REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

"ANÁLISIS DEL IMPACTO OCASIONADO POR EL MATERIAL PARTICULADO EN EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN ZONAS CERCANAS A OPERACIONES MINERAS"

Tesis Presentada por los Bachilleres:

Acosta Quelopana, Alejandro Marcelo

Rodríguez Delgado, José Julián

Para optar por el Título Profesional de:

Ingeniero de Minas

Asesor:

Ing. Gordillo Andia, Carlos Alberto

Arequipa-Perú

2022

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos

En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 08 de Julio del 2022

Dictamen: 002931-C-EPIM-2022

Visto el borrador del expediente 002931, presentado por:

2015701251 - **ACOSTA QUELOPANA ALEJANDRO MARCELO**
2015800681 - **RODRIGUEZ DELGADO JOSE JULIAN**

Titulado:

ANÁLISIS DEL IMPACTO OCASIONADO POR EL MATERIAL PARTICULADO EN EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN ZONAS CERCANAS A OPERACIONES MINERAS

Nuestro dictamen es:

APROBADO

1470 - **CASTILLO CACERES CESAR PIO**
DICTAMINADOR

2776 - **COLLADO OPORTO CHRISTIAM GUILLERMO**
DICTAMINADOR

2872 - **LOPEZ CASAPERALTA PATRICIA YANETH**
DICTAMINADOR

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

PRESENTACIÓN

Estimados ingenieros dictaminadores:

Tenemos el placer de presentar la tesis titulada “Análisis del Impacto Ocasionado por el Material Particulado en el Desempeño Energético de Paneles Fotovoltaicos en Zonas Cercanas a Operaciones Mineras” la cual será un valioso medio para poder fomentar tanto la investigación como la utilización de energías renovables en operaciones industriales y mineras.

Los autores están seguros de que estas energías renovables serán implementadas en mayor cantidad en un corto o mediano plazo, con el fin de reducir la huella de carbono producida por la industria a lo largo de los años, mejorando la calidad de vida de las futuras generaciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación se lo dedico a mi familia, Carlos Quelopana Rázuri (abuelo), Teresa Arroé Gómez (abuela), Renato Acosta Quelopana (hermano), Valentina Grillo Quelopana (hermana) y de forma especial, a mi madre, Karim Quelopana Arroé, quien fue indispensable para el desarrollo absoluto de la presente tesis, brindándome apoyo y amor incondicional, todos los recursos materiales y abstractos que pudiese necesitar, las fuerzas para nunca rendirme, consejos acertados, y sobre todo, nunca quitar la mira de mis objetivos, lo que me hizo perseverante y resiliente.

Acosta Quelopana, Alejandro Marcelo

Dedicado a Dios quien me guía siempre por el buen sendero; a mis padres quienes son mi soporte, mi fuerza e inspiración; a mi familia entera por ser el pilar fundamental de mi vida y a todas aquellas personas que creen en mí, ya que sin sus valiosos consejos no estaría dando este importante paso en mi vida profesional.

A todos ellos gracias totales.

Rodríguez Delgado, José Julián

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia por siempre estar presentes en los momentos en el que uno necesita apoyo y fuerzas para poder continuar, especialmente a mi madre Karim Quelopana Arroé, también quisiera agradecer al equipo de investigación de mi proyecto por creer en la viabilidad del mismo. Agradezco al Vicerrectorado de Investigación y a la Universidad Católica de Santa María por financiar el proyecto y hacer que los pensamientos e ideas, se puedan concretar en hechos e investigaciones, permitiendo que exista mayor conocimiento acerca de la energía fotovoltaica aplicada en el sector minero industrial en el sur del Perú.

Acosta Quelopana, Alejandro Marcelo

Agradecer a todo el equipo investigador por el apoyo incondicional, así como también a mi alma mater la Universidad Católica de Santa María y a su personal académico por incentivar a los alumnos a realizar investigación para que puedan proveer soluciones innovadoras que nuestra sociedad necesita. Agradecer en especial a mi familia y a mis amigos por ayudarme a alcanzar mis metas y a inspirarme a tener nuevas.

Rodríguez Delgado, José Julián

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

EPÍGRAFE

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad"

Albert Einstein

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

RESUMEN

La región de Arequipa, ubicada al sur de Perú, se encuentra en los mejores lugares del mundo para la obtención de energía fotovoltaica, ya que los valores de irradiancia solar son de los más altos del planeta, a pesar de ello, no se le da la importancia necesaria a esta tecnología que permite producir energía de una fuente renovable, evitando también la emisión de gases con efecto invernadero, tan solo el 1.44% de la energía en Perú es producida con paneles fotovoltaicos. Se pretende fomentar la utilización de energía solar no solo en el ámbito urbano, sino también en la industria minera la cual es una de las principales actividades económica y consumidoras de electricidad en el país. Estudios previos han demostrado que uno de los principales problemas que enfrentan las plantas fotovoltaicas es la deposición de material particulado, por lo que el objetivo del presente proyecto es hallar la cantidad de gramos por metro cuadrado de polvo depositado sobre un módulo fotovoltaico que provoque un déficit en el rendimiento energético del mismo, los resultados se utilizarán el proyecto de investigación mencionado en la presentación. Para lograrlo, se ubicó un panel fotovoltaico en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero en la provincia y departamento de Arequipa, donde el material particulado fue pesado con una balanza de precisión, dando así la obtención de la tasa de deposición de polvo (g/m^2), este valor se relacionó con el porcentaje de eficiencia emitida por el prototipo en mención. Los resultados mostraron que existe una reducción de eficiencia total promedio de 60.6% debido a una tasa de deposición de 35 g/m^2 en la superficie del panel fotovoltaico analizado experimentalmente. Por lo tanto, los resultados muestran que la presencia de material particulado en el departamento de Arequipa impactará en el desempeño energético del panel fotovoltaico, por ende no podría existir una óptima utilización y futura implementación en la industria minera ya que este sector es uno de los mayores generadores de material particulado en el mundo.

Palabras clave: Minería, energía renovable, paneles fotovoltaicos, irradiancia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ABSTRACT

The region of Arequipa, located in the south of Peru, is one of the best places in the world to obtain photovoltaic energy, since the values of solar irradiance are among the highest on the planet, despite this, it is not given the necessary importance to this technology that allows to produce energy from a renewable source, also avoiding the emission of greenhouse gases, only 1.44% of the energy in Peru is produced with photovoltaic panels. It is intended to promote the use of solar energy not only in the urban area, but also in the mining industry, which is one of the main economic activities and consumers of electricity in the country. Previous studies have shown that one of the main problems faced by photovoltaic plants is the deposition of particulate matter, so the objective of this project is to find the number of grams per square meter of dust deposited on a photovoltaic module that causes a deficit. in the energy performance of the same, the results will be used the research project mentioned in the presentation. To achieve this, a photovoltaic panel was located in the district of José Luis Bustamante y Rivero in the province and department of Arequipa, where the particulate material was weighed with a precision balance, thus obtaining the dust deposition rate (gr /m^2), this value was related to the percentage of efficiency emitted by the prototype in question. The results showed that there is an average total efficiency reduction of 45.3% due to a deposition rate of 35 g/m2 on the surface of the experimentally analyzed photovoltaic panel. Therefore, the results show that the presence of particulate material in the department of Arequipa will impact the energy performance of the photovoltaic panel, therefore there could be no optimal use and future implementation in the mining industry since this sector is one of the largest generators of particulate matter in the world.

Keywords: Mining, renewable energy, photovoltaic panels, irradiance.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se está viendo el continuo crecimiento de la demanda energética en Perú así como el problema del cambio climático mundial, por lo que se hace imperativo la utilización de energías renovables, considerando que este país es megadiverso y posee un potencial elevado para el abastecimiento energético a partir de fuentes renovables, siendo una de estas la energía fotovoltaica (Rios & Duarte, 2021). Perú cuenta con los niveles de irradiancia solar más elevados del mundo, especialmente en la zona sur, en donde se encuentra Arequipa, ciudad que cuenta con 7.566 Kwh/m^2 de irradiación normal directa al día, donde se superan valores medidos en países europeos, tales como Baviera, Alemania (2.790 Kwh/m^2); Provenza-Alpes-Costa Azul, Francia (4.649 Kwh/m^2); Almería, España (5.564 Kwh/m^2), los cuales están entre los más desarrollados en cuanto a la utilización de energía solar mediante paneles fotovoltaicos (Bazán et al., 2018). El mundo está apostando por el desarrollo tecnológico y uso de energías renovables, sin embargo, en Perú aproximadamente el 73% de las fuentes de energía provienen de combustibles fósiles como el gas natural y el petróleo (Bazán et al., 2018; Espinoza et al., 2019), lo cual provoca la emisión de gases tóxicos hacia la atmosfera (Abderrezek & Fathi, 2017) y un cambio climático crítico en el planeta. Se conoce que en el sur de Perú la energía usada convencionalmente proviene, en su mayoría, de centrales hidroeléctricas. El costo de esta energía en la ciudad de Arequipa es de 0.17 USD/Kw-h, mientras que el costo de la energía fotovoltaica en la misma región sería entre 0.10 y 0.15 USD/Kw-h. Esto nos da a entender que la utilización de energía fotovoltaica en Arequipa puede ocasionar ahorros monetarios y contribuir a la disminución de la contaminación ambiental. (Bazán et al., 2018; Espinoza et al., 2019).

El valor de irradiancia existente en Perú permite dar la oportunidad del aprovechamiento de la energía fotovoltaica en sectores urbanos y productivos, sobre todo en el sector minero, que es una de las actividades más importantes del país, la cual requiere alta utilización de energía eléctrica (OSINERGMIN, 2019b). La implementación de módulos de captación solar en las unidades mineras implica el análisis y mantenimiento de dichos dispositivos, ya que existen factores ambientales que alteran el correcto rendimiento de los paneles fotovoltaicos, siendo el más significativo el material particulado, generado por acción del viento, voladura y movimiento de tierras, que con el paso del tiempo se sedimentará en la superficie de los paneles solares (Cai et al., 2019; Isaifan et al., 2019; Kazem & Chaichan, 2019; Liu et al., 2019; Menoufi et al., 2017; Salari & Hakkaki-Fard, 2019).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Una investigación realizada en los Emiratos Árabes Unidos concluyó que el material particulado sedimentado en un panel fotovoltaico expuesto 12 meses a la intemperie impacta en su eficiencia en un 70% (Lu et al., 2019), de igual forma, se ha llegado a comprobar que la pérdida de la eficiencia del panel fotovoltaico puede alcanzar un máximo de 79.77% (Lu & Zhang, 2019). Otra investigación comenta que el óptimo funcionamiento de un panel solar se redujo en 26,36% a causa del aumento de la presencia de material particulado, de 0 g/m^2 a 8 g/m^2 (Salari & Hakkaki-Fard, 2019) asimismo, se ha comprobado que en ambientes desérticos el polvo afecta el rendimiento del panel fotovoltaico en un 34% cuando existe una acumulación de 10 g/m^2 en la superficie del módulo de captación solar (Y. Chen et al., 2019), los resultados dependerán de las condiciones ambientales y geológicas de la zona, lo que se demuestra en un estudio realizado en Babuin, Indonesia y Perth, donde las propiedades ópticas del polvo son distintas, lo que dificulta el paso de la irradiancia, más en unos casos que en otros (Abderrezek & Fathi, 2017; Tanesab et al., 2019). Los antecedentes mencionados resaltan la importancia de mantener un rendimiento óptimo de los módulos fotovoltaicos, para así aprovechar de manera correcta la captación solar y esta sea rentable.

El presente estudio tiene como finalidad analizar el desempeño energético a causa del material particulado existente en zonas urbanas y aledañas a operaciones mineras en Arequipa, se eligió esta ciudad porque posee un clima desértico con aproximadamente 300 días de cielo despejado, 11 horas de irradiación solar diaria y por la existencia de alta afluencia de polvo, también la región cuenta con la Sociedad Minera Cerro Verde, una de las minas a tajo abierto más grandes del mundo, ubicada a menos de 10 kilómetros de la ciudad, además de otras compañías mineras formales e informales cerca a los poblados, se sabe que la industria minera es una de las principales generadoras de material particulado, por lo que enriquece el análisis para determinar cuánto es que este factor influye en la captación de energía solar y así poder fomentar la utilización de energías renovables en empresas mineras (Abderrezek & Fathi, 2017; Salcedo & Trigoso, 2011; Tejada & Falcón, n.d.).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ACRÓNIMOS

- PV — Panel Fotovoltaico
- MINAM — Ministerio del Ambiente
- MINEM — Ministerio de Energía y Minas
- OSINERGMIN — Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
- SNMPE — Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía
- UCSM — Universidad Católica de Santa María
- BID — Banco Interamericano de Desarrollo
- NASA — National Aeronautics and Space Administration
- BM — Banco Mundial

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN III
DEDICATORIA IV
AGRADECIMIENTOS V
EPÍGRAFE VI
RESUMEN VII
ABSTRACT VIII
INTRODUCCIÓN IX
ACRÓNIMOS XI
CAPÍTULO I 17
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18
1.1.1. Descripción del problema 18
1.1.2. Justificación del problema 19
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 22
1.2.1. General 22
1.2.2. Específicos 22
1.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN 23
1.4. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN A LA QUE CORRESPONDE EL PROBLEMA 23
1.5. PALABRAS CLAVE 23
1.6. APORTE DEL DESARROLLO DE LA TESIS 24
1.6.1. Justificación e Importancia 24
1.6.2. Descripción de la Solución 25
1.7. HIPÓTESIS 25
1.8. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN 26
1.9. APORTE 26
CAPÍTULO II 27
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 28
2.1. ESTADO DEL ARTE 28
2.2. BASES TEÓRICAS DE LA INVESTIGACIÓN 37
2.2.1. Energía Eléctrica 37
2.2.1.1. Energía No Renovable 41
2.2.1.2. Energía Renovable 45
2.2.1.2.1. Decreto Legislativo N° 1002 51
2.2.2. Energía Fotovoltaica 52
2.2.2.1. Eficiencia Energética Fotovoltaica 58
2.2.2.2. Potencia Eléctrica 60
2.2.2.3. Factor de Carga (FF) 60
2.2.3. Irradiancia Solar 61
2.2.3.1. Irrandiancia Normal Directa (DNI) 61
2.2.3.2. Irradiancia Horizontal Difusa (DHI) 62
2.2.3.3. Irradiancia Horizontal Global (GHI) 62
2.2.3.4. Albedo 62
2.2.4. Material Particulado 63
2.2.4.1. Tamaño de Partículas 65
2.2.4.2. Reflexión de Irradiancia Solar Incidente 66
2.2.4.3. Adhesión de Material Particulado 67

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2.2.4.4. Efecto de Punto Caliente 68
2.2.5. Actividad Minera 69
2.2.5.1. Minería Superficial 70
2.2.5.2. Minería Subterránea 70
2.2.5.3. Operaciones Mineras que Emiten Material Particulado 71
2.2.5.3.1. Perforación 71
2.2.5.3.2. Voladura 73
2.2.5.3.3. Carguío y Acarreo 74
2.2.5.3.4. Chancado y Molienda 76

CAPÍTULO III 77

3. MARCO METODOLÓGICO 78

3.1. Alcances y Limitaciones 78
3.2. Tipo y Nivel de Investigación 79
3.3. Desarrollo Metodológico 80
3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 81
3.4.1. Técnica de Adquisición Bibliográfica 81
3.4.2. Técnica de Adquisición de Equipos Experimentales 81
3.4.2.1. Criterio de Selección de Panel Fotovoltaico 82
3.4.3. Técnica de Análisis Estadístico y Comprobación de la Hipótesis 89

CAPÍTULO IV 95

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES 96

4.1. Análisis e Interpretación de Resultados 96
4.1.1. Zona – José Luis Bustamante y Rivero 96
4.2. Discusiones 103

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 106

REFERENCIA 108

ANEXO 112

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: POTENCIAL FOTOVOLTAICO MUNDIAL 19
FIGURA 2: POTENCIAL FOTOVOLTAICO EN EL SUR DE PERÚ 21
FIGURA 3: PRODUCCIÓN ELÉCTRICA POR ZONA Y ORIGEN EN EL PAÍS (GWH) 38
FIGURA 4: VALOR PORCENTUAL DEL TIPO DE ENERGÍA USADA SEGÚN ZONA 40
FIGURA 5: CENTRAL ELÉCTRICA DE HIDROCARBUROS 43
FIGURA 6: PLATAFORMA PETROLERA DE LA EMPRESA SAVIA 44
FIGURA 7: INGENIEROS DE UNA PLANTA PETROLERA DE LA EMPRESA SAVIA 44
FIGURA 8: PLANTA DE GAS NATURAL PLUSPETROL 45
FIGURA 9: MINI HIDROELÉCTRICA HUAHUAHUASI ANCASH-PERÚ 47
FIGURA 10: CENTRAL TERMOELÉCTRICA BIOMASA HUAYCOLORO CALLAO-PERÚ 47
FIGURA 11: PLANTA EÓLICA TRES HERMANAS ICA, PERÚ 48
FIGURA 12: CENTRAL GEOTÉRMICA DE 120 MW EN ISLANDIA 48
FIGURA 13: SISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA OCEÁNICA 49
FIGURA 14: CENTRAL FOTOVOLTAICA TACNA SOLAR TACNA, PERÚ 50
FIGURA 15: COLECTOR TERMOSOLAR COMPACTO 51
FIGURA 16: DIAGRAMA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO 53
FIGURA 17: TIPOS DE ARREGLOS O ARRAYS DE PANELES FOTOVOLTAICOS 54
FIGURA 18: CAPA-N Y CAPA-P DE UNA CÉLULA SOLAR 56
FIGURA 19: EFECTO FOTOVOLTAICO EN UNA CÉLULA SOLAR 56
FIGURA 20: UNIDADES DE BATERÍA CONECTADAS EN SERIE 57
FIGURA 21: INVERSOR DE CORRIENTE DC-AC 58
FIGURA 22: TIPOS DE IRRADIANCIA SOLAR 63
FIGURA 23: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DEPOSICIÓN DE PM 64
FIGURA 24: APRECIACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO VISTA DESDE UN MICROSCOPIO 65
FIGURA 25: EFECTO SOMBRA CAUSADO POR EL MATERIAL PARTICULADO DEPOSITADO SOBRE EL PANEL FOTOVOLTAICO 66
FIGURA 26: MATERIAL PARTICULADO ADHERIDO A LA SUPERFICIE EVITANDO LA INCIDENCIA DE LUZ 67
FIGURA 27: COMPARACIÓN DE ARRAY LIMPIO VS ARRAY CON PUNTO CALIENTE 68
FIGURA 28: RELACIÓN DE LA CANTIDAD MATERIAL PARTICULADO CON LA TEMPERATURA PROVOCADA 69

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

FIGURA 29: VISTA PANORÁMICA DE UNA MINA DE TAJO ABIERTO 70
FIGURA 30: VISTA DE UN TÚNEL DE UNA MINA SUBTERRÁNEA 71
FIGURA 31: EQUIPO DE PERFORACIÓN EN MINERÍA SUPERFICIAL 72
FIGURA 32: EQUIPO DE PERFORACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA 73
FIGURA 33: VOLADURA EN EL FRENTE DE TRABAJO EN UNA MINA SUPERFICIAL 74
FIGURA 34: EQUIPOS USADOS PARA EL CARGUÍO, ACARREO Y DESCARGA DE MATERIAL 75
FIGURA 35: CHANCADORA PRIMARIA 76
FIGURA 36: PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE 100 WP 90
FIGURA 37: DATA LOGGER INSTALADO EN PANEL SOLAR 91
FIGURA 38: PANEL FOTOVOLTAICO SUCIO 92
FIGURA 39: PANEL FOTOVOLTAICO SUCIO 93

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: PRODUCCIÓN ENERGÉTICA SEGÚN TIPO Y ZONA EN GWH 39
TABLA 2: PRODUCCIÓN ENERGÉTICA POR REGIÓN Y VARIACIÓN PORCENTUAL 41
TABLA 3: TASA DE EMISIÓN SEGÚN FUENTE NO RENOVABLE DE ENERGÍA 42
TABLA 4: AVANCES TECNOLÓGICOS EN CÉLULAS SOLARES 59
TABLA 5: ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL PANEL FOTOVOLTAICO PARA LA FECHA ESTABLECIDA DE ANÁLISIS 84
TABLA 6: VARIACIÓN DE TEMPERATURA POR TIPO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA 88
TABLA 7: VARIACIÓN DE FILL FACTOR DE UN PANEL LIMPIO VS SUCIO 96
TABLA 8: VARIACIÓN DE POTENCIA DE UN PANEL LIMPIO VS SUCIO 98
TABLA 9: VARIACIÓN DE POTENCIA DE UN PANEL LIMPIO VS SUCIO 100

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: ÁNGULOS ADECUADOS DE INCLINACIÓN PARA EL PROTOTIPO PANEL FOTOVOLTAICO 87

GRÁFICO 2: VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA SEGÚN LA TEMPERATURA DE CADA TIPO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA 89

GRÁFICO 3: DIFERENCIA DE FILL FACTOR DE UN PANEL SUCIO VS LIMPIO 97

GRÁFICO 4: DIFERENCIA DE POTENCIA EXISTENTE EN UN PANEL SUCIO VS LIMPIO .. 99

GRÁFICA 5: EFICIENCIA DE PANEL FOTOVOLTAICO VS TASA DE DEPOSICIÓN DE POLVO 101

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO I

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1. Descripción del problema

La voladura ocasionada en los campos mineros, el movimiento de tierras y traslado de equipos genera material particulado en suspensión, de diferente composición y tamaño, también el medio donde se encuentra ubicada una actividad minera suele tener condiciones desérticas que, por acción del viento, genera el movimiento de partículas, las cuales podrían depositarse en la superficie de los paneles fotovoltaicos (Patra et al., 2016), provocando un déficit del aprovechamiento de la alta irradiancia de la zona minera en el sur de Perú, no permitiendo la óptima generación de energía fotovoltaica, la cual podría utilizarse para abastecer de manera total o parcial en el requerimiento energético de las industrias mineras.

Hoy en día, en la zona sur de Perú hay escaza utilización de paneles fotovoltaicos para generar energía mediante fuentes renovables en la industria minera, lo cual significa un problema actual debido a la crisis de calentamiento global.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

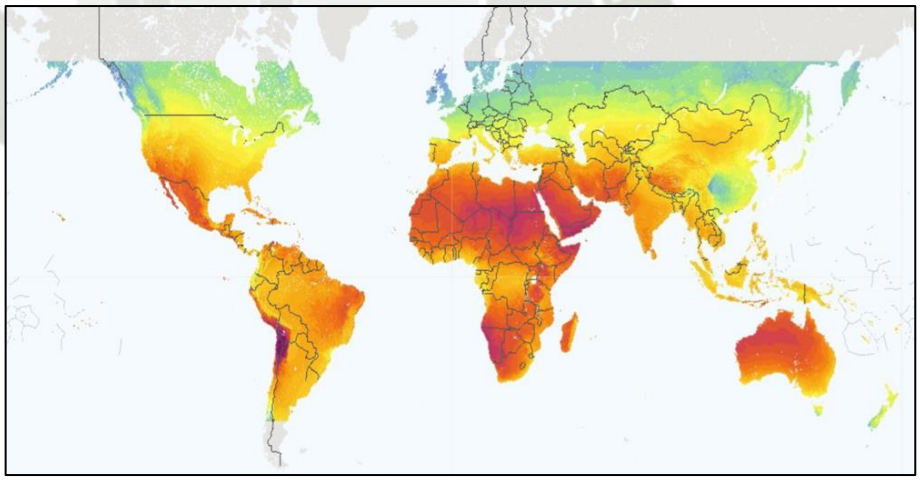
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

1.1.2. Justificación del problema

Perú es una potencia mundial en minería, y esta labor es una de las grandes consumidoras de energía eléctrica por todos los procesos que se manejan en este rubro (OSINERGMIN, 2019b). En el sur de Perú, se encuentran los más altos niveles de irradiancia solar, posibilitando la rentabilidad y funcionalidad de la energía solar fotovoltaica en la industria minera. En la siguiente figura se puede apreciar el alto potencial fotovoltaico con el que cuenta la zona mencionada.

Figura 1

Potencial Fotovoltaico Mundial



Fuente: Atlas (2021)

Nota. Esta figura representa la cantidad de energía expresada en kWh la cual es producida por cada kWp de capacidad de un panel fotovoltaico en el transcurso de un año. Las ubicaciones con las tonalidades rojas o más oscuras tienen un rendimiento de 2250, las regiones en naranja de 1600, las regiones en amarillo de 1300, las ubicaciones en verde de 1100 y las de color azul de 700.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Un estudio realizó un mapa de idoneidad, donde se clasificaron cinco categorías: “Altamente Adecuado”, “Muy Adecuado”, “Adecuado”, “Marginalmente Adecuado” e “Inadecuado”. Como se puede apreciar en la Figura 2, la categoría "Altamente Adecuado" se localiza en la zona sur del país. Los megaproyectos fotovoltaicos instalados en el país se encuentran dentro de la categoría "Altamente Adecuado", lo que acredita el alto potencial que posee la zona sur (Rios & Duarte, 2021).

Sin embargo, la cantidad de material particulado que se depositará en la superficie de los paneles fotovoltaicos situados en zonas mineras podría generar un mal desempeño en la captación solar y un inconforme abastecimiento energético a operaciones mineras.

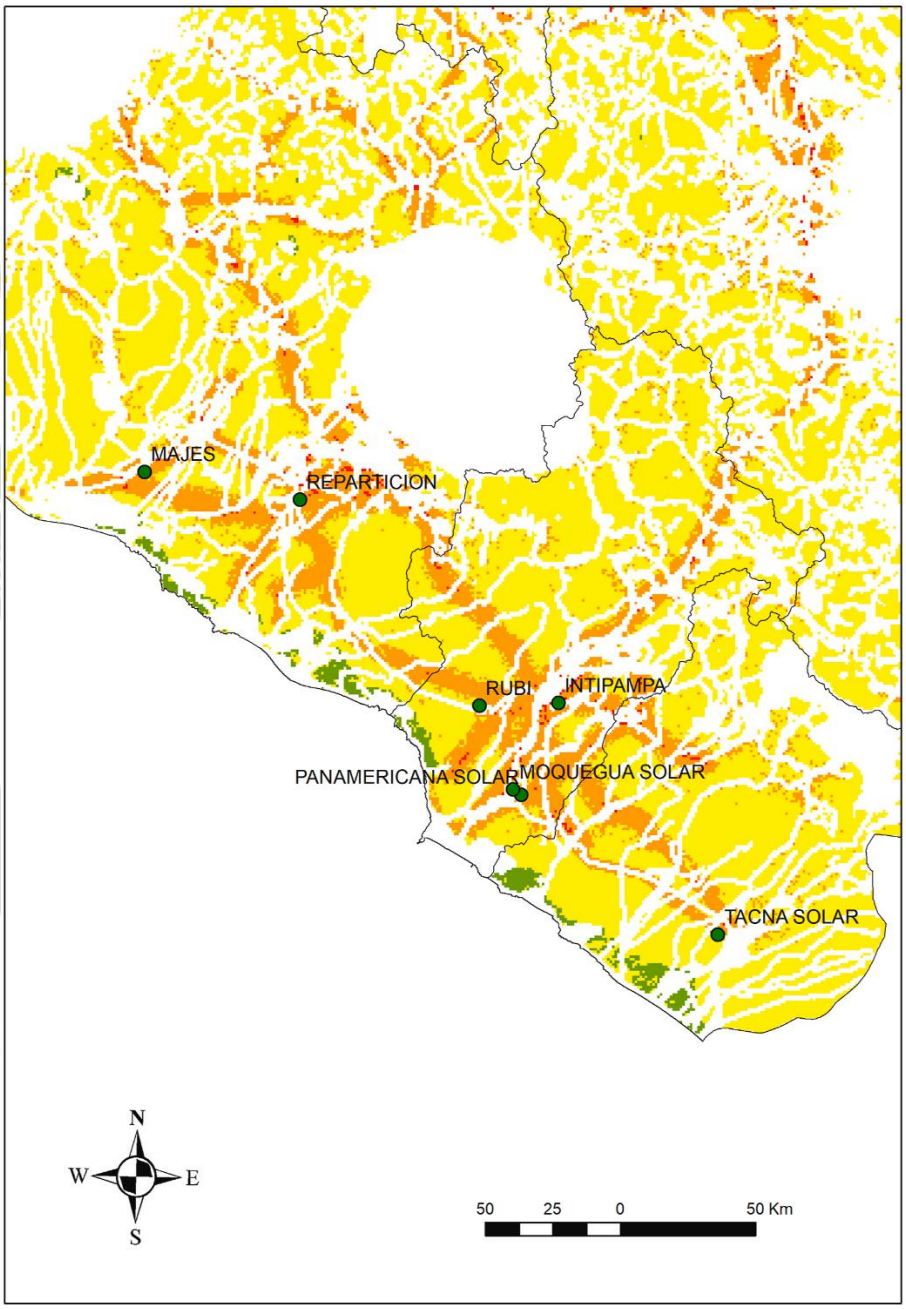
Siendo estos los motivos que le dan la justificación a este estudio, para que se realice la investigación y determinación del impacto en el desempeño del panel fotovoltaico a causa del material particulado sedimentado en la superficie de este, afectando la perspectiva del usuario en cuanto a la implementación de este tipo de energías en zonas urbanas y minero-industriales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 2

Potencial Fotovoltaico en el Sur de Perú



Fuente: Rios & Duarte (2021)

Nota. En la figura se pueden apreciar los megaproyectos fotovoltaicos en el sur de Perú, los cuales según su ubicación se encuentran en la zona naranja clasificada como categoría "Altamente Adecuada". La zona amarilla está clasificada como categoría "Muy Adecuada".

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. General

Hallar la cantidad de gramos por metro cuadrado de material particulado depositado sobre el panel fotovoltaico que ocasionen un déficit en la eficiencia energética del módulo fotovoltaico.

1.2.2. Específicos

- Estudiar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos de acuerdo con la variación de la irradiancia solar, en el transcurso de los días.
- Evaluar la caída de potencial que puede originar la tasa de deposición de material particulado en la superficie del panel fotovoltaico.
- Generar la data necesaria que será utilizada para desarrollar un sistema autónomo de limpieza.
- Fomentar la utilización de energía fotovoltaica en la industria minera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

1.3. Preguntas de Investigación

¿Cuál es la cantidad de gramos por centímetro cuadrado de material particulado depositado sobre el panel fotovoltaico que causa un déficit en la eficiencia energética del módulo fotovoltaico y cómo se fomentaría el uso de energía fotovoltaica en el sector minero?

- ¿Cuál es el comportamiento de los paneles fotovoltaicos de acuerdo con la variación de la irradiancia solar en el transcurso de los días?
- ¿Cuál es la caída de potencial que puede originar la tasa de deposición de material particulado en la superficie del panel fotovoltaico?
- ¿Cómo se va a generar la data necesaria que será utilizada para desarrollar un sistema autónomo de limpieza?
- ¿Cómo se fomenta la utilización de energía fotovoltaica en la industria minera?

1.4. Línea de Investigación a la que corresponde el Problema

Uso Eficiente de Energía

1.5. Palabras Clave

Minería, energía renovable, paneles fotovoltaicos, irradiancia, material particulado, eficiencia, factor de carga.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Mining, renewable energy, photovoltaic panels, irradiance, particulate matter, efficiency, fill factor.

1.6. Aporte del Desarrollo de la Tesis

1.6.1. Justificación e Importancia

A los autores les motiva poder fomentar el uso y desarrollo de energía eco-amigable de manera eficiente en operaciones mineras, ya que no producen gases con efecto invernadero y utilizan recursos renovables, beneficiando de manera significativa al medio ambiente y a la percepción que tiene la población hacia la industria minera, abriendo paso a que la empresa pueda tener un desarrollo sostenible, el cual es muy importante en la compañía, cubriendo los aspectos sociales, económicos y ambientales. La factibilidad de este proyecto proviene tanto de la ubicación en donde será desarrollado, Arequipa, zona privilegiada por la elevada irradiancia solar, una de las más potentes a nivel mundial, como del Fondo para la Investigación de la Universidad Católica de Santa María, con el cual se adquirirán los materiales necesarios para realizar el presente estudio y poder determinar el impacto que ocasiona el polvo sedimentado en la superficie del panel solar, una vez determinado se podrá realizar la mejora necesaria, con el apoyo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

de un equipo multidisciplinario de la facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales.

1.6.2. Descripción de la Solución

Se obtendrá la data necesaria para poder determinar en qué medida el panel fotovoltaico perderá su eficiencia debido a la cantidad de material particulado que se depositará sobre su superficie, por lo que se podrá sugerir el momento óptimo para limpiar el módulo fotovoltaico, lo cual mantendrá la eficiencia de la captación energética del mismo. Actualmente no se cuenta con dicha información, ya que la energía fotovoltaica aplicada a industrias mineras es una innovación, por lo que se pretende incentivar el uso de esta tecnología, conociendo cómo mantener su eficiencia. Adicionalmente se está diseñando en paralelo a este estudio un prototipo autónomo, capaz de mantener el rendimiento del elemento captador de rayos solares.

1.7. Hipótesis

Dado que la presencia de material particulado en el departamento de Arequipa es elevada, es probable que su propia sedimentación impacte en el desempeño energético de los paneles fotovoltaicos en 60.6%.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

1.8. Variables de investigación

- Variable independiente: Sedimentación de polvo en la superficie del panel fotovoltaico, esta variable es aquella que podrá ser controlada mediante parámetros impuestos, experimentadas y analizadas bajo técnicas de control y nos permitirán observar cambios en la variable dependiente.

- Variable dependiente: Eficiencia en la captación energética, esta es aquella variable en la que los investigadores podrán observar el comportamiento mientras se manipula la variable independiente.

1.9. Aporte

Los resultados que se encontrarán en la presente investigación, serán necesarios para el desarrollo de un sistema autónomo de limpieza el cual se diseñará en base a los factores ambientales de las zonas aledañas a operaciones mineras. Por otro lado, se incentivará el uso de energía fotovoltaica en el sector minero, ya que contribuirá a la reducción de gases con efecto invernadero, y a practicar el desarrollo sostenible.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

CAPÍTULO II

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del arte

- Se encontró el estudio titulado: *Estudio numérico sobre el proceso de contaminación por polvo polidispersado en paneles solares fotovoltaicos montados en el techo de un edificio*, en el cual se abordó la deposición de partículas de polvo polidispersado en paneles fotovoltaicos encontrados en el techo de un edificio ubicado en los Emiratos Árabes Unidos, en donde la presencia de polvo afecta hasta en un 70% en la eficiencia del de este panel, cuando este estuvo expuesto durante 12 meses, en donde se realiza una simulación tomando como factor la velocidad del viento y las partículas que se sedimentaron en el panel, por lo que recomiendan la implementación de una limpieza mecánica para mantener la eficiencia del panel y disminuir pérdidas de captación energética (Lu et al., 2019).

- Otra investigación titulada: *Optimización de parámetros de la estructura de absorción de polvo para el robot de limpieza de paneles fotovoltaicos basado en el método de experimento ortogonal*, en donde se indicó que el polvo es uno de los factores más influyentes en el mal funcionamiento de los paneles solares por lo que se realizó la fabricación de un robot que pueda limpiar las partículas que se depositan en los paneles solares fotovoltaicos, absorbiéndolas. Se realizaron 16 pruebas para poder determinar las dimensiones óptimas para este robot y garantizar su funcionamiento y propósito (Cai et al., 2019).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

- Se observó una investigación titulada: *Eliminación turbulenta de partículas de polvo en el flujo de aire de la superficie del panel solar: análisis y experimentación*, en donde se habló sobre la afectación de los paneles fotovoltaicos a causa de las partículas de polvo que se encuentran en él, analizando la adhesión de las partículas finas en la superficie del panel fotovoltaico para su próxima remoción mediante un flujo de aire turbulento, se analizó la adhesión de las partículas en ambientes secos y húmedos, y un modelo de desprendimiento de partículas mediante un flujos turbulentos, la velocidad de corte crítica del flujo de aire para eliminar las partículas se calculó según el método de Monte Carlo. Luego, se diseñó una boquilla de expansión de múltiples etapas que tenía múltiples cavidades de expansión en serie. El campo de flujo dentro de la boquilla se simuló en FLUENT para obtener la velocidad del flujo de aire de salida. Finalmente, el sistema de eliminación de polvo para el panel solar se validó experimentalmente y se demostró su viabilidad, optando por un enfoque para lograr la eliminación de partículas sin hacer contacto físico con la superficie (Du et al., 2019).

- Analizando la investigación denominada: *Un estudio numérico de los efectos de la deposición de polvo en módulos fotovoltaicos y sistemas fotovoltaicos-térmicos*, refiriéndose a la deposición de polvo en la superficie de los sistemas solares ha sido uno de los principales parámetros que afectan significativamente el rendimiento de dichos sistemas. En este estudio, se investigó numéricamente el efecto de la densidad de la deposición de polvo en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos (PV) y los sistemas fotovoltaicos-térmicos (PVT). En consecuencia, se simularon todas las capas de un módulo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

fotovoltaico de silicio monocristalino para ambos sistemas. Además, se estudia el efecto de varios parámetros del sistema en el rendimiento del módulo PV limpio y polvoriento y el sistema PVT. Los parámetros estudiados incluyeron: intensidad de radiación solar, temperatura ambiente, temperatura de entrada del refrigerante y velocidad de entrada del refrigerante. Los resultados obtenidos indican que al aumentar la densidad de deposición de polvo en la superficie del módulo fotovoltaico de 0 g/m^2 a 8 g/m^2, su eficiencia eléctrica se redujo en un 26,36%. Además, al aumentar la densidad de deposición de polvo en la superficie del sistema PVT de 0 g/m^2 a 8 g/m^2, sus eficiencias eléctricas y térmicas se reducen en un 26,42% y un 16,11%, respectivamente. Además, los resultados de la simulación mostraron que el efecto de los parámetros considerados en el sistema solar limpio es más significativo que el sistema polvoriento (Salari & Hakkaki-Fard, 2019).

- En el trabajo: *Influencias de la deposición de polvo en los paneles fotovoltaicos solares montados en el suelo: un estudio de simulación de CFD,* se analizó los procesos y comportamientos de deposición de polvo en conjuntos fotovoltaicos solares (PV) montados en tierra mediante el modelo de turbulencia k-ω de transporte de tensión de corte y el modelo de partículas discretas. La velocidad de entrada y las distribuciones de energía cinética turbulenta ajustadas a partir de datos experimentales se impusieron en la simulación para mejorar la precisión de la predicción. Después de la prueba independiente de la malla y la verificación numérica, se investigaron los campos de flujo de aire sobre la matriz fotovoltaica solar, las tasas de deposición de polvo para diferentes filas de paneles fotovoltaicos y diferentes

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

diámetros de polvo. Se encontró que las tasas de deposición de polvo en el panel de paneles solares fotovoltaicos se redujeron de la fila delantera a la trasera. La tasa máxima de deposición de la primera a la quinta fila de paneles fotovoltaicos es de 18.89%, 12.35%, 9.62%, 6.83% o 5.71% respectivamente. El diámetro de polvo correspondiente para la tasa de deposición máxima es de 350, 250, 200, 150 o 150 μm, respectivamente. Los principales mecanismos de deposición se investigaron mediante el análisis de las trayectorias de movimiento de polvo en las matrices de paneles fotovoltaicos. Además, la reducción máxima de la producción fotovoltaica inducida por el polvo puede alcanzar 79.77%, 18.16%, 5.88%, 2.66% o 1.89% desde la primera hasta la última fila de paneles fotovoltaicos, respectivamente. Por lo tanto, la mayor degradación de la eficiencia fotovoltaica aparece en la primera fila de paneles fotovoltaicos (Lu & Zhang, 2019).

- Otra investigación titulada: *El efecto del polvo con diferentes morfologías en la degradación del rendimiento de los módulos fotovoltaicos*, en donde se investigó el efecto del polvo con diferentes morfologías en la degradación del rendimiento de varias tecnologías fotovoltaicas (PV) que consisten en silicio policristalino (pc-Si), silicio monocristalino (mc-Si) y silicio amorfo (a-Si). El polvo recogido en dos ubicaciones diferentes, Babuin, Indonesia y Perth, Australia, se recubrió artificialmente sobre la superficie del vidrio de los módulos fotovoltaicos. El análisis reveló que el polvo de Babuin estaba dominado por partículas de mayor tamaño y porosas, por lo que pasaba más luz que las de Perth. El polvo de Perth con formas angulares y diagonales tenía mejores propiedades ópticas que la de Babuin con partículas elípticas y

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

esferoides. Como resultado, los valores de transmitancia de los dos tipos de polvo tienden a equilibrarse. Para una cantidad equivalente, el efecto del polvo de Babuin y Perth en la degradación del rendimiento de cada tecnología fotovoltaica fue similar. Además, las curvas espectrales de transmitancia de los dos tipos de polvo eran bastante planas con respecto al rango de longitud de onda de las tecnologías pc-Si, a-Si y mc-Si. En consecuencia, el polvo de Babuin o Perth tiene efectos similares en las tres tecnologías fotovoltaicas (Tanesab et al., 2019).

- Se observó un estudio titulado: *Evaluación de las fuerzas de adhesión entre partículas de polvo y superficies de módulos fotovoltaicos*, en donde se habló sobre la suciedad de los módulos fotovoltaicos (FV), motivo de preocupación creciente debido al efecto adverso de la acumulación de polvo en el rendimiento y la fiabilidad de la FV. En este trabajo, se informó sobre cuatro fuerzas de adhesión fundamentales que tienen lugar en la primera etapa del proceso de ensuciamiento. Estas son fuerzas capilares, van der Waal, electrostáticas y gravitacionales. Se encontró que, bajo una humedad relativa alta, el mecanismo de adhesión entre las partículas de polvo y las superficies de los módulos fotovoltaicos está dominado por la fuerza capilar, mientras que la fuerza de van der Waal domina en condiciones secas. Además, los datos de campo reales para largos períodos de suciedad sobre paneles solares en Qatar se investigaron y resultaron en proponer una nueva función sigmoide modificada que predice un valor de inflexión de humedad relativa en el que la transición en la tasa de deposición de materia particulada tiene lugar de valores bajos a altos. Además, el efecto de la rugosidad de la superficie se investigó

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

midiendo la fuerza de adhesión sobre el vidrio limpio en comparación con los sustratos que están recubiertos con películas delgadas de titania antipolvo desarrolladas internamente (Isaifan et al., 2019).

- Se analizó una investigación denominada *Investigaciones experimentales sobre la limpieza fotovoltaica de plantas de energía solar a gran escala en climas desérticos: comparación de técnicas de limpieza para la adaptación de drones*, este estudio investiga experimentalmente la efectividad de varias técnicas de limpieza fotovoltaica para la posible adaptación en vehículos aéreos no tripulados, drones, para operaciones de limpieza de plantas de energía solar a gran escala en climas desérticos. El objetivo final de este estudio es mejorar la eficiencia, reducir el costo, el tiempo y el impacto ambiental de las técnicas de limpieza integrándolas con la limpieza autónoma de drones para asegurar la rentabilidad y la competitividad de las instalaciones de energía solar fotovoltaica. Este estudio considera los siguientes factores: (I) efectividad de la limpieza (cambio en la producción de potencia en W y%), (II) frecuencia de limpieza (diaria, semanal y mensual), (III) costo total de la limpieza (USD / m2), (IV) adaptabilidad al dron, (V) consumo de energía, y (VI) peso. Las técnicas de limpieza probadas por su efectividad y costo general son (1) limpiadores de tela, (2) cepillos, (3) aspiradoras y (4) algunas combinaciones. La frecuencia de limpieza varía de 1 día a intervalos de 1 mes para encontrar el período de limpieza óptimo. Los resultados de este estudio muestran que hay una reducción significativa en la eficiencia de la energía fotovoltaica y, por lo tanto, un aumento en el costo de la electricidad producida, para periodos de limpieza mensuales, independientemente de la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

técnica de limpieza en condiciones de clima desértico. El limpiador de tela basado en microfibras es el método óptimo desde el punto de vista del costo y el rendimiento. El limpiador de tela basado en microfibra logró una mejora en el rendimiento promedio de 7.7% y 3.1% (en comparación con el panel de control) para la frecuencia de limpieza semanal en las temporadas de invierno y verano, respectivamente. También se llevó a cabo la evaluación del reacondicionamiento de drones, lo que hizo que el cepillo y el paño de microfibra con su bajo peso, tamaño pequeño y facilidad de uso sean las opciones más adecuadas para la limpieza de paneles solares basados en drones. Los factores de evaluación para el limpiador de tela con microfibra se encuentran en (I) 3.1% para la efectividad de limpieza en verano, (II) 1 semana para la frecuencia de limpieza, (III) 0.41 USD/m^2 para el costo total de limpieza, (IV) 9.5 (de 10) para la adaptabilidad al dron, (V) 10 (de 10) para el consumo de energía y (VI) 9 (de 10) para el peso (Al-Housani et al., 2019).

- El estudio titulado: *Estudio experimental del efecto del polvo en el rendimiento energético de los paneles fotovoltaicos*, investigó el efecto del polvo en el comportamiento eléctrico y térmico de los paneles fotovoltaicos. Para este fin, se consideraron varios tipos de polvos. Lo que condujo a diferentes comportamientos de panel en los aspectos térmico, óptico y eléctrico. De hecho, se ha demostrado que la transmisión de luz varía con el tipo de polvo. Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio que utilizan varios instrumentos como microscopio, espectrofotómetro, analizador de módulos fotovoltaicos I-V y registrador de datos equipado con termopares. Los resultados obtenidos muestran que las variaciones en los parámetros físicos (tamaño y tipo de

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

grano), el nivel de transmisión de luz y la temperatura de acristalamiento llevaron a un cambio en el rendimiento del panel fotovoltaico (PV) (Abderrezek & Fathi, 2017).

- En el trabajo: *Estudio experimental sobre el efecto de la deposición de polvo en paneles fotovoltaicos*, describe que, en los últimos años, la energía fotovoltaica ha sido considerada una de las principales formas de resolver la actual crisis energética. Los paneles fotovoltaicos (PV) se construyen generalmente en áreas expuestas como desiertos y terrenos baldíos. Y la eficiencia de la generación de energía fotovoltaica se ve afectada fácilmente por el polvo acumulado en ella. La investigación expuso los "tres factores" del efecto del polvo en los paneles fotovoltaicos, a saber, el efecto de protección, el efecto de la temperatura y el efecto de la corrosión, luego se propuso un método de evaluación de la eficiencia de las células fotovoltaicas. Finalmente, los experimentos de campo mostraron que, con el aumento de la densidad del polvo, la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la potencia de salida del panel fotovoltaico disminuyeron. El polvo con una densidad de 10 g/m^2 pudo reducir la potencia máxima del panel fotovoltaico en aproximadamente un 34%. En la etapa inicial de la acumulación de polvo fotovoltaico, el polvo tuvo el mayor impacto en su rendimiento de salida. Además, la densidad del polvo y la eficiencia de conversión tuvieron una mejor correlación no lineal. A medida que la densidad de acumulación de polvo aumentó gradualmente, la eficiencia de conversión de PV disminuyó gradualmente. Cuando la densidad del polvo aumentó hasta cierto punto, la eficiencia de conversión de PV tendió a ser estable (Y. Chen et al., 2019).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

- El estudio titulado: *El efecto de la acumulación de polvo y los métodos de limpieza en los resultados de los paneles fotovoltaicos basados en un estudio experimental de seis ubicaciones en el norte de Omán*, investigó sobre el problema que atraviesa La Sultanía de Omán, similar a otros países del CCG, la cual se ve afectada por la fluctuación de los precios del petróleo, lo que llevó a los tomadores de decisiones en este país a avanzar hacia las energías renovables y, en particular, al establecimiento de plantas de energía solar fotovoltaica (PV). Este paso requiere un estudio exhaustivo antes de gastar millones de dólares para construir tales centrales eléctricas. Dado que el polvo es uno de los principales problemas de los paneles fotovoltaicos en los países del CCG, este estudio investigó la influencia de ciertos factores climáticos, como la velocidad del viento, la humedad relativa en la acumulación de polvo y el efecto del método de limpieza aplicado a cada ciudad por separado, después de un año completo de observación y recopilación de datos sobre las condiciones climáticas y la producción de los seis sistemas instalados y utilizados en este estudio, se encuentra que las ciudades de Liwa y Sohar, seguidas por Mascate, exhiben el mayor porcentaje de polvo y contaminantes. Los contaminantes más prominentes son los materiales particulados (PM) de las chimeneas de las centrales eléctricas y las fundiciones en la ciudad industrial de Sohar. Además, el movimiento de un número considerable de vehículos en Mascate provocó un aumento en la concentración de PM depositadas en las células fotovoltaicas. Para las otras tres ciudades (Al-Khabourh, Suwaiq y Shinas), las cuales están lejos de cualquier zona industrial, y debido a la reducción del tráfico, el porcentaje de acumulación de polvo y contaminación de las células fotovoltaicas fue limitado, se han

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

utilizado nueve métodos disponibles para limpiar las células fotovoltaicas después de acumular el polvo durante un mes. De estos métodos, se encuentra que el uso de agua es suficiente para lavar las células fotovoltaicas en las ciudades de Al-Khaburah, Shinas y Al-Suwaiq, pero el efecto de la limpieza es más reducido en Sohar, Liwa y Mascate. Debido al PM y a muchos compuestos químicos, el uso de una solución de sodio fue la mejor opción para limpiar las células fotovoltaicas de estas tres ciudades. Se observó que la pérdida de productividad de las células solares disminuye durante la temporada de lluvias, lo que actúa como un limpiador natural para el PV. El estudio también encontró que el rocío en las ciudades estudiadas antes del amanecer provoca la interacción de algunas sales de sodio, magnesio y calcio y crea una capa de sales cohesivas, que son difíciles de limpiar (Kazem & Chaichan, 2019).

2.2. Bases Teóricas de la Investigación

2.2.1. Energía Eléctrica

Se puede definir como el movimiento de electrones hacia otros átomos cargados positivamente, este movimiento ocurre cuando los electrones ubicados en la última órbita del átomo se desprenden temporalmente, ya que se ubican alejados del núcleo en donde se encuentran los protones, existiendo una menor atracción entre cargas, es ahí donde los electrones empiezan a

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

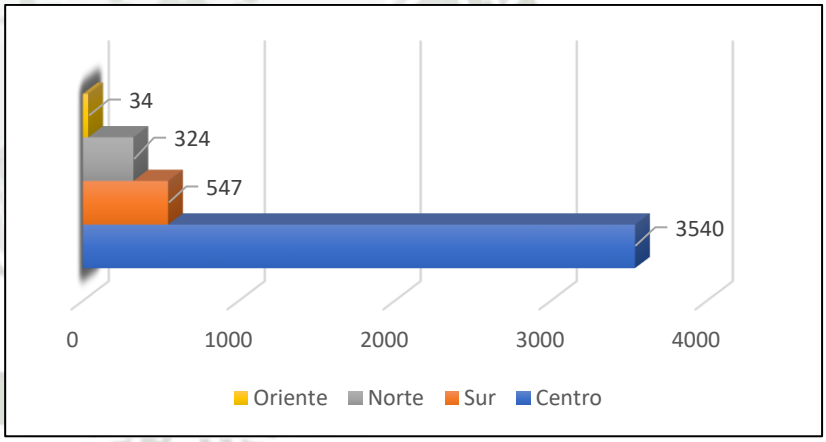
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

llamarse electrones libres. Este movimiento es el que produce energía eléctrica (Demirel, 2021).

La energía se puede generar a partir de diferentes fuentes, las cuales están clasificadas según su origen, pueden ser renovables o no renovables. En la presente investigación nos enfocaremos en las energías renovables, específicamente en la energía fotovoltaica (OSINERGMIN, 2019a).

Figura 3 Producción eléctrica por zona y origen en el

Producción eléctrica por zona y origen en el país (GWh)



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2021)

Nota. Como se aprecia en la Figura 3, la producción eléctrica en el Centro del país fue líder con 3540 GWh generados, por otro lado, en el Oriente del país, fue la zona con menor energía eléctrica generada.

En la Figura 3, se representa la producción energética en las cuatro zonas del país en el mes de febrero de 2021. Donde se aprecia que la producción se concentra en la zona central con

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

3,540 GWh, el cual representa el 80% del total, en la Figura 4 se puede observar que el 30% se obtiene por medio de energía térmica y el restante por energía hidráulica. Por otro lado, en la zona oriente del país, existe una producción total de 34 GWh, el cual representa el 0.76% del total, y tal como se observa en la Figura 4 el 100% proviene de energía térmica (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

Asimismo, en la Figura 4 se puede apreciar que en la zona norte y en la zona sur se utiliza energía eólica en un 21% y 9% del total de cada zona correspondiente, generando 114 GWh en febrero como se muestra en la Tabla 1, mientras que la energía solar solo es usada en el sur de Perú con un 12% produciendo 64 GWh en el mes mencionado (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

Tabla 1: Producción Energética según Tipo y

Producción Energética según Tipo y Zona en GWh

	Térmica	Hidráulica	Eólica	Solar	Referencia
Oriente	34	-	-	-	(Ministerio de Energía y Minas, 2021)
Centro	1063	2479	-	0.01	
Norte	111	139	65	-	
Sur	46	395	49	64	
Total	1255	3012	114	64	4445

Fuente: Propia

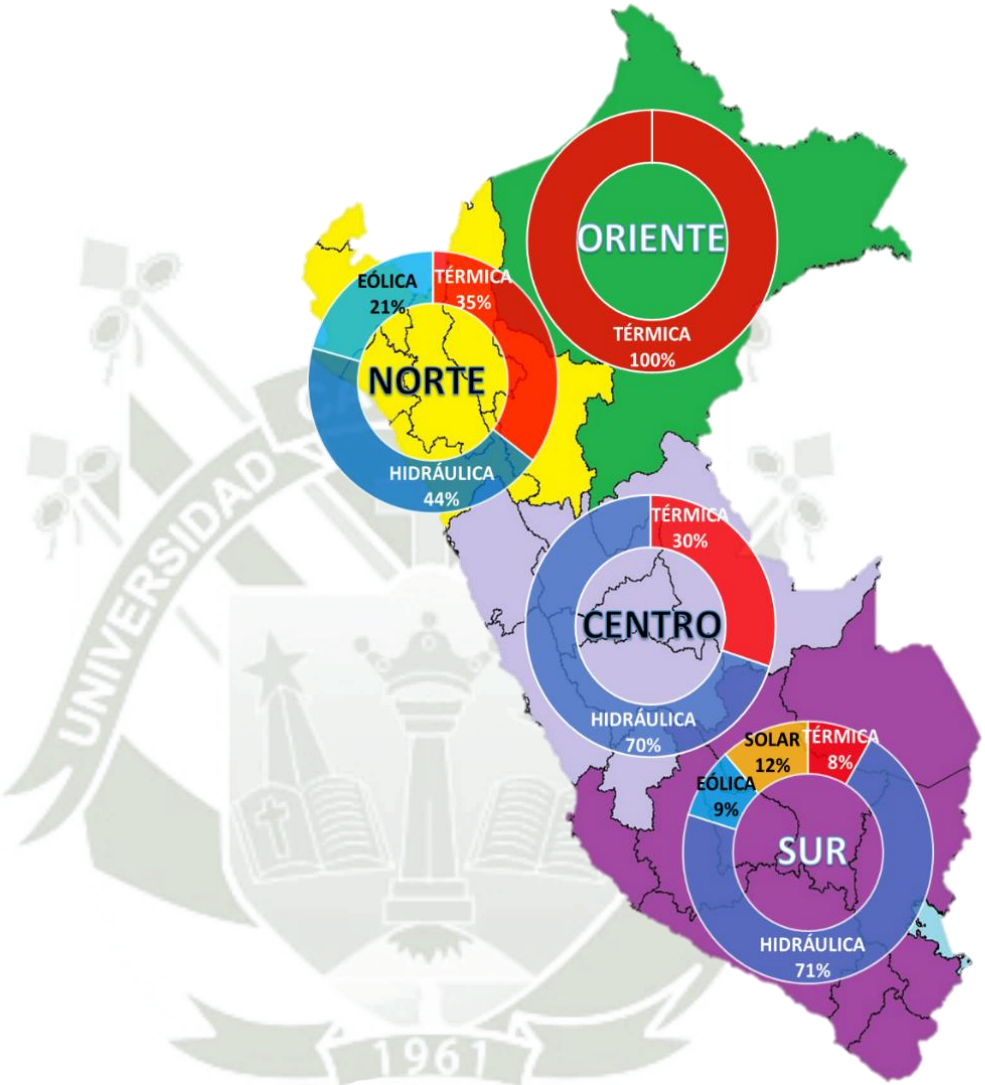
Nota. Producción energética en Perú según zona Oriente, Centro, Norte, y Sur de acuerdo a la forma en cómo esta se ha generado ya sea por medio de energía térmica, hidráulica, eólica y solar.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 4

Valor Porcentual del Tipo de Energía Usada según Zona



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2021)

Nota. La figura mostrada muestra el tipo de fuente de generación eléctrica usada en cada sector de Perú. Así como también, el porcentaje de utilización de cada fuente en la zona Norte, Oriente, Centro y Sur.

En la Tabla 2 observamos un ranking de las tres regiones de mayor producción eléctrica a nivel nacional comparado con la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

región arequipeña, que es donde se desarrollará la investigación científica, donde esta se encuentra en el puesto 11 de las 25 regiones de Perú a pesar de tener una caída del 20% en cuanto producción energética en el lapso de un año (Ministerio de Energía y Minas, 2021).

Tabla 2

Producción Energética por Región y Variación Porcentual

Puesto	Región	Febrero		Δ	Enero-Febrero		Δ
		2020	2021		2020	2021	
1	Lima	1643	1587	-3%	3291	3072	-7%
2	Huancavelica	911	915	0%	1935	1924	-1%
3	Junín	306	302	-1%	645	624	-3%
11/25	Arequipa	120	96	-20%	232	219	-6%

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas, 2021)

Nota. La tabla mostrada muestra la producción energética por región en el mes de febrero de 2021 en GWh, donde Lima, Huancavelica y Junín se posicionan como las mayores regiones productoras de electricidad.

2.2.1.1. Energía No Renovable

Son todas aquellas fuentes de energía que se encuentran de manera limitada en el planeta Tierra. Estos se han formado a partir de la descomposición de seres vivos, tanto del reino animal

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

como del vegetal, a causa de la acción de temperatura y presión sobre sus componentes biológicos.

En Perú destacan; el carbón, gas natural, y el petróleo, como fuentes de energía no renovable. Mediante la Tabla 3 se puede explicar la tasa de emisión de CO_2 por cada fuente energética no renovable (Demirel, 2021).

Tabla 3: Tasa de Emisión según Fuente No Renovable

Tasa de Emisión según Fuente No Renovable de Energía

Fuente No Renovable	Tasa de Emisión	Referencia
Carbón Vegetal	403.17 $kgCO_2/MWh$	(MINAM, 2016)
Gas Natural	201.94 $kgCO_2/MWh$	
Petróleo Industrial	263.86 $kgCO_2/MWh$	
Queroseno	258.82 $kgCO_2/MWh$	
Gasohol 84/90/95/97/98	230.01 $kgCO_2/MWh$	
Gasolina	249.46 $kgCO_2/MWh$	
Gas Licuado de Petróleo	227.14 $kgCO_2/MWh$	
Biomasa	359.97 $kgCO_2/MWh$	
Diésel D2	266.74 $kgCO_2/MWh$	
Diésel DB5	253.40 $kgCO_2/MWh$	

Nota. La Tabla 3 explica la tasa de emisión de $kgCO_2$ por cada MWh generado por fuentes no renovables según información revelada por el Ministerio del Ambiente Peruano.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Es importante mencionar que la combustión de energías no renovables genera la emisión de gases y partículas nocivas para el medio ambiente y para el ser humano como lo es el CO_2, SO_2, NO_2, NO_3 (Demirel, 2021).

Figura 5

Central Eléctrica de Hidrocarburos

Fuente: División de Supervisión de Gas Natural (2020)

Nota. En la Figura 5 se muestra una Central Eléctrica de Hidrocarburos la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes no renovables.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 6

Plataforma Petrolera de la Empresa Savia

Fuente: Sociedad Nacional de Minería - Energía y Petróleo (2021)

Nota. En la Figura 6 se muestra una Plataforma Petrolera de la Empresa Savia la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes no renovables.

Figura 7 *Ingenieros de una Planta Petrolera de*

Ingenieros de una Planta Petrolera de la Empresa Savia

Fuente: Sociedad Nacional de Minería - Energía y Petróleo (2021)

Nota. En la Figura 7 se muestran ingenieros de operaciones en una Planta Petrolera de la empresa Savia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 8

Planta de Gas Natural Pluspetrol

Fuente: Sociedad Nacional de Minería - Energía y Petróleo (2021)

Nota. En la Figura 8 se muestra una Planta de Gas Natural de la Empresa Pluspetrol la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes no renovables.

2.2.1.2. Energía Renovable

Es aquella energía que proviene de fuentes inagotables que se encuentran en la naturaleza. El 2008 cerca del 19% de la utilización energética global fue suministrada por energías renovables, en donde el 13% era a partir del uso de biomasa. En la actualidad esto está cambiando, y tanto la energía solar fotovoltaica como la eólica están creciendo rápidamente y

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

tomando mayor importancia gracias a los factores mencionados a continuación:

- Apoyo por parte del gobierno a el cambio de una matriz energética renovable.
- Toma de conciencia frente al problema del cambio climático.
- Precio elevado de los combustibles fósiles a medida que pasa el tiempo, caso contrario con lo que ocurre con el uso de energías renovables.

Sin embargo, hoy en día las nuevas fuentes de energía renovables están siendo investigadas, en las cuales destacan la energía geotérmica y oceánica. Una ventaja a destacar, es la facilidad de generación energética para abastecer lugares remotos (Demirel, 2021). Las energías renovables pueden ser las siguientes: Hidroenergía, Biomasa, Eólica, Geotérmica, Oceánica y Solar.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 9

Mini Hidroeléctrica Huahuahuasi Ancash-Perú

Fuente: OSINERGMIN (2019a)

Nota. En la Figura 9 se muestra la Mini Hidroeléctrica Huahuahuasi ubicada en Ancash-Perú la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

Figura 10

Central Termoeléctrica Biomasa Huaycoloro Callao-Perú

Fuente: OSINERGMIN (2019a)

Nota. En la Figura 10 se muestra la Central Termoeléctrica Biomasa Huaycoloro ubicada en Callao-Perú la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 11

Planta Eólica Tres Hermanas Ica, Perú

Fuente: OSINERGMIN (2019a)

Nota. En la Figura 11 se muestra la Planta Eólica Tres Hermanas ubicada en Ica-Perú la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

Figura 12 Central Geotérmica de 120 MW

Central Geotérmica de 120 MW en Islandia

Fuente: Stober & Bucher (2013)

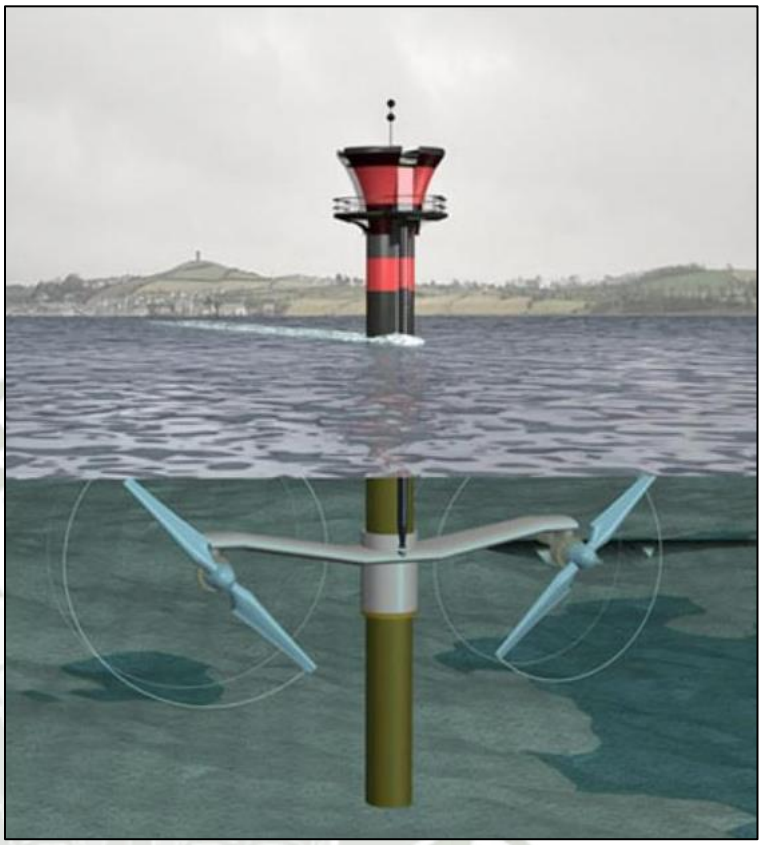
Nota. En la Figura 12 se muestra una Central Geotérmica de 120 MW ubicada en Islandia la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 13

Sistema Generador de Energía Oceánica



Fuente: (OSINERGMIN, 2017)

Nota. En la Figura 13 se muestra un Sistema Generador de Energía Oceánica el cual produce energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

- **Energía Solar**

Es capaz de absorber la irradiancia solar a través de células solares, pueden ser caracterizadas como tecnologías solares pasivas y activas. Las técnicas solares activas funcionan en conjunto con colectores térmicos, los cuales almacenan los

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

fluidos o gases previamente calentados por paneles solares, los cuales circulan a través de tubos o cables en el interior del panel. Por otro lado, el sistema solar pasivo funciona sin un colector solar térmico, para aprovechar la gravedad y el curso del agua para que circule naturalmente (Demirel, 2021).

Figura 14 Central Fotovoltaic

Central Fotovoltaica Tacna Solar Tacna, Perú

Fuente: OSINERGMIN (2019a)

Nota. En la Figura 14 se muestra la Central Fotovoltaica Tacna Solar Tacna ubicada en Tacna-Perú la cual genera energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

- **Sistema Termosolar de Generación Eléctrica**

Su función esta inclinada al uso de colectores cilindro parabólicos, cuenta con seguimiento solar permitiendo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

dirigir la luz solar hacia un tubo por donde transcurre un aceite sintético, el cual es calentado hasta alcanzar 400 °C. Mediante esta generación de calor es posible producir energía a través de la evaporación del agua para así mover una turbina de vapor (Demirel, 2021).

Figura 15

Colector Termosolar Compacto

Fuente: Salcedo & Trigoso (2011)

Nota. En la Figura 13 se muestra un Colector Termosolar Compacto el cual produce energía térmica.

2.2.1.2.1. Decreto Legislativo N° 1002

La ley de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables nos trae

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

beneficios como la implementación de un marco de fomento a la inversión privada, eliminación de barreras a esta actividad energética, preservación del medio ambiente, por lo que contribuye a alcanzar efectos positivos para el país y el mundo, trayendo consigo mayor seguridad en la disponibilidad de energía; "es necesario dictar incentivos para promover la inversión en la generación de electricidad con el uso de fuentes de energía renovable, incentivar la investigación científica e innovación tecnológica, además de la realización de proyectos que califiquen como Mecanismos de Desarrollo Limpio y, de obtener éstos su registro, los respectivos Certificados de Reducción de Emisiones - CRE pueden ser negociables con empresas de los países industrializados que contabilizarán estas reducciones de GEI como parte de las metas cuantitativas a que se comprometieron con el Protocolo de Kyoto" (Congreso de la República de Perú, 2008).

2.2.2. Energía Fotovoltaica

Es una fuente de energía renovable, capaz de aprovechar la irradiancia solar y generar energía eléctrica gracias a las células solares las cuales, al estar agrupadas, entre aproximadamente 60 a 72 células, se llega a conocer a ese conjunto como módulo fotovoltaico. Los módulos fotovoltaicos más comunes son de

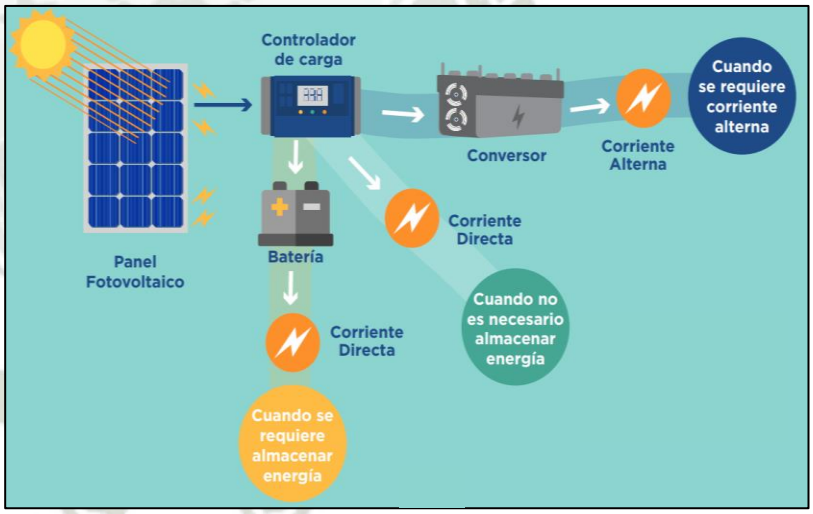
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

silicio monocristalino y policristalino, teniendo como eficiencias 15% y 12%, respectivamente (Demirel, 2021; Meral & Dinçer, 2011). Cabe mencionar que el panel fotovoltaico genera corriente continua (DC), por lo que, si se desea unir a la red, se debe convertir la corriente mediante un inversor para obtener corriente alterna (AC), de lo contrario, se puede alimentar de manera directa a una batería para su almacenamiento (Demirel, 2021).

Figura 16

Diagrama de un Sistema Fotovoltaico



Fuente: Pasos et al. (2018)

Nota. En la Figura 16 se visualiza un Diagrama de un Sistema Fotovoltaico conformado principalmente por un panel fotovoltaico, un controlador de carga, una batería y un conversor.

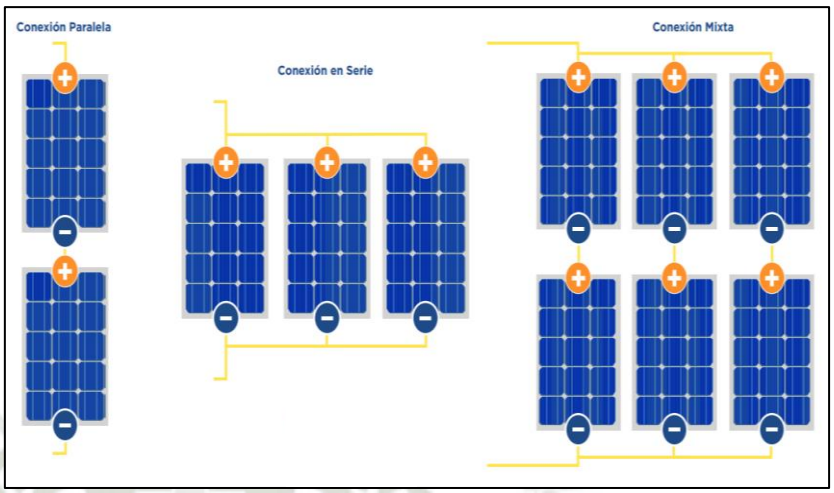
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 17

Tipos de Arreglos o Arrays de Paneles Fotovoltaicos



Fuente: Pasos et al. (2018)

Nota. En la Figura 17 se aprecian los Tipos de Arreglos o Arrays de Paneles Fotovoltaicos siendo los principales la Conexión Paralela, en Serie y Mixta.

La potencia de salida de los paneles solares fotovoltaicos se puede aumentar de manera considerable cuando se usa un arreglo o array de paneles, lo que permite sumar la potencia por cada panel fotovoltaico individual. Esta conexión puede estar en serie, paralelo o mixta (Pasos et al., 2018).

- **¿Cómo se Genera la Energía Eléctrica en una Célula Solar?**

  Según (Meral & Dinçer, 2011; Sharma et al., 2021) el flujo de electrones empieza cuando los fotones provenientes del

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

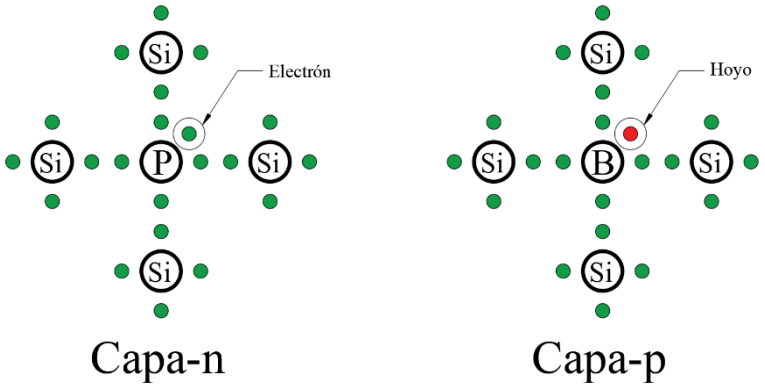
sol, a través de paquetes de energía, impactan en la superficie de la célula solar de silicio cargada negativamente (Capa-n), gracias a una molécula de fosforo con un electrón libre. La Capa-n colinda con una placa de carga positiva (Capa-p), compuesta por una molécula de boro la cual tiene un espacio para un electrón. Cuando estas se unen, algunos electrones de la Capa-n migran a la Capa-p, y al reaccionar con los fotones, en la unión de las capas se produce una región de agotamiento la cual genera hoyos y electrones libres, por efecto de cargas los electrones se sitúan en la Capa-n y los hoyos en la Capa-p. Su posición permite la existencia de una diferencia de potencial, por ende, para poder generar un flujo de electrones entre estas dos capas se necesita un material conductor, por ejemplo, el alambre de cobre. Al ser añadido, se da como resultado la existencia de corriente eléctrica continua (DC) del polo negativo al polo positivo. Actualmente la Capa-p es mayor a la capa-n con el objetivo de obtener una región de agotamiento más grande, y así generar mayor número de hoyos y electrones libres, que al ser conducidos por un material conductor, se permite desarrollar la fuerza motriz capaz de mover un motor.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 18

Capa-n y Capa-p de una célula solar

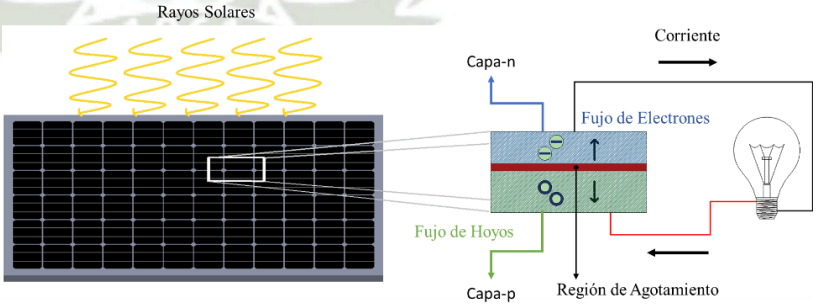


Fuente: Propia

Nota. En la Figura 18 se explica cómo la placa de carga negativa (Capa-n) colinda con una placa de carga positiva (Capa-p) para generar energía eléctrica en una célula solar de silicio.

Figura 19 Efecto Fotovoltaico en una Cé

Efecto Fotovoltaico en una Célula Solar



Fuente: Propia

Nota. En la Figura 19 se visualiza el flujo de electrones debido a la interacción de las Capas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

- **Batería**

Es aquel material capaz de almacenar energía eléctrica como energía química y asimismo transformar la energía química guardada, nuevamente en energía eléctrica. Estas son muy útiles como energía portátil, destacando su uso en dispositivos inalámbricos, automóviles y sobre todo en el almacenamiento de energía fotovoltaica (Demirel, 2021).

Figura 20. Unidades de Batería Conectadas en Serie

Unidades de Batería Conectadas en Serie

Fuente: Louie (2018)

Nota. En la Figura 20 se muestran baterías conectadas en serie. Este elemento es uno de los principales ítems del sistema fotovoltaico.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

- **Inversor de Corriente Eléctrica**

Elemento que tiene la funcionalidad de convertir Corriente Continua (DC) a Corriente Alterna (AC). Es capaz de poder hallar la máxima potencia de salida (Kjaer et al., 2002).

Figura 21

Inversor de Corriente DC-AC

Fuente: Espinoza et al. (2019)

Nota. En la Figura 21 se muestra un Inversor de Corriente DC-AC el cual es uno de los principales elementos de un sistema fotovoltaico.

2.2.2.1. Eficiencia Energética Fotovoltaica

Es la medida porcentual de la relación existente en un panel fotovoltaico entre la potencia de entrada y la potencia de salida, ambas medidas en Watts (Demirel, 2021).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 \qquad \textbf{(1)}$$

Donde:

P_{OUT} = Potencia de Salida (W)

P_{IN} = Potencia de Entrada (W)

η = Eficiencia (%)

A continuación, se muestra la Tabla 5, donde se aprecia una comparación de las células solares existentes y su eficiencia energética:

Tabla 4

Avances tecnológicos en células solares

Tipo de Célula Solar	Eficiencia aproximada (η)	Referencia
Célula Solar Orgánica (OSC)	18.22%	Sharma et al. (2021)
Nanocristales o Puntos cuánticos (QD)	16.6%	
Células Solares Concentradas (CPV)	38.9%	
Célula Solar Transparente (TSC)	4.23%	
Perovskita (PSC)	25.2%	
Célula Solar de Silicio Monocristalina	15%	Meral & Dinçer (2011)
Célula Solar de Silicio Policristalina	12%	

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Tipo de Célula Solar	Eficiencia aproximada (η)	Referencia
Célula Solar de Silicio Amorfa	6%	Meral & Dinçer (2011)

Nota. En la Tabla 4 se muestra la eficiencia entregada por cada tipo de célula solar.

2.2.2.2. Potencia Eléctrica

Definido como la velocidad de la corriente eléctrica que se entrega a un circuito eléctrico (Demirel, 2021).

$$P = VI \quad \textbf{(6)}$$

Donde:

P = Potencia Eléctrica (W)

V = Voltaje (V)

I = Intensidad de Corriente (A)

2.2.2.3. Factor de Carga (FF)

Es la relación de la potencia pico de salida con el producto de la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto, esta última representa el valor máximo de salida otorgado por un panel fotovoltaico. El factor de carga del panel fotovoltaico será

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

directamente proporcional a la eficiencia del módulo, por lo que el material particulado depositado podría afectar dichos valores (Y. Chen et al., 2019).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad \textbf{(7)}$$

Donde:

P_{max} = Potencia Eléctrica Pico de Salida (W)

V_{oc} = Voltaje de Circuito Abierto (V)

I_{sc} = Intensidad de Cortocircuito (A)

2.2.3. Irradiancia Solar

Definida como la energía incidente sobre el área de una superficie en un determinado periodo de tiempo. Su unidad de medida es kWh/ m^2 (Sengupta et al., 2017). Este dato se puedo obtener mediante un piranómetro.

2.2.3.1. Irrandiancia Normal Directa (DNI)

Es el valor de la irradiancia medida desde una superficie ligeramente inclinada y centrada en un ángulo solido en dirección al sol, el instrumento de medición utilizado es un pirheliómetro (Sengupta et al., 2017).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2.2.3.2. Irradiancia Horizontal Difusa (DHI)

Es el valor obtenido de la irradiancia dispersa, en cualquier dirección vectorial con excepción del valor obtenido por la Irradiancia Normal Directa (DIN). Cabe mencionar que el impacto de las nubes en el resultado no es preciso ya que varían en cuanto sus propiedades ópticas, en el caso de que estas fueran homogéneas y únicas, la precisión del dato DHI incrementaría (Sengupta et al., 2017).

2.2.3.3. Irradiancia Horizontal Global (GHI)

El valor de la irradiancia sobre una superficie horizontal es la suma de la irradiancia horizontal difusa (DHI) y la irradiancia normal directa (DNI). Este valor es el fundamental para el análisis y el diseño de sistemas fotovoltaicos, su instrumento de medición es el piranómetro (Sengupta et al., 2017).

2.2.3.4. Albedo

Según (Raina & Sinha, 2020), el albedo es el porcentaje de luz solar reflejada por el suelo y dirigida hacia el panel. La intensidad del albedo varía de forma directamente proporcional a la irradiancia emitida por el sol. Mediante el uso de un piranómetro, es posible obtener la irradiancia reflejada, por lo que dividiendo este último valor entre la irradiancia global

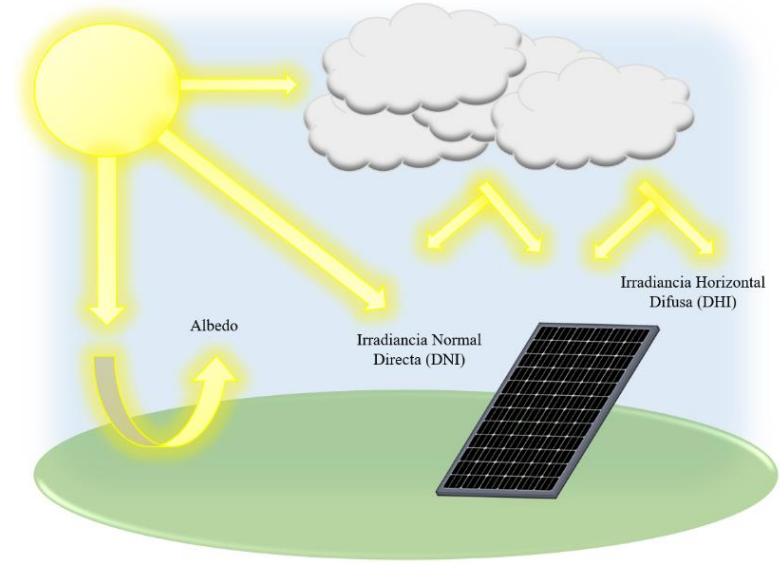
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

horizontal (GHI), es posible obtener el albedo (Sengupta et al., 2017).

Figura 22

Tipos de Irradiancia Solar



Fuente: Propia

Nota. En la Figura 22 se aprecian los Tipos de Irradiancia Solar siendo las principales el Albedo, Irradiancia Normal Directa y la Irradiancia Horizontal Difusa.

2.2.4. Material Particulado

Es materia medida en micrómetros, la cual puede encontrarse en el ambiente como sedimento, o en suspensión, a causa de erosión de rocas, movimiento de tierras, fenómenos naturales o acción geológica del viento (Li et al., 2020; Rivera Mantilla, 2011).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

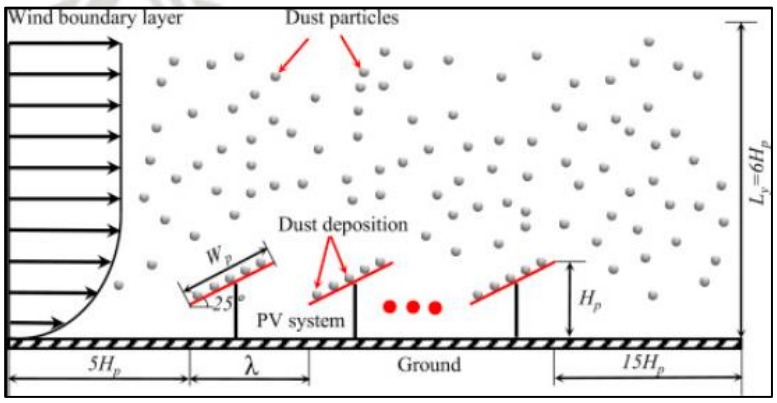
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

La deposición de material particulado sobre la superficie del panel fotovoltaico afecta en la eficiencia energética. Se ha demostrado en estudios que en ciertas zonas geográficas la concentración de polvo en un panel puede reducir en un 80% la potencia de salida (Fountoukis et al., 2018). Por otro lado, las partículas sedimentadas pueden intervenir en la transmitancia del panel, haciendo que varíe la irradiancia aprovechable por el módulo fotovoltaico (Li et al., 2020).

Los elementos comunes encontrados en el polvo son: calcio (Ca), silicio (Si), hierro (Fe), magnesio (Mg), aluminio (Al), titanio (Ti), potasio (K), sodio (Na), azufre (S) y cloro (Cl) (Isaifan et al., 2019).

Figura 23 Representación Gráfica de

Representación Gráfica de la Deposición de PM



Fuente: Lu & Zhang (2019)

Nota. En la Figura 23 se muestra la dispersión de PM en un ambiente de sistemas fotovoltaicos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

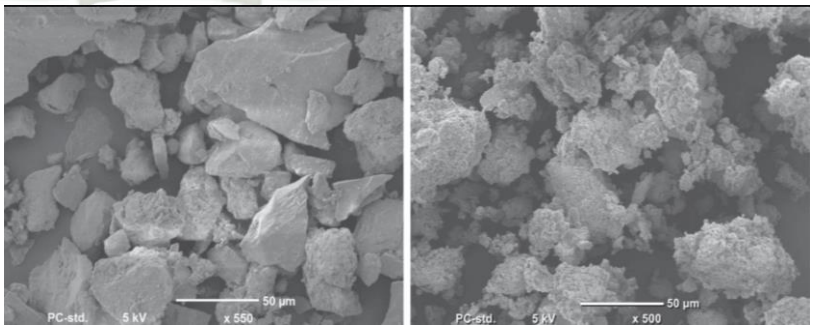
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2.2.4.1. Tamaño de Partículas

La forma de las partículas suele ser amorfa y su tamaño se presenta de forma variable según la ubicación del estudio, algunas investigaciones comentan que el diámetro del material particulado sedimentado sobre la superficie del panel fotovoltaico puede variar entre 0 y 500 µm (Tanesab et al., 2019). Asimismo, existe una relación directamente proporcional entre el tamaño del polvo y la eficiencia del panel fotovoltaico, mientras más fina sea la partícula entonces el área de cobertura será mayor, provocando un déficit en el óptimo funcionamiento del módulo fotovoltaico (Liu et al., 2019; Lu & Zhang, 2019).

Figura 24 Apreciación del Material Particula

Apreciación del Material Particulado Vista desde un Microscopio



Fuente: Tanesab et al. (2019)

Nota. En la Figura 24 se observa una vista microscópica de material particulado de 50µm.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2.2.4.2. Reflexión de Irradiancia Solar Incidente

Dependiendo de la composición química del material particulado se conocerá si la irradiancia puede transmitirse hacia la superficie del panel fotovoltaico, ya que puede existir una sombra formada por el polvo que impida la aceptación efectiva de la luz solar (Y. Chen et al., 2019; Liu et al., 2019; Salari & Hakkaki-Fard, 2019). También, dentro de las propiedades ópticas del polvo, influye de manera directa la morfología y textura del mismo, encontrándose que las rugosas dispersan la luz en mayo grado que las lisas, no obstante, existen compuestos minerales como el carbón que asimilan la radiación solar de manera eficaz (Liu et al., 2019; Tanesab et al., 2019).

Figura 25

Efecto Sombra Causado por el Material Particulado Depositado Sobre el Panel Fotovoltaico

Fuente: Abderrezek & Fathi (2017)

Nota. En la Figura 25 se aprecia el efecto sombra y la forma en cómo el PM se deposita en la superficie de un panel fotovoltaico de estudio.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

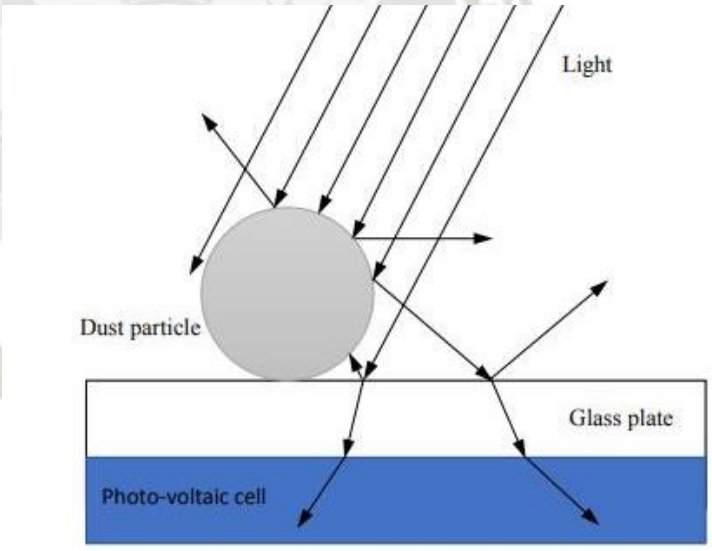
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2.2.4.3. Adhesión de Material Particulado

La adhesión se relaciona con la composición de las partículas, el tipo de superficie donde esta adherido el polvo y la calidad ambiental existente. Existen fuerzas capilares y gravitacionales en este fenómeno, sin embargo, este último depende del tamaño de partícula (Isaifan et al., 2019).

Figura 26

Material Particulado Adherido a la Superficie Evitando la Incidencia de Luz



Fuente: Isaifan et al. (2019)

Nota. En la Figura 26 se observa el efecto de la dispersión de la luz a causa de la presencia de PM sobre la superficie de un panel fotovoltaico.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

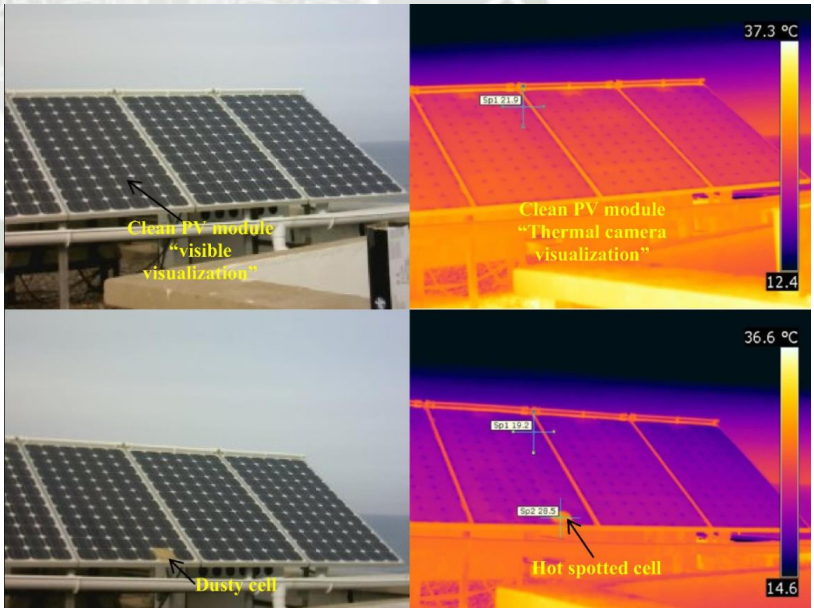
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2.2.4.4. Efecto de Punto Caliente

Se forma a partir de la acumulación parcial de material particulado sobre la superficie del panel fotovoltaico, no es homogénea por lo que se encuentra dispersada a lo largo de la superficie en diferentes formas. Los puntos calientes no permiten una correcta distribución de calor en la superficie, por lo que la alta temperatura focalizada afecta directamente los componentes electrónicos del módulo fotovoltaico y genera una condición subestándar para las personas (Y. Chen et al., 2019).

Figura 27 Comparación de Array Limpio vs Ar

Comparación de Array Limpio vs Array con Punto Caliente



Fuente: Abderrezek & Fathi (2017)

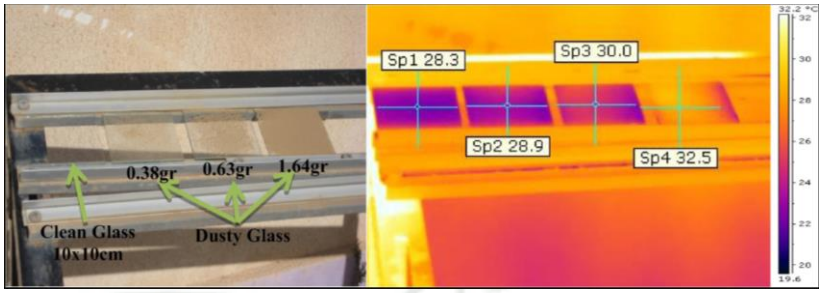
Nota. En la Figura 27 se observa la variación de temperatura a causa de la presencia de Hot Spots en la superficie de un panel fotovoltaico.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 28

Relación de la Cantidad Material Particulado con la Temperatura Provocada



Fuente: Abderrezek & Fathi (2017)

Nota. En la Figura 28 se aprecia el incremento de temperatura en la superficie de un material a causa de un punto caliente como consecuencia de la acumulación de PM.

2.2.5. Actividad Minera

Es el conjunto de procesos unitarios que permiten la extracción, movimiento, y venta de recursos minerales, los cuales generan beneficios económicos tanto a la empresa encargada de realizar dichas actividades, como a la región y país donde se encuentra el proyecto minero. Existen dos métodos de extracción de mineral; superficial y subterránea (Darling, 2011).

Es importante mencionar que, la actividad minera es una de las principales actividades que emite material particulado principalmente por la reducción de tamaño del material ya fragmentado a causa de la voladura. Asimismo, por acción del

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

viento el material particulado, puede trasladarse hacia zonas aledañas al proyecto minero (Peters et al., 2017).

2.2.5.1. Minería Superficial

Consiste en abrir de un agujero en la tierra. La mayoría de yacimientos son explotados mediante este método debido a que es más económico y también, porque los recursos minerales se encuentran cerca de la superficie terrestre y están dispuestos a ser extraídos de manera ininterrumpida (Darling, 2011).

Figura 29

Vista Panorámica de una Mina de Tajo Abierto

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 29 se observa un Open Pit ubicado en Perú.

2.2.5.2. Minería Subterránea

Es aquel que consiste en retirar de manera oportuna y segura, bloques de mineral, el cual suele ser de alta ley, ya que es un

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

procedimiento más costoso que el de la minería superficial. Se suele usar en yacimientos donde el mineral está dispuesto a varios metros debajo de la corteza terrestre (Darling, 2011).

Figura 30

Vista de un Túnel de una Mina Subterránea

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 30 se aprecia una galería de una mina subterránea ubicada en Perú.

2.2.5.3. Operaciones Mineras que Emiten Material Particulado

2.2.5.3.1. Perforación

Es la operación unitaria inicial para el proceso de conminución, el cual tiene como objetivo realizar agujeros en dirección horizontal, vertical o diagonal, que en su mayoría son cargados con explosivos. Existen diferentes tipos de perforación; para diseño, para producción y exploración (Darling, 2011). Sin embargo, estos tres vienen

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

acompañados de una alta generación de material particulado (Patra et al., 2016).

Figura 31

Equipo de Perforación en Minería Superficial

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 31 se muestra un equipo de perforación el cual emite PM durante su funcionamiento.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 32

Equipo de Perforación en Minería Subterránea

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 32 se observa un equipo de perforación para minería subterránea el cual emite PM durante su funcionamiento.

2.2.5.3.2. Voladura

Es la actividad encargada del proceso de conminución del material, la fragmentación de la roca sirve para facilitar la recuperación de mineral, una buena fragmentación conlleva a un ahorro económico considerable, ya que mientras menor

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

tamaño tenga la roca, menor energía se consumirá para reducirla aún más en procesos posteriores. Esta también ayuda en diseñar la forma que toma el tajo o la dirección del túnel (Darling, 2011). Cabe mencionar que la generación de material particulado en este proceso es elevada (Patra et al., 2016).

Figura 33 Voladura en el Frente

Voladura en el Frente de Trabajo en una Mina Superficial

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 33 se muestra una voladura de frente de minado en una operación superficial, esta emite PM durante su actividad.

2.2.5.3.3. Carguío y Acarreo

Es la encargada de cargar y llevar el material fragmentado hacia el lugar que se requiere, puede ser tanto a la zona de chancado y molienda, o a la zona de procesamiento de

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

mineral. Es importante que la selección de equipos sea de manera óptima, ya que los costos operativos de estos suelen representar un tercio del costo operativo total. Asimismo, la carga, el acarreo y la descarga deben ser controladas para así generar la mínima emisión de material particulado (Darling, 2011).

Figura 34 Equipos Usados para el

Equipos Usados para el Carguío, Acarreo y Descarga de Material

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 34 se observa el carguío y acarreo de material el cual emite PM alrededor de la actividad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

2.2.5.3.4. Chancado y Molienda

También conocido como proceso de comminución o trituración necesaria para la reducción de tamaño del macizo rocoso, lo que posteriormente contribuirá en la liberación de mineral existente en la roca. En cuanto molienda se distingue la autógena (AG) la cual consiste en que el mineral es triturado por sí mismo, la semiautógena (SAG) donde el mineral es triturado con la ayuda de pebbles y los rodillos de molienda de alta presión (HPGR) (Darling, 2011).

Figura 35 Chancadora Primaria

Chancadora Primaria

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 35 se muestra un chancador primario en operación minera, este emite PM durante su actividad.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO III

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Alcances y Limitaciones

El estudio posee un alcance explicativo ya que busca analizar el efecto que produce el material particulado sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos, por lo que se determinará una de las principales causas que ocasiona el efecto de perdida de captación energética (Patra et al., 2016).

Los bienes y materiales necesarios para la experimentación de la presente investigación; tales como cuatro paneles fotovoltaicos, cuatro reguladores solares, cuatro baterías en gel, multímetro, accesorios electrónicos y cables eléctricos; serán financiados por la Universidad Católica de Santa María, brindando el monto de S/. 30,000.00. El dinero restante se utilizará para los requerimientos de la segunda parte del proyecto. La experimentación necesaria para llevar a cabo el estudio se realizará en zonas aledañas a operaciones mineras en Arequipa.

La finalidad de este estudio es promover la utilización de un nuevo enfoque en el abastecimiento energético eco amigable en operaciones mineras (OSINERGMIN, 2019a), y conocer cómo es que el material particulado sedimentado es uno de los principales factores que afecta su funcionamiento.

Las limitaciones encontradas en el presente estudio fueron:

- Discontinuidad climática y complicado pronóstico a lo largo de los años.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

- Escaza investigación acerca del material particulado existente en operaciones mineras.
- Escaza implementación de energías renovables como la fotovoltaica en operaciones mineras en Perú.

3.2. Tipo y Nivel de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada ya que uno de los principales propósitos de estudio es analizar variables, utilizando información aportada por investigaciones previas, que intervengan en el óptimo funcionamiento de paneles fotovoltaicos y establecer definidamente lo que se desea mejorar o implementar en estudios relacionados a matrices energéticas de compañías mineras.

Asimismo, se considera experimental o evaluatoria el nivel del presente estudio, ya que más que buscar la relación o correlación entre las variables de estudio, se desea encontrar y analizar la reacción que ocurre al modificar el valor de las variables controlables, para mejorar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos ya que se pretende promover la instalación y óptimo funcionamiento de este tipo de energías renovables para abastecer operaciones mineras.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

3.3. Desarrollo Metodológico

La presente investigación es de tipo experimental ya que se aplicarán estímulos e intervenciones al panel fotovoltaico para analizar el material particulado y evaluar el rendimiento energético del mismo, por lo que se aplicarán parámetros experimentales a la variable independiente, en este caso el material particulado depositado en la superficie será retirado para evaluar la diferencia de potencia energética existente entre el PV limpio y el PV sucio. Por otro lado, la medida de la potencia de entrada (kWh) estará determinado por el valor máximo diario de irradiancia en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero ubicado en la provincia de Arequipa (KWph/m^2), dicho dato será extraído de plataformas internacionales validadas por el BM y la NASA (Atlas, 2021; NASA, 2021). Después, se medirá el efecto que causan las variables independientes sobre la variable dependiente, posteriormente se va a lograr la validez interna mediante el análisis del prototipo ubicado dentro de la ciudad de Arequipa**.**

Por estas razones este estudio es de experimentación pura, con diseño de preprueba, condición experimental, post prueba y grupo de control, este diseño elimina o descarta toda fuente de invalidación interna. Finalmente, se utilizará la correlación exponencial decreciente para poder aplicar la estadística y curva predictiva de las variables a estudiar.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1. Técnica de Adquisición Bibliográfica

La bibliografía e información se obtendrán de bases formales y reconocidas internacionalmente como artículos científicos, artículos de conferencia y revisiones bibliográficas como: Web of Science (WOS), ScienceDirect, IEEE, Springer, Scopus. Asimismo, se considerarán fuentes provenientes de entidades gubernamentales como: MINEM, MINAM, BID, OSINERGMIN, SNMPE, Congreso de la República de Perú.

3.4.2. Técnica de Adquisición de Equipos Experimentales

Es la forma de obtener los bienes y materiales necesarios para el desarrollo del proyecto de investigación, mediante el fondo otorgado por el Vicerrectorado de Investigación de la UCSM. Se seleccionó el tipo de panel fotovoltaico según factores de eficiencia por tipo de célula y performance de estas a distintas temperaturas. Por otro lado, la batería y el controlador de carga fueron seleccionados según el presupuesto del proyecto, recomendación del proveedor y aplicación en este estudio.

Los equipos adquiridos para la presente investigación son los siguiente:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

a) Panel Fotovoltaico Policristalino 100 Wp
b) Batería
c) Controlador de Carga
d) Sensor de Voltaje
e) Sensor de Corriente
f) Placa Arduino UNO
g) Shield Ethernet
h) LCD Keypad Shield
i) Cable Jumper Hembra-Macho
j) Módulo Regulador de Voltaje

3.4.2.1. Criterio de Selección de Panel Fotovoltaico

Para poder hallar el ángulo de inclinación óptimo del prototipo a posicionar en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero, se requiere hallar el ángulo de declinación del sol en el periodo en el que se realizará la experimentación. Por lo tanto, a continuación se muestra la ecuación propuesta por Spencer para poder completar el primer hito (Spencer, 1971).

$$\delta = 0.006918 - 0.399912\cos(\Gamma) + 0.070257\sin(\Gamma) - 0.006758\cos(2\Gamma) + 0.000907\sin(2\Gamma) - 0.002697\cos(3\Gamma) + 0.00148\sin(3\Gamma)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Donde:

δ = Ángulo de Declinación del Sol

Γ = Ángulo Diario en Radianes

Para poder hallar el ángulo diario en radianes, se debe tener en cuenta el número de día del año en el cual se realizó la experimentación. Para esto se utilizará la fórmula propuesta por (Kreith & Kreider, 1978).

$$\Gamma = \frac{2\pi(N-1)}{365}$$

Donde:

Γ = Ángulo Diario en Radianes

N = Número de Día del Año

El ángulo óptimo de inclinación del panel se determina tomando en cuenta la latitud local y el ángulo de declinación solar hallado previamente. Este ángulo óptimo viene dado por la fórmula propuesta en un estudio realizado por (Kalogirou, 2013). Cabe mencionar que el panel se ha ubicado en las coordenadas 16°25'51" S 71°31'16" W a una cota de 2353 m.s.n.m.

$$\alpha_n = 90 - L + \delta$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Donde:

δ = Ángulo de Declinación Solar (Grados)

L = Latitud Local (Grados)

α_n = Altura Solar al Medio Día

Finalmente la inclinación del panel que debe considerarse para esta investigación se halla mediante la siguiente fórmula. Cabe mencionar que se calculará un ángulo de inclinación adecuado para el tiempo en el que se realizará el presente estudio.

$$\beta_0 = 90 - \alpha_n$$

Donde:

β_0 = Ángulo de inclinación del panel

Tabla 5 Ángulo de Inclinación del Panel Fotovoltaico p

Ángulo de Inclinación del Panel Fotovoltaico para la Fecha Establecida de Análisis

N	Γ	δ	α_n	B_0
226.00	3.87	14.61	121.04	31.04
227.00	3.89	14.30	120.73	30.73
228.00	3.91	13.99	120.42	30.42
229.00	3.92	13.67	120.11	30.11
230.00	3.94	13.36	119.79	29.79
231.00	3.96	13.03	119.46	29.46
232.00	3.98	12.71	119.14	29.14
233.00	3.99	12.38	118.81	28.81

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

N	Γ	δ	α_n	B_0
234.00	4.01	12.05	118.48	28.48
235.00	4.03	11.71	118.14	28.14
236.00	4.05	11.38	117.81	27.81
237.00	4.06	11.03	117.46	27.46
238.00	4.08	10.69	117.12	27.12
239.00	4.10	10.34	116.77	26.77
240.00	4.11	9.99	116.42	26.42
241.00	4.13	9.64	116.07	26.07
242.00	4.15	9.29	115.72	25.72
243.00	4.17	8.93	115.36	25.36
244.00	4.18	8.57	115.00	25.00
245.00	4.20	8.21	114.64	24.64
246.00	4.22	7.85	114.28	24.28
247.00	4.23	7.48	113.91	23.91
248.00	4.25	7.11	113.54	23.54
249.00	4.27	6.74	113.17	23.17
250.00	4.29	6.37	112.80	22.80
251.00	4.30	6.00	112.43	22.43
252.00	4.32	5.62	112.05	22.05
253.00	4.34	5.25	111.68	21.68
254.00	4.36	4.87	111.30	21.30
255.00	4.37	4.49	110.92	20.92
256.00	4.39	4.11	110.54	20.54
257.00	4.41	3.73	110.16	20.16
258.00	4.42	3.34	109.77	19.77
259.00	4.44	2.96	109.39	19.39
260.00	4.46	2.57	109.00	19.00
261.00	4.48	2.19	108.62	18.62
262.00	4.49	1.80	108.23	18.23

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

N	Γ	δ	α_n	B_0
263.00	4.51	1.41	107.84	17.84
264.00	4.53	1.03	107.46	17.46
265.00	4.54	0.64	107.07	17.07
266.00	4.56	0.25	106.68	16.68
267.00	4.58	-0.14	106.29	16.29
268.00	4.60	-0.53	105.90	15.90
269.00	4.61	-0.92	105.51	15.51
270.00	4.63	-1.31	105.12	15.12
271.00	4.65	-1.70	104.73	14.73
272.00	4.67	-2.09	104.34	14.34
273.00	4.68	-2.48	103.95	13.95
274.00	4.70	-2.87	103.57	13.57
275.00	4.72	-3.25	103.18	13.18
276.00	4.73	-3.64	102.79	12.79
277.00	4.75	-4.03	102.40	12.40
278.00	4.77	-4.42	102.02	12.02
279.00	4.79	-4.80	101.63	11.63
280.00	4.80	-5.19	101.24	11.24
281.00	4.82	-5.57	100.86	10.86
282.00	4.84	-5.95	100.48	10.48

Fuente: Propia

Nota. En la Tabla 5 se puede apreciar inclinación del panel fotovoltaico (B_0) para la fecha establecida de análisis, en donde N es el número de día del año, Γ es el ángulo diario en radianes, δ es el ángulo de declinación solar, y α_n es la altura solar al medio día.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

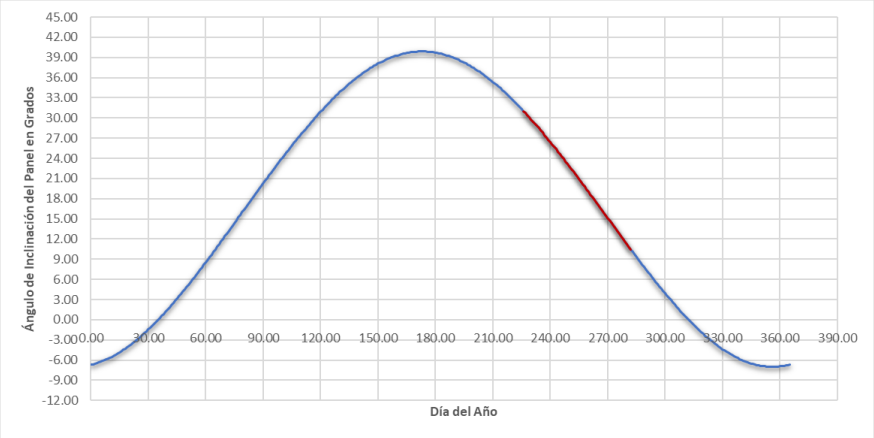
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

En la Tabla 5 se muestra el estudio recomendado por (Kalogirou, 2013) para poder determinar el ángulo óptimo de inclinación para nuestro panel solar fotovoltaico, dándonos como promedio 22.21 grados de inclinación, habiendo tomado 57 datos, que corresponden al número de días analizados.

En el Gráfico 1, la línea sombreada de color rojo representa los días del año estudiados, y se muestra con el fin de poder identificar los ángulos de inclinación adecuados para la presente investigación.

Gráfico 1 *Ángulos Adecuados de Inclinación para el Prototipo*

Ángulos Adecuados de Inclinación para el Prototipo Panel Fotovoltaico



Fuente: Propia

Nota. En el Gráfico 1 se muestra el ángulo adecuado de inclinación para un panel fotovoltaico a lo largo de un año.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Según el Gráfico 2 y la Tabla 6 se puede apreciar que, por más que los paneles de tipo policristalino tengan menor eficiencia a temperaturas menores a los de tipo monocristalino, se determinó que la resistencia de las células fotovoltaicas en los paneles policristalinos al calor es mayor que los monocristalinos. Es por tal motivo que en la presente investigación se utilizará como parte del prototipo un panel policristalino.

Tabla 6 Variación de Temperatura por Tipo de Célula Fotov

Variación de Temperatura por Tipo de Célula Fotovoltaica

Parámetro	Policristalino	Monocristalino
Voltaje (%/°C)	-0.31%	-0.38%
Potencia (%/°C)	-0.41%	-0.47%

Fuente: Propia

Nota. En la Tabla 6 se muestra la variación porcentual de voltaje y potencia de un panel fotovoltaico policristalino, monocristalino respecto al incremento de temperatura en °C.

Por otro lado, como se observa en la Tabla 6, se realizó una comparación de las cotizaciones de los paneles de tipo policristalino, las cuales fueron obtenidas de diferentes proveedores nacionales. La comparación de las diferentes

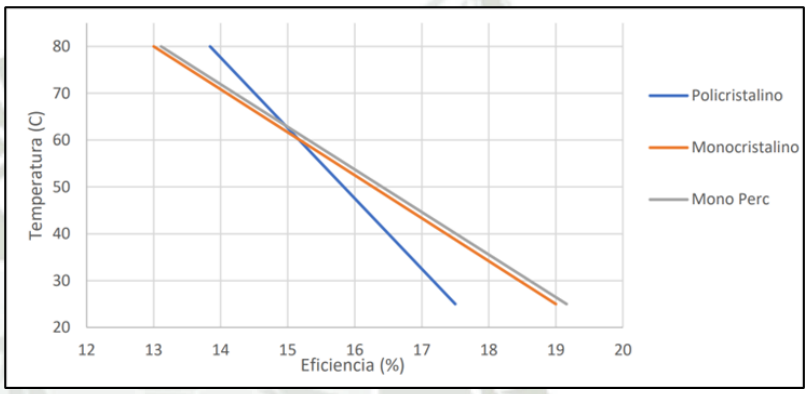
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

marcas nos permite conocer que es factible trabajar con la marca Eco Green Energy.

Gráfico 2

Variación de la Eficiencia según la Temperatura de cada Tipo de Célula Fotovoltaica



Fuente: (Helfer Lazo, n.d.)

Nota. En el Gráfico 2 se muestra la variación lineal de la eficiencia de paneles policristalino, monocristalinos y mono perc según el incremento de temperatura de operación.

3.4.3. Técnica de Análisis Estadístico y Comprobación de la Hipótesis

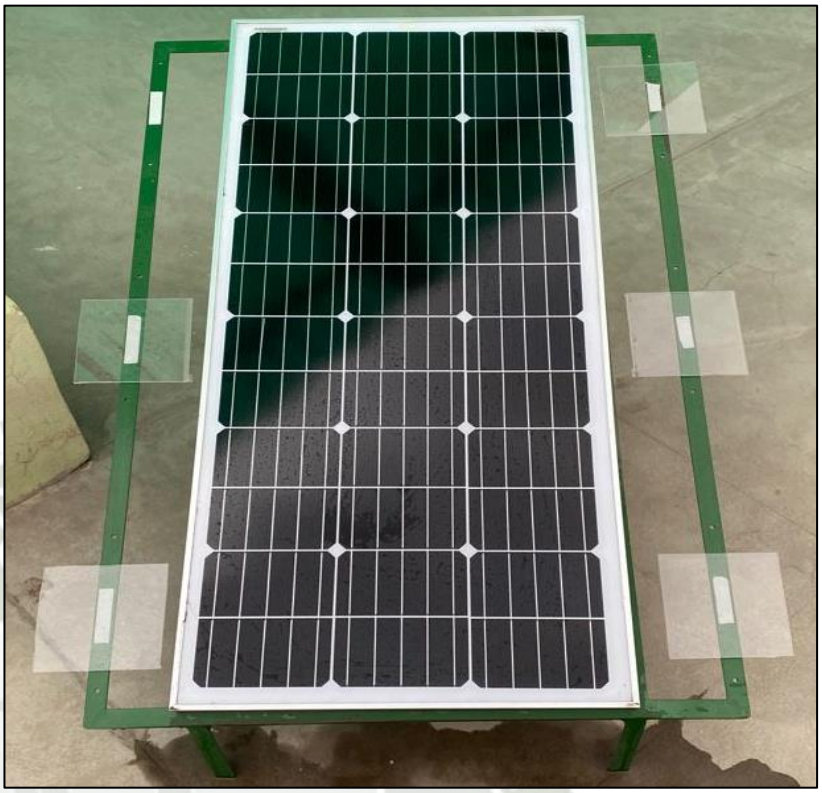
El prototipo se encontrará dispuesto en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero el cual está ubicado dentro de la provincia de Arequipa.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Figura 36

Panel Solar Fotovoltaico de 100 Wp



Fuente: Propia

Nota. En la Figura 36 se puede apreciar el panel fotovoltaico de 100 Wp usado para los fines experimentales en el presente estudio.

Se pretende realizar un análisis estadístico para conocer cómo es que el material particulado influye en el rendimiento de un módulo fotovoltaico. Por tal motivo es que, gracias a la instalación de un data logger, se medirán y almacenarán datos como el voltaje, corriente y potencia de salida, con el objetivo de determinar la caída de potencial y el factor de carga (FF) a lo largo del tiempo, lo cual influye en la pérdida de eficiencia del panel fotovoltaico a causa del gramaje de material particulado por cada metro cuadrado depositado en la superficie

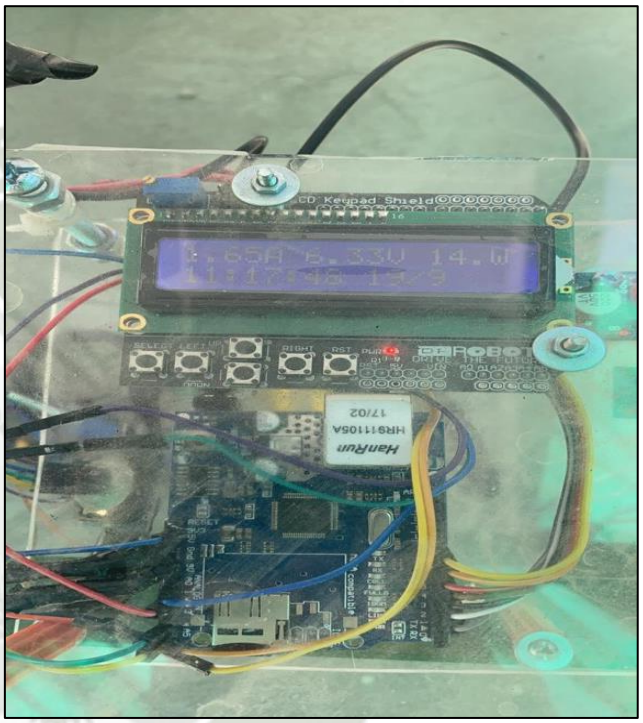
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

del módulo. Estos datos serán analizados con un área de superficie constante de panel fotovoltaico cuyo valor es de 0.75 m^2.

Figura 37

Data Logger Instalado en Panel Solar



Fuente Propia

Nota. En la Figura 37 se puede apreciar el data logger instalado y usado para los fines experimentales en el presente estudio.

La toma de muestra se realizó a través de dos maneras; panel fotovoltaico con la superficie cubierta de polvo naturalmente vs panel fotovoltaico con superficie limpia, ambos puestos en la intemperie durante cuatro semanas cada uno. A posteriori, se analizará estadísticamente la data recopilada de esas ocho

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

semanas utilizando ecuaciones cuadráticas donde se podrá observar la diferencia de eficiencia del panel cuando la superficie se encuentra limpia vs cuando está sucia. Cabe mencionar que los datos recopilados se han tomado en el intervalo horario de 7:00 AM a 4:00 PM.

Figura 38

Panel Fotovoltaico Sucio

Fuente: Propia

Nota. En la Figura 38 se puede apreciar el panel fotovoltaico de 100 Wp sucio y cubierto de PM.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 39

Panel Fotovoltaico Sucio

Fuente Propia

Nota. En la Figura 39 se puede apreciar el panel fotovoltaico de 100 Wp sucio y cubierto de PM.

Por otro lado, para demostrar la caída de eficiencia debido a la cantidad de polvo depositado (g/m^2), se realizó un análisis de datos por medio del modelo exponencial decreciente, ya que esta función es la que más se asemeja al comportamiento práctico de los resultados. Se establecerá una relación entre la variable independiente (X) densidad de material particulado cuyas unidades estarán en g/m^2 y la variable (Y) eficiencia energética del panel fotovoltaico medida en puntos porcentuales. A continuación, se muestra la ecuación que caracteriza al modelo exponencial:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

$$f(x) = ae^{-bx} + c$$

Asimismo, se detalla el cálculo de coeficiente de determinación exponencial (r^2):

$$r^2 = \frac{logb \sum XlogY + loga \sum logY - n(\overline{logY})^2}{\sum(logY)^2 - n\overline{(\log Y)^2}}$$

Donde:

a, b = Constantes

c = Asíntota Horizontal

X = Densidad de Material Particulado (g/m^2)

f(x) = Y = Eficiencia Energética del Panel Fotovoltaico

A partir de los resultados y del análisis planeado, se determinará si la hipótesis planteada por los autores de la presente investigación es verdadera o falsa.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

CAPÍTULO IV

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis e Interpretación de Resultados

Los resultados demostraron que el material particulado depositado en la superficie del panel fotovoltaico ocasiona un déficit en el funcionamiento, provocando deficiencia energética en el módulo solar. A continuación, se detallarán los resultados del prototipo instalado.

4.1.1. Zona – José Luis Bustamante y Rivero

En la Gráfica 3 y en la Tabla 7 podemos observar los resultados obtenidos en el prototipo ubicado en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero en la provincia de Arequipa, se muestran datos recopilados diariamente durante ocho semanas entre las 7:00 AM y las 4:00 PM.

Tabla 7: y Fill Factor

Variación de Fill Factor de un Panel Limpio vs Sucio

Hora	Panel Sucio	Panel Limpio	Diferencia Porcentual
7:00	0.02	0.03	1.57%
8:00	0.15	0.22	7.21%
9:00	0.32	0.35	2.86%
10:0	0.39	0.42	3.12%

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

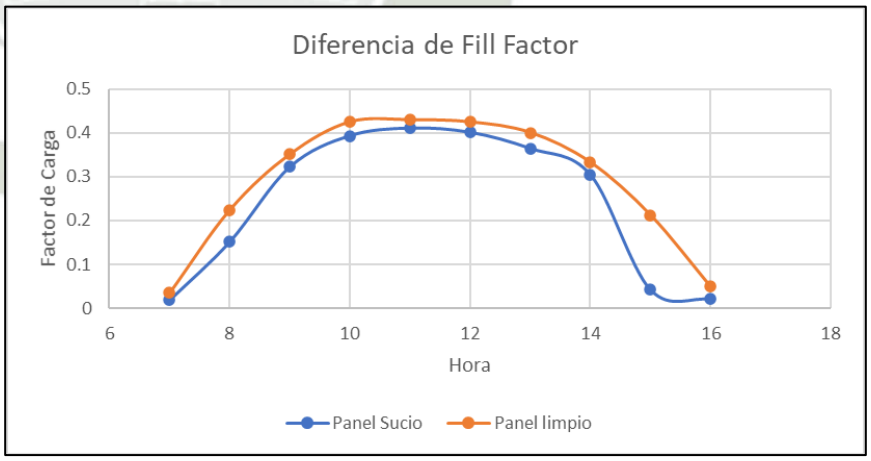
Hora	Panel Sucio	Panel Limpio	Diferencia Porcentual
11:00	0.41	0.43	1.86%
12:00	0.40	0.42	2.36%
13:00	0.36	0.40	3.61%
14:00	0.30	0.33	2.85%
15:00	0.04	0.21	17.02%
16:00	0.02	0.05	2.82%

Fuente: Propia

Nota. En la Tabla 7 se muestra la variación de Fill Factor de un panel limpio y un panel sucio, también se presenta la diferencia porcentual para evaluar el impacto del PM depositado.

Gráfico 3 Diferencia de Fill Factor de un Panel Sucio vs Limpio

Diferencia de Fill Factor de un Panel Sucio vs Limpio



Fuente: Propia

Nota. En el Gráfico 3 se puede observar la diferencia en el día de Fill Factor de un panel sucio y un panel limpio.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 8

Variación de Potencia de un Panel Limpio vs Sucio

Hora	Potencia de Panel Sucio	Potencia de Panel Limpio	Diferencia Porcentual
7:00	2.14 W	3.59 W	40.47%
8:00	18.46 W	23.95 W	22.94%
9:00	37.18 W	40.72 W	8.70%
10:00	46.39 W	49.03 W	5.38%
11:00	49.97 W	50.08 W	0.22%
12:00	48.70 W	49.83 W	2.27%
13:00	43.87 W	46.66 W	5.97%
14:00	36.42 W	37.56 W	3.04%
15:00	4.96 W	23.71 W	79.08%
16:00	2.41 W	5.25 W	54.04%

Fuente: Propia

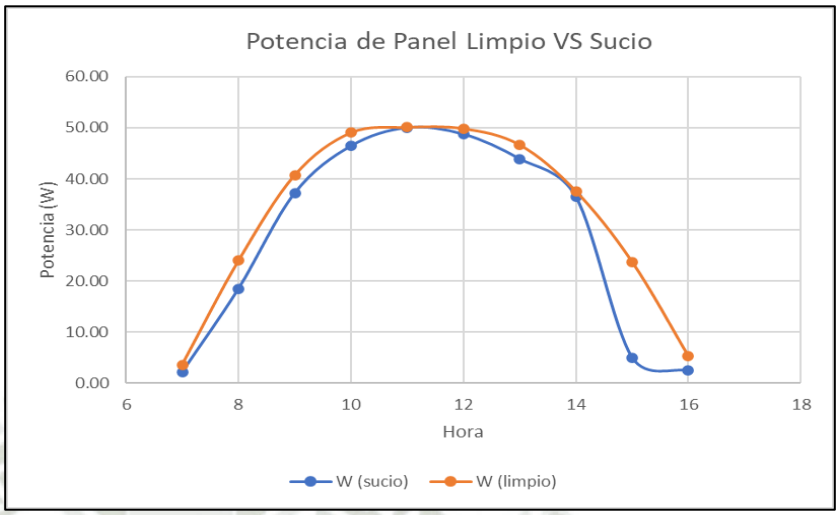
Nota. En la Tabla 8 se muestra la variación de potencia de un panel limpio y un panel sucio, también se presenta la diferencia porcentual para evaluar el impacto del PM depositado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Gráfico 4

Diferencia de Potencia Existente en un Panel Sucio vs Limpio



Fuente: Propia

Nota. En el Gráfico 4 se puede observar la diferencia en el día de potencia de un panel sucio y un panel limpio.

Como se pudo observar en el Gráfico 4 el valor de potencia más alto fue tomado a las 11:00 AM hora en la cual el panel fotovoltaico estuvo limpio. La caída máxima de potencia fue de 79.08 puntos porcentuales a las 15:00 horas, asimismo el factor de carga (FF) calculado para esa hora determinada fue de 0.04 en el panel fotovoltaico sucio y de 0.21 en el módulo con superficie limpia.

Por otro lado, se muestra el Gráfico 5 donde se observa la tendencia exponencial decreciente que se obtiene a partir de la relación entre la eficiencia del panel fotovoltaico medida en

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

puntos porcentuales con la tasa de deposición de material particulado (g/m^2).

Tabla 9

Variación de Potencia de un Panel Limpio vs Sucio

N°	Tasa (g/m^2)	Eficiencia (%)
1	0.00	55.72
2	5.00	50.52
3	10.00	45.67
4	15.00	40.44
5	20.00	28.35
6	25.00	24.79
7	30.00	22.27
8	35.00	21.93
9	40.00	21.81
10	45.00	21.69
11	50.00	21.68
12	55.00	21.64

Fuente: Propia

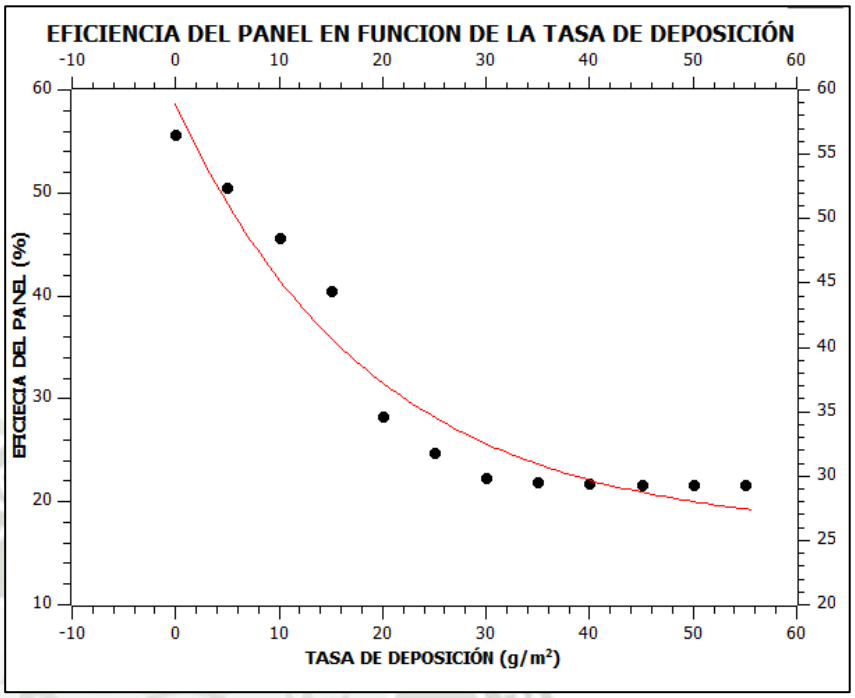
Nota. En la Tabla 9 se muestra la variación de la eficiencia del panel fotovoltaico de estudio respecto a la tasa de deposición de PM.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Gráfica 5

Eficiencia de Panel Fotovoltaico vs Tasa de Deposición de Polvo



Fuente: Propia desde QtiPlot

Nota. En el Gráfico 5 se puede observar la curva exponencial decreciente donde se expresa la variación de la eficiencia del panel de estudio respecto a la tasa de PM depositada en su superficie.

$R^2 = 0.949984740800988$

$$y(x) = 41.61e^{-\frac{x}{19,04}} + 16,99$$

$$y(x) = 41.61 * 0.948^{-x} + 16,99$$

Comparando el primer con el último valor, se obtiene que la densidad de material particulado depositado al final de la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

experimentación tuvo un valor de 55 g/m^2, mientras que la eficiencia leída en dicha condición fue de 21.64% habiendo caído 61.17 puntos porcentuales en comparación del primer día de lectura.

En el Gráfico 5 se puede observar el comportamiento del panel fotovoltaico ubicado en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero en la provincia de Arequipa.

En el gráfico mostrado se puede observar que el coeficiente de determinación exponencial es elevado, lo que indica que los datos están altamente relacionados. Además, se puede apreciar la fórmula del modelo exponencial, la cual nos ayudará a poder predecir la eficiencia del panel fotovoltaico a corto, mediano y largo plazo.

Los resultados descritos serán utilizados como parte fundamental del funcionamiento de un sistema autónomo de limpieza el cual, como se mencionó, forma parte de un proyecto de investigación financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la UCSM. Se establecerá un valor mínimo porcentual de pérdida de rendimiento fotovoltaico, para que el sistema de limpieza empiece a funcionar y así pueda mantener la eficiencia del módulo solar.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

4.2. Discusiones

Según lo observado en el presente estudio, la presencia de material particulado sobre la superficie del panel fotovoltaico fue debido a que Arequipa es una ciudad desértica de clima árido ubicada en medio de tres volcanes, con un parque automotor que ha ido creciendo en la última década al igual que la construcción de viviendas e intercambios viales (Carpio Ali et al., 2017). Algunas investigaciones comentan que la presencia de polvo sobre los paneles es debido a la contaminación provocada por la alta cantidad de medios de transporte en ambientes urbanos y por la presencia de industrias de la construcción (Huang et al., 2019; Kazem et al., 2020). Por otro lado, también se halló en una investigación realizada en China, que la sedimentación de polvo viene influenciada tanto por la actividad cotidiana del ser humano, como por la acción meteorológica (J. Chen et al., 2020). Finalmente cabe mencionar, que la industria minera es uno de los principales emisores de material particulado, por lo que la instalación de paneles fotovoltaicos en proyectos mineros se verá afectado por la presencia de polvo resultante de la actividad (Patra et al., 2016).

Se han realizado diferentes trabajos de investigación alrededor del mundo, tanto en campo como en laboratorios, en donde se relaciona la cantidad de material particulado sedimentado en la superficie de paneles solares fotovoltaicos con la pérdida de eficiencia o caída de potencial de estos. Estudios realizados en campo como en Bagdak-Irak, concluyen con que la densidad de polvo sedimentada en el panel llegó a ser de 10 g/m^2 llegando a ocasionar la pérdida del 34% de la potencia (Y. Chen et al., 2019). En Zhejiang, al este de China, la potencia de los paneles

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

solares fotovoltaicos disminuyó en un 7.4% a causa de la presencia de 0.644 g/m^2 en la superficie del módulo (J. Chen et al., 2020). En Argelia, en la ciudad de Ouargla después de 8 semanas se llegó a acumular 4.36 g/m^2 de polvo en la superficie de los módulos solares, obteniendo una caída de producción de 8.41% (Dida et al., 2020), mientras que en la ciudad de Tipaza con tan sólo 8 g/m^2 la eficiencia cayó en un 50% (Abderrezek & Fathi, 2017). En El Cairo-Egipto, para que se reduzca la eficiencia del panel en un 19.23% es necesario que se deposite 7.07 g/m^2 de polvo en la superficie de este (Elminir et al., 2006).

En cuanto las investigaciones realizadas en laboratorios, la experimentación realizada en Sharif University of Tehnology reportó que existe una disminución del rendimiento eléctrico en un 26.36% debido a una acumulación de 8 g/m^2 de material particulado (Salari & Hakkaki-Fard, 2019), por otro lado, un estudio hecho en el 2017 por universidades de China e Inglaterra argumentaron que el voltaje de salida se redujo en un 60% y la muestra de polvo depositado fue de 4.71 g/cm^2 (Xu et al., 2017). Finalmente se encontró en una experimentación realizada en Wuhan, China que la eficiencia eléctrica de un módulo fotovoltaico caía semanalmente en un 2.1% por cada 300 mg/m^2 de material particulado muestreado (Huang et al., 2019). En el presente trabajo de investigación se concluye, que en la zona de estudio puede existir una reducción porcentual de hasta 61.17% de eficiencia debido a una deposición de material particulado medida de 55 g/m^2. Asimismo se puede apreciar en el apartado de resultados que la eficiencia del panel fotovoltaico presentó una caída significativa al presentar una tasa de deposición de 15 g/m^2 y 20 g/m^2, ya que esta se redujo en 12.09 puntos porcentuales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Cabe mencionar que las investigaciones comentadas, tuvieron un comportamiento exponencial decreciente mediante la toma de datos obtenidos de forma experimental. De igual manera, en el presente trabajo se obtuvo el mismo modelo, obteniendo como asíntota horizontal (punto mínimo de eficiencia) de 16.99%. Asimismo, se obtuvo la función mostrada a continuación $f(x) = 41.61\ (0.948^{-x}) + 16.99$; esta curva exponencial decreciente muestra una relación con estudios científicos tales como (Y. Chen et al., 2019), (Abderrezek & Fathi, 2017).

Los resultados encontrados en el presente estudio demuestran el efecto que produce el material particulado sobre el factor de carga (FF), resaltando la diferencia de 17 puntos porcentuales entre el panel fotovoltaico sucio respecto al limpio a las 3:00 PM. También, en otros estudios se muestra un fenómeno similar producido en los módulos fotovoltaicos, por ejemplo, el trabajo realizado por (Abderrezek & Fathi, 2017) demuestra que existe una variación del factor de llenado de su sistema en aproximadamente 10.34% debido a cierta deposición de material particulado en la superficie del panel fotovoltaico. Por otro lado, una publicación científica (Y. Chen et al., 2019) comenta en sus resultados una variación de factor de carga de 14.45% a causa de una tasa de deposición de 80 g/m^2 de material particulado depositado sobre la superficie del panel fotovoltaico. Esta comparación intuye en la comprobación de que el material sedimentado sobre la superficie del módulo solar influye negativamente a la generación de energía tanto como en su eficiencia como en el factor de carga (FF).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dado que la presencia de material particulado en el departamento de Arequipa es elevada, está comprobado que su propia sedimentación impactará en el desempeño energético de los paneles fotovoltaicos en más del 50% y no pueda existir una óptima utilización y futura implementación en las operaciones mineras. Por tanto, es necesario establecer un protocolo de limpieza adecuado para evitar el funcionamiento deficiente de paneles fotovoltaicos en cuanto la captación energética, de igual manera en un ambiente minero ya que es una de las principales industrias generadoras de material particulado.

Gracias a la comparación con otras experimentaciones realizadas en diferentes ciudades e instituciones del mundo, los autores concluyen que el rendimiento energético varía debido a la desigual composición fisicoquímica del material particulado distribuido en la superficie de un módulo fotovoltaico. Se cree que la implementación de PV's para abastecimiento energético, de manera total o parcial, en operaciones mineras es importante para reducir la huella de carbono en el planeta y también para contribuir con el desarrollo sostenible y mejorar la aceptación social hacia la industria.

A partir del presente estudio se establece un indicador de desempeño basado en los resultados, ya que el primer tramo de la curva exponencial es el más crítico, evidenciándose la caída del 18% de eficiencia con tan solo la presencia de 10 g/m^2 de material particulado en la superficie del panel y tomando en cuenta que se requiere una operación continua y efectiva de estos sistemas solares, entonces se considera que debe aplicarse un protocolo de limpieza antes de que exista una pérdida de 18 puntos porcentuales de rendimiento energético. El motivo por el

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

cual se escogió este indicador de desempeño es porque a partir de los 10 g/m^2 de tasa de deposición existe una caída decreciente considerable en la Gráfica 5.

Asimismo, para la instalación de plantas fotovoltaicas en proyectos mineros, es necesario un estudio minucioso para poder conocer en qué medida impacta el material particulado en el rendimiento energético de los módulos fotovoltaicos, para así establecer un plan eficiente de limpieza antes de invertir millones de dólares en la generación de energía a partir de fuentes renovables.

De manera adicional, los autores insisten en que se continúe realizando investigaciones de este tipo, que contribuyan con el desarrollo sostenible que implica la armonía entre el crecimiento de la industria minera, la aceptación de la sociedad y el cuidado medio ambiental.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

REFERENCIA

Abderrezek, M., & Fathi, M. (2017). Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. *Solar Energy*, *142*, 308–320. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.040

Al-Housani, M., Bicer, Y., & Koç, M. (2019). Experimental investigations on PV cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: Comparison of cleaning techniques for drone retrofitting. *Energy Conversion and Management*, *185*, 800–815. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.058

Atlas, G. S. (2021). Global solar atlas. *World Bank Group*, *4*.

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/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.003

Cai, S., Bao, G., Ma, X., Wu, W., Bian, G.-B., Rodrigues, J. J. P. C., & de Albuquerque, V. H. C. (2019). Parameters optimization of the dust absorbing structure for photovoltaic panel cleaning robot based on orthogonal experiment method. *Journal of Cleaner Production*, *217*, 724–731. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.135

Carpio Ali, L. A., Oviedo Meneses, A. R., Reynozo Torres, S. V., & Tejada Espinoza, A. M. (2017). *Semaforización inteligente como alternativa de solución al problema del tránsito en la ciudad de Arequipa*.

Chen, J., Pan, G., Ouyang, J., Ma, J., Fu, L., & Zhang, L. (2020). Study on impacts of dust accumulation and rainfall on PV power reduction in East China. *Energy*, *194*, 116915. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116915

Chen, Y., Liu, Y., Tian, Z., Dong, Y., Zhou, Y., Wang, X., & Wang, D. (2019). Experimental Study on the Effect of Dust Deposition on Photovoltaic Panels. *Energy Procedia*, *158*, 483–489. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.139

Congreso de la República de Perú. (2008). *Promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables [Decreto Legislativo N° 1002]*.

Darling, P. (2011). *SME mining engineering handbook* (Third Edit). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Demirel, Y. (2021). *Energy* (3rd ed.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56164-2

Dida, M., Boughali, S., Bechki, D., & Bouguettaia, H. (2020). Output power loss of crystalline silicon photovoltaic modules due to dust accumulation in Saharan environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *124*, 109787. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109787

División de Supervisión de Gas Natural. (2020). *Boletín Estadístico de Gas Natural -Trimestre 2020-4*.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

Du, X., Jiang, F., Liu, E., Wu, C., & Ghorbel, F. H. (2019). Turbulent airflow dust particle removal from solar panel surface: Analysis and experiment. *Journal of Aerosol Science*, *130*, 32–44. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.01.005

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), 3192–3203. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014

Espinoza, R., Muñoz-Cerón, E., Aguilera, J., & de la Casa, J. (2019). Feasibility evaluation of residential photovoltaic self-consumption projects in Peru. *Renewable Energy*, *136*, 414–427. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.003

Fountoukis, C., Figgis, B., Ackermann, L., & Ayoub, M. A. (2018). Effects of atmospheric dust deposition on solar PV energy production in a desert environment. *Solar Energy*, *164*, 94–100. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.010

Helfer Lazo, A. M. (n.d.). *Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico en la compañia de bombero de Yanahuara-Arequipa*.

Huang, W., Zhou, K., Sun, K., & He, Z. (2019). Effects of wind flow structure, particle flow and deposition pattern on photovoltaic energy harvest around a block. *Applied Energy*, *253*, 113523. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113523

Isaifan, R. J., Johnson, D., Ackermann, L., Figgis, B., & Ayoub, M. (2019). Evaluation of the adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *191*, 413–421. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.031

Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic press.

Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2019). The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman. *Solar Energy*, *187*, 30–38. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.036

Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., & Sopian, K. (2020). A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, *276*, 123187. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187

Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., & Blaabjerg, F. (2002). Power inverter topologies for photovoltaic modules-a review. *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, *2*, 782–788 vol.2. https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042648

Kreith, F., & Kreider, J. F. (1978). *Principles of solar engineering*.

Li, X., Liu, T., Wang, J., Xu, L., & Zhang, Z. (2020). Dust deposition can focus light at a limited distance on photovoltaic panels. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *246*, 106921. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106921

Liu, S., Yue, Q., Zhou, K., & Sun, K. (2019). Effects of Particle concentration, deposition and accumulation on Photovoltaic device surface. *Energy Procedia*, *158*, 553–558. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.151

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Louie, H. (2018). *Battery Storage for Off-Grid Systems BT - Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries* (H. Louie, Ed.; pp. 213–259). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91890-7_8

Lu, H., Lu, L., Zhang, L., & Pan, A. (2019). Numerical study on polydispersed dust pollution process on solar photovoltaic panels mounted on a building roof. *Energy Procedia*, *158*, 879–884. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.225

Lu, H., & Zhang, L.-Z. (2019). Influences of dust deposition on ground-mounted solar photovoltaic arrays: A CFD simulation study. *Renewable Energy*, *135*, 21–31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.096

Menoufi, K., Farghal, H. F. M., Farghali, A. A., & Khedr, M. H. (2017). Dust accumulation on photovoltaic panels: a case study at the East Bank of the Nile (Beni-Suef, Egypt). *Energy Procedia*, *128*, 24–31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.010

Meral, M. E., & Dinçer, F. (2011). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(5), 2176–2184. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.010

MINAM. (2016). Elaboración del Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero–Sector Procesos Industriales y Uso de Productos. In *Industria Química e Industria de los Metales*. https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/06/Guia-N°-1_Energia_Combustion-Estacionaria-y-Emisiones-Fugitivas.pdf

Ministerio de Energía y Minas. (2021). *PRINCIPALES INDICADORES DEL SECTOR ELÉCTRICO A NIVEL NACIONAL Diciembre 2020*. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/11 Cifras preliminares del Sector Electrico - Noviembre 2020-1_1(2).pdf

NASA. (2021). *POWER data access viewer*.

OSINERGMIN. (2017). *ENERGÍAS RENOVABLES EXPERIENCIA Y PERSPECTIVAS EN LA RUTA DEl PERÚ HACIA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA*.

OSINERGMIN. (2019a). *ENERGÍAS RENOVABLES EXPERIENCIA Y PERSPECTIVAS EN LA RUTA DEl PERÚ HACIA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA*.

OSINERGMIN. (2019b). *REPORTE DE ANÁLISIS ECONÓMICO SECTORIAL SECTOR MINERÍA-Relación actual y futura entre el sector minero y el sector eléctrico*.

Pasos, M., Alarcón, A., & Dalaison, W. (2018). + SOL+ LUZ: Guía práctica para la implementación de sistemas fotovoltaicos en proyectos de infraestructura social. *Washington, DC, Aug*.

Patra, A. K., Gautam, S., & Kumar, P. (2016). Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation—A review. *Environmental Technology & Innovation*, *5*, 233–249. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.04.002

Peters, T. M., O'Shaughnessy, P. T., Grant, R., Altmaier, R., Swanton, E., Falk, J., Osterberg, D., Parker, E., Wyland, N. G., Sousan, S., Stark, A. L., & Thorne, P. S. (2017). Community airborne particulate matter from mining for sand used as hydraulic fracturing proppant. *Science of The Total Environment*, *609*, 1475–1482. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.006

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Raina, G., & Sinha, S. (2020). A simulation study to evaluate and compare monofacial Vs bifacial PERC PV cells and the effect of albedo on bifacial performance. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.632

Rios, R., & Duarte, S. (2021). Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS) in Peru. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *149*, 111310. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111310

Rivera Mantilla, H. (2011). *Geología General* (Megabyte, Ed.; Tercera).

Salari, A., & Hakkaki-Fard, A. (2019). A numerical study of dust deposition effects on photovoltaic modules and photovoltaic-thermal systems. *Renewable Energy*, *135*, 437–449. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.018

Salcedo, M. T., & Trigoso, F. M. (2011). *SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON ENERGIA SOLAR EN LA CIUDAD DE AREQUIPA*.

Sengupta, M., Habte, A., Gueymard, C., Wilbert, S., & Renne, D. (2017). *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition*. https://doi.org/10.2172/1411856

Sharma, D., Mehra, R., & Raj, B. (2021). Comparative analysis of photovoltaic technologies for high efficiency solar cell design. *Superlattices and Microstructures*, *153*, 106861. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106861

Sociedad Nacional de Minería - Energía y Petróleo. (2021). *Operaciones Sector Hidrocarburos*. https://www.snmpe.org.pe/multimedia/galeria-de-fotos/sector-hidrocarburos/operaciones.html

Spencer, J. W. (1971). Fourier series reprensentation of the position of the sun. *Search*, *2*(5), 172.

Stober, I., & Bucher, K. (2013). *Geothermal Energy*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13352-7

Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J., & Urmee, T. (2019). The effect of dust with different morphologies on the performance degradation of photovoltaic modules. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *31*, 347–354. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.024

Tejada, E. P., & Falcón, E. V. C. (n.d.). *XX11I Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIII-SPES) REGISTRO DE DATOS DE BAJO COSTE PARA EL MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE*.

Xu, R., Ni, K., Hu, Y., Si, J., Wen, H., & Yu, D. (2017). Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. *Energy Conversion and Management*, *148*, 100–109. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.058

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ANEXO

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ECO GREEN ENERGY
Building a Greener World

SOLAR MODULE
EGE-100-105P-36

POLYCRYSTALLINE MODULE

100-105 W / 36 Cells / 5 Bus bars

Eco Green Energy's modules are only made of grade A solar cells with a very high efficiency and ensured more than 25 years lifespan.

KEY FEATURES

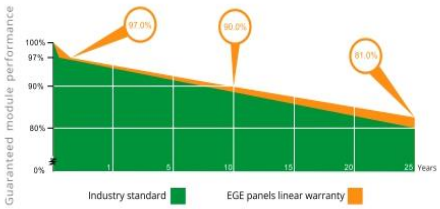
- 5 bus bars cells, with efficiency up to 21 %
- IP65 junction box for long term weather endurance
- High quality aluminum frame, resisting load up to 5400 Pa and wind pressure up to 2400 Pa
- High transmissivity, low-iron tempered glass
- High performance in low-light environment
- Double EL test before and after lamination

CERTIFICATES

IEC 61215 / IEC 61730 / CE
ISO 9001:2015

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

12-Year Product Warranty · 25-Year Linear Power Warranty



25 YEARS **OUTPUT POWER WARRANTY**

12 YEARS **PRODUCT WARRANTY**

Eco Green Energy Group Ltd. 2018. All rights reserved.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ELECTRICAL DATA AT STC*

Power output (Pmax)	100 W	105 W
Power tolerance	0~+3 %	0~+3 %
Module efficiency	14.63 %	15.36 %
Maximum power voltage (Vmp)	18.41 V	18.92 V
Maximum power current (Imp)	5.43 A	5.55 A
Open circuit voltage (Voc)	22.41 V	23.32 V
Short circuit current (Isc)	5.89 A	5.92 A

*Standard Test Conditions: Irradiance: 1 000 W / m²
Cell temperature: 25 °C • AM: 1.5

ELECTRICAL DATA AT NOCT*

Power output (Pmax)	73.98 W	77.68 W
Maximum power voltage (Vmp)	17.00 V	17.48 V
Maximum power current (Imp)	4.35 A	4.44 A
Open circuit voltage (Voc)	20.80 V	21.65 V
Short circuit current (Isc)	4.78 A	4.81 A

*Nominal Operating Cell Temperature: Irradiance: 800 W / m²
Ambiant temperature: 20 °C • AM: 1.5 • Wind speed: 1 m/s

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

NOCT	45 °C ±2 °C
Temperature coefficient of Pmax	-0.41%/°C
Temperature coefficient of Voc	-0.31%/°C
Temperature coefficient of Isc	+0.06%/°C

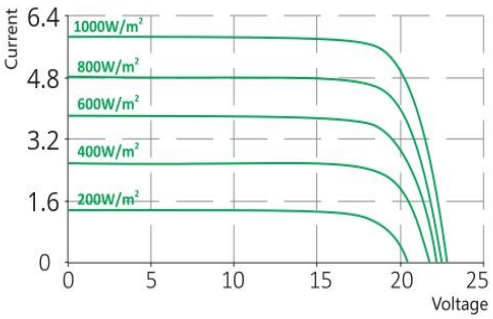
MAXIMUM RATINGS

Operating temperature range	-45 °C ~+85 °C
Maximum system voltage	1500 V
Max series fuse rating	15 A
Max front load (e.g.: snow)	5 400 Pa
Max back load (e.g.: wind)	2 400 Pa

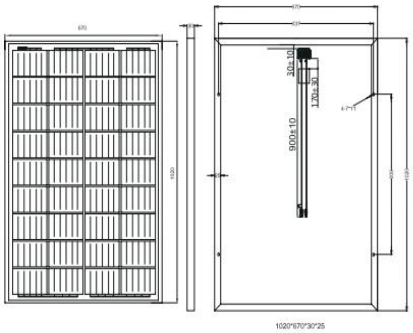
MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Polycrystalline (156.75x104 mm)
Number of cells	36
Dimensions	1020x670x30mm
Weight	7.7 kg
Glass	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
Junction box	IP65
Cable	0.9 m
Connector	MC4 or MC4 compatible

I-V CURVES



ENGINEERING DRAWINGS (mm)



PACKAGING

Type	Pcs/ Type	Weight
Per pallet	35 pcs	299.5 kg
20ft GP Container	990 pcs	8.5 t
40ft GP Container	2150 pcs	18.4 t
40ft HQ Container	2500 pcs	21.4 t

ECO GREEN ENERGY
Building a Greener World

Eco Green Energy Group Ltd. 2018. All rights reserved.
Add: 299 Xing Cheng Road, Chong Chuan District, Nantong, Jiangsu, China
Tel: +86 513 66690088 / E-mail: info@eco-greenenergy.com

Specifications included in this datasheet are subject to change without prior notice. Refer to our website for further information or contact one of our sales staff.
www.eco-greenenergy.com

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

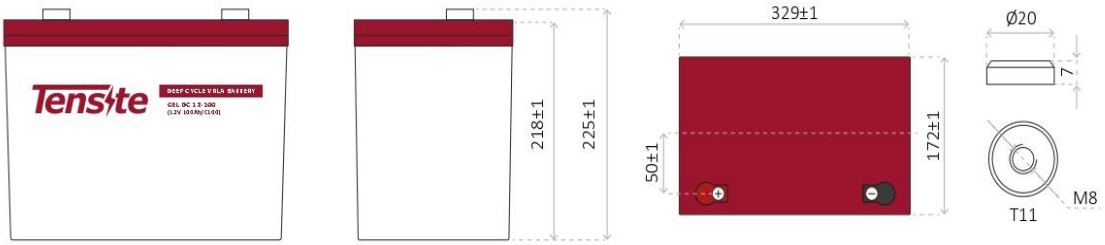
Tensite

GEL 12-100

CHARACTERISTICS

- Compact size ideal for any type of use.
- Great performance due to its deep descharge cycle life.
- Perfect to use as accumulator in photovoltaic installations.

DIMENSIONS



Tensite
info@tensitebatteries.com
www.tensitebatteries.com

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tensite

GEL 12-100

GEL BATTERY
12V 100 AH

GEL SERIES BATTERY

GEL series batteries are manufactured with special separators and silica gel immobilizing the electrolyte inside the battery. The proven silica gel technology can improve battery cycle life and performance at wider temperature range. The deep discharge cycle life is increased 50% compared normal battery.

APPLICATION

- Emergency Power System
- Communication equipment
- Telecommunication systems
- Uninterruptible power supplies
- Power tools
- Marine equipment
- Medical equipment
- Solar and wind power system

GENERAL FEATURES

- Safety Sealing
- Non-spillable construction
- High power density
- Excellent recovery from Deep discharge
- Thick plates and high active materials
- Longer life and low self-discharge design

TECHNICAL SPECIFICATIONS

BATTERY MODEL	Nominal voltage		12V	
	Rated capacity (100 hour rate)		100Ah	
	Cells Per battery		6	
DIMENSION	Length	Width	Height	Total Height
	329 mm	172 mm	218 mm	225 mm
APPROX. WEIGHT	26.2 kg ± 3%			
CAPACITY @ 25°C	10 hour rate (9.1A)	5 hour rate (15.1A)	3 hour rate (23.8A)	2 hour rate (33.8A)
	91 Ah	75.5 Ah	71.4 Ah	67.6 Ah
MAX. DISCHARGE CURRENT	900 A (5 sec.)			
INTERNAL RESISTANCE	Full charged Vat 25°C: Approx. 4.4mΩ			
CAPACITY AFFECTED BY TEMP. (10 HR)	40°C	25°C	0°C	
	102%	100%	85%	
CHARGE METHOD @25°C	Cycle Use		Standby Use	
	14.1-14.4V (Initial charging current less than 27A)		13.50-13.80V	

BATTERY DISCHARGE TABLE

CONSTANT CURRENT (AMP) AND CONSTANT POWER (WATT) DISCHARGE TABLE AT 25 ºC

F.V / TIME		10 min	15 min	30 min	60 min	3 hr	5 hr	10 hr	20 hr
1.60	A	190.0	153.3	103.0	54.0	23.1	14.9	9.5	5.10
	W	338.00	273.50	183.83	97.16	42.90	28.13	18.18	9.88
1.70	A	171.00	144.00	98.00	51.00	22.50	14.60	9.30	5.00
	W	318.83	268.83	183.50	95.66	42.50	28.10	18.15	9.68
1.75	A	153.00	126.00	92.00	49.00	22.00	14.40	9.10	5.00
	W	290.66	239.83	176.00	94.83	42.50	28.10	17.93	9.65
1.80	A	144.00	117.00	85.00	48.00	21.40	14.00	9.00	4.90
	W	277.66	225.00	163.33	92.16	42.08	27.66	17.83	9.65
1.85	A	135.00	108.00	76.00	46.00	20.70	13.70	8.60	4.60
	W	261.16	209.83	147.50	90.00	40.98	27.16	17.20	9.27

Tensite
info@tensitebatteries.com
www.tensitebatteries.com

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

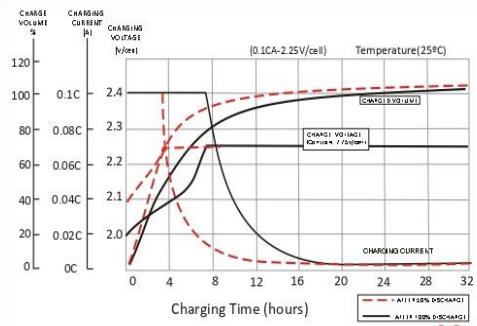
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Tensite

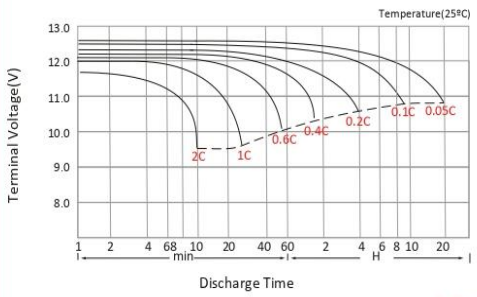
GEL 12-100

BATTERY CHARACTERISTICS

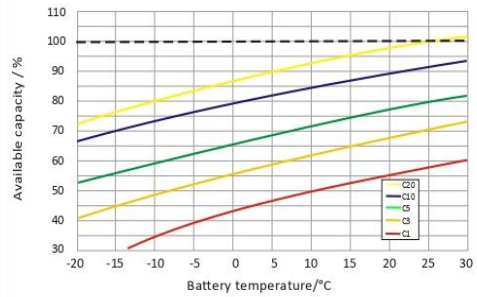
Float charging characteristics



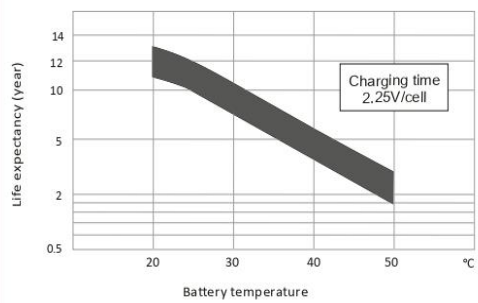
Discharge characteristics



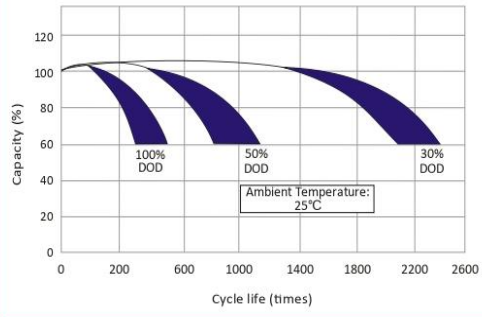
Temperature effects in realtion to battery capacity



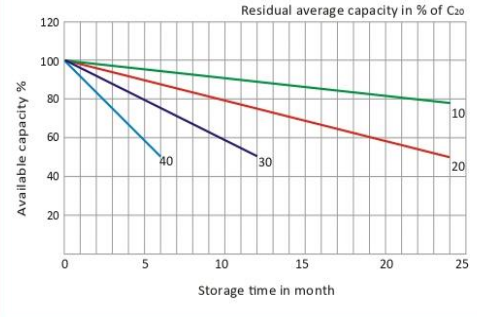
Effect of temperature on long term float life



Cycle life in relation to depth discharge



General relation of capacity vs. storage time



Tensite
info@tensitebatteries.com
www.tensitebatteries.com

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

victron energy
BLUE POWER

Revision : Rev 05
Date : 22-02-2016

BlueSolar PWM Light Charge Controller 12/24V

(with light turn-off timer)

1. DESCRIPTION

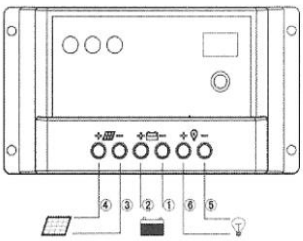
- Programmable load output with lighting control mode.
- Three stage battery charging (bulk – absorption – float).
- Protected against over current.
- Protected against short circuit.
- Protected against reverse polarity connection of the battery or solar array.
- Low voltage load disconnect.
- Easy to set up thanks to two digit seven segment display.

2. INSTALLATION

IMPORTANT

- **Always connect the batteries first, in order to allow the Controller to recognize system voltage**
- **Use a 12V (36 cells) solar array for a 12V battery system.**
- **Use a 24V (72 cells) solar array for a 24V battery system.**

The display will show a "12" if the Controller detects a 12V battery, and a "24" if it detects a 24V battery



Do not exceed Solar and Load ratings

3. LED INDICATORS

Green LED:
Off: No sunlight or not enough sunlight. Charger off.
Fast flashing: Bulk charge.
On: Absorption charge.
Slow flashing: Float charge.

LED=Green: battery fully charged (> 13,4V)
LED=Orange: battery ok (12,4V - 13,4V)
LED=Red: battery low (11,2V - 12,4V)
LED=Flashing Red: battery fully discharged (< 11,2V)
(load output cut off level: 11,2V)

LED=ON: load output is on.
LED=OFF: load output is off.
LED=Slow flashing: Overload.
LED=Fast flashing: Short Circuit

Please note:

1. The load output will cut off in case of over load or short circuit. The load output will attempt to restart after 30 seconds.
2. After over discharge, the load will reconnect automatically when the battery is recharged to 13,1V / 26,2V.
3. After over discharge, the load can be reconnected manually by pressing the on/off push button, if the battery voltage exceeds 12,6V / 25,2V.

4. SETTING THE LOAD OUTPUT

4.1 Settings

0	Load output permanently off	9	Load output turned on during 9 hours after sunset
1	Load output turned on during 1 hour after sunset	10	Load output turned on during 10 hours after sunset
2	Load output turned on during 2 hours after sunset	11	Load output turned on during 11 hours after sunset
3	Load output turned on during 3 hours after sunset	12	Load output turned on during 12 hours after sunset
4	Load output turned on during 4 hours after sunset	13	Load output turned on during 13 hours after sunset
5	Load output turned on during 5 hour after sunset	H	Manual load control
6	Load output turned on during 6 hours after sunset	C	Load output controlled by battery voltage only
7	Load output turned on during 7 hours after sunset	L	Dusk to dawn mode
8	Load output turned on during 8 hours after sunset	d	Debug mode

4.2 Settings description

0 Charger only
The load output is switched off permanently.

1-13 Light control + delay
The load output automatically turns on after sunset (array voltage < 8V) and the built-in timer starts counting.
When the timer reaches the set time, or when the low voltage limit is reached, the load output will turn off.

H Manual
The load output can be turned on and off manually with the push button.
(low voltage shutdown remains active)

C Load output controlled by battery voltage only
Load disconnect and load reconnect will be based only on battery voltage, see section 3

L Dusk to dawn mode
Turn on delay (array voltage < 8V): 10 seconds.
Turn off delay (array voltage > 8V): 1 minute.
No timer function.

d Debug mode
Same as L mode but without delay of 10s/1min

5. SPECIFICATIONS

BlueSolar PWM-Light	12/24-5	12/24-10	12/24-20	12/24-30
Battery Voltage	12/24V with automatic system voltage detection*			
Rated charge current	5 A	10 A	20 A	30 A
Recommended solar array	36 cell for 12 V / 72 cell for 24 V			
Automatic low voltage load disconnect	Yes			
Maximum solar voltage	28 V for a 12 V system and 55 V for a 24 V system (1)			
Self-consumption	< 10 mA			
Overload protection	Shut down after 60 s in case of 130% load			
	Shut down after 5 s in case of 160% load			
	Short circuit: immediate shut down			
Grounding	Common positive			
Operating temp. range	-20 to +50°C (full load)			
Humidity (non	Max 95 %			
Settings				
Charge voltage 'absorption'	14.2 V / 28,4 V			
Charge voltage 'float'	13.8 V / 27,6 V			
Load disconnect	11,2V / 22,4V			
Load reconnect	12,6V / 25,2V (manual) 13,1V / 26,2V (automatic)			
Enclosure				
Protection class	IP20			
Terminal size	5 mm² / AWG10			
Weight	0,13 kg			0,15 kg
Dimension (h x w x d)	70 x 133 x 33,5 mm (2.8 x 5.3 x 1.3 inch)			
Mounting	Vertical wall mount Indoor only			
Humudity (non condensing)	Max. 95%			
Operating temperature	-20°C to +50°C (full load)			
Cooling	Natural convection			
Standards				
Safety	IEC 62109-1			
EMC	EN 61000-6-1, EN 61000-6-3, ISO 7637-2			

1) For 12V use 36 cell solar panels
For 24V use 72 cell solar panels
or 2x 36 cell in series

2) The controller switches to the lower float voltage level 2 hours after the absorption voltage has been reached.
Whenever the battery voltage becomes lower than 13 V, a new charge cycle is triggered.

Victron Energy bv / De Paal 35 / 1351 JG ALMERE / The Netherlands
Phone: (+31) (0)36 535 97 00 / Fax: (+31) (0)36 535 97 40 / www.victronenergy.com / e-mail: sales@victronenergy.com

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis