H. (2022). Estudio de los efectos del polvo en deposición sobre módulos fotovoltaicos y sistemas fotovoltaicos híbridos. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/02b5ef42-427d-485c-85f1-94b897ed7eaf>.
- Hülsmann, P., Heck, M. & Köhl, M. (2013). Simulation of water vapor ingress into PV-modules under different climatic conditions. *Journal of Materials*, 1(8), 1-7. <https://downloads.hindawi.com/archive/2013/102691.pdf>.
- Ilse, K., Werner, M., Naumann, V., Figgis, B. W., Hagendorf, C. & Bagdahn, J. J. (2016). Microstructural analysis of the cementation process during soiling on glass surfaces in arid and semi-arid climates. *Physica status solidi (RRL)*, 10(7), 525-529.
- Ilse, K., Figgis, B., Khan, M. Z., Naumann, V. & Hagendorf, C. (2018). Dew as a detrimental influencing factor for soiling of PV modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(1), 287-294. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8561172/>.

- Javed, W., Guo, B. & Figgis, B. (2017). Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables. *Solar Energy*, 157, 397-407. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17307260>.
- Kazmerski, L. L., Diniz, A. S. A., Maia, C. B., Viana, M. M., Costa, S. C., Brito, P. P., de Oliveira Cruz, L. R. (2016). *Soiling particle interactions on PV modules: Surface and inter-particle adhesion and chemistry effects*. Conferencia de especialistas fotovoltaicos (PVSC) del IEEE. 1714-1717. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7749916/>.
- Knotter, D., & Wali, F. (2010). Developments in Surface Contamination and Cleaning. Particle Deposition, Control and Removal 1st edn, 81-120. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7830-4.10003-9>.
- Konyu, M., Ketjoy, N. & Sirisamphanwong, C. (2020). Effect of dust on the solar spectrum and electricity generation of a photovoltaic module. *IET Generación de Energía Renovable*, 14(14), 2759-2764. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-rpg.2020.0456>.
- Laborde, M. & Williams, R. (2016). *Energía solar*. Buenos Aires, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. <http://www.google.com/amp/s/docplayer.es/amp/34446199-Energia-solar-editores-miguel-a-laborde-roberto-j-j-williams.html>.
- Lorenzo, E., Moretón, R. & Luque, I. (2014). Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns. *Progreso en energía fotovoltaica: investigación y aplicaciones*, 22(6), 666-670. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.2348>.
- Mahecha-Vanegas, C. H. (2021). *Análisis de los componentes físicos y ambientales para la captación de agua niebla como complemento de abastecimiento para zonas rurales del departamento de Cundinamarca*. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/26400>.
- Pedroso, B. (2019). *Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos tras 7 años de operación en Santiago de Cuba*. (Trabajo de Diploma, Universidad de Moa). Cuba.

- Perkins, C. L., Muller, M. & Simpson, L. (2017). *Laboratory studies of particle cementation and PV module soiling*. IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC).
- Rodríguez, M. I. (2022). *Evaluación de la eficiencia energética de paneles solares operando In Situ*. Corporación Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/9516>.
- SolarWorld. (2015). *SUNMODULE SW 150 R6A*. <http://www.solarage.com/wp-content/uploads/2016/07/Sunmodule-SW-150-poly-data-sheet.pdf>.
- Tiwari, G., Tiwari, A. J. & Springer, A. (2016). Shyam, *Handbook of Solar Energy: Theory*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-0807-8>.
- Velasco, J. G. (2009). *Energías renovables*: Reverte.
- Weather Spark. (2022). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Moa. <https://es.weatherspark.com/y/23497/Clima-promedio-en-Moa-Cuba-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-Humidity>.
- Zhang, J., Xie, S., Lu, Z., Wu, Y., Xiao, H., Zhang, X. & Cells, S. (2018). Influence of substrate temperature on the film morphology and photovoltaic performance of non-fullerene organic solar cells. *Materiales de Energía solar y Células Solares*, 174, 1-6. <http://www.sciencedirect.com/science/article/abcs/pii/S0927024817303926>.
- Zorrilla, J., Philiouline, M., Carretero, J., Bernaola, P., Carpena, P., Mora-López, L. & Sidrach-de-Cardona, M. (2011). *Analysis of dust losses in photovoltaic modules*. Paper presented at the World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13, Linköping; Sweden. https://www.irishellas.com/files/Analysis-of-dust-losses-in-photovoltaic-modules_2011.pdf.