

COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOS TECNOLOGÍAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN ESTACIÓN SECA Y LLUVIOSA EN JULIACA

Data de submissão: 07/05/2024

Data de aceite: 03/06/2024

Junior Torres Yucra

Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca -Perú
<https://orcid.org/0000-0001-9789-9013>

Juan churata Huaraya

Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca -Perú
<https://orcid.org/0000-0001-6908-5741>

Huber Rony Hurtado Arhuata

Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca -Perú
<https://orcid.org/0000-0003-0417-1045>

Vilma Sarmiento Mamani

Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca -Perú
<https://orcid.org/0000-0002-5520-716X>

Miguel Washington Soncco Vilcapaza

Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca -Perú
<https://orcid.org/0000-0003-2385-1820>

RESUMEN: En cada región, las condiciones climáticas tienen un impacto significativo en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos, subrayando la necesidad de datos específicos para cada área, como en el caso de Puno. Para entender mejor este efecto,

se realizó un estudio en el centro poblado de Ayabacas, con el objetivo de evaluar la eficiencia de dos tecnologías fotovoltaicas durante la estación seca y lluviosa. Se utilizaron cuatro módulos fotovoltaicos, dos de tecnología policristalina y dos de tecnología monocristalina. Dos de estos módulos fueron expuestos a la acumulación de polvo durante 12 meses, mientras que los otros dos se mantuvieron limpios como referencia. Se evaluó la potencia de salida en ambas estaciones. Durante la estación seca, se observó que los módulos con polvo experimentaron una ligera reducción en la eficiencia en comparación con los limpios. Por ejemplo, en el caso de los módulos policristalinos, la eficiencia disminuyó de 3.11% a 3.07% con polvo, mientras que para los monocristalinos, la reducción fue de 3.28% a 3.23%. En la estación lluviosa, se mantuvo la tendencia de reducción en la eficiencia para los módulos con polvo, aunque en menor medida que en la estación seca. Por ejemplo, los módulos policristalinos experimentaron una disminución de 3.64% a 3.61% con polvo, y los monocristalinos de 3.83% a 3.77%. Además, se registraron las temperaturas máximas alcanzadas por los módulos durante ambas estaciones. En la estación

lluviosa, el módulo policristalino con polvo alcanzó una temperatura máxima de 48.58 °C, mientras que el monocristalino con polvo llegó a 46.3 °C. Durante la estación seca, estas temperaturas máximas fueron ligeramente más altas, con 48.62 °C para el policristalino sin polvo y 47.44 °C para el monocristalino sin polvo.

PALABRAS-CLAVE: Generación fotovoltaica, rendimiento y pérdidas.

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF TWO PHOTOVOLTAIC PANELS TECHNOLOGIES IN DRY AND RAINY SEASONS IN JULIACA

ABSTRACT: In each region, weather conditions have a significant impact on the performance of photovoltaic modules, underscoring the need for specific data for each area, as in the case of Puno. To better understand this effect, a study was carried out in the town of Ayabacas, with the objective of evaluating the efficiency of two photovoltaic technologies during the dry and rainy season. Four photovoltaic modules were used, two with polycrystalline technology and two with monocrystalline technology. Two of these modules were exposed to dust accumulation for 12 months, while the other two were kept clean for reference. The power output was evaluated at both stations. During the dry season, it was observed that dusty modules experienced a slight reduction in efficiency compared to clean ones. For example, in the case of polycrystalline modules, the efficiency decreased from 3.11% to 3.07% with dust, while for monocrystalline modules, the reduction was from 3.28% to 3.23%. In the rainy season, the trend of reduction in efficiency for the dusty modules continued, although to a lesser extent than in the dry season. For example, polycrystalline modules experienced a decrease from 3.64% to 3.61% with dust, and monocrystalline modules from 3.83% to 3.77%. In addition, the maximum temperatures reached by the modules during both seasons were recorded. In the rainy season, the polycrystalline module with dust reached a maximum temperature of 48.58 °C, while the monocrystalline module with dust reached 46.3 °C. During the dry season, these maximum temperatures were slightly higher, with 48.62 °C for the dust-free polycrystalline and 47.44 °C for the dust-free monocrystalline.

KEYWORDS: Photovoltaic generation, performance and losses

INTRODUCCIÓN

El Sol ejerce una influencia dominante en las actividades terrestres, y su papel en la provisión de energía, tanto en el presente como en el futuro, es crucial (Bachiller, 2007). La tecnología solar fotovoltaica, que convierte la energía lumínica del Sol en electricidad a través de placas semiconductores activadas por la radiación solar, es una manifestación directa de este aprovechamiento (Habana, 2017).

En casi todo el territorio peruano, la energía solar se destaca como el recurso energético más ampliamente disponible. Esta disponibilidad es notablemente alta y constante a lo largo de todo el año, lo que la hace particularmente atractiva en comparación con otros países. La intensidad de la radiación solar aumenta con la latitud y la altitud sobre el nivel del mar. Las regiones con los mayores promedios anuales se encuentran en la costa sur, con valores de 6.0–6.5 kWh/m² en los departamentos de Tacna, Moquegua y

Arequipa, y en la sierra, con valores de 5.5–6 kWh/m² en departamentos como Ayacucho, Cuzco, Apurímac y Puno (MINEM, 2011). Por lo tanto, la radiación solar es un factor crucial a considerar en el diseño de sistemas fotovoltaicos, ya que varía según la ubicación geográfica debido a factores climáticos (Sepúlveda, 2014).

También se reconoce la importancia de garantizar el óptimo rendimiento de los paneles fotovoltaicos (Rojas & Lozano, 2016). Sin embargo, la acumulación de polvo en estos sistemas emerge como uno de los principales factores que afecta negativamente su eficiencia (Angulo et al., 2020). Además, se destaca que el aumento de la temperatura conlleva una disminución en el voltaje de los paneles fotovoltaicos, lo que repercute en su eficiencia general (Karafil et al., 2016). En este contexto, es esencial comprender el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos en relación con las condiciones geográficas y climáticas específicas del centro poblado de Ayabacas, en la región de Puno, especialmente durante la estación seca y la estación lluviosa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se instaló un módulo experimental en el Instituto de Energías Renovables y Eficiencia Energética (IEREE) de la Universidad Nacional de Juliaca, en el Centro Poblado de Ayabacas, a una altitud de 3832 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). La financiación provino de la doctora Vilma Sarmiento Mamani. Durante un periodo de 365 días, se monitoreó continuamente el módulo, tanto en la estación lluviosa (noviembre de 2021 a octubre de 2022) como en la estación seca (de mayo a octubre de 2022). El sistema incluyó 4 módulos fotovoltaicos: 2 monocristalinos y 2 policristalinos, todos de 100 Wp, montados con una orientación norte y un ángulo de inclinación de 15°. Cada módulo se conectó individualmente. Se realizó una comparación entre la limpieza de un módulo de cada tipo y la exposición prolongada al polvo de los otros dos durante 12 meses, evaluando luego su potencia de salida. Se registraron datos de corriente, tensión y temperatura durante todo el periodo de estudio para un análisis científico detallado.

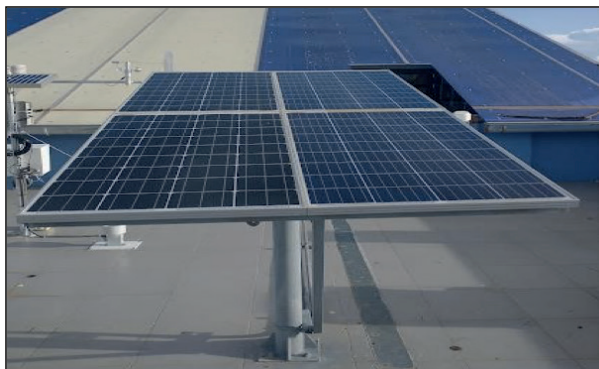


Figura 1: Módulos fotovoltaicos de ambas tecnologías instalados en el IREEE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la comparación se enfocan en la energía eléctrica continua (E_{dc} en kWh/día) generada por los módulos fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos, tanto en condiciones limpias como sucias.

Se aplicó la norma IEC 61724 para analizar los datos de productividad y eficiencia, siguiendo los procedimientos mencionados a continuación.

Inicialmente, el cálculo de la irradiación en el plano (H_i en Wh/m²) se realiza sumando la irradiancia incidente en el plano (G_k en W/m²) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$H_i = \sum_k G_k \times r_k$$

Para determinar la energía en la parte de corriente continua (E_A en Wh), se emplea la siguiente ecuación:

$$E_A = \sum_k P_{A,k} \times r_k$$

La ecuación utiliza el valor de potencia a la entrada en corriente continua (P_A , k en W), donde $P_{A,k}$ representa el k -ésimo valor registrado. Además, la normativa define el rendimiento energético del array fotovoltaico (Y_A en Wh·W⁻¹) como la producción de energía en corriente continua del sistema por cada kW nominal instalado:

$$Y_A = E_A / P_A$$

Donde P_0 es la potencia pico del sistema.

La eficiencia media del arreglo durante un intervalo de tiempo se calcula mediante la siguiente expresión:

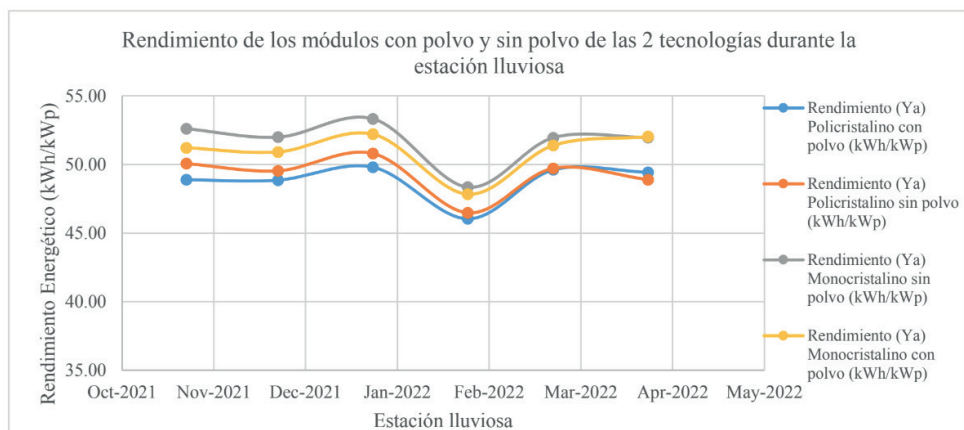
$$\eta_A = E_A / H_i \times A_a$$

La variable A_a representa el área total del arreglo, que se calcula sumando las áreas de las superficies frontales de los módulos fotovoltaicos definidas por sus bordes externos.

Los resultados obtenidos durante un año de monitoreo, desde noviembre de 2021 hasta octubre de 2022, se presentan a continuación:

Mes - Año	(Ya) Poli conpolvo (kWh/kWp)	(Ya) Poli sinpolvo (kWh/kWp)	(Ya) Mono sin polvo (kWh/kWp)	(Ya) Mono con polvo (kWh/kWp)
Nov-21	48.88	50.06	52.61	51.22
Dic-21	48.86	49.54	51.99	50.91
Ene-22	49.80	50.80	53.33	52.21
Feb-22	46.04	46.48	48.35	47.84
Mar-22	49.61	49.72	51.95	51.39
Abr-22	49.43	48.89	51.97	52.03
Estación lluviosa	292.63	295.49	310.20	305.59

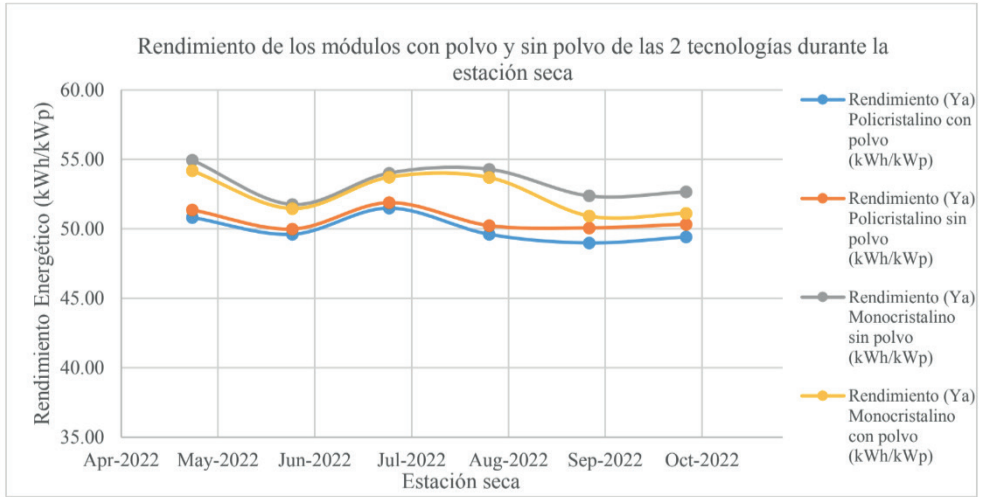
Tabla N° 01: Resultados de rendimiento de los sistemas – estación lluviosa (2021-2022).



Gráfica N°1: Rendimiento mensual de los sistemas con polvo y sin polvo – estación lluviosa (2021-2022).

Mes - Año	(Ya) Policon polvo (kWh/kWp)	(Ya) Poli-sin polvo (kWh/kWp)	(Ya) Mono-sin polvo (kWh/kWp)	(Ya) Mono con polvo (kWh/kWp)
May-22	50.82	51.37	54.95	54.18
Jun-22	49.61	49.99	51.76	51.46
Jul-22	51.49	51.88	54.01	53.72
Ago-22	49.61	50.24	54.29	53.70
Set-22	48.99	50.07	52.37	50.93
Oct-22	49.42	50.33	52.66	51.12
Estación seca	299.93	303.88	320.04	315.11

Tabla N°2: Resultados de rendimiento de los sistemas – estación seca (2022).



Gráfica N°2: Rendimiento mensual de los sistemas con polvo y sin polvo – estación seca (2022).

Resumen temperatura estación lluviosa (°C)							
Tiempo	Poli-sin polvo	Mono-sin polvo	Mono-con polvo	Poli-con polvo	Amb.	Dif. (poli)	Dif. (mono)
06:30-07:30	10.90	10.84	10.20	9.87	5.85	-1.02	-0.64
07:30-08:30	22.91	22.55	21.57	21.02	10.54	-1.89	-0.98
08:30-09:30	33.94	33.22	32.05	31.11	15.25	-2.83	-1.17
09:30-10:30	41.20	40.05	38.73	37.65	18.70	-3.55	-1.32
10:30-11:30	45.88	44.33	42.92	41.97	21.63	-3.91	-1.41
11:30-12:30	48.58	46.30	44.97	44.54	24.12	-4.05	-1.33
12:30-13:30	44.97	42.45	41.32	41.42	24.33	-3.55	-1.12
13:30-14:30	37.05	34.82	33.99	34.26	22.47	-2.79	-0.84
14:30-15:30	27.85	26.13	25.53	25.94	19.24	-1.91	-0.60
15:30-16:30	19.85	18.94	18.41	18.64	15.74	-1.22	-0.53
16:30-17:30	12.49	12.34	11.87	11.84	11.28	-0.66	-0.47
PROMEDIO	31.42	30.18	29.23	28.93	17.20	-2.49	-0.95

Tabla N° 03: Resultados de temperatura para la estación lluviosa

Resumen temperatura estación seca (°C)							
Tiempo	Polisin polvo	Mono sin polvo	Mono con polvo	Policon polvo	Amb.	Dif. (poli)	Dif. (mono)
06:30-07:30	6.28	6.86	5.99	5.77	1.46	-0.51	-0.87
07:30-08:30	23.46	23.55	22.22	21.63	8.91	-1.83	-1.32
08:30-09:30	36.71	36.46	34.89	33.81	14.36	-2.90	-1.57
09:30-10:30	45.06	44.19	42.68	41.44	18.91	-3.62	-1.51
10:30-11:30	48.62	47.44	46.13	45.06	21.67	-3.56	-1.31
11:30-12:30	48.41	46.73	45.61	45.05	23.22	-3.36	-1.12
12:30-13:30	45.65	43.49	42.47	42.46	24.17	-3.19	-1.02
13:30-14:30	39.89	37.80	36.96	37.16	23.99	-2.73	-0.84
14:30-15:30	30.24	28.89	28.08	28.30	21.05	-1.93	-0.81
15:30-16:30	19.83	19.40	18.65	18.74	16.73	-1.10	-0.75
16:30-17:30	10.98	11.44	10.79	10.66	11.03	-0.32	-0.64
PROMEDIO	32.28	31.48	30.41	30.01	16.86	-2.28	-1.07

Tabla N° 04: Resultados de temperatura para la estación seca

CONCLUSIONES

Durante la estación lluviosa, se observó que la eficiencia del módulo policristalino con polvo disminuyó en un 0.031% diario en comparación con el módulo sin polvo, resultando en una reducción total del 0.97% a lo largo de la estación, con una eficiencia final de 3.61%. Para el módulo monocristalino con polvo, la eficiencia disminuyó a una tasa de 0.048% por día, alcanzando una eficiencia final del 3.77%, lo que representa una reducción total del 0.06% durante la estación lluviosa. En cuanto a la productividad mensual, se observó un descenso de hasta el 2.36% para el módulo policristalino con polvo y del 2.64% para el módulo monocristalino con polvo, en comparación con sus respectivos módulos sin polvo, durante el mes de noviembre. En el inicio de la estación seca, la eficiencia del módulo policristalino con polvo disminuyó a una tasa diaria de 0.042%, resultando en una reducción total del 1.3% a lo largo de la estación, con una eficiencia final de 3.07%. Para el módulo monocristalino con polvo, la eficiencia disminuyó a una tasa de 0.05% por día, alcanzando una eficiencia final del 3.23%, lo que representa una reducción total del 1.54% durante la estación seca. La productividad mensual descendió hasta un 2.16% para el módulo policristalino con polvo en septiembre, y hasta un 2.93% para el módulo monocristalino con polvo en octubre. Esta reducción se atribuye a la disminución de la precipitación pluvial, que con el tiempo acumula polvo en los módulos fotovoltaicos y afecta su rendimiento. Durante ambas estaciones, las temperaturas máximas registradas para los módulos policristalinos y monocristalinos sin polvo fueron de 48.58 °C y 46.3 °C respectivamente durante la estación lluviosa, y de 48.62 °C y 47.44 °C respectivamente

durante la estación seca. La temperatura ambiente promedio fue de 16.86 °C y 17.2 °C durante la estación seca y lluviosa respectivamente, con máximos de 24.17 °C y 24.33 °C, y mínimos de 1.46 °C y 5.85 °C respectivamente. Se observó que los módulos fotovoltaicos monocristalinos presentaron una variación de temperatura menor en comparación con los módulos policristalinos, con diferencias de 2.05 °C durante la estación seca y 2.64 °C durante la estación lluviosa. En conclusión, el centro poblado de Ayabacas se considera un lugar óptimo para la instalación de sistemas fotovoltaicos debido a su baja acumulación de polvo en los módulos, su temperatura moderada que no supera los 50°C, y la temperatura ambiente favorable de alrededor de 24 °C durante ambas estaciones.

REFERENCIAS

- Adinoyi, M. J. y Said, S. A. M. (2013). Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 60, 633–636. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>
- Alfaro, E., Espinoza, R., & Huaccachi, W. (2019). Influencia del polvo sobre el rendimiento eléctrico de modulos fotovoltaicos de película delgada, mediciones hechas en el labsofcer. 2–7.
- Andrea, Y., Pogrebnaya, T. y Kichonge, B. (2019). Effect of Industrial Dust Deposition on Photovoltaic Module Performance: Experimental Measurements in the Tropical Region.
- Angulo, J., Calsi, B., Alfaro, E., Conde, L., Muñoz, E., Grieseler, R., Guerra, J., Palomino, J., Espinoza, R. y Casas, J. (2020). Potencia nominal en un string fotovoltaico. Study of the dust effect and the nominal power estimation in a photovoltaic string. 3, 27–33.
- Bachiller, R. (2007). El Sol nuestra estrella, 371–382.
- Blanco, I. (2011). Instalación solar fotovoltaica conectada a red sobre la azotea de una nave industrial.
- Chaichan, T., Kazem, A., Al-waeli, A. y Sopian, K. (2020). The effect of dust components and contaminants on the performance of photovoltaic for the four regions in Iraq : a practical study. 3.
- Cieza, J. (2017). Dimensionamiento De Un Sistema Fotovoltaico Para Las Instalaciones Eléctricas De Alumbrado En El Hostal Lancelot Ubicado En Chiclayo. Recuperado de <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/1919/BC-TES- MP-765.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Díaz, R., Castro, M., Santos, A. y Vilaragut, M. (2018). Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica, 39, 146–156. Habana, L. (2017). . The hour equivalent solar pick, definition and interpretation,XXXVIII, 124–131.
- Hussain, A., Batra, A. y Pachauri, R. (2017). An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module. *Renewables: Wind, Water, and Solar*. Recuperado de <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0043-y>
- Karafil, A., Ozbay, H., Kesler, M. y Parmaksiz, H. (2016). Calculation of Optimum Fixed Tilt Angle of PV Panels Depending on Solar Angles and Comparison of the Results with Experimental Study Conducted in Summer in Bilecik, Turkey, 971–976.

- Karmouch, R. y Hor, H. (2017). Solar Cells Performance Reduction under the Effect of Dust in Jazan Region Fundamentals of Renewable Energy and Applications. 7(2), 8–11. Recuperado de <https://doi.org/10.4172/2090-4541.1000228>
- MINEM. (2001). Ministerio de energía y minas. Recuperado de: <http://www.minem.gob.pe/>
- MINEM. (2011). Ministerio De Energía Y MinaS. Recuperado de: <http://www.minem.gob.pe/>
- MINEM. (2011). Potencial de las Energías Renovables en el Perú.
- Nuevo, Pablo. 2016. Análisis de Factores Que Influyen En La Suciedad de Paneles Fotovoltaicos y Su Efecto Sobre La Producción de Energía Eléctrica. 115.
- Navarrete, K. T. del P. (2019). Análisis técnico -económico de un sistema fotovoltaico con influencia de suciedad, viento y lluvia en Arequipa- Perú- Ingeniera Industrial.
- OSINERGMIN. 2017. La Industria de La Energía Renovable En El Perú, 10 Años de Contribuciones a La Mitigación Del Cambio Climático. Vol. 1.
- Quispe, Augusto Wemer. 2017. Estudio Técnico Y Económico Para La Instalación De Una Planta Fotovoltaica Para La Provisión De Energía Al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional En La Región Puno. 1–17.
- Rao, A., Pillai, R., Mani, M. y Ramamurthy, P. (2014). Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance. Energy Procedia, 54, 690–700. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.310>
- Rojas, M. y Lozano, M. (2016). Determinación del ángulo de inclinación óptimo de un panel fotovoltaico en el Valle Del Mantaro.
- Saidan, M., Ghani, A., Alasis, E. y Kaldellis, J. K. (2016). Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. Renewable Energy, 92, 499–505. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.031>
- Santa, S (2014). Diseño de una instalación fotovoltaica autónoma para la finca Mis Delirio en Pereira – Colombia. Recuperado de <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/13683/TFM-Sergio%20Santa%20Garcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- SENAMHI. (2018). Servicio Nacional de Metereologia e Hidrologia del Peru. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/>
- Sepúlveda, S. (2014). Radiación Solar : Factor Clave Para El Diseño De Sistemas Fotovoltaicos Solar Radiation : Key Factor For Design Of Radiación Solar : Factor Clave Para El Diseño, 60–65.
- SIEMENS. (2004). Hoja de Datos Técnicos Hoja de Datos Técnicos. 28046. <https://multimedia.3m.com/mws/media/1411966O/3m-structural-adhesive-08122-spanish-tds.pdf>
- SIEMENS. (2014). Hoja de datos. 3964, 4–7. SOLAR, O. (2022a). Onda Solar ODA100-18-M. SOLAR, O. (2022b). Onda Solar ODA100-18-P.
- Sulaiman, A., Hussain, H., Siti, N., Leh, H. y Razali, M. (2021). Effects of Dust on the Performance of PV Panels. 5(10), 2021–2026.