



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“Efecto de la acumulación de material particulado sobre la
generación eléctrica de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Lima,
Perú”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

Bach. María Lucia Mendiola Monsante (0000-0002-3647-7201)

Asesor:

Msc. Franco Canziani Amico (0000-0003-0552-9109)

Lima – Perú

2021

COPIA DE ACTA DE SUSTENTACIÓN



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 25 de febrero de 2021.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Mg. Yadira Torres Peña
Miembro: Ing. Roberto Gabriel Torres Salas
Miembro: Ing. Jose Adolfo Rojas Álvarez

Se reúnen para evaluar la tesis titulada: "Efecto de la acumulación de material particulado sobre la generación eléctrica de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú"

Presentada por la bachiller:

- María Lucía Mendiola Monsante

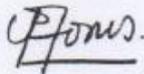
Para optar el Título Profesional de ingeniera ambiental.

Asesorada por: Mg. Franco Canziani Amico

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes de la carrera de ingeniería ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime (X) por mayoría simple () calificar a:

Tesista: María Lucía Mendiola Monsante	Nota (en letras): Diecisiete
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (X)
Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

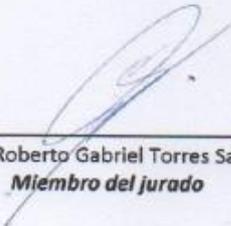
Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Mg. Yadira Torres Peña
Presidente del Jurado



Mg. Franco Canziani Amico
Asesor



Ing. Roberto Gabriel Torres Salas
Miembro del jurado



Ing. Jose Adolfo Rojas Álvarez
Miembro del jurado

T // (51) 610 6738
informes@cientificaedu.pe
cientificaedu.pe

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	3
TESIS EN FOMRATO ARTÍCULO NO PUBLICADO.....	4
ANEXOS.....	23
Evidencia del envío a revista científica.....	23
Copia de documento de aprobación de comité de ética	24
Copia de resolución de aprobación del proyecto de tesis	25
Instrumentos usados en la investigación y demás información de utilidad	27
Ficha técnica de paneles solares empleados.....	27

RESUMEN

La acumulación de polvo también conocido como material particulado (PM) en módulos fotovoltaicos (FV) tiene dos efectos principales; reduce la cantidad de luz que alcanza a las celdas fotovoltaicas e incrementa la temperatura de los módulos resultando en pérdidas de eficiencia. Este fenómeno es conocido como soiling en inglés. La cantidad de partículas acumuladas y su efecto en la potencia de salida de dos módulos FV limpio y sucio fue evaluada entre junio y noviembre de 2019 en Lima, Perú. La tasa de deposición de partículas, la temperatura y potencia de salida fueron registradas. Los resultados muestran que el polvo disminuye la potencia de salida levemente bajo clima nublado, común durante el invierno en la ciudad de Lima. Se determinó que la potencia de salida del módulo sucio se vio significativamente reducida en hasta 49% y su temperatura aumentó en 7°C en días soleados. Los autores concluyeron que la acumulación de partículas impacta negativamente en la energía que producen los módulos FV y que la interacción entre partículas y humedad afecta la adherencia de estas, motivos por el cual estas interacciones deben ser estudiadas a mayor detalle.

ABSTRACT

The accumulation of dust also known as particulate matter (PM) on PV modules has two main effects; it reduces the amount of light that reaches the photovoltaic cells and increases the photovoltaic module's temperature resulting in loss of efficiency; this phenomenon is known as soiling. The amount of particles accumulated and its effect on the output of both clean and dirty PV modules were assessed between June and November 2019 in Lima, Peru. The particle deposition rate was registered, as well as module temperature and output. Results show that dust slightly decreases energy yield under cloudy weather, common during winter in the city of Lima. It was determined that the dusty module's yield reduced significantly on sunny days and its temperature rose, up to a 49% reduction and 7°C increase. The author concluded that dust accumulation negatively impacts PV modules output and the interaction between precipitation and humidity affects dust particles adherence and for this reason it should be subject to further research.

TESIS EN FOMRATO ARTÍCULO NO PUBLICADO

Efecto de la acumulación de material particulado sobre la generación eléctrica de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú

María Lucia Mendiola¹ Franco Canziani¹

¹ Carrera de ingeniería ambiental, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

Abstract. The accumulation of dust also known as particulate matter (PM) on PV modules has two main effects; it reduces the amount of light that reaches the photovoltaic cells and increases the photovoltaic module's temperature resulting in loss of efficiency; this phenomenon is known as soiling. The amount of dust accumulated and its effect on the output of both clean and dirty PV modules were assessed between June and November 2019 in Lima, Peru. The dust deposition rate was registered, as well as module temperature and electrical energy output. Results show that dust slightly decreases energy yield under cloudy weather, common during winter in the city of Lima. It was determined that the dusty module's yield reduced significantly on sunny days and its temperature rose, up to a 49% reduction and 7°C increase. The author concluded that dust accumulation negatively impacts PV modules output and the interaction between precipitation and humidity affects dust particles adherence and for this reason I should be subject to further research.

Key word: solar energy, photovoltaic module, solar, particulate matter, air quality, air pollution.

INTRODUCCIÓN

La tecnología fotovoltaica, que aprovecha la radiación solar al transformarla en energía eléctrica haciendo uso de materiales semiconductores, fue perfeccionada en 1960 con el fin de proveer electricidad en el espacio. Posteriormente el desarrollo tecnológico hizo posible el uso de módulos fotovoltaicos (módulos FV en adelante), también conocidos como paneles solares (Singh, 2013). Desde entonces la eficiencia de esta tecnología ha aumentado y sus precios han disminuido considerablemente desde el 2010. El costo de instalación promedio global pasó de ser de entre 3300 y 7900 dólares/kW en el 2010 a estar entre 800 y 2700 dólares/kW en 2018. Mientras que la inversión en grandes centrales solares fotovoltaicas bajó de 4621 dólares /kW en 2010 a 1210 dólares/kW en 2018 (IRENA, 2019).

Los módulos FV pueden ser instalados en cualquier parte del mundo. No obstante, es los países más cercanos al Ecuador su uso tiene un mayor potencial debido a su alta incidencia de radiación solar, ya sea para sistemas aislados, micro redes o grandes centrales que alimenten a la red eléctrica pública (Makrides et al., 2010). Tal es el caso del Perú, que cuenta con condiciones favorables para el uso de tecnologías solar fotovoltaica y otras formas de energía solar (Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología, 2003). El país viene aprovechando dicho potencial y al 2019 cuenta con siete centrales solares agrupadas en la zona desértica comprendida por las regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna en el sur del Perú. Dichas centrales tienen una potencia instalada de 284,5 MW, que equivale al 2.08% del total instalado en el país y en el 2018 generaron en el 745.400 MWh, equivalente al 1.43% del total de energía eléctrica generada en el País en ese año (Ministerio de Energía y Minas, 2019). Esta tecnología libre de emisiones es idónea para reemplazar a las fuentes fósiles y reducir emisiones de carbono asociadas a la generación de energía eléctrica, meta planteada por Perú (Ministerio del Ambiente - MINAM, 2016) para hacer frente al cambio climático. Por otro lado, la instalación de centrales solares FV es menos costosa cada año, siendo el costo promedio mundial USD 1.21/W en el 2018, 13% menor al año 2017 (IRENA, 2019).

Los módulos FV se ensucian de manera natural con el tiempo, este fenómeno es llamado *soiling* o "acumulación de partículas" y tiende a ser más severo en módulos con ángulo de inclinación nulo o bajo (Elminir et al., 2006) (Figgis et al., 2017). La composición de dichas partículas, el grado de acumulación y la severidad que tiene en los módulos FV dependen de la ubicación geográfica, estación, ocurrencia de

lluvia, y contaminación atmosférica (Asl-Soleimani et al., 2001) (Kimber et al., 2006) (Bowman et al., 2011).

La acumulación de contaminantes como tierra, polvo, nieve y otras formas de material particulado (PM) en la superficie de los módulos impide que la luz solar llegue a las celdas, componentes internos de este y como consecuencia se reduce su productividad. Además, esta acumulación de partículas puede contribuir al aumento de temperatura del módulo causando que se reduzca la energía que este genera debido a que cuando las celdas fotovoltaicas de un módulo son expuestas a temperaturas mayores a aquellas en sus especificaciones técnicas el voltaje del módulo disminuye y por ende su potencia también, puesto que esta resulta del producto del voltaje por la corriente (Dubey et al., 2013). Incluso existe evidencia de que los módulos FV que experimentan acumulación de material particulado y aumento de temperatura más intensos en ciertas secciones del mismo puede sufrir una acelerada degradación de la vida útil (Lorenzo et al., 2014).

Es por estos motivos que el PM es considerado el tercer factor meteorológico más importante después de temperatura del aire e insolación (cantidad de radiación solar que llega a una superficie de la Tierra en un día o un año), que determina la producción de electricidad en un módulo o sistema fotovoltaico (Caron & Littmann, 2013) y según la composición y tamaño de las partículas estas pueden ser fácilmente limpiadas por lluvias o pueden fijarse al vidrio y acelerar la degradación del módulo (Ghazi et al., 2014) (Appels et al., 2013).

A fin de reducir estas pérdidas de eficiencia los módulos son limpiados con regularidad, sin embargo, la limpieza es un asunto complejo en instalaciones a gran escala, especialmente porque las regiones con mayor recurso solar suelen tener un clima árido y escasez de agua (Sarver et al., 2013). Determinar entonces la real necesidad de limpieza es primordial para no elevar los costos de una central FV, y la forma más efectiva de determinar las pérdidas por acumulación de PM y necesidad de limpieza en cada localidad es evaluando módulos expuestos a la intemperie durante un periodo prolongado (Hoffman & Maag, 1980).

Los efectos de acumulación de PM en módulos FV varían de acuerdo a la ubicación geográfica de los módulos evaluados, ángulo de inclinación y a la composición de las partículas que los cubren. Las pérdidas de potencia, eficiencia y corriente han sido registradas para diferentes climas, entorno periodos de tiempo y tecnologías fotovoltaicas (Sayyah et al., 2014) (Ghazi et al., 2014) (Appels et al., 2013), (Bowman et al., 2011). Y los resultados arrojan que el impacto sería menor en localidades con climas lluviosos y mayor en países del medio oriente con clima árido (Qasem et al., 2014) (Guo et al., 2015) (Asl-Soleimani et al., 2001).

Viendo hacia los países de América del Sur, En Santiago de Chile, un estudio de dos años encontró pérdidas de eficiencia por acumulación de PM de hasta 17% en un mes en tres tipos de módulos, asimismo halló que el tiempo óptimo de limpieza para un sistema FV es de 45 días (Urrejola et al., 2016). Mientras que, en Minas Gerais, Brasil otro estudio realizado en un sistema FV ubicado en el techo de un estadio halló que la potencia de los módulos en hora punta del día disminuyó en 13.7% durante la estación seca y 6.5% durante la húmeda. De igual manera la producción de energía diaria disminuyó en un 16.5% y 8% en dichas estaciones debido al efecto del PM sobre los módulos, además se encontró que la composición de las partículas acumuladas varía según la ubicación de los módulos (Fraga et al., 2018). Por otro lado en Mar de Plata, Argentina se evidenció un aumento en la energía generada en un mes de un 4% debido a la limpieza semanal de PM depositado en la superficie de los módulos, considerada por los autores del estudio como no significativa (S. B. Jacob et al., 2016).

Los estudios publicados en materia solar fotovoltaica en Perú se centran en electrificación rural, en aplicaciones como bombeo de agua y factibilidad de su uso en diferentes ciudades de país (Bazán et al., 2018) y recientemente en la comparación entre tres tipos de módulos bajo climas distintos (Romero-Fiances et al., 2019), sin embargo el efecto de la acumulación de PM sobre los módulos no ha sido abordado.

El objetivo de la presente investigación es determinar el efecto de la acumulación de PM sobre el rendimiento de módulos fotovoltaicos mediante el registro y comparación de la masa de PM acumulado sobre la superficie y las diferencias en temperatura y potencia entre un módulo limpio y otro sucio. Para este fin se analizó el desempeño de dos módulos instalados en cercado de Lima, una zona industrial de la

ciudad de Lima, Perú durante los meses de junio a noviembre del 2019 durante un periodo de 161 días. Finalmente se propone una frecuencia de limpieza para prevenir pérdidas de potencia significativas debido a la acumulación de PM.

La ciudad de Lima tiene una alta concentración de PM₁₀ y PM_{2.5}, siendo el promedio anual de 82 µg m⁻³. (Silva et al., 2017) Este nivel supera a los estándares de calidad ambiental peruanos DS N° 003-2017-MINAM. Los valores más altos de PM₁₀ y PM_{2.5} son recogidos de la parte este de la ciudad, debido a que la dirección dominante del viento es sur y sureste y el 58% de dichos contaminantes provienen de fuentes móviles, es decir de vehículos. (Comisión Multisectorial para la gestión de la iniciativa del aire limpio para Lima y Callao, 2019)

Descripción del sitio

El experimento se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la empresa Waira Energía SAC. en el distrito de cercado de Lima. Dicha empresa está ubicada en la latitud 12° 2'51.05"S y Longitud 77° 3'49.21"O a 105 msnm en una zona industrial con alto tránsito de vehículos de carga y de transporte público, entre las avenidas Argentina y Benavides, ambas con alto tránsito (ver figura 1). Las vías colindantes son asfaltadas, pero se encuentran en mal estado y con presencia de tierra y residuos sólidos, la dirección del viento predominante durante el periodo de toma de datos fue de 218° es SSE, y la velocidad promedio fue de 2.1 m/s. según información obtenida brindada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, 2019).

Gráfica 21: Rosa de Viento en la estación "CDM" (Invierno)

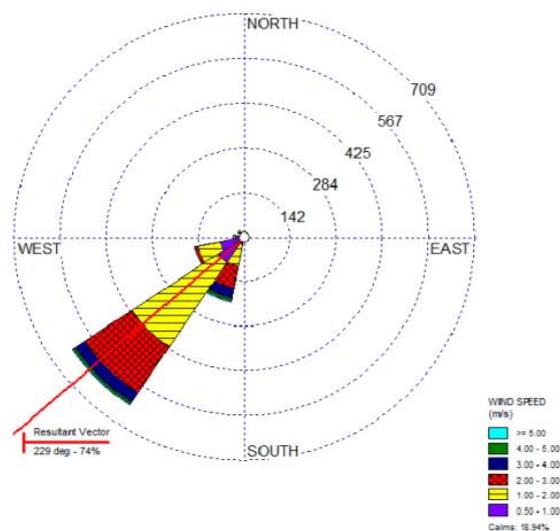


Figura N° 1 Rosa de vientos de la estación Campo de Marte, más cercana a la zona de estudio.

Fuente: Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao. MINAM 2018

(Comisión Multisectorial para la gestión de la iniciativa del aire limpio para Lima y Callao, 2019)

METODOLOGÍA

Para determinar el efecto de la acumulación de PM sobre la generación de electricidad de los módulos se midió la potencia de salida de los módulos control y sucio. Se utilizó un multímetro marca FLUKE modelo 325 para medir la temperatura de la parte posterior de cada módulo (T), el voltaje de circuito abierto (Voc), corriente en corto circuito (Isc), y voltaje en el punto de máxima potencia (Vmpp) y corriente en el punto de máxima potencia (Impp) cuando el módulo se conectó a una resistencia de 2.2 ohmios. Cabe señalar que las mediciones de corriente y voltaje se realizaron de acuerdo al estándar IEC 60904 - Dispositivos fotovoltaicos, Parte 1: Medición de características fotovoltaicas corriente-voltaje (International Electrotechnical Commission (IEC), 2006).

Se procuró realizar la medición de cada módulo consecutivamente, en un lapso no mayor a dos minutos, para evitar que la variación en la radiación solar altere los resultados. Se realizaron múltiples mediciones consecutivas para disminuir el rango de error.

Se registraron los datos de corriente, voltaje y temperatura, mientras que el dato de Potencia fue obtenido al multiplicar la corriente por el voltaje según la siguiente fórmula. $Potencia (Watts) = I \times V$.

Para recolectar el PM que se deposita sobre los módulos FV se instalaron 32 placas de vidrio de 8x10cm sobre un soporte de madera a la misma altura y ángulo de inclinación que los dos módulos. Se recogieron 3 placas por semana de evaluación que estas fueron conservadas en bolsas herméticas previamente pesadas y rotuladas. Se registró el peso inicial y final de cada placa usando una balanza analítica calibrada marca Satorius TE214S con precisión de 0.001 gramos, con el fin de determinar la masa de PM acumulada por área. Tras realizar la sustracción y convertir las unidades se obtuvo el PM en gramos acumulado en un metro cuadrado.

Los resultados de potencia y temperatura fueron sometidos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza para determinar las pruebas estadísticas a aplicar, estas se realizaron haciendo uso del software SPSS Statistics de IBM, de la siguiente manera:

Tabla N° 2 Pruebas estadísticas aplicadas

Periodo de análisis (número de datos)	Potencia	Temperatura	Resultado
Nub 1 (18)	U de Mann – Whitney para muestras independientes	T de student para muestras independientes	<ul style="list-style-type: none"> • Medianas y distribución de Potencia es la misma entre panel sucio y limpio. • Media y distribución de Temperatura es la misma entre panel sucio y limpio.
Sol (8)	T de student para muestras independientes	U de Mann – Whitney para muestras independientes	<ul style="list-style-type: none"> • Media y varianza de <u>Potencia es distinta</u> entre panel sucio y limpio. • Medianas y distribución de <u>Temperatura es distinta</u> entre panel sucio y limpio.
Nub 2 (12)	U de Mann – Whitney para muestras independientes		<ul style="list-style-type: none"> • Medianas y distribución de <u>Potencia es distinta</u> entre panel sucio y limpio • Medianas y distribución de Temperatura es la misma entre panel sucio y limpio.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Potencia (Watts)

La potencia generada por ambos módulos se calculó al multiplicar la corriente (Impp) por el voltaje (Vmpp) cuando cada módulo estuvo conectado a una resistencia o carga en la hora pico de sol (12:00). Los resultados relacionados a potencia son discutidos en esta sección.

En el Tabla N°2 y figura N°2 se observa que la diferencia entre la potencia del panel limpio y sucio incrementa con el paso del tiempo, de modo que después de un mes aproximadamente el módulo sucio generó 35,07% menos de potencia que el limpio, mientras que en el día 161 el valor es de 64,7% menos de potencia. Estos resultados son similares a los hallados en una investigación llevada a cabo en Antofagasta, Chile en la que se encontró que módulos FV poli-cristalinos que acumularon PM consistentemente disminuyeron su potencia en 28% tras un mes y tras seis meses en 50%. Además, inmediatamente después de eventos de limpieza el rendimiento se recupera (Fuentealba et al., 2015). Estos resultados son similares a los obtenidos e indicarían que la acumulación de PM en el tiempo reduce la potencia que genera un módulo y que esta reducción es fácilmente reversible.

A pesar de que los resultados usados para comparación fueron sobre producción de energía acumulada mensual y los resultados obtenidos en la presente investigación fueron puntuales (alrededor del mediodía, durante la hora pico de radiación), ambos resultados indican que existe una pérdida en la producción de energía debido a la acumulación de PM en módulos FV y que además que este efecto intensifica con el tiempo.

Otro estudio realizado en Pakistán halló que la acumulación de PM impacta negativamente en la producción de energía. En dicho experimento los módulos sucios produjeron 15.2% menos energía que los limpios tras 77 días sin limpieza (Ali et al., 2017). Mientras que la presente investigación con igual metodología halló que la pérdida de energía para un periodo de tiempo similar en Lima urbana es de 47 a 49%, es decir, el efecto del PM en Lima sería hasta 3 veces más severo que una localidad con índices de calidad de aire más bajos. Pues Perú presenta una exposición media anual a PM_{2.5} de 24,78 ug/m³ y Pakistán de 58,28. (Brauer, M. et al., 2017)

Se analizaron los datos de potencia recogidos en días nublados y soleados por separado, adicionalmente se dividieron los días nublado en dos grupos, el primer grupo va desde el día 8 al 57 y el segundo del día 106 al 161, debido a que corresponden a distintas estaciones del año (invierno y primavera).

Los datos de potencia en los días nublados presentan una distribución no normal, por lo que fue evaluada mediante la prueba estadística de Mann-Whitney en el software SPSS Statistics de IBM. Esta prueba arrojó que no existe una diferencia significativa de potencia entre el módulo sucio y el limpio entre el día 8 y 57 con un nivel de significancia $p=0.113$ y un 5% de error. Mientras que la misma prueba aplicada a los días 106 y 161 arrojó que existen diferencias significativas entre la potencia de ambos módulos ($p=0.002$) con un 5% de error. Es decir, que la acumulación de PM disminuye la potencia del módulo FV a partir de 100 días sin limpieza.

Por otro lado, se comprobó que existen diferencias significativas para la potencia de ambos módulos durante los días soleados con nivel de significancia $p=0.320 \times 10^{-8}$ y un 5% de error. Tras realizar la prueba estadística de t de student para muestras independientes, usando el mismo software.

Se puede afirmar con suficiente certeza que la acumulación de PM en la superficie de un módulo FV reduce significativamente la producción de energía ($W \cdot s$) en los siguientes casos: a) durante periodos soleados (de alta radiación) y sin limpieza por hasta 80 días y b) En periodos nublados, de baja radiación y sin limpieza por 100 días a más. Mientras que en periodos nublados la potencia de un módulo limpio será estadísticamente igual a la de un módulo que no ha sido limpiado en hasta 60 días.

Tabla N° 3 Potencia y rendimiento en los tres periodos analizados

Periodo	Día	POTENCIA en watts			Diferencia de potencia* %
		LIMPIO	SUCIO	Diferencia	
Nub_1 Distribución no normal (Limpio p=0.014; Sucio p=0.002)	8	6,888	5,52	1,368	19,86
	19	20,235	12,96	7,275	35,95
	27	9,648	6,264	3,384	35,07
	39	4,68	3,315	1,365	29,17
	49	5,687	4,532	1,155	20,31
Sol	83	216,216	111,104	105,112	48,61
	90	208,565	124,662	83,903	40,23
Nub_2 Distribución no normal (Limpio p=0.002; Sucio p=0.008)	106	24,486	12,948	11,538	47,12
	161	26,46	9,344	17,116	64,69

* La reducción de potencia fue calculada usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ reducción de Potencia} = \frac{P_{Limp} - P_{Suc}}{P_{Limp}} \times 100$$

Y se interpreta de la siguiente manera: el panel sucio generó 19.86% menos de potencia que el limpio .

Los días soleados proporcionaron radiación solar suficiente para que la potencia de salida sea cercana a la máxima obtenible, cosa que ocurrió con el módulo limpio. Sin embargo, el sucio llegó únicamente a la mitad de su capacidad debido al PM acumulado.

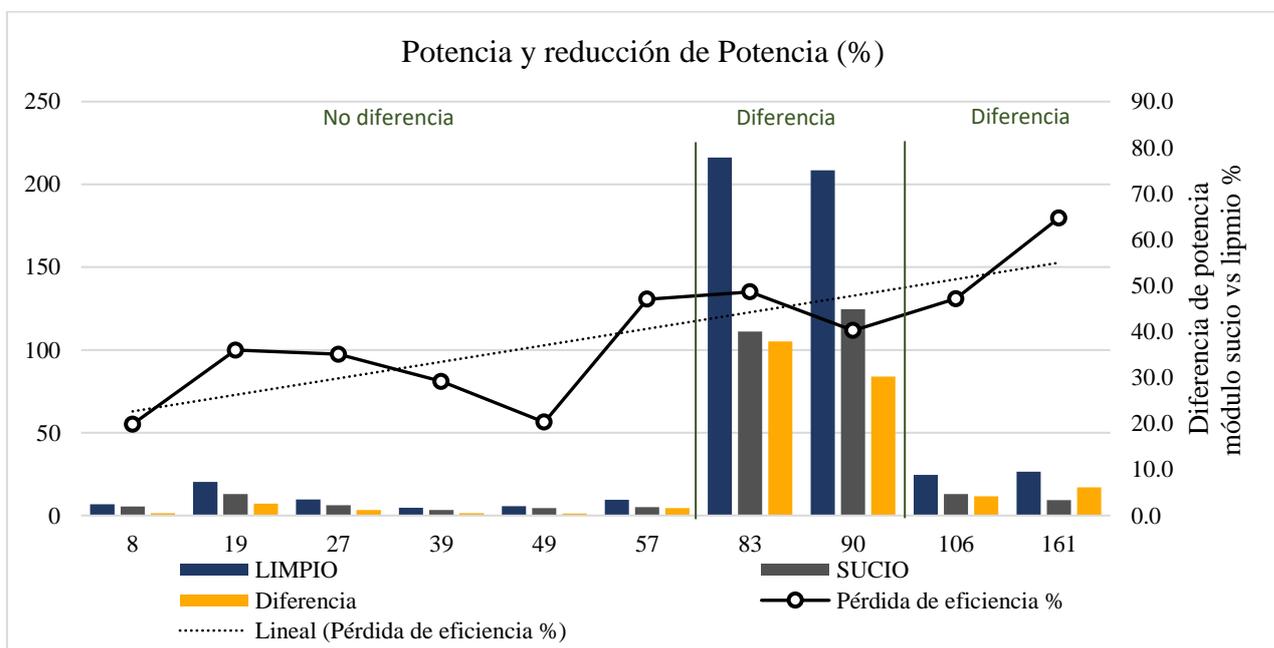


Figura N° 3 Potencia y reducción (%) del módulo sucio vs limpio.

Los días 83 y 90 fueron atípicamente soleados y libres de nubes, por consiguiente, la potencia generada por ambos módulos está por encima de los 100 Watts. Se observa que el módulo sucio produjo entre 50 y 60% menos que el limpio en estos días soleados. Esto se explica porque en los días con mayor radiación la corriente de los módulos es más alta, y es este parámetro (corriente) que se ve más impactado negativamente por la acumulación de PM que limita la luz solar (Solar Energy International, 2013) Por otro lado, también es posible que la eficiencia del módulo sucio se vea

comprometida debido a una alta temperatura de operación, este tema será discutido en la sección siguiente.

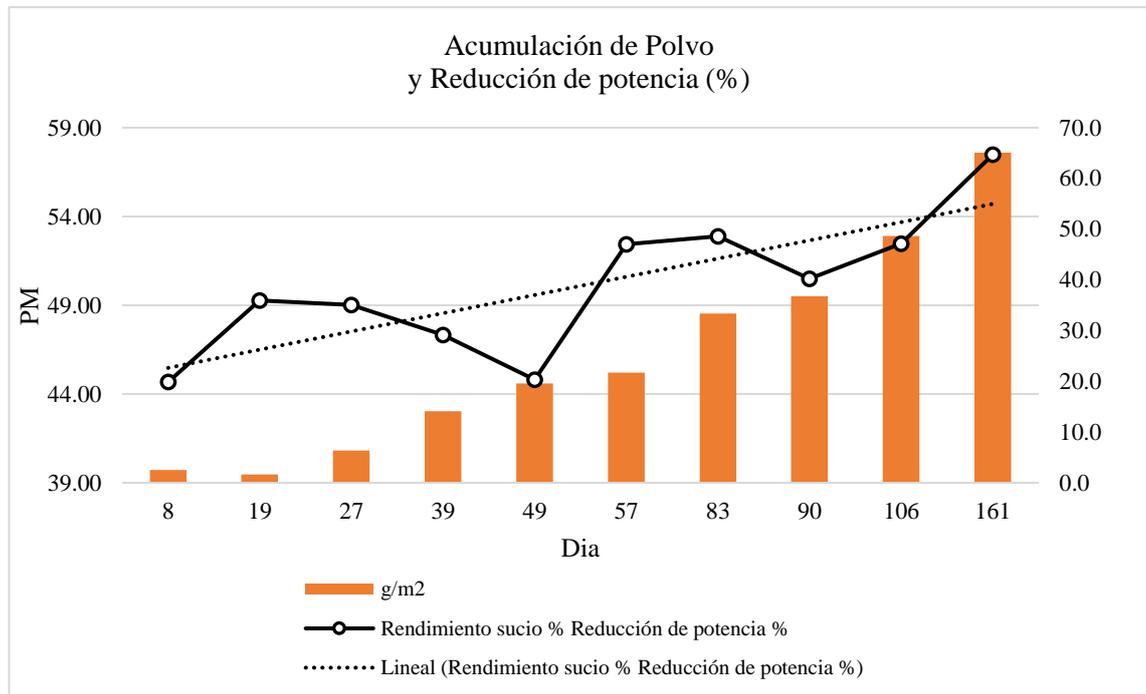


Figura N° 4 Acumulación de PM y Reducción de Potencia módulo sucio vs limpio (%).

Acumulación de Material Particulado

Tras restar el peso inicial del peso final de las placas, se obtuvieron los resultados de PM acumulado en gramos sobre la superficie de las placas de vidrio de 80 cm². Tras una conversión de unidades se halló la masa de PM acumulada por metro cuadrado y sobre un módulo de 1,93m2 que se observan en el Tabla N°3. Después de 161 días en los que el módulo que no fue limpiado acumuló una capa de PM de 57,6 g/m2 que dificulta el paso de la luz solar (figuras N° 3, 4 y 5).

Tabla N° 4 PM depositado, calidad de aire y precipitación

Fecha	Día	PM en superficie		Variación porcentual		Calidad del aire inter muestral		Precipitación inter muestral		
		g/módulo (1.93 m²)	g/m²	g/placa (0.008 m²)	Vs día 8	Semanal	PM 10 (ppm)	PM 2.5 (ppm)	Máxima diaria (mm)	Acumulada (mm)
		10/06/2019	0	0	0	0	-	-	-	-
17/06/2019	8	76,66	39,71	0,3177	-	-	25,53	21,7	0,2	0,5
27/06/2019	19	76,20	39,47	0,3158	-0,6	-0,6	26,79	22,3	0,4	1,5
04/07/2019	27	78,79	40,81	0,3265	2,8	3,4	20,01	16,85	0,2	0,8
15/07/2019	39	83,06	43,03	0,3442	8,3	5,4	27,65	23,62	0,5	1,5
25/07/2019	49	86,09	44,60	0,3568	12,3	3,7	23,67	20,5	0,6	1,2
31/07/2019	57	87,28	45,21	0,3617	13,8	1,4	23,17	20,59	0,1	0,3
23/08/2019	83	93,70	48,54	0,3883	22,2	7,4	26,96	24,25	0,3	2,4

30/08/2019	90	95,59	49,52	0,3961	24,6	2,0	25,96	23,54	0,6	0,8
17/09/2019	106	102,12	52,90	0,4232	33,2	6,9	25,99	20,28	0,3	1,5
18/11/2019	161	111,18	57,59	0,4607	45,0	8,9	35,98	26,51	1,5	3,7

Fuente: Elaboración propia con data de SENAMHI 2019, para la estación campo de Marte

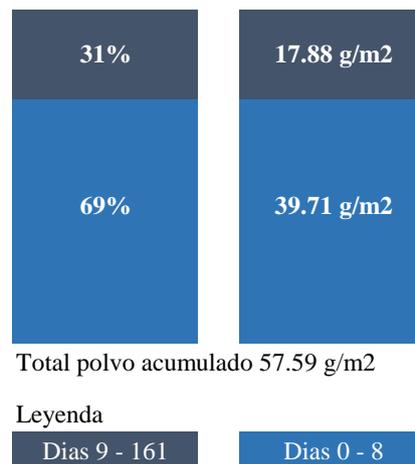


Figura N° 5 Distribución temporal de PM acumulado.

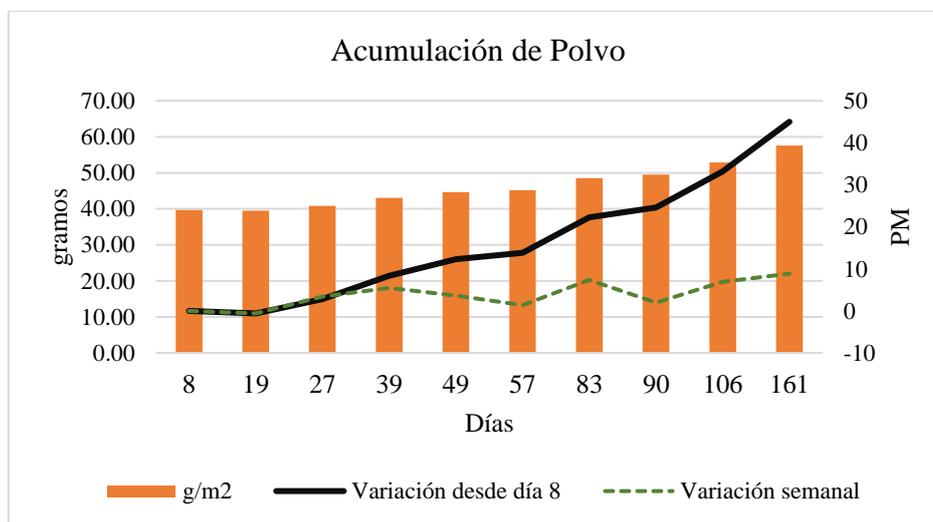


Figura N° 6 Acumulación de PM por metro cuadrado

Se observa que el PM acumulado disminuyó un 0,6% entre el día 8 y 19, que se puede atribuir a mayor velocidad máxima del viento durante ese periodo versus el periodo anterior. Mientras que en los días siguientes aumentó sostenidamente en un promedio de 5,6 %.

Tras un mes el total de PM acumulado sobre el panel sucio fue de 43,03 g/m2, este resultado es mayor a los obtenidos en El Cairo de 24g/m2 para un periodo y ángulo de inclinación similar en el 2009 (Qasem et al., 2014) y es también mayor a los 8,03 obtenidos en Kuwait para módulos con un ángulo de inclinación 15° en un mes. (Elminir et al., 2006). Es decir que en una zona industrial de Lima el PM depositado en un

mes sería mayor que en ciudades ubicadas en la zona de la mayor acumulación de PM en el mundo, Medio Oriente (Ghazi et al., 2014).

Esta diferencia se puede explicar por la confluencia de dos factores, el clima y la alta concentración de contaminantes en el aire de Lima, particularmente en el centro de dicha ciudad con concentraciones de PM₁₀ superior a 100 µg/m³ y PM_{2,5} entre 20 a 40 µg/m³, que superan los valores de la OMS y Estándares Nacionales (Pasci Valdivia, 2016). La calidad del aire de la ciudad ha sido objeto de numerosos estudios, los que coinciden en que los niveles de contaminantes en el aire son predominantemente de origen vehicular y además las condiciones meteorológicas no favorecen a su dispersión. (Sánchez-Ccoyllo, O. R. & Ordóñez-Aquino, C. G., 2016; Tapia et al., 2018; Verán-Leigh et al., 2019)

Durante los meses de invierno la baja temperatura y humedad relativa mayor a 85% favorece la formación de partículas finas (PM_{2,5}) además de la precipitación de las partículas de mayor tamaño PM₁₀, que son arrastradas por las gotas de lluvia o son adsorbidas por el rocío en un fenómeno denominado deposición húmeda (Silva et al., 2017), contribuyendo a su deposición sobre las superficies como módulos fotovoltaicos y otras estructuras, como vehículos, edificios, etc. Este es el mecanismo más probable de acumulación de PM sobre los módulos dado que durante los meses evaluados la humedad relativa promedio fue de 88.5% con precipitaciones entre 0,1 y 0,3 mm (SENAMHI, 2019).

Llama la atención que en los primeros 8 días se acumula la mayor cantidad de PM (69%) mientras que en los siguientes 152 días se adhiere menor cantidad (31%). Puesto de otra manera, tras 22 semanas sólo aumento en 17.88 g/m², menos de la mitad del acumulado en 8 días. Se puede deducir que si los módulos fuesen limpiados semanalmente estos se ensuciarían con casi 40g/m² de PM cada periodo. Por el contrario, si el periodo entre limpieza es mayor, como por ejemplo 60 o 90 días estos se ensuciarían con hasta un máximo de 50g/m².

Esta lenta acumulación de partículas tras la primera semana y los mecanismos por los cuales se adhieren a la superficie son temas que requieren mayor estudio en el Perú y en la región. Puesto que para discutir los resultados se ha usado literatura sobre mecanismos de deposición de PM proveniente de Asia y Estados Unidos principalmente y no son totalmente aplicables para la zona de estudio debido a la distinta ubicación geográfica, clima y características de las partículas de PM. (Mani & Pillai, 2010)

El primero es adhesión capilar, asociada a alta humedad relativa en el ambiente. Esta ocurre cuando el agua se condensa alrededor de las partículas higroscópicas depositadas aumentando su adhesión e incluso capturando nuevas partículas. Mientras que el segundo, la cementación, ocurre tras múltiples ciclos de condensación y secado dejando una costra de sales u otros minerales entre las partículas y la superficie del módulo. Esta costra se adhiere firmemente y además de dificultar la limpieza también daña la superficie (Figgis et al., 2017). Entonces, además de atenuar la radiación solar recibida el PM acumulado junto con la humedad de ambiente deterioraría los módulos fotovoltaicos, contribuyendo a su rápida degradación. Para evitar esta degradación se debe realizar limpieza frecuente. Mientras que para evitar pérdidas de potencia por acumulación de partículas se propone un periodo de limpieza de 60 días para sistemas instalados en la Ciudad de Lima durante el invierno con clima nubado.

La máxima precipitación registrada durante el periodo de estudio fue de 0.3mm/h día (Tabla N°3) y este es el promedio máximo para la ciudad de Lima (CLIMATE-DATA.ORG, 2020). Este volumen sería suficiente para ocasionar cementación y adhesión de nuevas partículas e insuficiente para limpiar la superficie de los módulos tras compararlo con la literatura: Un estudio realizado en Bélgica encontró que el agua de lluvia deposita más partículas atmosféricas sobre la superficie inicialmente y sólo si esta es intensa o prolongada tiene un efecto de limpieza (Appels et al., 2013), sin embargo, no se especifica un volumen mínimo de precipitación. Por otro lado, un estudio en Brasil estimó que 7mm/h de lluvia son suficientes para limpiar parcialmente los módulos y reducir las pérdidas por acumulación de PM (Fraga et al., 2018), mientras que en un estudio en Malasia concluyó que 20mm es la cantidad de lluvia necesaria para una limpieza completa en dicha región (Kimber et al., 2006; Maghami et al., 2016).

Múltiples autores coinciden en que el efecto de la acumulación de PM suele ser más severo en localidades con escasa precipitación, como lo es la ciudad de Lima-(Fraga et al., 2018; Kimber et al., 2006; Maghami et al., 2016; Sarver et al., 2013)-

Temperatura

El módulo sucio presentó una mayor temperatura que el limpio durante todo el experimento, en los días nublados la diferencia de temperatura no fue mayor a 2°C, mientras en días soleados el módulo sucio alcanzó una temperatura 7°C mayor a la del limpio. El comportamiento de la temperatura de la parte posterior de ambos módulos se encuentra detallada en el cuadro 4 y figura 6.

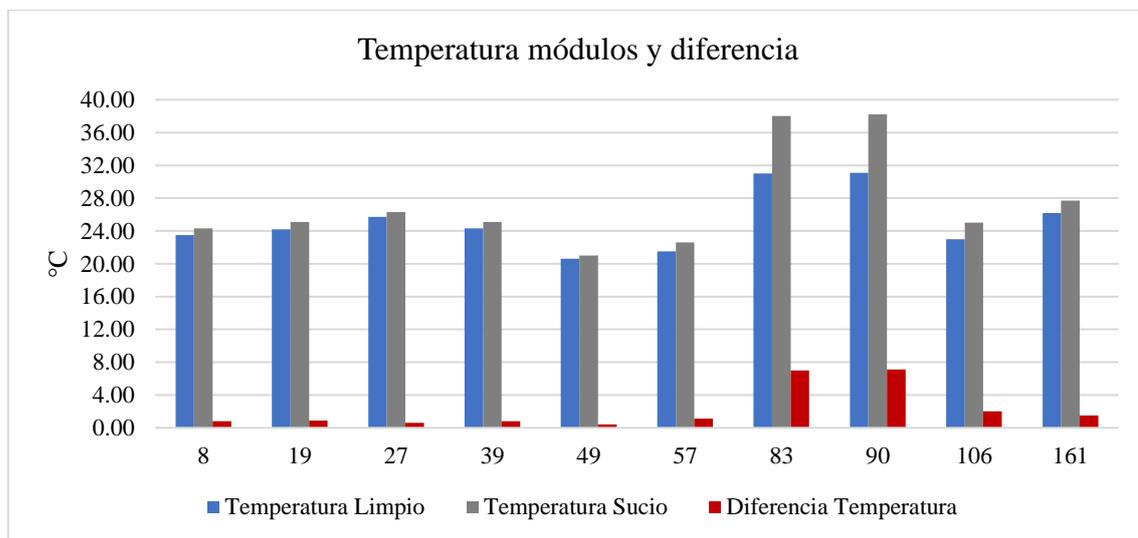


Figura N° 7 Temperatura del módulo sucio y limpio.

De igual manera que con la potencia de salida, los datos de temperatura fueron analizados en tres periodos. Se determinó que la mediana y distribución de temperatura es distinta entre el módulo sucio y limpio durante los días soleados, por el contrario, no se evidencian diferencias significativas de temperatura entre ambos módulos durante los días nublados.

En los días soleados las medianas de temperatura de ambos módulos son significativamente distintas (p=0.029). Mientras que en los periodos nublados 1 y 2 no se evidencia diferencia entre medias con p=0.685 y p=0.180 respectivamente.

Tabla N° 5 Temperatura módulo sucio y limpio en los tres periodos analizados.

Periodo	Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA			Temperatura ambiental
				LIMPIO	SUCIO	Diferencia	
Nub_1	8	17/06/2019	11:25:00	23,5	24,3	0,8	19,7
	19	27/06/2019	12:45:00	24,2	25,1	0,9	19,73
	27	4/07/2019	11:45:00	25,7	26,3	0,6	20,1
	39	15/07/2019	12:20:00	24,3	25,1	0,8	20,3
	49	25/07/2019	12:02:00	20,7	21	0,3	17,4
	57	31/07/2019	12:22:00	21,5	22,6	1,1	18,4
Sol	83	23/08/2019	11:54:00	31	38	7	20,5
	90	30/08/2019	12:10:00	30,2	37,3	7,1	19,6
Nub_2	106	17/09/2019	14:00:00	23	25	2	19,4
	161	18/11/2019	13:10:00	26,2	27,7	1,5	23

La mayor diferencia de temperatura y potencia ocurrieron durante los días soleados en los que el módulo sucio presentó una temperatura superior al limpio en hasta 7.1 °C grados. Esta diferencia se puede atribuir a que la radiación solar es absorbida por la capa de PM en la superficie del módulo sucio, pues

existe evidencia de que el PM en distintas superficies absorbe un mayor rango de longitud de onda, aumentando la temperatura de dichas superficies. (Eller, 1977)

Otros estudios realizados en Chile hallaron de igual manera que la eficiencia en la generación de electricidad depende de la temperatura ambiente (Urrejola et al., 2016) así como que el desempeño del módulo se ve afectado por las altas temperaturas en verano (Fuentelba et al., 2015). En Perú otra investigación que compara sistemas FV en 3 ciudades determinó que la limpieza del PM no compensa las pérdidas por temperatura en módulos FV ubicados en zonas desérticas (Romero-Fiances et al., 2019) Sin embargo en el ámbito urbano y con las condiciones climáticas y ambientales de Lima el efecto sobre los módulos debe ser estudiado a profundidad.

En la producción de energía eléctrica fotovoltaica, el voltaje es directamente afectado por la temperatura que presentan los módulos por lo que cada fabricante incluye un valor llamado “coeficiente de temperatura” que indica el porcentaje en el que se ve afectada la potencia de salida por fluctuaciones en la temperatura (Solar Energy International, 2013). El coeficiente variación de potencia máxima por temperatura ($C_{TP_{max}}$) de los módulos utilizados es de $-0,44\%/^{\circ}C$ lo que quiere decir que por cada grado sobre los $25^{\circ}C$ que el módulo presente, la potencia máxima disminuirá en un $0,44\%$. Caso contrario si el módulo presentara temperaturas por debajo de los $25^{\circ}C$ su potencia aumentará en $0,44\%$ por cada grado. El módulo limpio alcanzó un valor máximo de $31^{\circ}C$, mientras que el sucio experimentó $38^{\circ}C$, entonces según el ($C_{TP_{max}}$) la potencia de salida de ambos disminuyó en $2,64\%$ y $5,72\%$ respectivamente sólo debido a la temperatura.

Un estudio realizado en el 2019 entre cuatro sistemas FV instalados en Perú (dos de ellos ubicados en Lima) concluyó que las altas temperaturas en verano y baja radiación en Lima ocasionan pérdidas significativas en módulos poli cristalinos, mientras que otros módulos de sílice amorfo y micro cristalino tienen una mayor tolerancia a estos factores ambientales y los autores recomiendan su uso en esta localidad. (Romero-Fiances et al., 2019). Sin embargo, dicho estudio no toma en cuenta el factor de la limpieza, pues compara un sistema que acumuló PM ininterrumpidamente contra uno con que fue limpiado semanalmente, lo que recalca la necesidad de investigar los efectos de la acumulación de PM para conocer su real impacto y si la limpieza puede optimizar la generación de electricidad aun cuando el clima no es el ideal.

Efecto de la acumulación de PM superficial

Para integrar los resultados anteriormente expuestos, La acumulación de PM ocurrió principalmente durante los primeros 8 días de exposición y en los días posteriores continúa a un menor ratio.

La acumulación de PM superficial en un módulo FV tiene dos efectos: El primero es el aumento de la temperatura de operación de los módulos, reduciendo así el voltaje y la potencia de salida en días sin nubes y alta radiación. Este efecto fue corroborado mediante pruebas estadísticas para los datos obtenidos en los días soleados y coincide con resultados de otras investigaciones en Chile donde se encontró que las altas temperaturas en meses de verano impactan negativamente el desempeño de los módulos (Fuentelba et al., 2015), así como en Iraq, en donde se halló que la mayor reducción en el voltaje ocurre cuando la temperatura del módulo aumenta (Kazem et al., 2013).

El segundo efecto es que las partículas por sus propiedades ópticas bloquean y desvían parcialmente la radiación que debería llegar a las celdas del módulo fotovoltaico, impactando negativamente la corriente que este genera. Esta obstrucción de la radiación incrementa con la deposición de nuevas partículas hasta llegar a tener un efecto significativo en la potencia de salida de un módulo pasada la barrera de los 60 días sin limpieza ya sea en días con alta o baja radiación (Qasem et al., 2014). En un estudio realizado en Kuwait determinó que la corriente en las celdas FV disminuye un $28,5\%$ con una concentración de PM superficial de $4,25\text{mg}/\text{cm}^2$ (Qasem et al., 2014). Si bien determinar la corriente de las celdas FV está fuera del alcance de este experimento, para fines comparativos en el día 57 (día a partir del cual se observan diferencias estadísticamente significativas) la concentración de PM es de

4,46mg/cm² y llegó a alcanzar 5,76mg/cm² para el final del experimento. La corriente que genera el módulo FV se ve disminuida debido a la concentración de PM acumulada en su superficie.

3. Conclusiones

Se evaluó la deposición de PM, temperatura y potencia de salida de dos módulos idénticos con 10° de inclinación, uno sucio y otro limpio, entre los meses de junio a noviembre por 161 días en la ciudad de Lima bajo clima predominantemente nublado. Encontrándose que la deposición de PM proveniente de la contaminación atmosférica sobre la superficie de los módulos fue de 39.71g/m² durante los primeros 8 días, 43.03 g/m² en un mes y 57.59g/m² tras 160 días. Como consecuencia de esta capa de PM se observó un aumento de temperatura en el módulo sucio con respecto al limpio durante todo el experimento, siendo la diferencia de temperatura y potencia de salida estadísticamente significativa en días soleados y también en los nublados sólo a partir del día 100. Por el contrario, durante los primeros 57 días nublados no se evidenciaron diferencias significativas en potencia ni temperatura entre ambos módulos.

La capa de PM ocasionó al aumento de la temperatura del módulo y bloqueó el paso de la radiación hacia sus celdas, impactando en la corriente que estas generan y finalmente en la potencia de salida de este. Este efecto fue notorio durante los días soleados, en los que el módulo sucio tuvo una potencia de salida del 50% respecto al limpio y experimentó una temperatura superior a este en hasta 7.1°C.

Debido a que recién a partir de los 57 días sin limpieza se observaron diferencias en potencia y temperatura se sugiere realizar la limpieza de los módulos en un periodo no mayor a este entre los meses de junio a noviembre. Por otro lado, la limpieza frecuente es recomendada para evitar el deterioro del módulo aún si no se observan pérdidas significativas de potencia.

Finalmente se concluye que la falta de limpieza impacta negativamente sobre la potencia de salida de los módulos y que la escasa precipitación en Lima no es suficiente para limpiar los módulos instalados con un ángulo de 10° o inferior. Por otra parte, la interacción entre precipitación, humedad y adherencia de partículas de PM no ha sido estudiada a profundidad en dicha ciudad y se recomienda realizar investigación sobre estas interacciones y sus efectos sobre la superficie de módulos fotovoltaicos.

Limitantes y recomendaciones

El efecto de la acumulación de PM sobre módulos FV requiere de mayor investigación para determinar un periodo de limpieza óptimo para cada estación del año. Este estudio no incluyó los meses de diciembre a mayo que se caracterizan por cielo despejado en la ciudad de Lima.

Además, se recomienda continuar evaluando el desempeño de sistemas fotovoltaicos de manera detallada y extensiva para poder conocer el efecto de la acumulación de PM sobre los módulos FV de otras marcas y tecnologías disponibles, así como en otras ciudades y localidades de país.

No se pudo conocer datos de radiación incidente durante la toma de datos debido a que ni en las instalaciones de Waira SAC ni en la estación meteorológica se contaba con un pirómetro (Campo de Marte-SENAMHI). Sin embargo, esto no es determinante dado que se utilizó como referencia el módulo limpio y no el nivel de radiación. Además, debido a la metodología aplicada todas las mediciones fueron realizadas sucesivamente bajo las mismas condiciones de radiación.

No estuvo dentro de los objetivos de este estudio el cálculo de la producción de energía diaria de cada módulo, sino que se evaluó la potencia de salida en un momento puntual del día, a las 12:00 horas. Pues la diferencia de generación es teóricamente más marcada en aquella hora (*Solar Electric Handbook Photovoltaic Fundamentals and Applications*, 2013). (ver figura N° 7).

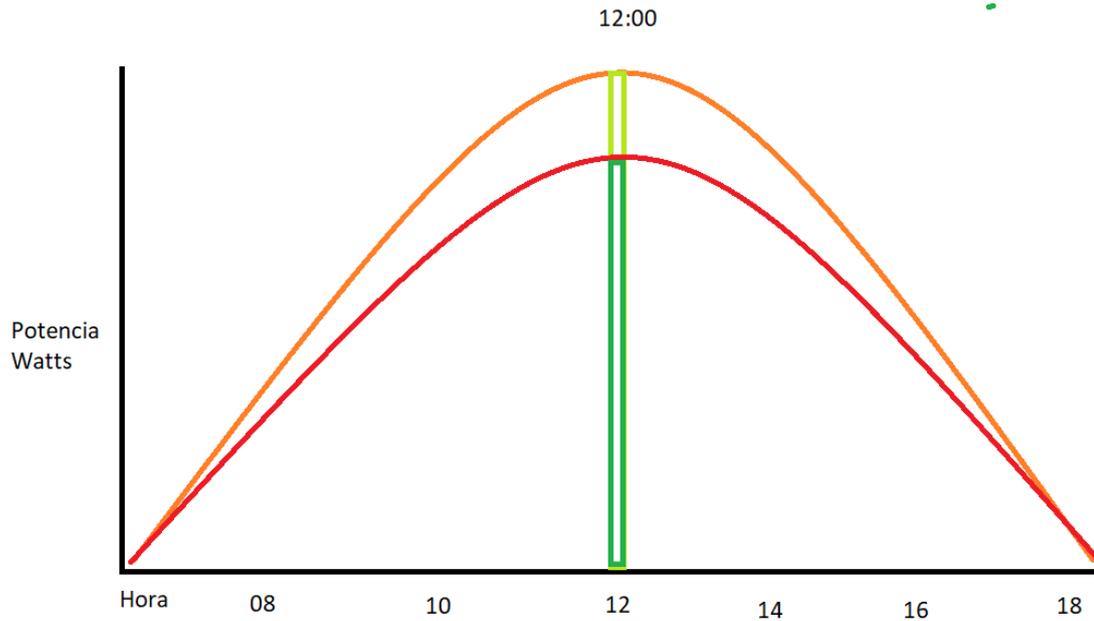


Figura N° 8 Diferencia entre calcular la energía diaria vs en un instante. (elaboración propia)

La diferencia entre las áreas de bajo la curva colora naranja y color rojo oscuro es la diferencia de potencia que ocurre en un día, Mientras que la diferencia entre las áreas en verde corresponde a la potencia de salida puntual, registrada en el Tabla N° 2.

Agradecimientos

La autora agradece a la empresa Waira SAC por poner a disposición sus instalaciones y asesoría constante y al Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI) por proporcionar los datos meteorológicos de precipitación y Material Particulado PM2.5 y PM10.

4. Referencias Bibliográficas

- Ali, H., Zafar, M., Bashir, M., Nasir, M., Ali, M., & Siddiqui, A. (2017). Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan. *Thermal Science*, 21(2), 915-923. <https://doi.org/10.2298/TSCI140515046A>
- Appels, R., Lefevre, B., Herteleer, B., Goverde, H., Beerten, A., Paesen, R., De Medts, K., Driesen, J., & Poortmans, J. (2013). Effect of soiling on photovoltaic modules. *Solar Energy*, 96, 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.017>
- Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., & Zabihi, M. S. (2001). The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran. *Renewable Energy*, 24(3), 459-468. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00029-5)
- Bazán, J., Rieradevall, J., Gabarrell, X., & Vázquez-Rowe, I. (2018). Low-carbon electricity production through the implementation of photovoltaic panels in rooftops in urban environments: A case study for three cities in Peru. *Science of The Total Environment*, 622-623, 1448-1462. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.003>
- Bowman, J., Jensen, S., McDonald, M., Dimroth, F., Kurtz, S., Sala, G., & Bett, A. W. (2011). *Analysis Of Soiling Rates At The Victor Valley Community College CPV Site*. 312-316. <https://doi.org/10.1063/1.3658351>
- Brauer, M. et al. (2017). *Global Burden of Disease Study 2017*. <https://www.indexmundi.com/facts/indicators/EN.ATM.PM25.MC.M3>
- Caron, J. R., & Littmann, B. (2013). Direct Monitoring of Energy Lost Due to Soiling on First Solar Modules in California. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(1), 336-340. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2216859>
- CLIMATE-DATA.ORG. (2020). *LIMA CLIMA*. CLIMATE-DATA.ORG. <https://es.climate-data.org/>
- Comisión Multisectorial para la gestión de la iniciativa del aire limpio para Lima y Callao. (2019). *Diagnóstico de la gestión de la calidad ambiental del aire de Lima y Callao*.

- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, 33, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
- Eller, B. M. (1977). Road dust induced increase of leaf temperature. *Environmental Pollution (1970)*, 13(2), 99-107. [https://doi.org/10.1016/0013-9327\(77\)90094-5](https://doi.org/10.1016/0013-9327(77)90094-5)
- Elminir, H. K., Ghitas, A. E., Hamid, R. H., El-Hussainy, F., Beheary, M. M., & Abdel-Moneim, K. M. (2006). Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 47(18-19), 3192-3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>
- Figgis, B., Ennaoui, A., Ahzi, S., & Rémond, Y. (2017). Review of PV soiling particle mechanics in desert environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 872-881. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.100>
- Fraga, M. M., Campos, B. L. de O., Almeida, T. B. de, Fonseca, J. M. F. da, & Lins, V. de F. C. (2018). Analysis of the soiling effect on the performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in Minas Gerais, Brazil. *Solar Energy*, 163, 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.025>
- Fuentealba, E., Ferrada, P., Araya, F., Marzo, A., Parrado, C., & Portillo, C. (2015). Photovoltaic performance and LCoE comparison at the coastal zone of the Atacama Desert, Chile. *Energy Conversion and Management*, 95, 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.036>
- Ghazi, S., Sayigh, A., & Ip, K. (2014). Dust effect on flat surfaces – A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 742-751. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.016>
- Guo, B., Javed, W., Figgis, B. W., & Mirza, T. (2015). Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar. *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SGRE.2015.7208718>

- Hoffman, A. R., & Maag, C. R. (1980). Airborne particulate soiling of terrestrial photo-voltaic modules and cover materials. *Lifecycle problems and environmental technology*, 229-236.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2006). *INTERNATIONAL STANDARD IEC 60904-1 Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*.
- IRENA. (2019). Renewable power generation costs in 2018. *International Renewable Energy Agency*, 88.
- Kazem, H. A., Khatib, T., Sopian, K., Buttinger, F., Elmenreich, W., & Albusaidi, A. S. (2013). *Effect of Dust Deposition on the Performance of Multi-Crystalline Photovoltaic Modules Based on Experimental Measurements*. 4.
- Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., & Wenger, H. (2006). The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States. *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2391-2395. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279690>
- Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307-1316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>
- Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., Georghiou, G. E., Schubert, M., & Werner, J. H. (2010). Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 754-762. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.021>
- Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124-3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
- Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Anuario Estadístico de Electricidad 2018*. MINEM. http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=6&idEstadistica=13285

- Ministerio del Ambiente - MINAM. (2016). *La Contribución Nacional del Perú—INDC: agenda para un desarrollo climáticamente responsable.*
- Murcia, G. J., Gonzalez, S. A., Echeverria, N. I., Garin, E., & Branda, J. C. (2017). *Efecto de las Condiciones Meteorológicas de Mar del Plata en la Producción Fotovoltaica.* 8.
- Pacsi Valdivia, S. A. (2016). ANALISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CALIDAD DEL AIRE DETERMINADO POR MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2,5 EN LIMA METROPOLITANA. *Anales Científicos*, 77(2), 273. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i2.699>
- Qasem, H., Betts, T. R., Müllejjans, H., AlBusairi, H., & Gottschalg, R. (2014). Dust-induced shading on photovoltaic modules: Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(2), 218-226. <https://doi.org/10.1002/pip.2230>
- Romero-Fiances, I., Muñoz-Cerón, E., Espinoza-Paredes, R., Nofuentes, G., & De la Casa, J. (2019). Analysis of the Performance of Various PV Module Technologies in Peru. *Energies*, 12(1), 186. <https://doi.org/10.3390/en12010186>
- S. B. Jacob, C. N. de Souza, G. J. Murcia, J. C. Branda, E. Garín, & D.O. Carrica. (2016). Influencia de la limpieza en la generación de instalaciones fotovoltaicas. *ERMA*, 38, 1-5.
- Sánchez-Ccoyllo, O. R. & Ordóñez-Aquino, C. G. (2016). *Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana, 2015.*
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698-733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>
- Sayyah, A., Horenstein, M. N., & Mazumder, M. K. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 107, 576-604. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>
- Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología. (2003). *Atlas de Energía Solar del Perú.*

- Silva, J., Rojas, J., Norabuena, M., Molina, C., Toro, R. A., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: The metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6327-2>
- Singh, G. K. (2013). Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, 53, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.057>
- Solar Electric Handbook Photovoltaic Fundamentals and Applications* (2.^a ed.). (2013). Pearson.
- Solar Energy International. (2013). *Solar Electric Handbook: Photovoltaic Fundamentals and Applications*. Pearson Learning Solutions.
- Tapia, V., Carbajal, L., Vásquez, V., Espinoza, R., Vásquez-Velásquez, C., Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2018). Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2,5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 190. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3250>
- Urrejola, E., Antonanzas, J., Ayala, P., Salgado, M., Ramírez-Sagner, G., Cortés, C., Pino, A., & Escobar, R. (2016). Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile. *Energy Conversion and Management*, 114, 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.016>
- Verán-Leigh, D., Larrea-Gallegos, G., & Vázquez-Rowe, I. (2019). Environmental impacts of a highly congested section of the Pan-American highway in Peru using life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(8), 1496-1514. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1574-1>

ANEXOS

Evidencia del envío a revista científica

[HS] Acuse de recibo de envío




Recibidos x
Tesis x



ojs@ubiobio.cl
 para mí ▾

lun, 29 mar 18:16 (hace 22 horas)



Maria Lucia Mendiola Monsante:

Gracias por enviar el manuscrito " EFECTO DE LA ACUMULACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EN LA CIUDAD DE LIMA, PERÚ " a Hábitat Sustentable. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/authorDashboard/submission/4730>

Nombre de usuario/a: mmendiola

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Dra Claudia Muñoz Sanguinetti

Copia de documento de aprobación de comité de ética

COMITÉ INSTITUCIONAL DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN CON ANIMALES Y BIODIVERSIDAD



Constancia N° 84-CIEI-AB-CIENTÍFICA-2019

El presidente del Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad de la Universidad Científica del Sur (CIEI-AB-CIENTÍFICA) da constancia que el proyecto de investigación, cuyos datos se registran a continuación, ha sido **aprobado**.

Código de registro: **358-2018-PRE11**
 Título: **Efecto de la suciedad superficial sobre la generación de electricidad en sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú**
 Investigador(a): **María Lucía Mendiola Monsante**

La aprobación del proyecto de investigación implica que el documento presentado a evaluación cumple con los lineamientos de Universidad en materia de investigación y ética, los cuales se sustentan en la normativa internacional vigente.

En tal sentido, esta aprobación carecerá de valor si es que el proyecto de investigación arriba indicado es modificado de cualquier forma. Toda enmienda, añadido, eliminación o eventualidad (eventos adversos, etc.) posterior a la fecha de aprobación debe ser reportado al CIEI-AB-CIENTÍFICA.

La vigencia de la aprobación de este documento es de dieciocho (18) meses (**hasta el 24 de febrero del 2021**), periodo en el que puede desarrollarse el proyecto. Cualquier trámite para su renovación deberá ser enviado antes del término de la vigencia de este documento, debiendo suspenderse todo desarrollo hasta que la renovación sea aprobada.

Villa El Salvador, 15 de agosto de 2019




Méd. Vet. Gianmarco Paolo Rojas Moreno
 Presidente
 Comité Institucional de Ética en Investigación
 con Animales y Biodiversidad

Copia de resolución de aprobación del proyecto de tesis



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°124-2019-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 30 de septiembre de 2019

VISTO:

El informe de revisión independiente académica y la aprobación de un Comité de Ética del proyecto de tesis titulado: **Efecto de la suciedad superficial sobre la generación de electricidad en sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú**, presentado por:

- **María Lucía Mendiola Monsante**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el título profesional de **Ingeniera Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el proyecto de tesis titulado: **Efecto de la suciedad superficial sobre la generación de electricidad en sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú** con N° de registro: **358-2018-PRE11**, y establecer el inicio del periodo de ejecución del mencionado proyecto.

Nombrar al docente/colaborador **Mg. Franco Canziani Amico** como asesor para el desarrollo de la tesis en cuestión.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
 Director Académico de Carrera
 Ingeniería Ambiental

Copia del acta de cambio de título



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N° 058-2021-DACIA-DAFCA-U.
CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Lima, 23 de febrero del 2021

VISTO:

La solicitud presentada por: **María Lucia Mendiola Monsante** con el fin de modificar el título de la tesis: **Efecto de la suciedad superficial sobre la generación eléctrica de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú** por **Efecto de la acumulación de material particulado sobre la generación eléctrica de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo a lo dispuesto en las Normas y Procedimientos de los Trabajos de Investigación para la Obtención de Títulos Profesionales y Grados Académicos, se admite el cambio del título de la tesis dados motivos que justifican el cambio.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar el cambio del título de la tesis titulada: **María Lucia Mendiola Monsante** con el fin de modificar el título de la tesis: **Efecto de la suciedad superficial sobre la generación eléctrica de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú** por **Efecto de la acumulación de material particulado sobre la generación eléctrica de módulos**

fotovoltaicos en la ciudad de Lima, Perú

Regístrese, comuníquese y archívese,



Documento firmado digitalmente
Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico
Carrera de Ingeniería Ambiental

T// (51) 610 6738
informes@cientifica.edu.pe
cientifica.edu.pe

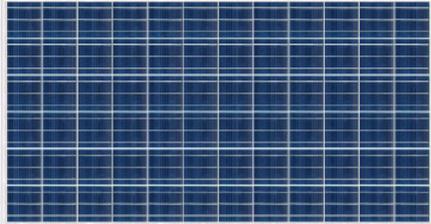
Instrumentos usados en la investigación y demás información de utilidad

Ficha técnica de paneles solares empleados

Guaranteed Performance**

- 10 Years Manufacturing Warranty
- 12 Years Warranty, 90% Power Output
- 25 Years Warranty, 80% Power Output

Free module recycling through membership in the Green Cycle Association



CHN 72P 280W/290W/295W/300W/305W/310W/315W

High-Performance 72 Cell Poly Crystalline 156x156mm Solar Photovoltaic Module

P156x156 315W

We focus on precise production and provide Customer with best cost-effective products to create Market Value for Customer

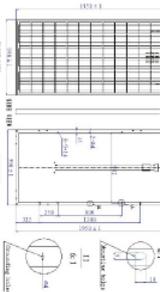


- Power tolerance (0+-3%) to ensure the high reliability of power output
- Modules certified by TÜV to with stand high level of wind loads (2400 Pa) and snow load(5400 Pa)
- Special PV Module Insurances by world leading insurance company guarantees the benefit of PV investors and PV module users
- Junction box and Bypass diodes guarantee the modules free of overheating and hot spot effect*

choosing chinland solar

- The most vertically integrated solar manufacturer in the industry with production of single wafer solar cells and modules using both mono crystalline and dual crystalline technology
- Global distribution with local warehousing, delivery and after sales services
- Modules certified by global testing facilities: IEC61215, IEC61730, CE, MCS, CEC, IEC61853
- Manufacturing with international quality standards and environment management system ISO9001 and ISO 14001
- Most updated design with drainage holes in the frame ensures the modules to withstand various weather conditions.
- Minimal wiring effort required as the module has light reverse current resistance.

MECHANICAL DRAWINGS



MECHANICAL SPECIFICATION

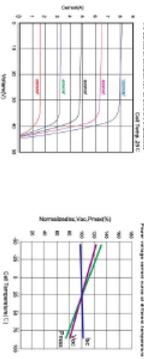
Cell Type	Poly Crystalline 156x156mm					
Number of cells	72(6x12)					
Dimensions (MMXCM)	1650x912x35mm					
Weights	24kg					
Front Glass	3mm tempered low iron glass					
Frame	Chloro anodized aluminum alloy					
Junction Box	IP 65 with bypass diodes					
Cable	MC4 compatible					
Output Cables	TUV-LV length 500mm, 4-core*					

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

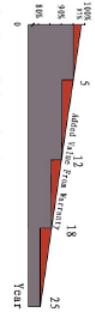
	280W	290W	295W	300W	305W	310W	315W
Maximum Power at STC (Pmax)	280W	290W	295W	300W	305W	310W	315W
Short Circuit Current (Isc)	8.68A	8.57A	8.54A	8.71A	8.73A	8.66A	8.93A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.0 V	43.2 V	43.3V	43.3V	44.0V	44.0V	44.3V
Maximum Power Current (Imp)	7.85A	8.00A	8.09A	8.17A	8.27A	8.35A	8.44A
Maximum Power Voltage (Vmp)	35.5V	36.3V	36.5V	36.7V	37.1V	37.1V	37.3V
Module Efficiency	14.50%	15.02%	15.28%	15.54%	15.80%	16.05%	16.32%
Power Tolerance	0+-3%	0+-3%	0+-3%	0+-3%	0+-3%	0+-3%	0+-3%

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	48 C±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.44%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.54%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C



INDUSTRY LEADING WARRANTY BASED ON NOMINAL POWER



PACKING CONFIGURATION

Container	20GP	40GP
Prices per pallet	24	24
Pallets per container	10	24
Prices per container	240	576

SYSTEM INTEGRATION PARAMETERS

Maximum system voltage	VOC: 1000V
Maximum Series Fuse	15 A
Increase snatched acc. to IEC 61715	5000A
Operating Temperature	-40to+85°C
Number of bypass diodes	3 or 6

QUALIFICATIONS AND CERTIFICATES



CHINLAND SOLAR ENERGY
www.chinland.com



Free module recycling through membership in the Green Cycle Association