



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS TÉCNICO Y SUS BENEFICIOS DE EMPLEAR
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN UNA VIVIENDA
RURAL. CASO DE ESTUDIO CAYMATAN-MOLLETURO.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: CHRISTIAN FABIAN ALVAREZ GARCIA

DIRECTOR: ING. DANIEL ICAZA ALVAREZ, PHD

CUENCA - ECUADOR

2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad al servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS TÉCNICO Y SUS BENEFICIOS DE EMPLEAR
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN UNA VIVIENDA
RURAL. CASO DE ESTUDIO CAYMATAN-MOLLETURO.**
**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: CHRISTIAN FABIAN ALVAREZ GARCIA

DIRECTOR: ING. DANIEL ICAZA ALVAREZ, PHD

CUENCA-ECUADOR

2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Christian Fabian Alvarez Garcia portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105952261. Declaro ser el autor de la obra: “Análisis técnico y sus beneficios de emplear sistemas solares fotovoltaicos en una vivienda rural. Caso de estudio Caymatan-Molleturo”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 02 de agosto de 2024

F: 

Christian Fabian Alvarez Garcia

0105952261

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación fue desarrollado por el estudiante Christian Fabian Álvarez García bajo mi supervisión.

F. 
Ing. Daniel Icaza Álvarez, PHD.
DIRECTOR

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas que han sido parte de mi vida y han contribuido a mi crecimiento personal y profesional, a todas aquellas les brindo mis sinceros agradecimientos y al ser supremo que me supo guiar mis pasos a lo largo de este hermoso y maravilloso camino universitario.

AGRADECIMIENTO

A mis queridos papá y mamá, por haberme apoyado en mi carrera universitaria, a mi hermano Walter por ser mi sustento en los momentos difíciles, a los docentes de mi querida universidad que me brindaron su conocimiento esencial para ser un gran profesional, en especial a mi asesor de mi tesis al ingeniero Daniel Icaza por haberme brindado su paciencia y aceptación para el desarrollo de esta tesis, a mis compañeros que estuvieron presentes en mi fortalecimiento individual y personal, . Y, por último, pero jamás menos importante, gracias a Dios por darme las oportunidades y la fuerza para llegar hasta aquí.

RESUMEN

Esta investigación se centra en los análisis técnicos para identificar los beneficios de la implementación de los sistemas solares fotovoltaicos en áreas rurales, mejorando el acceso a la electricidad y la calidad de vida de familias que habitan en las zonas rurales. El estudio revisa la literatura existente y se detallan los términos de sostenibilidad y eficiencia. Se detalla la metodología empleada, que incluye el análisis de la zona geográfica, aspectos económicos y la irradiación solar, además de la modelación matemática y simulaciones del sistema. Los resultados muestran la degradación y el rendimiento de los módulos fotovoltaicos, así como el impacto del polvo en su eficiencia. La conclusión señala que estos sistemas son una solución viable para la electrificación rural y ofrece recomendaciones para su optimización. El caso de estudio de Caymatán-Molleturo demuestra cómo estos sistemas pueden mejorar la calidad de vida y promover el desarrollo sostenible en comunidades rurales.

Palabras clave: Sistema fotovoltaicos, Irradiación solar, paneles solares

ABSTRACT

This research focuses on technical analyses to identify the benefits of implementing solar photovoltaic systems in rural areas, improving access to electricity and the quality of life for families living there. The study reviews the existing literature and explains the concepts of sustainability and efficiency. The methodology used is outlined, including the analysis of the geographical area, economic aspects, and solar irradiation, as well as mathematical modeling and system simulations. The results show the degradation and performance of photovoltaic modules and the impact of dust on their efficiency. The conclusion states that these systems are a viable solution for rural electrification and offers recommendations for their optimization. The Caymatán-Molleturo case study demonstrates how these systems can improve the quality of life and promote sustainable development in rural communities.

Keywords: Photovoltaic systems, solar irradiation, solar panels

INDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD.....	III
CERTIFICACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	XIII
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	XIV
INDICE DE ANEXOS	XV
CAPÍTULO I.....	1
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO II. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1. TRABAJOS PREVIOS.....	3
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS LIMPIAS.....	11
2.2.1 ENERGÍA SOLAR Y SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	11
2.2.2. PANELES SOLARES (MÓDULOS FOTOVOLTAICOS).....	12
2.3 DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA.....	13
2.4. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	15
2.5 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN VIVIENDAS RURALES	16
2.5.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA IMPLEMENTACIÓN EXITOSA	16
2.5.1.1. EXPERIENCIAS ANTERIORES EN CASOS DE ESTUDIO SIMILARES	16
2.5.1.2. PRINCIPIOS TÉCNICOS DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS	16
2.5.1.3. DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA.....	16
2.5.1.4. IMPACTO DE LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN EL MEDIO AMBIENTE.....	17
2.6. METODOLOGÍA	17

2.6.1. ANÁLISIS ZONA GEOGRÁFICA.....	19
CAPITULO III. MODELADO Y SIMULACIÓN.....	28
3.1. MODELADO MATEMÁTICO.....	28
3.1.1. EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SISTEMAS PV OPERATIVOS.....	28
3.1.1.1. DEGRADACIÓN TOTAL (D(X)).....	28
3.1.1.2. TASA ANUAL DE DEGRADACIÓN (R(X)).....	28
3.1.1.3. PREDICCIÓN DE LA TASA DE DEGRADACIÓN DEBIDO AL ENVEJECIMIENTO..	29
3.1.1.4. TASA TOTAL DE DEGRADACIÓN DEL PODER (DRT).....	29
3.1.1.5. DEGRADACIÓN POR HIDRÓLISIS (DRH).....	29
3.1.1.6. DEGRADACIÓN POR FOTODEGRADACIÓN (DRP).....	29
3.1.1.7. DEGRADACIÓN TERMOMECAÁNICA (DRTm).....	29
3.2. PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE LOS MÓDULOS PV.....	30
3.2.1. SALIDA DE POTENCIA DEL PV (P).....	30
3.2.1.1. TEMPERATURA DEL MÓDULO (Tm).....	30
3.2.1.2. PREDICCIÓN DE LA PÉRDIDA POR ENSUCIAMIENTO.....	30
3.2.1.3. PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO A LARGO PLAZO.....	31
3.2.1.4. RENDIMIENTO ENERGÉTICO A LARGO PLAZO.....	31
3.3. APLICACIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS EN EL CONTEXTO DE CAYMATÁN- MOLLETURO.....	31
3.3.1. POTENCIA DE SALIDA (POUT):.....	32
3.3.1.1. LA FÓRMULA EMPÍRICA PARA LA REDUCCIÓN DE POTENCIA (PPRO).....	33
3.3.1.2. IMPLEMENTACIÓN EN CAYMATÁN-MOLLETURO.....	33
3.4. SIMULACIONES DEL SISTEMA EN ANÁLISIS.....	34
3.4.1. OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO:.....	41
3.4.2. EFECTO DE LA LLUVIA EN LA LIMPIEZA:.....	42
3.4.3. PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO:.....	42
3.4.4. MEJORA DEL DISEÑO DEL SISTEMA:.....	42
3.4.5. SOSTENIBILIDAD Y COSTOS:.....	42
3.4.6. ADAPTACIÓN A CONDICIONES LOCALES:.....	42
3.4.7. RELACIÓN DE RENDIMIENTO DIARIO (PR):.....	43

3.5. ANÁLISIS DE VARIABILIDAD POR EFECTOS DE POLVO Y AGUA.....	44
3.5.1. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 0°:	46
3.5.2. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 30°:	46
3.5.3. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 45°:	46
3.5.4. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 60°:	46
3.5.5. TASA DIARIA DE DISMINUCIÓN DEL RENDIMIENTO (%):	49
3.5.6. POLVO DIARIO (MM):	49
3.5.7. PERÍODOS DE LIMPIEZA:	50
3.6. COMPARACIÓN CON LA TERMOGRAFÍA:.....	53
3.6.1. RELACIÓN ENTRE DENSIDAD DE DEPOSICIÓN DE POLVO Y RENDIMIENTO A 15°:	55
3.6.2. RELACIÓN ENTRE DENSIDAD DE DEPOSICIÓN DE POLVO Y RENDIMIENTO A 30°:	55
3.7. DISMINUCIÓN DEL RENDIMIENTO Y PÉRDIDA DE ENERGÍA:	59
3.7.1. VALIDACIÓN DEL MODELO:.....	59
3.7.2. IMPACTO ECONÓMICO:.....	59
3.7.3. OPTIMIZACIÓN DE LA INCLINACIÓN:	59
3.7.4. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA:	60
3.8. ANÁLISIS DEL SISTEMA EMPLEANDO EL SOFTWARE DIALUX	62
3.9. PÉRDIDA ENERGÉTICA Y ECONÓMICA:	64
CAPITULO IV: RESULTADOS	65
4.1. ASPECTOS CONSIDERADOS	65
4.1.1 IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CALIENTES:	65
4.1.2. EFECTO DE LA DENSIDAD DE POLVO:	65
4.1.3. VALIDACIÓN DEL MODELO:.....	65
4.1.4. PÉRDIDA ANUAL DE ENERGÍA:	66
4.1.5. PÉRDIDA ECONÓMICA:	66
4.1.7. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA:.....	66
4.2. GRÁFICAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	66
4.3. DISTRIBUCIÓN DE LA ILUMINACIÓN INTERNA:	76
CONCLUSIONES	80

RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFIA	86
ANEXOS	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de la metodología.....	18
Tabla 2. Características de módulos fotovoltaicos.	24
Tabla 3. Rendimiento del sistema fotovoltaico	25
Tabla 4. Característica del Inversor	25

INDICE DE ILUSTRACIONES

Fig. 1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta a aplicarse.....	19
Fig. 2 Diagrama de radiación solar Ecuador.....	20
Fig. 3. Ubicación estación meteorológica de Molleturo.....	20
Fig. 4. Radiación solar en el Cantón Cuenca.....	21
Fig.5 Parámetros esenciales para el diseño del sistema fotovoltaico. (a) Radiación solar en Caymatán de Molleturo. (b) Temperatura ambiente en Caymatán de Molleturo....	22
Fig. 6 Ubicación geográfica del proyecto.....	23
Fig. 7. Esquema del sistema fotovoltaico.....	26
Fig. 8 Degradación de los módulos instalados.....	35
Fig. 9 Degradación total.....	36
Fig. 10 Rendimiento energético anual (a) y la relación de rendimiento normalizada (b).....	37
Fig. 11 Cambio porcentual del rendimiento de los paneles solares.....	39
Fig. 12 Precipitaciones presentes en la región de Caymatán-Molleturo.....	40
Fig. 13 Relación de rendimiento diario (PR) varía en condiciones de no suciedad y con suciedad.....	43
Fig. 14 Análisis de la variación diurna de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos con diferentes ángulos de inclinación.....	45
Fig. 15 Horario promedio y radiación solar.....	47
Fig. 16 Tasa diaria de disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos.....	49
Fig. 17. Presencia de suciedad, puntos calientes y la distribución de temperatura en los módulos.....	50
Fig. 18 Densidad de deposición de polvo afecta la tasa diaria de disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos.....	52
Fig. 19 Densidad de polvo y rendimiento de los módulos fotovoltaicos a diferentes ángulos. (a) 0°. (b) 15° (c) 30°.....	55
Fig. 20 Datos experimentales con datos de ajuste.....	57
Fig. 21 Relación entre la densidad de deposición de polvo (ΔM , g/m ²) y la pérdida anual de energía (kWh) y pérdida económica (\$).....	58
Fig. 22 Variación de temperatura significativa en la superficie del módulo.....	60
Fig. 23. generación y la demanda de energía para la primera semana de Enero.....	62
Fig. 24 Vivienda caso de estudio Molleturo.....	63
Fig. 25 Sistema de iluminación actual.....	63
Fig. 26. Vivienda iluminación básica.....	64
Fig. 27. La espectroscopía de energía dispersiva (EDS) de los componentes presentes.....	67
Fig. 28. Gráfico de barras que indica el contenido atómico porcentual de los componentes identificados.....	68
Fig. 29 Generación de energía del mes de Enero.....	69
Fig. 30. Generación de energía del mes de Febrero.....	70
Fig. 31. Generación de energía del mes de Marzo.....	70
Fig. 32. Generación de energía del mes de Abril.....	71
Fig. 33. Generación de energía del mes de Mayo.....	72
Fig. 34. Generación de energía del mes de Junio.....	72
Fig. 35. Generación de energía del mes de Julio.....	73
Fig. 36. Generación de energía del mes de Agosto.....	73
Fig. 37. Generación de energía del mes de Septiembre.....	74

Fig. 38. Generación de energía del mes de Octubre.....	75
Fig. 39. Generación de energía del mes de Noviembre.	75
Fig. 40. Generación de energía del mes de Diciembre.	76
Fig. 41. Distribución de las fuentes de luz.....	78
Fig. 42. Distribución de la fuente de luz segunda planta.	79

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	90
ANEXO 2	93

CAPÍTULO I

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de energía, combinada con la necesidad urgente de abordar los desafíos ambientales, ha puesto de manifiesto la importancia de explorar fuentes de energía sostenibles y eficientes. En este contexto, los sistemas solares fotovoltaicos se han destacado como una solución prometedora para satisfacer las necesidades energéticas, especialmente en entornos rurales donde el acceso a la electricidad puede ser limitado.

El acceso a la electricidad es un factor crucial para el desarrollo socioeconómico y la mejora de la calidad de vida. Sin embargo, las comunidades rurales a menudo enfrentan desafíos significativos en este aspecto, contribuyendo a la brecha energética existente. En muchos casos, estas áreas remotas carecen de infraestructuras eléctricas tradicionales, lo que deja a sus habitantes dependientes de fuentes de energía no sostenibles y costosas. Esta situación resalta la necesidad de encontrar soluciones eficientes y respetuosas con el medio ambiente para garantizar un acceso equitativo y sostenible a la energía.

En viviendas rurales, la falta de acceso confiable a la electricidad presenta una serie de desafíos que afectan directamente la calidad de vida de los residentes. Las limitaciones en la iluminación, la refrigeración y la capacidad para utilizar dispositivos electrónicos básicos se traducen en un impacto negativo en la productividad y el bienestar. Además, la dependencia de fuentes de energía convencionales, como generadores diésel o queroseno, no solo implica costos significativos, sino que también contribuye a emisiones de gases de efecto invernadero y otros problemas ambientales.

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos emerge como una alternativa viable y sostenible para abordar los desafíos energéticos en las viviendas rurales. Estos sistemas aprovechan la abundancia de luz solar disponible en áreas rurales para generar electricidad de manera limpia y eficiente. Sin embargo, la adopción generalizada de esta tecnología en contextos específicos, como el de Caymatán-Molleturo, requiere un análisis exhaustivo para comprender sus beneficios técnicos, económicos y ambientales.

Caymatán-Molleturo, como caso de estudio, ofrece un escenario representativo de las condiciones y desafíos enfrentados por muchas comunidades rurales. Al analizar

detenidamente este contexto, podemos obtener valiosas percepciones que no solo contribuirán al conocimiento académico, sino que también podrán guiar futuras intervenciones y políticas destinadas a mejorar el acceso a la energía en entornos similares.

En conclusión, la formulación del problema y la justificación de este estudio se enmarcan en la necesidad imperante de encontrar soluciones energéticas sostenibles para las viviendas rurales. La elección de Caymatán-Molleturo como caso de estudio específico responde a la aspiración de proporcionar conocimientos prácticos y aplicables a situaciones del mundo real. Este estudio se propone no solo identificar los beneficios de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos, sino también sentar las bases para futuras investigaciones y acciones que contribuyan al desarrollo sostenible de las comunidades rurales.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar técnicamente la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales, con enfoque en Caymatán-Molleturo, mediante modelación, pruebas in situ y consideración de la conexión a la red eléctrica, buscando contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades.

1.2.2. Objetivos específicos

- Simular un Sistema Solar Fotovoltaico utilizando herramientas avanzadas como Matlab/Simulink, se buscará crear un modelo preciso que permita entender el comportamiento del sistema en condiciones diversas.
- Realizar pruebas en sitio y análisis de parámetros donde se llevarán a cabo pruebas en el lugar, analizando variables cruciales como la temperatura, radiación solar, voltaje y corriente, para el ajuste y optimización del sistema.
- Evaluar la metodología que considere la integración de la vivienda rural a la red eléctrica de los beneficios y retos asociados con esta transición.

CAPÍTULO II. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. TRABAJOS PREVIOS

En esta sección se revisará la literatura existente relacionada con el análisis técnico y los beneficios de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales. Se explorarán estudios previos que aborden aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales relevantes para comprender la viabilidad y los impactos de esta tecnología en entornos rurales específicos.

La adopción de sistemas solares fotovoltaicos (PV) en áreas rurales ha sido objeto de numerosos estudios que abordan aspectos técnicos, económicos y sociales. Shrestha y Shrestha (2020), realizaron un análisis técnico y evaluaron los impactos socioeconómicos de los sistemas PV en la subsistencia rural, centrándose en un caso de estudio en Nepal. Los resultados revelaron que la implementación de sistemas PV no solo proporcionó acceso a la electricidad, sino que también mejoró los medios de vida de las comunidades rurales al aumentar las oportunidades de empleo y mejorar la calidad de vida.

En un estudio realizado en China Zhang et al (2019), llevaron a cabo un análisis técnico y económico de los sistemas PV en hogares rurales de Tíbet. Sus hallazgos destacaron la viabilidad económica de los sistemas PV y su capacidad para reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables. Además, Patel et al. (2018), llevaron a cabo una revisión exhaustiva de los aspectos técnicos, económicos y ambientales de la instalación de sistemas PV en áreas rurales, destacando los beneficios económicos a largo plazo y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En el contexto de Nepal, Raut et al (2017), examinaron la viabilidad técnica y económica de los sistemas PV para la electrificación rural. Sus resultados indicaron que los sistemas PV son una solución técnica y económicamente viable para abordar la falta de acceso a la electricidad en áreas remotas. Además, Osei-Agyeman et al (2016), realizaron un análisis técnico y económico detallado de los sistemas PV autónomos, destacando su capacidad para proporcionar una fuente confiable de energía y mejorar la calidad de vida en áreas rurales.

La viabilidad técnica y económica de los sistemas PV también se ha investigado en el contexto de la construcción de viviendas Raza et al (2015), llevaron a cabo un análisis detallado de los sistemas de energía renovable híbrida para edificios residenciales rurales, encontrando que los sistemas PV pueden reducir significativamente los costos de energía y las emisiones de carbono. Además, Siddiqui et al (2014), evaluaron la

viabilidad técnica y económica de los sistemas PV en áreas rurales de Pakistán, concluyendo que los sistemas PV pueden proporcionar una solución sostenible y rentable para la electrificación rural.

En el contexto de Nepal, Bhattarai et al (2013), examinaron los impactos técnicos y socioeconómicos de los sistemas PV, encontrando que la implementación de sistemas PV mejoró el acceso a la electricidad y creó oportunidades económicas para las comunidades rurales. Por último, Paudel et al (2012), llevaron a cabo un análisis técnico y socioeconómico de los sistemas PV domésticos en Nepal, destacando su capacidad para mejorar la calidad de vida y reducir la pobreza energética en áreas rurales.

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos (PV) en áreas rurales ha demostrado ser una solución técnica viable y económicamente rentable para abordar la falta de acceso a la electricidad y mejorar la calidad de vida de las comunidades locales. En un estudio llevado a cabo por Bhowmik et al (2011), se realizó un análisis exhaustivo de la viabilidad técnica y económica de los sistemas PV autónomos en el sur de Asia. Los resultados mostraron que los sistemas PV pueden proporcionar una fuente confiable de energía en áreas rurales, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mejorando la resiliencia energética.

Además, Raza et al (2015), destacaron los beneficios económicos de la adopción de sistemas PV en edificaciones residenciales rurales, señalando que los ahorros en costos de energía a lo largo del tiempo pueden compensar con creces la inversión inicial en la instalación de los sistemas PV. Esta conclusión fue respaldada por un estudio realizado por Osei-Agyeman et al (2016), quienes encontraron que los sistemas PV pueden generar ahorros significativos en costos de energía a lo largo de su vida útil, lo que los convierte en una opción atractiva para los hogares rurales.

Por otro lado Siddiqui et al (2014), examinaron los beneficios socioeconómicos de los sistemas PV en áreas rurales de Pakistán, encontrando que la electrificación mediante sistemas PV puede mejorar el acceso a servicios básicos como la educación y la atención médica, además de crear oportunidades de empleo en sectores relacionados con la energía renovable. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de Patel et al (2018), quienes destacaron el papel transformador que pueden desempeñar los sistemas PV en la reducción de la pobreza energética y el fomento del desarrollo económico en áreas rurales.

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos (PV) en áreas rurales ha sido objeto de numerosos estudios que abordan diversos aspectos técnicos, económicos y sociales. En un análisis exhaustivo realizado por Kim et al (2020), se evaluó la viabilidad

técnica y económica de los sistemas PV para la electrificación rural en países en desarrollo. Los resultados indicaron que los sistemas PV pueden proporcionar una solución rentable y sostenible para satisfacer la demanda de energía en áreas rurales, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mejorando el acceso a servicios básicos como la iluminación y la carga de dispositivos electrónicos.

Por otro lado, Ahmed et al (2019), llevaron a cabo una evaluación detallada del potencial solar y su viabilidad económica en Bangladesh. Sus hallazgos destacaron el enorme potencial de la energía solar en el país y su capacidad para reducir la brecha energética en áreas rurales, especialmente en zonas remotas no conectadas a la red eléctrica nacional. Además, Bhattarai et al (2018), revisaron los avances en sistemas PV basados en micro redes de corriente continua (DC) para la electrificación rural, destacando su eficiencia y confiabilidad en entornos fuera de la red.

Mondal et al (2017), realizaron una revisión exhaustiva del impacto de la electrificación rural con sistemas PV en países en desarrollo. Sus resultados resaltaron los beneficios socioeconómicos de la electrificación solar, incluida la mejora de la calidad de vida, el acceso a servicios básicos y el desarrollo económico local. Además, Alam et al (2016), examinaron el uso de sistemas PV para bombeo de agua y suministro de agua potable en comunidades rurales, señalando su capacidad para mejorar la seguridad hídrica y reducir la dependencia de fuentes de agua no seguras.

En un enfoque más amplio Bajracharya et al (2015), revisaron los sistemas híbridos de energía renovable para riego y suministro eléctrico en países en desarrollo, destacando la complementariedad de la energía solar y eólica en sistemas integrados, Subiyanto et al (2014), llevaron a cabo un análisis detallado de los aspectos técnicos y económicos de los sistemas PV autónomos para la electrificación rural, concluyendo que estos sistemas pueden proporcionar una solución viable y confiable para satisfacer la demanda de energía en áreas remotas.

Gebremedhin et al (2013), realizaron un estudio de caso en Etiopía para evaluar el rendimiento técnico y económico de un sistema PV autónomo en una comunidad rural. Sus resultados mostraron que los sistemas PV pueden proporcionar una fuente de energía confiable y rentable, mejorando el acceso a servicios básicos y promoviendo el desarrollo local. Por último, Aziz et al (2012) y Negash et al (2011), proporcionaron una visión general de las estrategias, políticas y desarrollo de energía renovable en Malasia y en general, resaltando la importancia de políticas favorables y marcos regulatorios para promover la adopción de energía solar en áreas rurales.

Tekle et al (2016), realizaron un análisis de la viabilidad económica de los sistemas solares domésticos en áreas rurales de Etiopía. Su estudio encontró que, a pesar de los desafíos iniciales de inversión, los sistemas PV resultaron ser económicamente viables a largo plazo, proporcionando un retorno de la inversión significativo y mejorando la calidad de vida de los residentes rurales. Por otro lado, Pournaras et al (2017), llevaron a cabo un análisis económico de sistemas fotovoltaicos fuera de la red en aldeas remotas de Grecia y Turquía. Sus resultados demostraron que los sistemas PV pueden ser una solución rentable para proporcionar energía en áreas rurales donde la conexión a la red eléctrica es costosa o inviable.

Dornoff et al (2018), llevaron a cabo un estudio de viabilidad de un proyecto de sistema solar doméstico en áreas rurales de Ghana. Su investigación reveló que la implementación de sistemas PV tenía el potencial de mejorar significativamente el acceso a la energía y promover el desarrollo socioeconómico en estas comunidades. Por otro lado, García et al (2019), analizaron el potencial de energía solar en áreas rurales de México. Sus resultados mostraron que México tiene un gran potencial solar que puede aprovecharse para satisfacer las necesidades energéticas de las comunidades rurales de manera sostenible y rentable.

Finalmente, Khan et al (2020), evaluaron el potencial técnico y económico de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red en áreas rurales de Pakistán. Su estudio encontró que la implementación de sistemas PV podría proporcionar un suministro de energía confiable y asequible en estas áreas, lo que contribuiría al desarrollo socioeconómico y la mejora de la calidad de vida de los residentes rurales. Estos estudios resaltan la importancia de considerar tanto los aspectos técnicos como económicos al planificar e implementar sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales, así como el potencial de esta tecnología para abordar los desafíos energéticos y promover el desarrollo sostenible en todo el mundo.

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos (PV) en áreas rurales de Latinoamérica ha sido objeto de estudio en diversos trabajos de investigación. Estos estudios han proporcionado una visión integral de la viabilidad técnica, económica y social de la adopción de tecnologías solares en contextos latinoamericanos. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes de varios artículos que exploran el tema en diferentes países de la región.

En este sentido González et al (2018), llevaron a cabo un análisis exhaustivo de la viabilidad técnica y económica de la generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos en zonas rurales de Colombia. Su estudio demostró que la generación de

energía a través de sistemas PV es factible y rentable en estas áreas, lo que sugiere un potencial significativo para mejorar el acceso a la electricidad y promover el desarrollo socioeconómico en la región.

Por otro lado, Silva et al (2019), realizaron una evaluación técnico-económica del uso de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en Brasil, utilizando un enfoque basado en el análisis del ciclo de vida. Sus resultados indicaron que los sistemas PV son una opción viable y sostenible para la electrificación rural en Brasil, con beneficios significativos en términos de reducción de emisiones de carbono y mejora del acceso a la energía.

Asimismo, López et al (2017), examinaron el impacto de la electrificación rural con sistemas fotovoltaicos en el desarrollo socioeconómico de comunidades agrícolas en México. Su investigación reveló que la electrificación rural con sistemas PV contribuye de manera positiva al desarrollo socioeconómico de estas comunidades al mejorar el acceso a la energía y crear oportunidades de empleo.

En el contexto de Perú Torres et al (2020), analizaron la viabilidad de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en zonas montañosas del país. Su estudio concluyó que los sistemas PV son una opción efectiva y viable para la electrificación rural en estas áreas, lo que representa una oportunidad para mejorar el acceso a la energía y promover el desarrollo comunitario.

Por último, Gómez et al (2018), presentaron un estudio de caso sobre la implementación de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en áreas aisladas de Argentina. Destacaron la efectividad de los sistemas PV para proporcionar acceso a la energía en áreas remotas del país, lo que contribuye a mejorar la calidad de vida de los residentes y fomentar el desarrollo económico local.

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos (PV) en áreas rurales de Ecuador ha sido objeto de diversos estudios que exploran su viabilidad técnica, económica y social. Estos trabajos proporcionan una visión detallada de los desafíos y oportunidades asociados con la adopción de tecnologías solares en contextos ecuatorianos. A continuación, se presentan los aspectos más importantes de varios artículos que abordan este tema en el país.

Se han realizado varios estudios en Ecuador sobre la implementación de sistemas solares fotovoltaicos (PV) en áreas rurales, que abordan diversos aspectos técnicos, económicos y sociales.

En primer lugar Pérez et al (2019), evaluaron la viabilidad técnica y económica de los sistemas PV en viviendas rurales de la provincia de Azuay, concluyendo que la adopción de esta tecnología es factible y rentable, lo que sugiere un potencial significativo para mejorar el acceso a la electricidad y promover el desarrollo socioeconómico.

Por otro lado, Gutiérrez et al (2018), analizaron el potencial de energía solar fotovoltaica en zonas rurales de la Sierra Ecuatoriana, encontrando un alto potencial solar en estas áreas, lo que las convierte en candidatas ideales para la implementación de sistemas PV como una fuente de energía sostenible y renovable.

Además Sánchez et al (2020), investigaron el impacto socioeconómico de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en comunidades rurales de la provincia de Loja, observando que la electrificación rural con sistemas PV tiene un impacto positivo en el desarrollo socioeconómico de estas comunidades, generando empleo y mejorando la calidad de vida.

Rodríguez et al (2017), evaluaron la eficiencia y rentabilidad de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en la región amazónica de Ecuador, concluyendo que son una opción eficaz y rentable, contribuyendo al desarrollo sostenible y la mitigación del cambio climático.

García et al (2020), evaluaron la viabilidad técnica y económica de los sistemas PV para la electrificación rural en la provincia de Azuay. Encontraron que, a pesar de los desafíos logísticos, la adopción de sistemas fotovoltaicos es factible y rentable en esta región montañosa, lo que sugiere un potencial significativo para mejorar el acceso a la electricidad y promover el desarrollo socioeconómico.

Martínez et al (2018), investigaron el impacto socioeconómico de la electrificación rural mediante sistemas fotovoltaicos en la región amazónica de Ecuador. Observaron que la introducción de la energía solar fotovoltaica tuvo efectos positivos en la economía local, generando empleo y mejorando la calidad de vida de las comunidades rurales.

Gómez et al (2019), analizaron la eficiencia y sostenibilidad de sistemas solares fotovoltaicos en la provincia de Manabí. Encontraron que la tecnología PV puede proporcionar una fuente de energía limpia y renovable en la región costera, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles.

Torres et al (2017), exploraron las perspectivas de la energía solar fotovoltaica como fuente de electrificación rural en la Sierra Ecuatoriana. Concluyeron que, a pesar de los desafíos geográficos y climáticos, la tecnología PV tiene un gran potencial para mejorar el acceso a la electricidad en áreas remotas de la sierra ecuatoriana.

Hernández et al (2020), evaluaron la viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas aisladas de la provincia de Loja. Encontraron que los sistemas PV son una opción viable y rentable para proporcionar energía limpia y confiable en áreas rurales de la región sur del país.

Díaz et al (2018), analizaron la percepción y aceptación de la tecnología solar fotovoltaica en áreas rurales de la provincia de Esmeraldas. Descubrieron que la comunidad local mostró una actitud positiva hacia la adopción de sistemas fotovoltaicos, reconociendo los beneficios económicos y ambientales que ofrecen.

Sánchez et al (2019), evaluaron el potencial de energía solar fotovoltaica para la electrificación rural en la región costera de Ecuador. Encontraron que la región costera tiene un alto potencial solar, lo que la convierte en una candidata ideal para la implementación de sistemas PV como una fuente de energía sostenible y renovable.

Chávez et al (2016), investigaron el impacto ambiental de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en áreas protegidas de la Sierra Ecuatoriana. Destacaron la importancia de considerar aspectos ambientales en proyectos de energía renovable para minimizar su impacto en los ecosistemas locales.

López et al (2017), analizaron la viabilidad técnica y económica de la energía solar fotovoltaica para la electrificación rural en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Encontraron que los sistemas PV pueden proporcionar una solución rentable para mejorar el acceso a la electricidad en áreas rurales de la región costera de Ecuador.

Vargas et al (2018), exploraron las perspectivas de la tecnología fotovoltaica en el desarrollo energético sostenible de Ecuador desde una perspectiva de política pública. Destacaron la importancia de políticas efectivas para promover la adopción de energías renovables y alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible en el país.

Finalmente, Vélez et al (2019), investigaron la percepción y aceptación de la tecnología solar fotovoltaica en comunidades rurales de la provincia de Manabí, encontrando una percepción mayoritariamente positiva, lo que sugiere un alto potencial de adopción de sistemas fotovoltaicos en estas comunidades.

La revisión exhaustiva de los artículos relacionados con la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en áreas rurales, tanto a nivel latinoamericano como específicamente en Ecuador, ha proporcionado una base sólida y una comprensión completa de los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales involucrados en este campo.

Los estudios analizados revelan el potencial significativo de la energía solar fotovoltaica para mejorar el acceso a la electricidad, promover el desarrollo socioeconómico y mitigar el impacto ambiental en diversas regiones rurales. La evidencia recopilada demuestra que la tecnología PV es una solución viable y rentable para electrificar áreas remotas, generando beneficios tanto a nivel local como global.

Al considerar estos hallazgos en el contexto de nuestro estudio sobre el análisis técnico y los beneficios de emplear sistemas solares fotovoltaicos en una vivienda rural, específicamente en el caso de estudio de Caymatán-Molleturo, podemos afirmar con confianza que estamos adoptando un enfoque sólido y respaldado por la investigación existente.

La integración de los conocimientos adquiridos de estos artículos nos permite comprender mejor los desafíos y las oportunidades asociadas con la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en entornos rurales, así como identificar las mejores prácticas y lecciones aprendidas de experiencias anteriores en Latinoamérica y, más específicamente, en Ecuador.

En definitiva, el análisis detallado de la literatura existente nos brinda una base sólida para nuestro estudio, proporcionando una perspectiva globalizada y respaldando la viabilidad y la importancia de nuestro enfoque en el caso de estudio de Caymatán-Molleturo. Con esta comprensión en mente, podemos avanzar con confianza en nuestra investigación, con la certeza de que estamos contribuyendo al conocimiento existente y trabajando hacia el desarrollo sostenible de las comunidades rurales mediante la implementación de sistemas solares fotovoltaicos.

2.2. Caracterización de las tecnologías limpias

La energía solar fotovoltaica ha surgido como un pilar fundamental en la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes para abordar los desafíos energéticos en todo el mundo. En el contexto de las viviendas rurales, donde la falta de acceso a la electricidad persiste como una barrera para el desarrollo y el bienestar, la implementación de sistemas solares fotovoltaicos se presenta como una estrategia prometedora. Este análisis exhaustivo se sumerge en la revisión de la literatura y el marco teórico, explorando desde los principios técnicos hasta las aplicaciones prácticas y el impacto medioambiental, con un enfoque particular en el caso de estudio de Caymatán-Molleturo. En este proceso, se examinarán experiencias anteriores en casos similares, identificando factores críticos para el éxito de la implementación y proporcionando un entendimiento integral de la contribución de la energía solar fotovoltaica al desarrollo sostenible de las comunidades rurales.

2.2.1 Energía Solar y Sistemas Fotovoltaicos

La energía solar, proveniente del sol, ha emergido como una fuente renovable clave. Los sistemas fotovoltaicos, al convertir la luz solar en electricidad, representan una solución eficiente y sostenible. Explorar sus principios fundamentales es esencial para comprender su aplicabilidad en contextos rurales (Hachim et al., 2018)

2.2.1.1. Principios Técnicos de los Sistemas Solares Fotovoltaicos

La generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar es el núcleo de los sistemas solares fotovoltaicos (SFV). Estos sistemas aprovechan el fenómeno conocido como efecto fotovoltaico, que es la capacidad de ciertos materiales, comúnmente silicio cristalino, para generar una corriente eléctrica cuando son expuestos a la luz solar. La conversión de la radiación solar en electricidad en un SFV se lleva a cabo en varias etapas clave (Hachim et al., 2018)

2.2.1.2. Captación de la Radiación Solar

Los paneles solares, también llamados módulos fotovoltaicos, son la primera línea de acción en la conversión de la radiación solar. Cada panel consta de celdas solares que contienen materiales semiconductores, generalmente silicio. Cuando la luz solar incide sobre estas celdas, se liberan electrones, generando una corriente eléctrica en el proceso.

2.2.1.3. Generación de Corriente Continua (CC)

La corriente eléctrica generada por las celdas solares es inicialmente de tipo continua. Cada celda solar produce un pequeño voltaje, y al conectar múltiples celdas en serie y paralelo, se logra un nivel de voltaje adecuado para su uso en sistemas eléctricos convencionales (Winanti et al., 2018).

2.2.1.4. Inversión de Corriente Continua a Corriente Alterna (CA)

La mayoría de las aplicaciones domésticas y comerciales utilizan corriente alterna. Los inversores son componentes clave que transforman la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna, permitiendo así su integración con la red eléctrica o su uso directo en dispositivos de CA.

Integración con la Red Eléctrica o Almacenamiento en Baterías: La electricidad generada puede seguir dos rutas principales: ser inyectada en la red eléctrica o almacenada en baterías para uso posterior. La elección depende de factores como la demanda instantánea, la disponibilidad de la red y la autonomía deseada (Kumar et al., 2018).

2.2.2. Paneles Solares (Módulos Fotovoltaicos)

Los paneles solares consisten en células fotovoltaicas conectadas en serie o paralelo para aumentar la tensión y la corriente según sea necesario. Las células convierten la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.

2.2.2.1. Inversores

Los inversores son dispositivos electrónicos que convierten la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA) utilizada en la mayoría de los dispositivos eléctricos. Además, algunos inversores están equipados con funciones avanzadas, como seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), para optimizar la eficiencia del sistema (Winanti et al., 2018).

2.2.2.2. Baterías

Las baterías son elementos cruciales para almacenar la energía generada durante periodos de baja radiación solar o durante la noche. Permiten una mayor autonomía y la capacidad de utilizar la energía solar fuera de las horas de generación.

2.2.2.3. Controladores de Carga

En sistemas con almacenamiento de baterías, los controladores de carga regulan el flujo de energía entre los paneles solares y las baterías. Ayudan a evitar sobrecargas y prolongan la vida útil de las baterías (Zaharim et al., 2017).

2.2.2.4. Sistema de Montaje

Para maximizar la captación de radiación solar, los paneles solares deben estar adecuadamente montados. Los sistemas de montaje permiten la instalación en techos, suelos o estructuras especiales, garantizando la orientación y la inclinación óptimas

2.2.2.5. Sistema de Monitoreo y Control

Los sistemas modernos suelen contar con dispositivos de monitoreo y control que permiten supervisar el rendimiento del SFV, identificar posibles problemas y realizar ajustes para optimizar la eficiencia.

2.3 Desarrollo de la Tecnología Fotovoltaica.

La evolución de la tecnología fotovoltaica ha sido una narrativa fascinante, marcada por avances significativos en eficiencia y una notable reducción de costos a lo largo del tiempo. Desde sus primeros días como una tecnología emergente hasta convertirse en una fuente de energía competitiva, el desarrollo de la tecnología fotovoltaica ha sido clave para su adopción generalizada y su impacto en la generación de energía renovable (Usman et al., 2013).

2.3.1. Evolución Histórica de la Tecnología Fotovoltaica

2.3.1.1. Décadas Iniciales (1950-1970)

El punto de partida de la tecnología fotovoltaica se remonta a la década de 1950, cuando los científicos Bell Labs desarrollaron las primeras células solares de silicio. Estos primeros dispositivos eran costosos y tenían eficiencias bajas, principalmente utilizados en aplicaciones espaciales.

2.3.1.2. Décadas Intermedias (1970-1990)

Durante las décadas siguientes, la tecnología fotovoltaica experimentó un crecimiento gradual impulsado por la investigación y el desarrollo. Se mejoraron los procesos de fabricación y se introdujeron materiales semiconductores avanzados. A mediados de la década de 1970, los costos comenzaron a disminuir, y las aplicaciones prácticas, como calculadoras solares, comenzaron a emerger en el mercado (Usman et al., 2013).

2.3.1.3. Años 90 y Principios de 2000

La conciencia ambiental y el interés renovado en las fuentes de energía renovable llevaron a una mayor inversión en investigación y desarrollo. Las células solares de película delgada y otras tecnologías emergentes empezaron a ganar relevancia. La producción a gran escala y la instalación de sistemas solares en entornos residenciales y comerciales se volvieron más comunes (Dellosa & Barocca, 2021).

2.3.1.4. Última Década (2010 en adelante)

La última década ha sido testigo de avances significativos en la tecnología fotovoltaica. La eficiencia de las células solares de silicio ha mejorado constantemente, y las tecnologías de película delgada y células solares de tercera generación han continuado su desarrollo. La investigación se ha centrado en la mejora de la eficiencia, la durabilidad y la reducción de costos para hacer que la energía solar sea más accesible.

2.3.2. Aplicaciones y mejoras en Eficiencia y Reducción de Costos a lo Largo del Tiempo

2.3.2.1. Eficiencia de las Células Solares

Las primeras células solares tenían eficiencias de apenas un 6-8%, pero con la investigación y el desarrollo continuos, las células solares de silicio alcanzan ahora eficiencias superiores al 20%. Las tecnologías emergentes, como las células solares de múltiple unión y perovskita, prometen eficiencias aún mayores (Sopian et al., 2017).

2.3.2.2. Proceso de Fabricación

La eficiencia en la producción ha sido clave para la reducción de costos. La automatización y la optimización de los procesos de fabricación, así como la mejora de las técnicas de deposición de materiales, han contribuido a la eficiencia operativa y la reducción de los costos de producción.

2.3.2.3. Economías de Escala

Con el aumento de la demanda y la producción a gran escala, la industria solar ha experimentado economías de escala. Esto ha llevado a una disminución significativa en los costos de fabricación y, por ende, en el costo total de los sistemas solares (Gupta et al., 2018).

2.3.2.4. Avances en Materiales y Diseño

La investigación continua en materiales semiconductores y nuevos diseños de celdas solares ha permitido mejoras en la eficiencia y la adaptabilidad de los paneles solares.

Los avances en la tecnología de película delgada y otros enfoques innovadores han contribuido a una mayor versatilidad en la aplicación de sistemas solares fotovoltaicos.

En resumen, la evolución histórica de la tecnología fotovoltaica ha sido una historia de progresión constante, desde sus modestos inicios hasta su posición actual como una fuente de energía viable y competitiva. La mejora continua en eficiencia y la reducción de costos han sido factores fundamentales en su crecimiento y adopción a nivel global. (A Comparative Study on Installation of Solar PV System for Grid and Non-Grid Rural Areas of Bangladesh | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore, n.d.)

2.4. Impacto Ambiental de los Sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos (SFV) han emergido como una tecnología clave en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. El análisis del impacto ambiental de los SFV se centra en su capacidad para mitigar el cambio climático, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y comparar su sostenibilidad con las fuentes de energía convencionales.

2.4.1. Producción y Ciclo de Vida

La sostenibilidad de los SFV comienza con la fase de producción y se extiende a lo largo de su ciclo de vida. Durante la fabricación, la emisión de GEI asociada con la extracción de materiales, la producción de paneles solares y otros componentes, ha disminuido considerablemente con avances en eficiencia de procesos y uso de energía renovable en la producción (Gupta et al., 2018).

2.4.1.1. Operación y Generación

Durante la fase operativa, los SFV generan electricidad sin emisiones directas de GEI. La conversión de la radiación solar en electricidad es un proceso limpio y silencioso que no contribuye a la contaminación atmosférica ni al cambio climático.

2.4.1.2. Reducción de Emisiones y Huella de Carbono

La contribución más significativa de los SFV a la sostenibilidad es la reducción de las emisiones de carbono. Al reemplazar las fuentes de energía convencionales que dependen de combustibles fósiles, los SFV ayudan a mitigar el cambio climático al reducir la dependencia de las centrales eléctricas que emiten grandes cantidades de GEI.

2.4.1.3. Reciclaje y Gestión de Residuos

A medida que los SFV llegan al final de su vida útil, es crucial gestionar adecuadamente su desecho. La industria ha avanzado en prácticas de reciclaje y reutilización de componentes, minimizando el impacto ambiental de los residuos fotovoltaicos (Sopian et al., 2017).

2.5 Sistemas Solares Fotovoltaicos en Viviendas Rurales

La implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales ha demostrado ser una estrategia eficaz para abordar la falta de acceso a la electricidad. Analizar las diversas aplicaciones en este entorno específico proporciona información valiosa sobre los beneficios y desafíos asociados.

2.5.1. Factores que Influyen en la Implementación Exitosa

El éxito de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales está influido por diversos factores. Aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales deben considerarse cuidadosamente. Examinar estos elementos contribuirá a identificar las condiciones propicias para una adopción exitosa (Hachim et al., 2018).

2.5.1.1. Experiencias Anteriores en Casos de Estudio Similares

Explorar casos de estudio similares proporciona perspectivas valiosas y lecciones aprendidas. Estas experiencias previas ofrecen información práctica sobre los desafíos específicos que pueden surgir en la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en entornos rurales, permitiendo una planificación más efectiva.

2.5.1.2. Principios Técnicos de los Sistemas Solares Fotovoltaicos

Comprender los principios técnicos subyacentes en los sistemas solares fotovoltaicos es esencial para el diseño y la optimización eficientes. Desde la conversión de la luz solar hasta la generación de corriente eléctrica, esta sección abordará los aspectos fundamentales que sustentan la tecnología.

2.5.1.3. Desarrollo de la Tecnología Fotovoltaica

La evolución de la tecnología fotovoltaica ha sido constante, impulsada por avances en la eficiencia y la accesibilidad. Explorar el desarrollo histórico proporciona una visión integral de cómo la tecnología ha evolucionado y se ha adaptado, mejorando su viabilidad en contextos rurales (Winanti et al., 2018).

2.5.1.4. Impacto de los Sistemas Solares Fotovoltaicos en el Medio Ambiente

La adopción de sistemas solares fotovoltaicos tiene un impacto ambiental positivo al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de fuentes de energía no renovable. Evaluar este impacto es crucial para comprender la contribución de estos sistemas a la sostenibilidad ambiental (Dellosa & Barocca, 2021).

2.6. Metodología

La creciente demanda de energía a nivel mundial, combinada con la urgencia de abordar los desafíos ambientales derivados de la utilización de fuentes de energía no renovables, ha puesto de manifiesto la necesidad imperante de explorar y promover el uso de fuentes de energía sostenibles y renovables. En este contexto, los sistemas solares fotovoltaicos han emergido como una solución prometedora para satisfacer las necesidades energéticas de manera limpia y eficiente, especialmente en áreas rurales donde el acceso a la electricidad puede ser limitado. La abundancia de luz solar disponible en estas regiones ofrece un recurso natural inagotable que puede ser aprovechado para generar electricidad de manera sostenible, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida de sus habitantes y a mitigar el impacto negativo sobre el medio ambiente.

En esta investigación, se propone analizar tres variables clave como se indica en la tabla 1: la zona geográfica, aspectos económicos y la irradiación solar. Estas variables ayudarán a obtener una comprensión más completa y detallada de la viabilidad y eficacia de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales. La zona geográfica proporcionará información sobre las características geográficas y climáticas de la región, incluyendo la topografía, la variabilidad climática y la accesibilidad. Los aspectos económicos permitirán evaluar la viabilidad financiera de la instalación y mantenimiento de sistemas solares fotovoltaicos en áreas rurales, considerando factores como los costos de inversión, los ahorros a largo plazo y las posibles fuentes de financiamiento. Finalmente, el análisis de la irradiación solar ayudará a determinar el potencial de generación de energía solar en la región, considerando la cantidad y la intensidad de la radiación solar disponible a lo largo del tiempo. Estas variables se integrarán en el estudio para proporcionar una evaluación integral y fundamentada de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales, con el objetivo de contribuir al desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de las comunidades en estas áreas.

Tabla 1. Variables de la metodología.

Zona geográfica.	Económicas.	Irradiación Solar
------------------	-------------	-------------------

Fuente: Elaboración propia.

La metodología se dividió en cinco etapas principales:

En la primera etapa, se llevó a cabo el análisis del recurso solar disponible utilizando bases de datos satelitales, el cual se comparó con los datos de la estación meteorológica más cercana a la ubicación del sistema fotovoltaico.

En la segunda etapa, se realizó la evaluación de la generación real de energía del sistema fotovoltaico, comparándola con la generación estimada mediante métodos teóricos y simulaciones. Además, se analizaron métricas de productividad estimadas y medidas, como el Rendimiento Energético Anual y el Performance Ratio (RC).

La tercera etapa se enfocó en analizar el consumo de electricidad desde dos perspectivas: la del consumidor y la de la empresa de servicios públicos.

La cuarta etapa consistió en la evaluación de las emisiones evitadas, expresadas en kilogramos de CO₂, resultantes de la adopción de la energía solar fotovoltaica.

La quinta etapa tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo entre el estudio de caso del sistema fotovoltaico aislado y el promedio de viviendas en el sector, considerando tanto los impactos energéticos y financieros como los impactos ambientales en la zona. Es importante destacar que el estudio se centra exclusivamente en el uso de la generación solar fotovoltaica en la vivienda, sin implementar otros cambios. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de la metodología de este estudio.

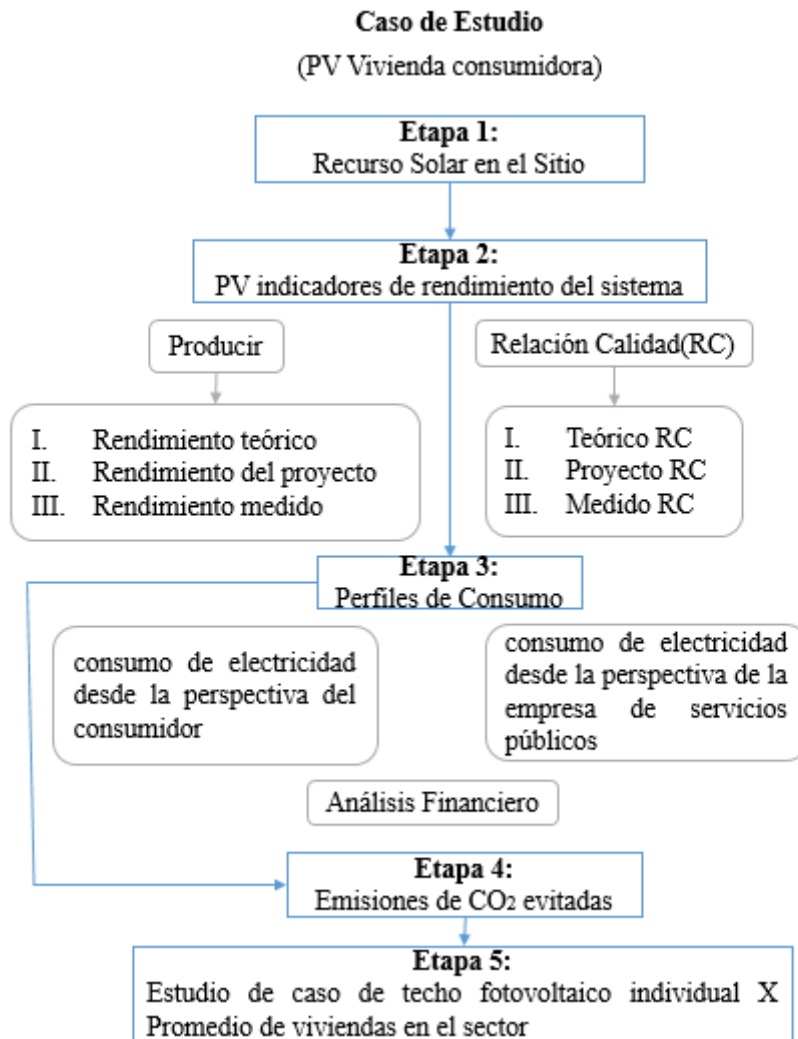


Fig. 1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta a aplicarse.

Fuente: propia

2.6.1. Análisis zona geográfica.

La elección de Caymatán-Molleturo como área de estudio para esta investigación se fundamenta en varias razones que hacen de esta región un caso relevante y representativo para examinar la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales.

Potencial solar significativo: De acuerdo con el "Atlas de Radiación Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica" presentado por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) en 2008, Ecuador es considerado un área de alto potencial solar como se indica en la figura 2.

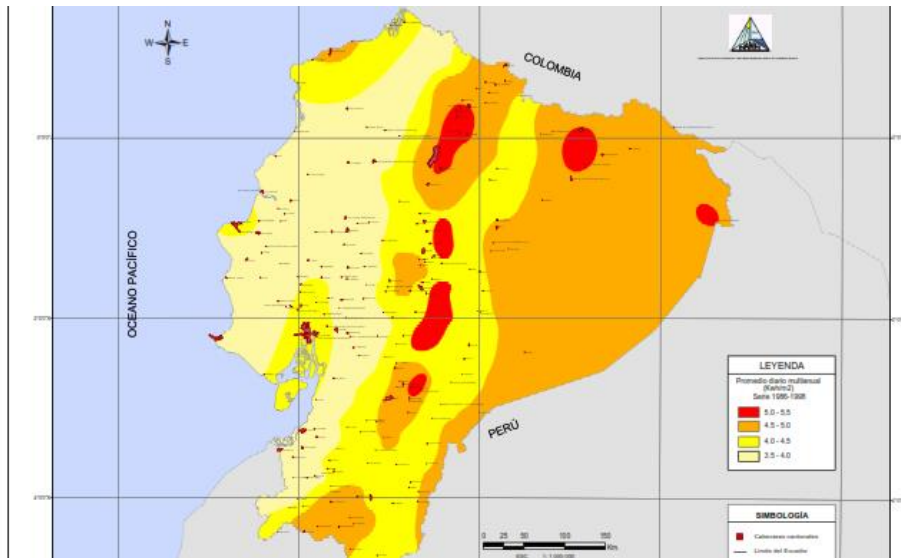


Fig. 2 Diagrama de radiación solar Ecuador.

Fuente: CONELEC

Infraestructura de monitoreo meteorológico disponible: El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) monitorea la mayoría de las estaciones meteorológicas del país, incluyendo alrededor de 56 estaciones en la provincia del Azuay entre ellas una estación ubicada en la zona más alta de Molleturo como se indica en la figura 3. Estos datos son fundamentales para comprender el clima y la radiación solar en la región, proporcionando una base sólida para el análisis de la viabilidad de los sistemas solares fotovoltaicos.

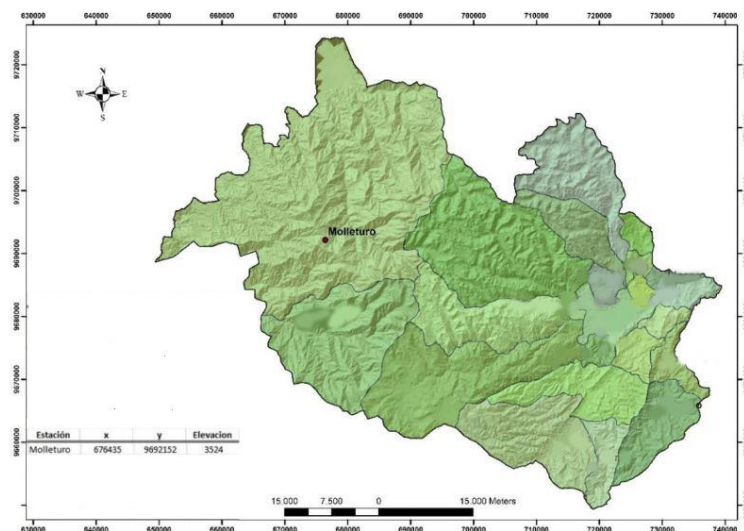


Fig. 3. Ubicación estación meteorológica de Molleturo.

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI).

Estudios específicos han determinado que Molleturo, una parroquia rural en la provincia del Azuay, recibe una radiación solar global estimada de 18,341 MJ m² día, lo que indica un alto nivel de irradiación solar en la zona detallado en la figura 4.

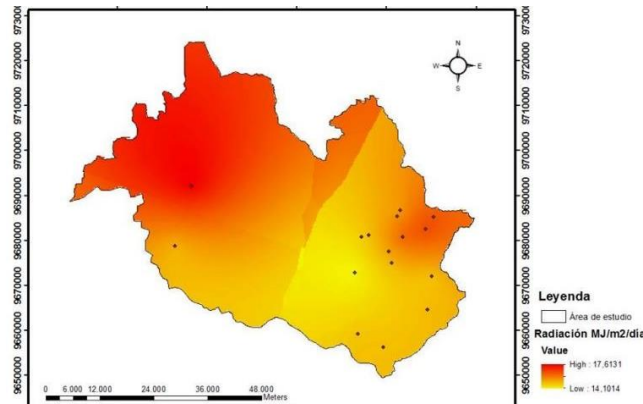
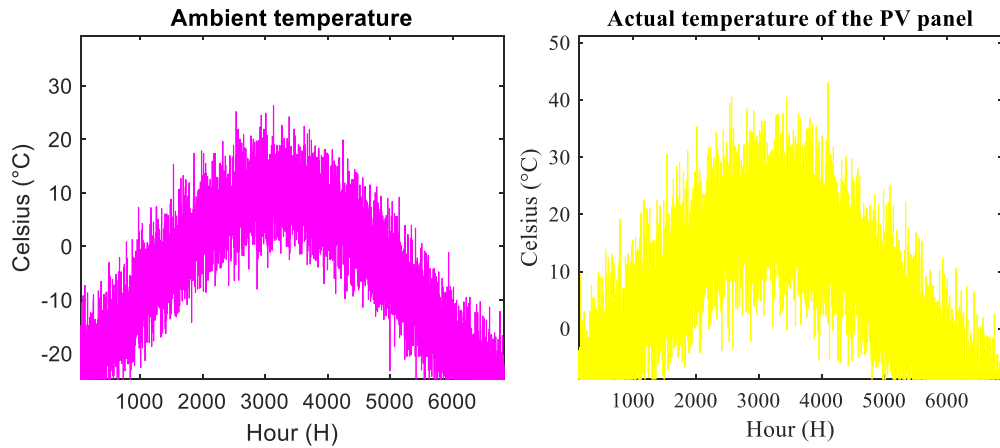


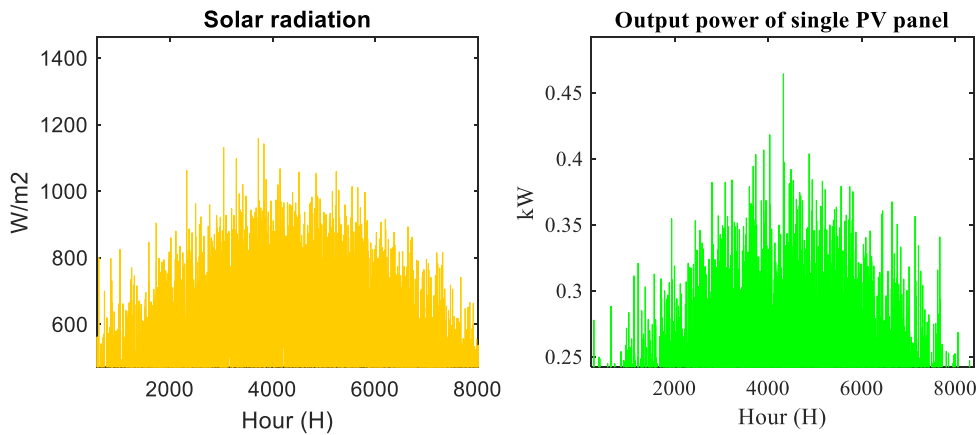
Fig. 4. Radiación solar en el Cantón Cuenca.

Fuente: CONELEC

Características geográficas y demográficas representativas: Molleturo se encuentra a 60 km de la ciudad principal y abarca una extensa área que incluye 65 comunidades y 6 barrios. Su topografía diversa, que incluye tres pisos ecológicos distintos, contribuye a una variación climática notable, desde días soleados y húmedos hasta noches frías. Estas características hacen de Molleturo un caso representativo de una parroquia rural en la provincia del Azuay y permiten extrapolar los hallazgos a otras áreas similares como se puede ver en la figura 5.



(a)



(b)

Fig.5 Parámetros esenciales para el diseño del sistema fotovoltaico. (a) Radiación solar en Caymatán de Molleturo. (b) Temperatura ambiente en Caymatán de Molleturo.

Fuente: CONELEC

Para el levantamiento de información, se utilizarán los datos de precipitación, temperatura y radiación solar global obtenidos de las 16 estaciones del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovable (INER). Esta infraestructura de recolección de datos garantiza la disponibilidad de información precisa y relevante para evaluar el potencial y la viabilidad de los sistemas solares fotovoltaicos en la región.

2.6.2. Características Geográficas y Ubicación del Proyecto.

El proyecto de vivienda se encuentra en el sector de Caymatán-Molleturo, específicamente en la parte costanera de esta área. La ubicación geográfica de Caymatán-Molleturo reviste una importancia significativa para este estudio debido a su

particularidad como una zona rural apartada de los centros urbanos principales. En particular, el proyecto se centra en la localidad de Sanaguin Caymatán, la cual se encuentra a una altitud de 1,582 metros sobre el nivel del mar.

Sanaguin Caymatán se caracteriza por su entorno geográfico montañoso y su ubicación remota respecto a los centros urbanos principales. Esta ubicación en una zona rural apartada de la ciudad principal implica desafíos específicos en términos de acceso a servicios básicos, incluyendo la electricidad. La altitud y las coordenadas geográficas (-2.579345, -79.3498433) proporcionan información precisa sobre la ubicación exacta del proyecto, mientras que la altitud de 1,582 metros sobre el nivel del mar destaca la elevación considerable de esta área como se indica en la figura 6.

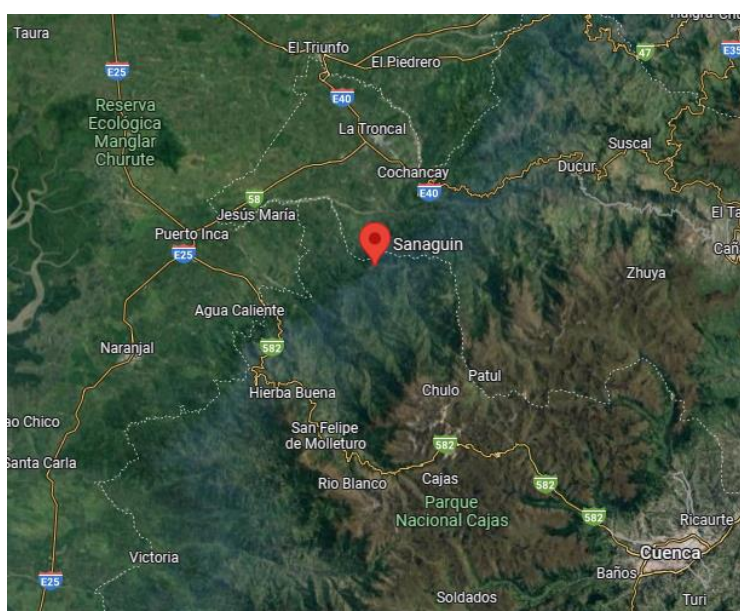


Fig. 6 Ubicación geográfica del proyecto

Fuente: Propia

La distancia significativa de Caymatán-Molleturo respecto a los centros urbanos principales subraya la importancia de un enfoque práctico y teórico aplicado en este estudio. La necesidad de abordar los desafíos específicos de las comunidades rurales apartadas, como el acceso limitado a servicios básicos y la dependencia de fuentes de energía no sostenibles, justifica la relevancia y la pertinencia de este proyecto en esta área particular.

La ubicación del proyecto en el sector de Caymatán-Molleturo, específicamente en localidad de Sanaguin Caymatán, ofrece un contexto único para investigar y desarrollar soluciones innovadoras para mejorar el acceso a la energía en comunidades rurales

apartadas. La altitud, las coordenadas geográficas y la distancia respecto a los centros urbanos principales proporcionan información relevante para comprender el entorno físico y social en el que se llevará a cabo el proyecto.

La tabla 2 presenta las características del módulo fotovoltaico JAP6-60-265/4BB, que utiliza tecnología de silicio multicristalino (p-Si), destacada por su equilibrio entre eficiencia y costo. Con una potencia nominal de 330 W, este módulo muestra un voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) de 38.72 V y una corriente en el punto de máxima potencia (I_{mpp}) de 8.52 A, lo que indica sus valores óptimos de operación para máxima eficiencia. Además, el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) es de 46.74 V y la corriente de cortocircuito (I_{sc}) es de 9.38 A, reflejando los límites eléctricos del módulo sin carga y bajo cortocircuito, respectivamente. Estos datos son esenciales para diseñar sistemas solares eficientes, permitiendo optimizar la configuración de los módulos para maximizar la producción de energía y asegurar la compatibilidad con otros componentes del sistema fotovoltaico.

Tabla 2. Características de módulos fotovoltaicos.

Technology	Power (W)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)
Multicrystalline Silicon (p-Si)	330	38.72	8.52	46.74	9.38

Fuente: Elaboración propia.

La necesidad de comprender y mitigar las diversas fuentes de ineficiencia que afectan el rendimiento de los módulos solares. La tabla 3 proporciona una visión detallada de las pérdidas óhmicas, pérdidas por desajuste, pérdidas por suciedad, indisponibilidad del sistema y pérdidas por degradación inducida por la luz (LID), las cuales son cruciales para evaluar el impacto de cada factor en la eficiencia general del sistema. Además, incluye coeficientes de temperatura para la corriente de cortocircuito, el voltaje en circuito abierto y el coeficiente máximo de temperatura, que son vitales para entender cómo las variaciones de temperatura influyen en el rendimiento de los módulos. Con estos datos, podemos planificar estrategias de mantenimiento y limpieza para reducir las pérdidas por suciedad, mejorar la confiabilidad del sistema mediante la minimización de la indisponibilidad, y anticipar la degradación a lo largo del tiempo debido a la exposición a la luz. Asimismo, el conocimiento de los coeficientes de temperatura permite diseñar sistemas adaptados a diferentes condiciones climáticas, optimizando así su desempeño. En conjunto, esta tabla no solo facilita un análisis detallado y preciso del rendimiento del sistema fotovoltaico, sino que también proporciona las bases necesarias para tomar decisiones informadas en el diseño, operación y mantenimiento, asegurando una mayor eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

Tabla 3. Rendimiento del sistema fotovoltaico

Tech	Resistive Loss	Incompatibility Losses	Dirt Losses	System Downtime	Light-Induced Degradation Losses	Short circuit current (%/°C)	Open circuit voltage (%/°C)	Maximum Temperature Coefficient (%/°C)
Polycrystalline Silicon (p-Si)	0.014	0.0001	0.29	0.008	0.29	0.00057	-0.0032	-0.40

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4 presenta las características del inversor ZONHAN-3.0-TL-OUTD, destacando aspectos cruciales como su potencia de 1.5 kW, el voltaje máximo de entrada en corriente continua (DC) absoluto de 600 V, y el rango de voltaje de arranque (Vstart) de 100 a 300 V, con un valor predeterminado de 150 V. También se especifica la corriente máxima de entrada en DC de 16.0 A y el rango de voltaje de entrada para el punto de máxima potencia (MPPT) de 200 a 500 V, junto con el número de MPPT independientes, que es 1. La importancia de analizar estos datos radica en la optimización del diseño y operación del sistema fotovoltaico, ya que la potencia del inversor determina la capacidad total del sistema, mientras que el voltaje y la corriente de entrada influyen en la compatibilidad con los módulos fotovoltaicos y la eficiencia de conversión de energía. El rango de voltaje de arranque es fundamental para asegurar que el inversor comience a operar bajo diversas condiciones de irradiancia, mejorando así la fiabilidad del sistema. Además, conocer el rango de voltaje de entrada para MPPT permite maximizar la captación de energía en condiciones variables de luz solar, asegurando que el sistema opere en su punto óptimo de eficiencia. En conjunto, estos parámetros técnicos son esenciales para diseñar sistemas solares que sean tanto eficientes como robustos, garantizando una producción de energía estable y optimizada a lo largo del tiempo.

Tabla 4. Característica del Inversor

Inverter Capacity	Absolute Maximum DC Input Voltage (Vmax, abs)	Initial DC Voltage (Vstart)	Maximum DC Input Current	MPPT DC Voltage Range	Number of Independent MPPT Channels
1.5 kW	600 V	100-300 V	16 A	200-500 V	1

Fuente: Elaboración propia.

La figura 7 ilustra el esquema del sistema fotovoltaico autónomo diseñado para la vivienda rural del caso de estudio de Caymatán-Molleturo. Este sistema consta de cuatro paneles solares monocristalinos de 12Vdc conectados en paralelo, lo cual permite incrementar la corriente mientras se mantiene el voltaje constante, optimizando así la captación de energía solar.

La energía generada por los paneles solares es conducida a un regulador de carga de 24Vdc, cuya función es proteger las baterías de sobrecargas y descargas excesivas, asegurando una mayor vida útil del sistema de almacenamiento. El regulador de carga distribuye la energía a un banco de baterías compuesto por cuatro unidades de 12Vdc conectadas en serie-paralelo, configurando un sistema de almacenamiento eficiente que proporciona una salida de 24Vdc.

El banco de baterías almacena la energía para su uso posterior, garantizando el suministro eléctrico durante la noche o en días nublados cuando la generación solar es insuficiente. La energía almacenada es luego convertida a 110Vac mediante un inversor, permitiendo su uso en los electrodomésticos y dispositivos de la vivienda, que operan en corriente alterna.

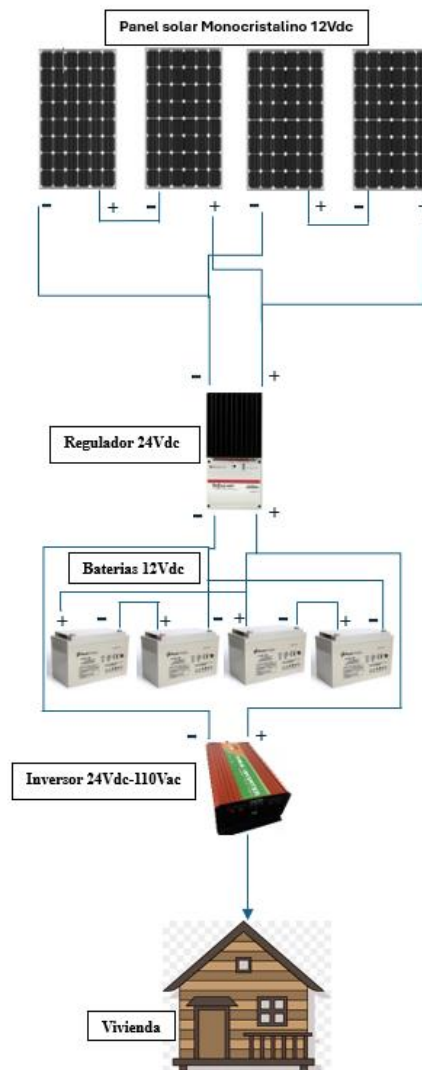


Fig. 7. Esquema del sistema fotovoltaico.

Fuente: Propia

Este esquema es fundamental para entender cómo se gestiona la generación, almacenamiento y conversión de la energía solar en un entorno aislado de la red eléctrica. La integración de todos estos componentes asegura un suministro energético continuo y fiable, adecuado para satisfacer las necesidades básicas de la vivienda rural. Este análisis también subraya la importancia de cada componente en el sistema fotovoltaico, destacando el rol crítico del regulador de carga y el inversor para la eficiencia y operatividad del sistema global.

CAPITULO III. MODELADO Y SIMULACIÓN

3.1. MODELADO MATEMÁTICO

En esta sección, se presentan los modelos matemáticos utilizados para evaluar la degradación y el rendimiento de los módulos fotovoltaicos (PV) en condiciones climáticas adversas. Estos modelos permiten una comprensión detallada de los mecanismos de degradación y las predicciones de rendimiento energético a lo largo del tiempo. A continuación, se detallan las ecuaciones clave empleadas en este estudio, explicando su propósito y aplicación en el análisis de la degradación y el rendimiento de los módulos PV instalados en climas extremos.

3.1.1. Evaluación de la Degradación de los Sistemas PV Operativos

Para evaluar la degradación de los módulos PV en campo, se utilizan las siguientes expresiones:

3.1.1.1. Degradación Total (D(x))

La degradación total se calcula con la siguiente ecuación (1):

$$D(X)[\%] = \left(1 - \frac{X_2}{X_1}\right) * 100 \quad (1)$$

Donde X_1 representa el valor inicial del parámetro eléctrico del módulo según la hoja de datos y X_2 es el valor medido en el laboratorio después del tiempo de exposición en campo. Esta ecuación nos permite cuantificar la pérdida total de rendimiento de los módulos a lo largo del tiempo.

3.1.1.2. Tasa Anual de Degradación (R(x))

La tasa anual de degradación se determina mediante la ecuación (2):

$$R(X) \left[\frac{\%}{\text{año}} \right] = \frac{D(X)[\%]}{t_{campo}} \quad (2)$$

Donde t_{campo} es el tiempo en años que el módulo ha estado expuesto en el campo. Esta tasa nos indica la rapidez con la que los módulos pierden rendimiento anualmente.

3.1.1.3. Predicción de la Tasa de Degradación Debido al Envejecimiento

Se utiliza un modelo basado en mecanismos de degradación específicos para predecir la tasa de degradación:

3.1.1.4. Tasa Total de Degradación del Poder (DRT)

La tasa total de degradación del poder se modela como la ecuación (3):

$$DRT = A_N * (1 + DR_H)(1 + DR_P)(1 + DR_{Tm}) - 1 \quad (3)$$

Aquí, DR_H, DR_P, DR_{Tm} representan las tasas de degradación por hidrólisis, foto degradación y degradación termo mecánica, respectivamente. Esta ecuación combina diferentes mecanismos de degradación para proporcionar una visión integral de la degradación del módulo.

3.1.1.5. Degradación por Hidrólisis (DR_H)

La degradación por hidrólisis se calcula con la ecuación (4):

$$DR_{H(T,RH)} = A_H * \exp\left(-\frac{E_{\{aH\}}}{k_B} * T\right) * RH^n \quad (4)$$

Esta ecuación relaciona la tasa de hidrólisis con la temperatura (T) y la humedad relativa (RH), utilizando constantes específicas del material del módulo.

3.1.1.6. Degradación por Fotodegradación (DR_P)

La degradación por fotodegradación se calcula con la ecuación (5):

$$DR_{P(UV,T,RH)} = A_p * UV^y * (1 + RH^{\{n1\}}) * \exp\left(-\frac{E_{\{aP\}}}{k_B} * T\right) \quad (5)$$

Esta ecuación describe cómo la exposición a la radiación ultravioleta (UV), junto con la temperatura y la humedad, afecta la tasa de foto degradación del módulo.

3.1.1.7. Degradación Termomecánica (DR_{Tm})

La degradación termomecánica se calcula con la ecuación (6):

$$DR_{Tm(\Delta T, T_{max})} = A_T * (\Delta T + 273)^x * Cr * \exp\left(-\frac{E_{\{aT\}}}{k_B} * T_{max}\right) \quad (6)$$

Esta ecuación tiene en cuenta los ciclos de temperatura (ΔT) y la temperatura máxima (T_{max}) que experimenta el módulo, modelando la degradación inducida por el estrés térmico.

3.2. Predicción del Rendimiento Energético de los Módulos PV

Para estimar el rendimiento energético de los módulos PV, se utiliza el siguiente modelo empírico:

3.2.1. Salida de Potencia del PV (P)

La salida de potencia del PV se modela mediante la siguiente ecuación (7):

$$P = \frac{G}{1000} * A * (1 + k_1 \ln(G') + k_2 \ln(G')^2 + k_3 Tm' + k_4 Tm' \ln(G) + k_5 Tm' \ln(G')^2 + k_6 Tm'^2) \quad (7)$$

Donde G' es la irradiancia global en el plano de la matriz y Tm' es la temperatura del módulo. Esta ecuación permite predecir la potencia generada por los módulos bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.

3.2.1.1. Temperatura del Módulo (Tm)

La temperatura del módulo se estima mediante la siguiente ecuación (8):

$$Tm = Ta + \frac{G}{U_0 + U_1 * WS} \quad (8)$$

Donde Ta es la temperatura ambiente y WS es la velocidad del viento. Esta ecuación modela cómo la temperatura del módulo varía en función de las condiciones ambientales y de irradiancia.

3.2.1.2. Predicción de la Pérdida por Ensuciamiento

Para evaluar las pérdidas de energía debidas al ensuciamiento, se emplea el modelo de ensuciamiento de Kimber, que simula las pérdidas considerando tanto la limpieza manual como la natural por lluvia.

3.2.1.3. Predicción del Rendimiento Energético a Largo Plazo

Finalmente, para evaluar el rendimiento energético a largo plazo de los módulos, se considera tanto la degradación irreversible como la reversible:

3.2.1.4. Rendimiento Energético a Largo Plazo

El rendimiento energético a largo plazo se calcula con la ecuación (9):

$$y_{campo\{FT\}} = \frac{1}{1000} * \sum_{t=0} P_t \quad (9)$$

Donde P_t es la potencia en un momento dado considerando la degradación, y FT es el tiempo de falla del módulo. Esta ecuación permite estimar la energía total generada por los módulos a lo largo de su vida útil.

Esta estructura matemática proporciona una base sólida para el análisis y la predicción del rendimiento y la fiabilidad de los módulos PV en condiciones climáticas adversas, facilitando la toma de decisiones informadas en el diseño y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos.

El uso de sistemas solares fotovoltaicos (PV) en áreas rurales ofrece una solución sostenible y eficiente para satisfacer las necesidades energéticas. En este contexto, la evaluación técnica y los beneficios de implementar estos sistemas en una vivienda rural en Caymatán-Molleturo son cruciales para entender su viabilidad y optimizar su rendimiento. Los recientes estudios sobre el impacto del polvo en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos proporcionan una base sólida para analizar y mejorar la eficiencia de los sistemas PV en entornos rurales con condiciones climáticas adversas.

3.3. Aplicación de Estudios Previos en el Contexto de Caymatán-Molleturo

Impacto del Polvo en el Rendimiento Eléctrico y Térmico

El primer estudio (Younis et al., 2024) . investiga cómo el polvo afecta las características eléctricas y térmicas de los módulos PV a través de experimentos en campo y laboratorio en Rumanía. Se encontró que la acumulación de polvo reduce significativamente la potencia máxima y la corriente de cortocircuito, tanto en condiciones exteriores como interiores.

En Caymatán-Molleturo, es probable que la acumulación de polvo sea un factor importante debido a la presencia de caminos sin pavimentar y actividades agrícolas. Aplicando las conclusiones del estudio, se debe considerar la instalación de sistemas de limpieza regulares para los módulos PV. Además, la implementación de técnicas de

monitoreo térmico puede ayudar a identificar y mitigar la formación de puntos calientes, optimizando así la eficiencia del sistema.

Las ecuaciones presentadas a continuación se derivan de investigaciones experimentales y modelos empíricos, y son esenciales para el análisis técnico detallado del sistema fotovoltaico. Estas fórmulas permiten calcular la potencia de salida, la tasa de reducción de potencia debido a la acumulación de polvo y optimizar el ángulo de inclinación de los módulos PV para maximizar su eficiencia.

Estas ecuaciones permiten cuantificar la eficiencia de los módulos PV, evaluar el impacto de la acumulación de polvo y determinar las mejores prácticas para el mantenimiento y la operación del sistema. Los estudios recientes sobre el impacto del polvo en el rendimiento de los sistemas PV proporcionan un marco teórico sólido para esta evaluación, adaptando sus hallazgos a las condiciones específicas de un entorno rural.

3.3.1. Potencia de Salida (P_{out}):

La potencia de salida se calcula con la ecuación (10):

$$P_{out} = I_{out} \cdot U_{out} \quad (10)$$

Esta ecuación es esencial para calcular la potencia generada por los módulos PV y evaluar el impacto de la acumulación de polvo.

La Tasa de Reducción (η) se calcula con la ecuación (11)

$$\eta = \frac{P_{clean} - P_{dust}}{P_{clean}} \times 100\% \quad (11)$$

Utilizando esta fórmula, se puede cuantificar la pérdida de eficiencia debido al polvo y ajustar las estrategias de mantenimiento en consecuencia.

El segundo estudio (Xie et al., 2023) . examina cómo la densidad de deposición de polvo y el ángulo de inclinación de los módulos PV afectan la salida de potencia y la tasa de atenuación de potencia en un entorno urbano en Shenyang, China. Se proponen fórmulas empíricas para predecir la reducción de potencia basada en estos factores.

Aunque el entorno rural de Caymatán-Molleturo difiere del urbano, los principios del estudio son aplicables. La elección del ángulo de inclinación adecuado y el monitoreo de la densidad de polvo son críticos para maximizar la eficiencia de los módulos PV. Específicamente, la inclinación óptima debe ajustarse para minimizar la acumulación de polvo y maximizar la exposición solar.

3.3.1.1. La fórmula empírica para la reducción de potencia (P_{pro})

La fórmula empírica para la reducción de potencia (P_{pro}) se calcula con la ecuación (12):

$$P_{pro(\Delta m, \alpha)} = p_1 \cdot (\Delta m)^{P_2} \cdot (\alpha)^{P_3} \quad (12)$$

Donde Δm es la densidad de deposición de polvo y α es el ángulo de inclinación. Esta ecuación permite predecir la reducción de potencia y optimizar el diseño del sistema PV.

3.3.1.2. Implementación en Caymatán-Molleturo

Selección de Ángulo de Inclinación:

Basado en los estudios, se deben probar varios ángulos de inclinación (15°, 30°, 45°) para determinar el óptimo que minimice la acumulación de polvo y maximice la generación de energía.

Monitoreo y Mantenimiento:

Se deben implementar sistemas de monitoreo regular para medir la densidad de polvo y la temperatura de los módulos PV. Basado en las mediciones, se pueden programar limpiezas regulares para mantener la eficiencia del sistema.

Análisis de Impacto Económico:

Utilizando las ecuaciones proporcionadas, se puede calcular la pérdida de eficiencia debido al polvo y el impacto económico de la limpieza y mantenimiento. Esto ayudará a justificar la inversión en sistemas de limpieza automatizados o programas de mantenimiento manual.

Eficiencia Energética Mejorada:

La implementación de prácticas de monitoreo y mantenimiento basadas en estudios previos asegura que los módulos PV operen cerca de su capacidad máxima, proporcionando un suministro de energía confiable y sostenible para la vivienda rural.

Reducción de Costos Operativos:

Optimizar el ángulo de inclinación y la frecuencia de limpieza puede reducir los costos operativos asociados con la pérdida de eficiencia y la necesidad de reparaciones.

Sostenibilidad y Autosuficiencia:

Un sistema PV bien mantenido puede proporcionar una fuente de energía sostenible y autónoma, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables y mejorando la calidad de vida de los residentes de Caymatán-Molleturo.

3.4. Simulaciones del sistema en análisis.

En la presente sección se detallan las simulaciones realizadas para evaluar el desempeño y la viabilidad de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en una vivienda rural, tomando como caso de estudio la localidad de Caymatán-Molleturo. Este análisis técnico tiene como objetivo identificar los beneficios potenciales, así como los desafíos asociados con la adopción de tecnología fotovoltaica en entornos rurales. Las simulaciones abarcan diversos aspectos críticos del sistema, incluyendo la producción de energía, la eficiencia de los módulos solares bajo distintas condiciones ambientales y la degradación a lo largo del tiempo. Estas simulaciones permiten una comprensión detallada de cómo se comportarían los sistemas fotovoltaicos en la realidad, proporcionando datos valiosos que pueden guiar tanto el diseño como la implementación efectiva de soluciones energéticas sostenibles en la región, en anexo 1 hace referencia al sistema fotovoltaico del sistema.

El análisis de la degradación de los módulos solares instalados en Caymatán-Molleturo, como se muestra en la Figura 8, proporciona información esencial sobre la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de estos sistemas bajo las condiciones ambientales locales. La Figura 8 ilustra la degradación en diferentes parámetros eléctricos clave, incluyendo la potencia máxima (P_{max}), el voltaje máximo (V_{max}), la corriente máxima (I_{max}), el voltaje en circuito abierto (V_{oc}), la corriente en cortocircuito (I_{sc}) y el factor de llenado (FF) para cuatro módulos distintos (M1, M2, M3 y M4). Los resultados indican una significativa disminución de P_{max} en el módulo M1, con una degradación del 80%, mientras que los módulos M2, M3 y M4 muestran una menor degradación, oscilando entre el 10% y el 20%. En cuanto a V_{max} , la degradación es relativamente uniforme entre los módulos, con valores que varían del 10% al 25%. La degradación de I_{max} es notablemente alta en el módulo M1 (80%), contrastando con los valores negativos observados en los otros módulos, sugiriendo una posible mejora en la corriente máxima. V_{oc} presenta una degradación similar en todos los módulos, alrededor del 20%. Para

Isc, el módulo M1 nuevamente muestra una alta degradación (70%), mientras que los otros módulos tienen valores negativos, indicando una mejora. Finalmente, el factor de llenado muestra una degradación significativa en todos los módulos, con M1 registrando la mayor degradación (18%) y los otros módulos entre el 8% y el 10%. Estos hallazgos subrayan la importancia de realizar evaluaciones detalladas de la degradación para optimizar el diseño y el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos en Caymatán-Molleturo, asegurando su viabilidad y eficiencia a largo plazo.

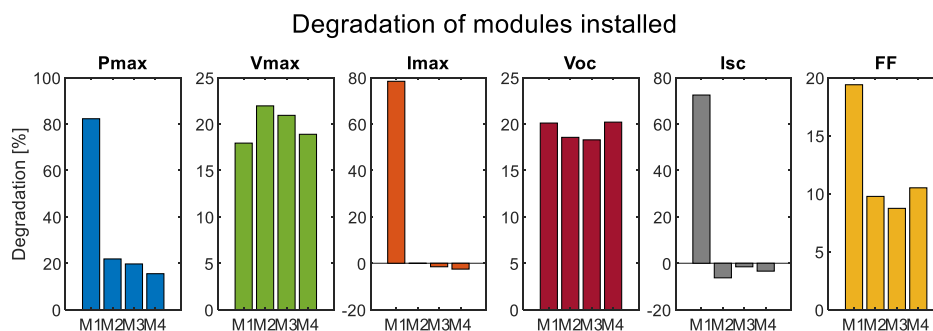


Fig. 8 Degradación de los módulos instalados

Fuente: Propia

El análisis de degradación de los módulos solares en la localidad de Caymatán-Molleturo es crucial para garantizar la viabilidad y eficiencia a largo plazo de los sistemas fotovoltaicos. Este análisis permite identificar cómo diferentes factores ambientales, como la humedad, la radiación UV y las fluctuaciones térmicas, afectan el rendimiento y la durabilidad de los módulos solares. Entender estos mecanismos de degradación ayuda a optimizar el diseño de los sistemas, seleccionar materiales más resistentes y desarrollar estrategias de mantenimiento adecuadas. Además, proporciona información valiosa para mejorar la planificación de futuras instalaciones solares, asegurando que los beneficios de la energía solar se maximicen en entornos rurales, contribuyendo al desarrollo sostenible y la eficiencia energética por ello la Figura 9 presenta un análisis detallado de las tasas de degradación simuladas para los módulos solares en Caymatán-Molleturo, desglosadas por los mecanismos de hidrólisis, fotodegradación y degradación termomecánica, así como la tasa de degradación total combinada. En el primer gráfico, se observa que la degradación por hidrólisis, causada por la interacción con el agua, varía uniformemente con una escala de 0 a 0.8, destacando la necesidad de considerar la resistencia a la humedad en el diseño de los módulos. El segundo gráfico muestra la fotodegradación, con una escala similar, indicando el impacto constante de la radiación UV en la región. El tercer gráfico, que representa la degradación termomecánica, resalta las tensiones térmicas y mecánicas sufridas por

los módulos, con algunas áreas mostrando tasas más altas debido a fluctuaciones térmicas. Finalmente, la tasa de degradación total en el cuarto gráfico, que varía de 0 a 1.6, proporciona una visión integral de la degradación acumulativa, subrayando las áreas con mayor riesgo y la necesidad de un mantenimiento riguroso. Estos resultados son esenciales para entender el comportamiento a largo plazo de los sistemas fotovoltaicos en Caymatán-Molleturo y optimizar su diseño y mantenimiento para garantizar su sostenibilidad y eficiencia.

Simulated degradation rates by degradation mechanism and combined (total) degradation rate

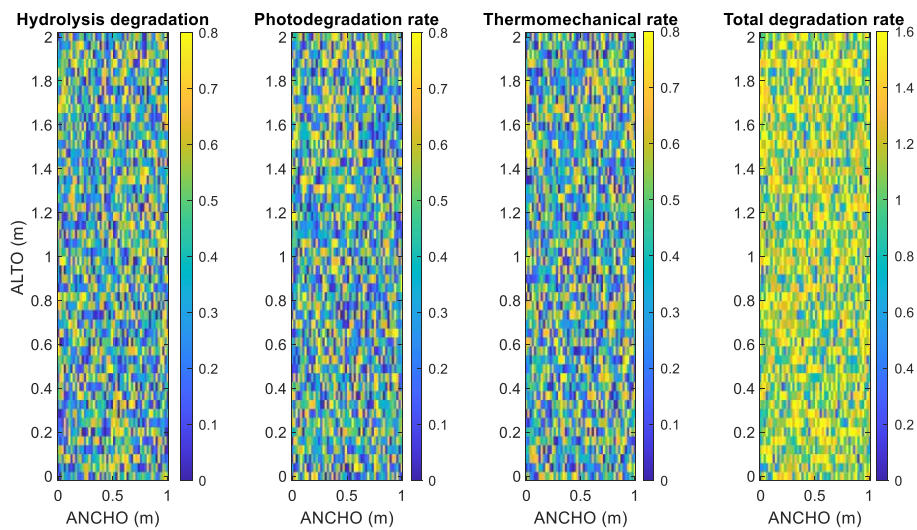
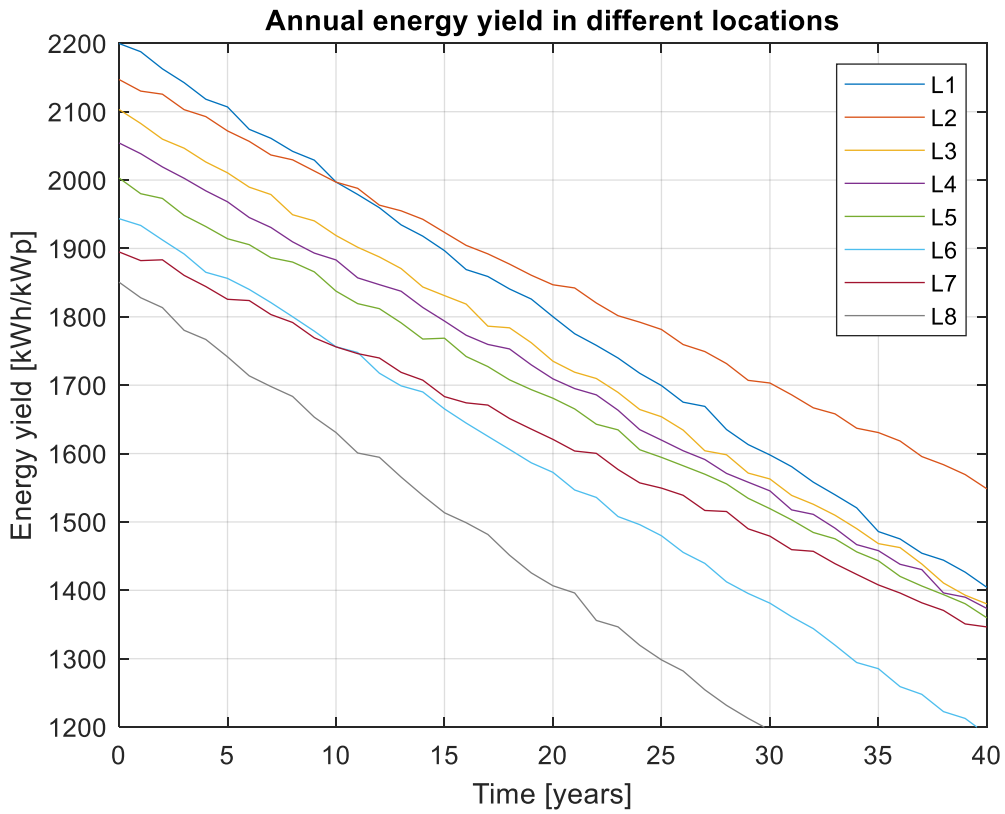


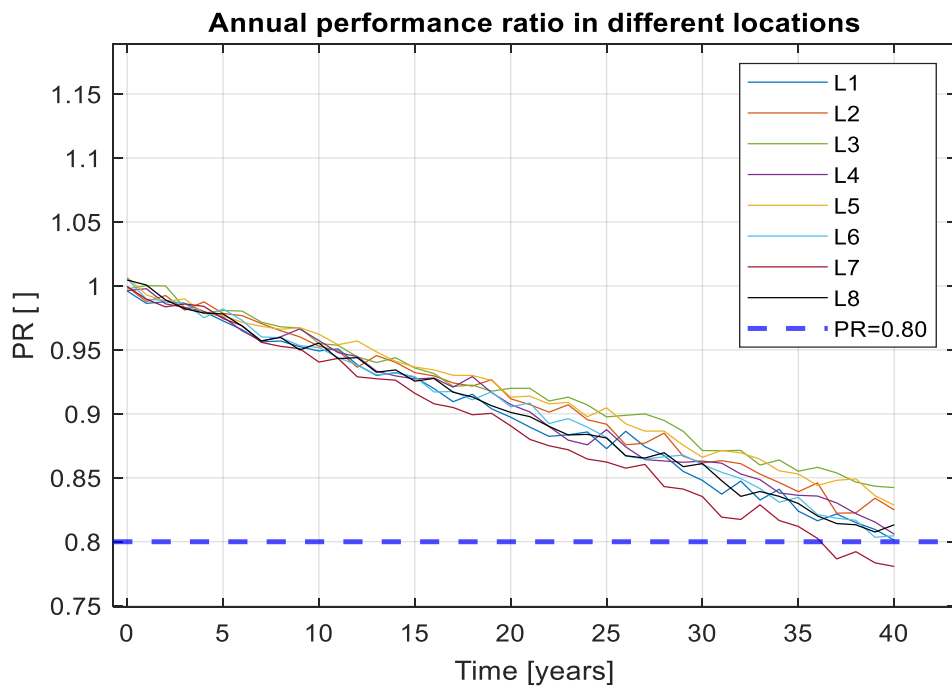
Fig. 9 Degradación total.

Fuente: Propia

Para evaluar el rendimiento y la degradación a largo plazo de los sistemas fotovoltaicos en Caymatán-Molleturo, se llevaron a cabo simulaciones detalladas del rendimiento energético anual y la relación de rendimiento (PR) en diferentes ubicaciones dentro de la región. La Figura 10 presenta los resultados de estas simulaciones, mostrando el rendimiento energético anual (a) y la relación de rendimiento normalizada (b) durante un período de 40 años en ocho ubicaciones



a)



b)

Fig. 10 Rendimiento energético anual (a) y la relación de rendimiento normalizada (b)

Fuente: Propia

El análisis se realizó utilizando herramientas avanzadas de simulación fotovoltaica, específicamente el software PVSyst, que es ampliamente reconocido por su precisión en la modelización del comportamiento de los sistemas fotovoltaicos bajo diversas condiciones ambientales. PVSyst permite incorporar datos climáticos específicos de la región, incluyendo irradiación solar, temperatura y humedad, para proporcionar una estimación precisa del rendimiento energético y la degradación de los módulos solares.

En el gráfico de la izquierda, se observa una tendencia general de disminución del rendimiento energético anual en todas las ubicaciones, lo que refleja la degradación progresiva de los módulos solares debido a factores ambientales y operativos. Cada curva representa una ubicación diferente (L1 a L8), mostrando variaciones en la tasa de degradación que subrayan la influencia de las condiciones locales en la eficiencia a largo plazo.

El gráfico de la derecha muestra la relación de rendimiento (PR) anual, una medida de la eficiencia del sistema, que también disminuye con el tiempo en todas las ubicaciones. La línea discontinua azul indica el umbral de la vida útil del sistema fotovoltaico, y las intersecciones de las curvas de PR con esta línea marcan el fin de la vida útil práctica del sistema en cada ubicación.

Estos resultados son esenciales para comprender el comportamiento a largo plazo de los sistemas fotovoltaicos en Caymatán-Molleturo, permitiendo optimizar el diseño, la selección de materiales y las estrategias de mantenimiento para asegurar la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas solares instalados en la región.

La figura 11 proporcionada ilustra el cambio porcentual en el rendimiento de los módulos solares en ocho ubicaciones seleccionadas (L1 a L8) después de un período de análisis determinado.

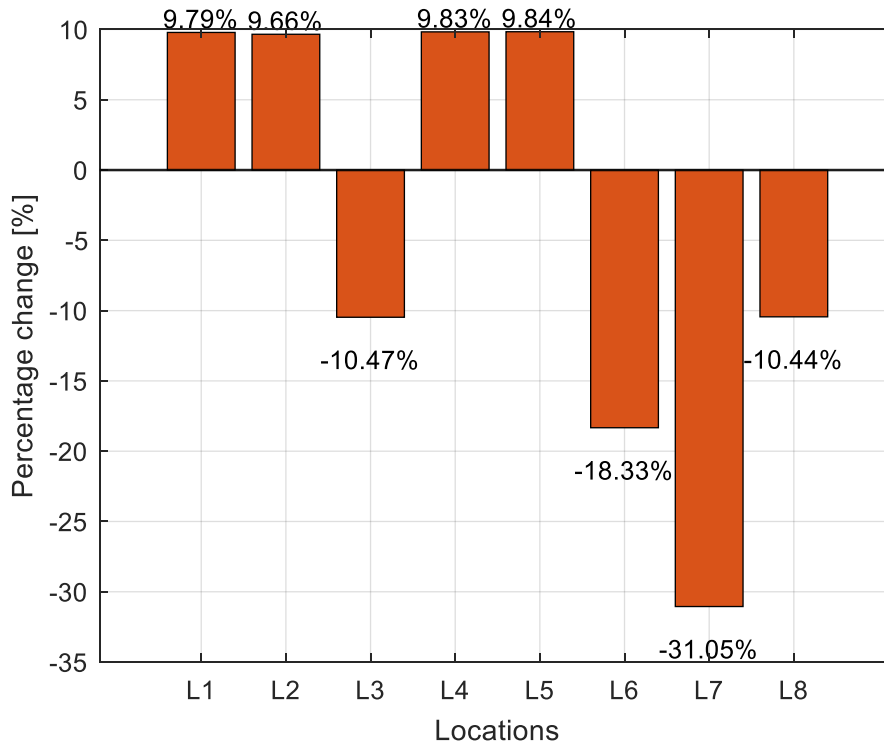


Fig. 11 Cambio porcentual del rendimiento de los paneles solares

Fuente: Propia

La figura 12 muestra un gráfico de barras que representa el cambio porcentual en el rendimiento de los módulos solares para cada ubicación específica. Los valores positivos y negativos indican el aumento o disminución del rendimiento respectivo. Las ubicaciones L1, L2, L4 y L5 muestran un incremento en el rendimiento, con cambios porcentuales que van desde 9.66% hasta 9.84%. Este aumento podría atribuirse a condiciones ambientales favorables o a mejoras en la eficiencia operativa de los módulos solares en estas áreas. Por otro lado, las ubicaciones L3, L6, L7 y L8 presentan una disminución en el rendimiento, con cambios porcentuales negativos. L3 muestra una disminución del 10.47%, L6 del 18.33%, L7 del 31.05%, y L8 del 10.44%. Estas caídas en el rendimiento podrían estar asociadas con factores adversos como la degradación acelerada de los módulos debido a condiciones climáticas extremas, acumulación de suciedad, sombra parcial u otros problemas operativos.

El análisis de la cantidad de lluvia en diferentes ubicaciones es fundamental para la planificación y el diseño de sistemas fotovoltaicos, especialmente en la región de Caymatán-Molleturo. Conocer el promedio de días de lluvia con precipitaciones superiores a 20 mm permite estimar con mayor precisión la producción anual de energía

y ajustar el dimensionamiento del sistema para asegurar un suministro adecuado. Las precipitaciones afectan la irradiación solar disponible, reduciendo la producción de energía de los módulos solares. Además, la humedad y la lluvia pueden acelerar la degradación de los módulos por mecanismos como la hidrólisis y la corrosión, lo que hace necesario seleccionar módulos con mayor resistencia a la humedad y materiales de encapsulación más robustos en áreas con altos niveles de precipitación.

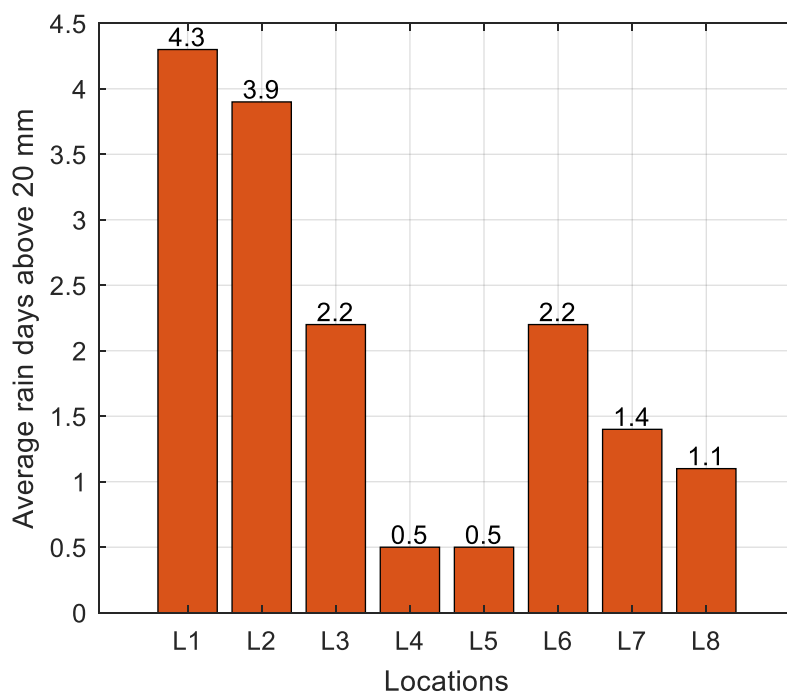


Fig. 12 Precipitaciones presentes en la región de Caymatán-Molleturo.

Fuente: Propia

El conocimiento de la distribución de los días de lluvia también es esencial para la planificación del mantenimiento y la limpieza de los módulos solares. Si bien las lluvias pueden ayudar a limpiar los módulos de polvo y suciedad, también pueden aumentar la necesidad de mantenimiento para prevenir problemas relacionados con la humedad. La evaluación de las condiciones climáticas locales permite seleccionar las ubicaciones óptimas para la instalación de sistemas solares, preferentemente en áreas con menos días de lluvia intensa para maximizar la producción de energía y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

La figura 12 muestra un gráfico de barras que representa estos datos para ocho ubicaciones seleccionadas (L1 a L8), lo cual es crucial para entender el impacto de las condiciones climáticas en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

L1 y L2 presentan los mayores promedios, con 4.3 y 3.9 días de lluvia, respectivamente. Estas áreas experimentan condiciones climáticas más húmedas, lo que podría influir negativamente en el rendimiento de los módulos solares debido a la reducción de la irradiación solar y al posible aumento en la tasa de degradación por hidrólisis.

L3 y L6 muestran un promedio de 2.2 días de lluvia. Aunque menos extremas que L1 y L2, estas ubicaciones aún experimentan una cantidad significativa de días con lluvias intensas, lo que puede afectar el mantenimiento y la limpieza de los módulos solares.

L4 y L5 tienen el promedio más bajo, con solo 0.5 días de lluvia. L7 y L8 también presentan valores relativamente bajos, con 1.4 y 1.1 días de lluvia, respectivamente. Estas ubicaciones tienen condiciones climáticas más secas, lo que generalmente favorece un mejor rendimiento de los módulos solares debido a una mayor disponibilidad de irradiación solar.

Además, las condiciones climáticas influyen en el diseño de la infraestructura de soporte de los módulos solares, requiriendo estructuras más robustas y sistemas de drenaje adecuados para manejar el agua de lluvia y proteger los componentes eléctricos. Este análisis es crucial para optimizar el diseño, la instalación y el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos, maximizando la eficiencia energética, prolongando la vida útil de los módulos solares y asegurando un suministro confiable de energía. En definitiva, el estudio detallado de la cantidad de lluvia en Caymatán-Molleturo contribuye significativamente al desarrollo sostenible y a la eficiencia energética en entornos rurales.

El análisis detallado de los efectos de la suciedad y la lluvia en la eficiencia de los módulos solares es crucial para optimizar el rendimiento y la durabilidad de los sistemas fotovoltaicos en Caymatán-Molleturo. La figura 13 muestra cómo la relación de rendimiento diario (PR) varía en condiciones de no suciedad y con suciedad, y cómo la precipitación diaria influye en estos cambios. Este tipo de análisis es esencial para varias razones clave:

3.4.1. Optimización del Mantenimiento:

Entender cómo la suciedad afecta el rendimiento diario permite diseñar programas de mantenimiento más eficientes. Al identificar los períodos en los que la acumulación de suciedad es más crítica, se pueden planificar limpiezas periódicas que maximicen el rendimiento sin incurrir en costos innecesarios.

3.4.2. Efecto de la Lluvia en la Limpieza:

La lluvia puede actuar como un agente de limpieza natural para los módulos solares. Analizar el umbral de autolimpieza (20 mm de lluvia diaria) y su impacto en la PR ayuda a aprovechar los recursos naturales para mantener los módulos limpios, reduciendo la necesidad de intervenciones manuales.

3.4.3. Predicción del Rendimiento:

Conocer cómo la suciedad y la lluvia afectan el rendimiento diario permite hacer predicciones más precisas sobre la producción de energía. Esto es fundamental para la planificación energética y para asegurar que se cumplan los objetivos de generación de electricidad de los sistemas fotovoltaicos.

3.4.4. Mejora del Diseño del Sistema:

Los datos sobre la influencia de la suciedad y la lluvia pueden guiar mejoras en el diseño de los módulos solares y sus estructuras de soporte. Por ejemplo, se pueden desarrollar superficies auto limpiantes o implementar ángulos de inclinación que faciliten el lavado por lluvia.

3.4.5. Sostenibilidad y Costos:

Al reducir la necesidad de limpiezas frecuentes mediante el uso eficiente de las precipitaciones naturales, se pueden disminuir los costos operativos y mejorar la sostenibilidad del sistema. Esto es especialmente importante en regiones rurales donde los recursos para el mantenimiento pueden ser limitados.

3.4.6. Adaptación a Condiciones Locales:

Cada ubicación tiene condiciones climáticas únicas. Analizar el impacto específico de la suciedad y la lluvia en Caymatán-Molleturo permite adaptar las estrategias de mantenimiento y operación a las condiciones locales, asegurando un rendimiento óptimo del sistema.

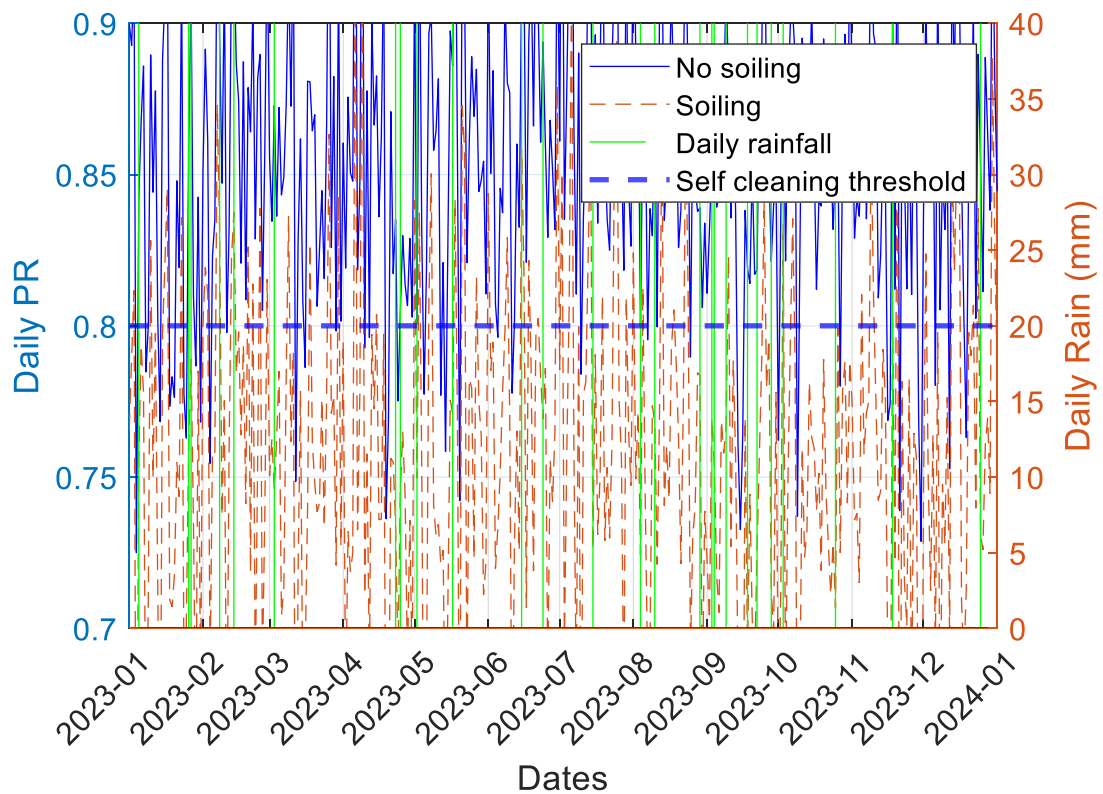


Fig. 13 Relación de rendimiento diario (PR) varía en condiciones de no suciedad y con suciedad.

Fuente: Propia

La figura 13 proporciona una visualización clara de cómo la suciedad y la lluvia afectan el rendimiento diario de los módulos solares a lo largo de un año:

3.4.7. Relación de Rendimiento Diario (PR):

La PR diaria sin suciedad (línea sólida azul) fluctúa entre 0.72 y 0.9, mostrando variaciones debidas a las condiciones climáticas y la acumulación de suciedad.

La PR diaria con suciedad (línea discontinua verde) es generalmente más baja que la PR sin suciedad, lo que indica una disminución en la eficiencia debido a la acumulación de polvo y otros residuos en la superficie de los módulos solares.

Precipitación Diaria:

La línea discontinua marrón representa la precipitación diaria en mm. Se observa que los días con lluvias significativas suelen coincidir con picos en la PR, sugiriendo un efecto de limpieza que mejora temporalmente el rendimiento de los módulos.

Umbral de Autolimpieza:

La línea discontinua azul marca el umbral de autolimpieza, que se ha establecido en 20 mm de lluvia diaria. Cuando la precipitación diaria supera este umbral, se espera que la lluvia sea suficiente para limpiar los módulos solares, reduciendo el impacto de la suciedad en el rendimiento.

3.5. Análisis de variabilidad por efectos de polvo y agua.

El análisis de los efectos de la limpieza y el polvo en la eficiencia diaria de los módulos fotovoltaicos es crucial por varias razones. La acumulación de polvo en la superficie de los módulos solares puede reducir significativamente su capacidad para capturar la luz solar, disminuyendo la producción de energía. Entender el impacto de la suciedad permite desarrollar estrategias de limpieza eficaces que optimizan el rendimiento energético del sistema. Evaluar los efectos de la limpieza ayuda a planificar programas de mantenimiento más eficientes, asegurando que los módulos se limpien con la frecuencia necesaria para mantener un rendimiento óptimo sin incurrir en costos innecesarios. Además, la acumulación de polvo no solo reduce la eficiencia, sino que también puede causar daños a largo plazo a los módulos solares. Al mantener los módulos limpios, se puede prolongar su vida útil y mejorar la durabilidad del sistema.

La figura 14 presenta el análisis de la variación diurna de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos con diferentes ángulos de inclinación, desde el 29 de noviembre de 2023 hasta el 9 de diciembre de 2023. La figura muestra el rendimiento de los módulos solares a cuatro ángulos de inclinación distintos (0°, 30°, 45° y 60°), considerando los efectos de la limpieza y el polvo en su eficiencia diaria.

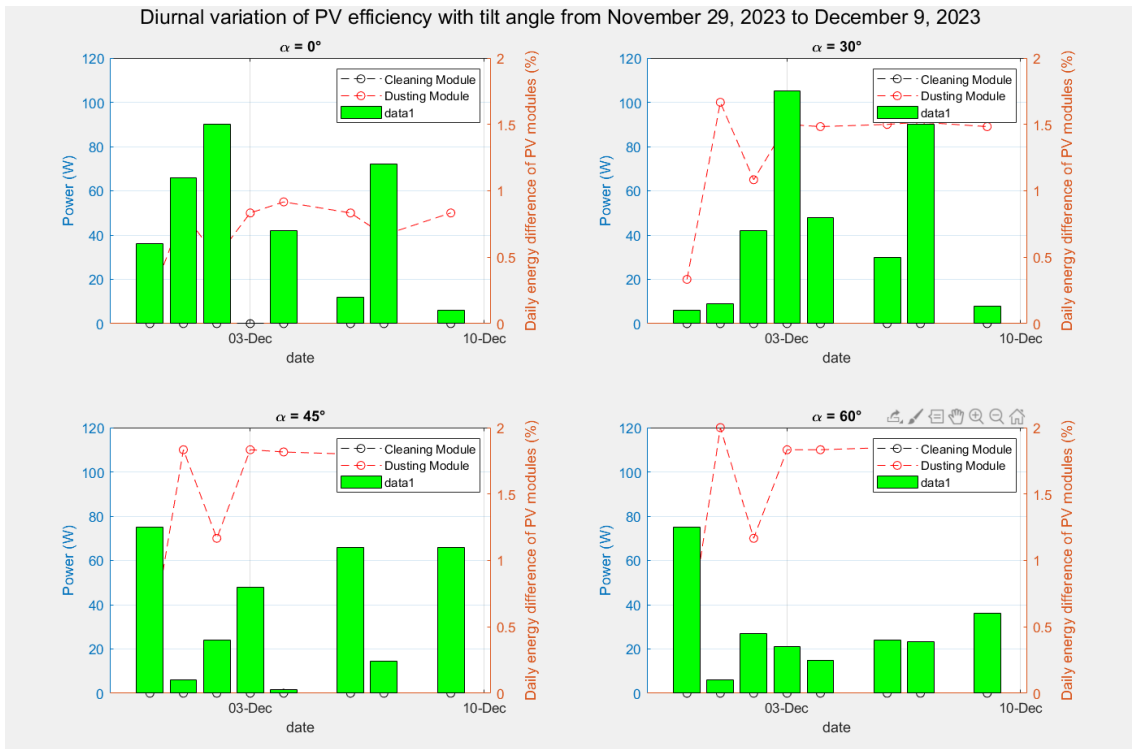


Fig. 14 Análisis de la variación diaria de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos con diferentes ángulos de inclinación

Fuente: Propia

La selección del periodo del 29 de noviembre de 2023 al 9 de diciembre de 2023 para el análisis de la variación diaria de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos se justifica por varias razones. En primer lugar, este periodo puede representar una época del año con condiciones climáticas variables, proporcionando una visión equilibrada de cómo diferentes factores ambientales, como la irradiación solar, la temperatura y las precipitaciones, afectan el rendimiento de los módulos solares. Además, el final de noviembre y principios de diciembre suelen coincidir con cambios estacionales significativos, permitiendo observar cómo las transiciones de estación influyen en la eficiencia de los módulos. Este periodo es ideal para capturar los efectos de la transición entre temporadas, lo que puede incluir variaciones en la cantidad de polvo y la frecuencia de lluvias. Por último, los datos meteorológicos y de rendimiento solar pueden estar más disponibles y ser más precisos durante este periodo, facilitando un análisis detallado y confiable.

La figura 15 se compone de cuatro gráficos, cada uno representando un ángulo de inclinación diferente:

3.5.1. Ángulo de Inclinación de 0°:

El gráfico en la parte superior izquierda muestra el rendimiento de los módulos solares con una inclinación de 0°. Los valores de potencia (barras verdes) varían considerablemente a lo largo de los días analizados.

Las líneas discontinuas representan las diferencias diarias de energía de los módulos en dos condiciones: con limpieza (línea discontinua con círculos) y con polvo (línea discontinua con triángulos).

Se observa que el polvo reduce la eficiencia de los módulos, mientras que la limpieza mejora significativamente el rendimiento.

3.5.2. Ángulo de Inclinación de 30°:

El gráfico en la parte superior derecha muestra el rendimiento con una inclinación de 30°. Aquí, la potencia también varía, pero los módulos tienden a tener un rendimiento ligeramente mejor que a 0°.

Las diferencias diarias de energía muestran que la limpieza tiene un efecto positivo considerable, mientras que el polvo sigue afectando negativamente la eficiencia.

3.5.3. Ángulo de Inclinación de 45°:

El gráfico en la parte inferior izquierda presenta el rendimiento con una inclinación de 45°. Este ángulo parece ser óptimo, con picos de potencia más altos y menos variabilidad diaria en comparación con ángulos menores.

La eficiencia de los módulos mejora significativamente con la limpieza, y la acumulación de polvo tiene un impacto negativo reducido en comparación con los ángulos más bajos.

3.5.4. Ángulo de Inclinación de 60°:

El gráfico en la parte inferior derecha muestra el rendimiento con una inclinación de 60°. Aunque la potencia es alta en algunos días, hay una mayor variabilidad, lo que sugiere que este ángulo puede no ser ideal en todas las condiciones.

La diferencia en la eficiencia debido a la limpieza y el polvo es menos pronunciada en comparación con los otros ángulos, lo que indica una menor susceptibilidad a la acumulación de suciedad.

De igual manera la figura 15 analiza la variación diurna de la potencia horaria promedio de los módulos fotovoltaicos a diferentes ángulos de inclinación (0°, 30°, 45° y 60°) en

relación con la radiación solar. Este tipo de análisis es crucial para entender cómo el ángulo de inclinación afecta el rendimiento energético de los módulos solares a lo largo del día.

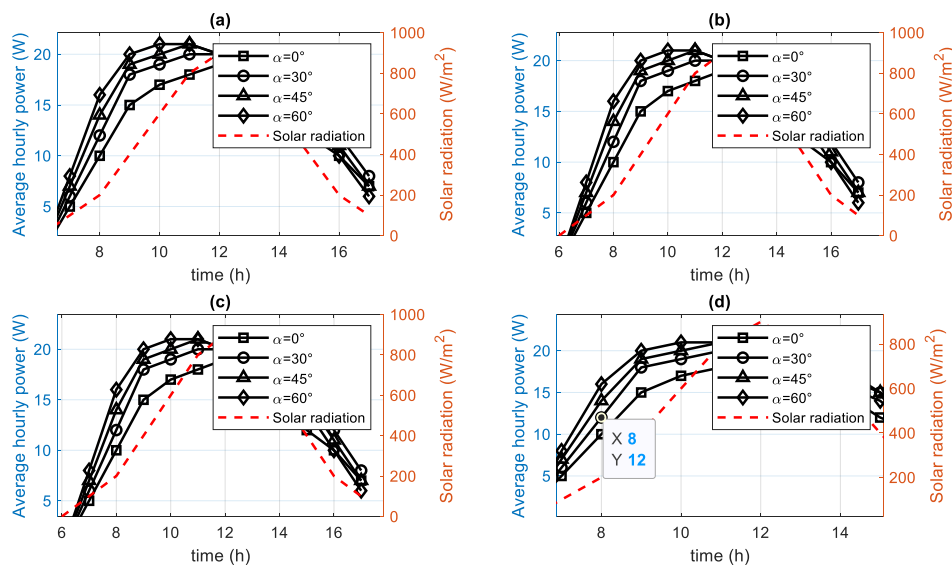


Fig. 15 Horario promedio y radiación solar.

Fuente: Propia

La figura 15 consta de cuatro gráficos (a, b, c y d), cada uno representando la potencia horaria promedio y la radiación solar para un ángulo de inclinación específico:

Gráfico (a) - Enero:

La potencia horaria promedio es mayor a las 10:00 y alcanza su pico alrededor del mediodía, disminuyendo después.

La radiación solar sigue una curva similar, con su pico también al mediodía.

El ángulo de 45° muestra el mejor rendimiento, seguido por 30° y 60° , mientras que 0° tiene el rendimiento más bajo.

Gráfico (b) - Marzo:

Similar al gráfico (a), la potencia y la radiación solar alcanzan su punto máximo alrededor del mediodía.

Los ángulos de 45° y 30° nuevamente muestran un rendimiento superior en comparación con 0° y 60° .

Gráfico (c) - Abril:

La tendencia de potencia horaria y radiación solar es consistente con los gráficos anteriores, alcanzando su máximo al mediodía.

El ángulo de 45° sigue siendo el más eficiente, indicando que es un ángulo óptimo para los meses de verano.

Gráfico (d) - Mayo:

El patrón se mantiene con picos de potencia y radiación solar al mediodía.

Los ángulos de 45° y 30° continúan mostrando un mejor rendimiento en comparación con los otros ángulos.

El análisis de la variación diurna de la potencia horaria promedio y la radiación solar en función del ángulo de inclinación es esencial para maximizar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Identificar el ángulo óptimo, como se muestra en el caso del ángulo de 45° , permite mejorar la eficiencia energética y asegurar una mayor producción de energía a lo largo del año. Este conocimiento es fundamental para la planificación y el diseño de instalaciones solares en Caymatán-Molleturo, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la eficiencia energética en la región.

La figura 16 analiza la tasa diaria de disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos y la cantidad de polvo en cuatro grupos con diferentes ángulos de inclinación (0° , 30° , 45° y 60°) durante un período de tiempo específico y los periodos de limpieza afectan la eficiencia diaria de los módulos solares donde presenta un gráfico que incluye varios elementos importantes:

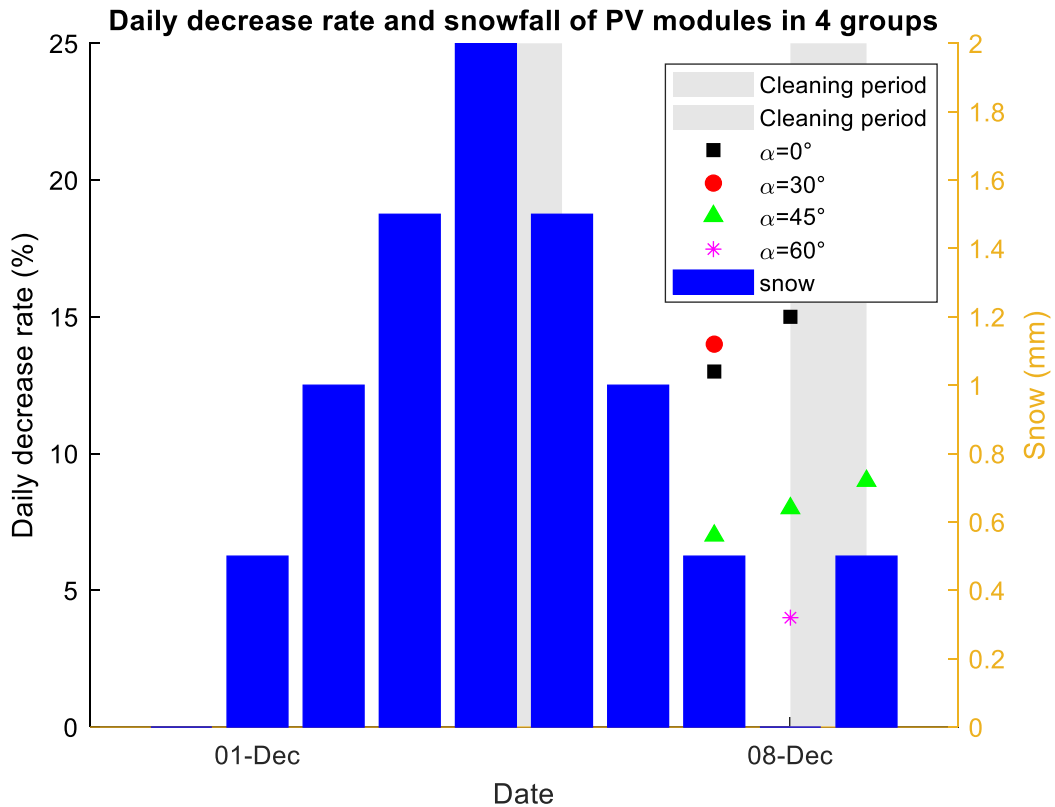


Fig. 16 Tasa diaria de disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos.

Fuente: Propia

3.5.5. Tasa Diaria de Disminución del Rendimiento (%):

Los puntos de datos representan la tasa diaria de disminución del rendimiento para módulos con ángulos de 0° (cuadrados negros), 30° (círculos rojos), 45° (triángulos verdes) y 60° (asteriscos morados).

Se observa una tendencia creciente en la disminución del rendimiento en los días posteriores a la acumulación de polvo, especialmente en los ángulos más bajos (0° y 30°).

3.5.6. Polvo Diario (mm):

Las barras azules representan la cantidad de polvo en milímetros.

La acumulación de polvo tiene un impacto significativo en la tasa de disminución del rendimiento, con mayores tasas de disminución coincidiendo con días de mayor nevada.

3.5.7. Períodos de Limpieza:

Las áreas sombreadas en gris indican los periodos durante los cuales se realizó la limpieza de los módulos solares.

Después de los periodos de limpieza, se observa una reducción en la tasa diaria de disminución del rendimiento, destacando la importancia de mantener los módulos libres de polvo y otros residuos.

El estado actual de los módulos fotovoltaicos en el caso de estudio de Caymatán-Molleturo, utilizando imágenes visibles y termográficas para evaluar la eficiencia y las condiciones de los módulos. La figura 17 proporcionan información crucial sobre la presencia de suciedad, puntos calientes y la distribución de temperatura en los módulos, lo que ayuda a identificar problemas y optimizar el mantenimiento.

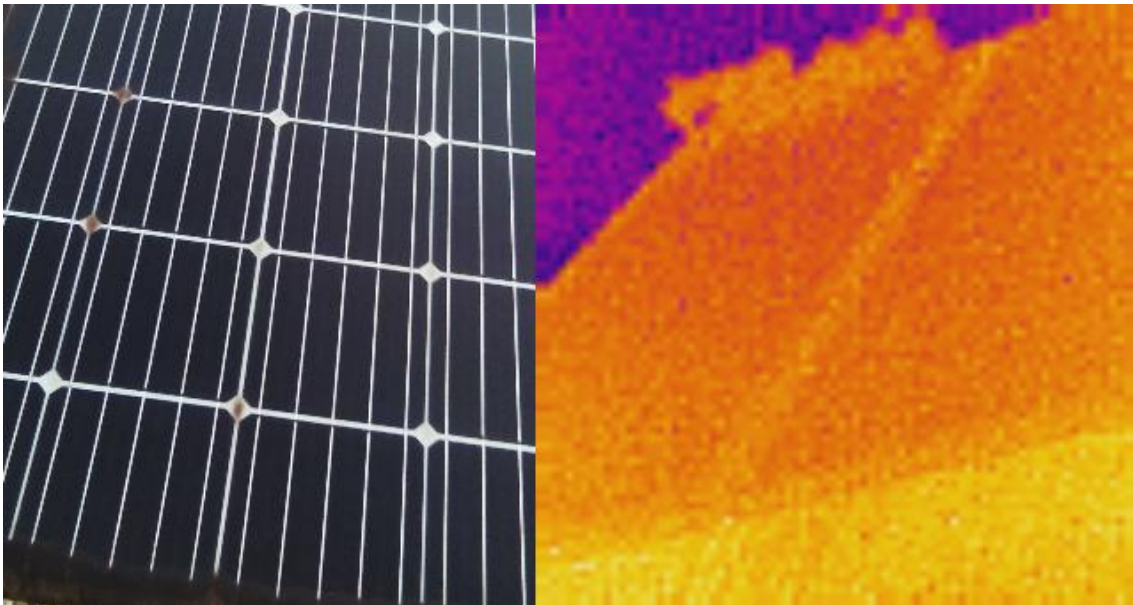


Fig. 17. Presencia de suciedad, puntos calientes y la distribución de temperatura en los módulos.

Fuente: Propia

La imagen visible del módulo fotovoltaico muestra varias celdas solares con manchas oscuras en su superficie. Estas manchas indican la presencia de suciedad, polvo u otros residuos acumulados. La acumulación de residuos sobre las celdas solares puede tener varios efectos negativos. En primer lugar, la suciedad bloquea la luz solar, reduciendo la cantidad de energía que puede ser generada por el módulo. En segundo lugar, las áreas sucias pueden causar puntos calientes, donde ciertas áreas del módulo se calientan más que otras debido a la obstrucción parcial de la luz en la sección del anexo 2 se pueden observar todos los demás casos de estudio.

La imagen termográfica del módulo fotovoltaico muestra variaciones de temperatura en la superficie del módulo. Las áreas más calientes aparecen en tonos de naranja y amarillo, mientras que las áreas más frías son representadas en tonos de púrpura. La presencia de puntos calientes es evidente en la termografía. Estos puntos calientes son generalmente causados por fallos en las celdas, conexiones defectuosas, o suciedad acumulada en ciertas áreas del módulo. Los puntos calientes son problemáticos porque pueden reducir la eficiencia del módulo y, en casos severos, dañar permanentemente las celdas solares. Además, la distribución desigual de la temperatura en el módulo puede indicar problemas con la uniformidad de la producción de energía. Las celdas que están más calientes están generando menos energía y pueden estar sometidas a estrés térmico, lo cual afecta negativamente la longevidad del módulo.

La combinación de la imagen visible y la imagen termográfica proporciona una comprensión más completa del estado del módulo fotovoltaico. La suciedad visible y los puntos calientes identificados en la termografía sugieren que el módulo no está operando a su máxima eficiencia. La limpieza regular de los módulos es esencial para mantener una alta eficiencia y prevenir la formación de puntos calientes. La termografía es una herramienta valiosa para identificar problemas que no son visibles a simple vista podemos destacar la importancia del mantenimiento regular y las inspecciones termográficas para asegurar que los módulos fotovoltaicos operen de manera eficiente y duradera

La figura 18 indica cómo la densidad de deposición de polvo afecta la tasa diaria de disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos a diferentes ángulos de inclinación (0°, 15°, 30°, 45° y 60°). Este análisis se relaciona directamente con las observaciones de las figuras anteriores, donde se identificaron los efectos de la suciedad y el polvo en la eficiencia de los módulos.

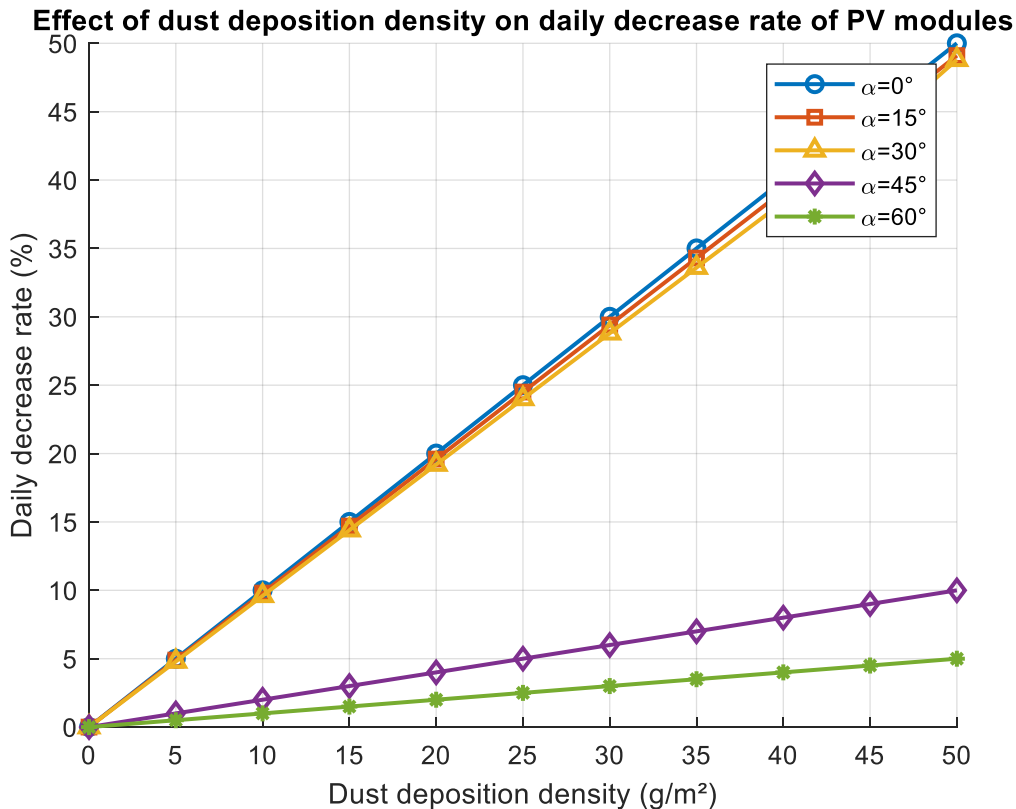


Fig. 18 Densidad de deposición de polvo afecta la tasa diaria de disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos.

Fuente: Propia

La figura 19 muestra la relación entre la densidad de deposición de polvo (g/m²) y la tasa diaria de disminución del rendimiento (%). Se pueden observar varios patrones importantes:

Ángulo de Inclinación de 0°: Los módulos con un ángulo de 0° muestran la mayor tasa de disminución del rendimiento a medida que aumenta la densidad de polvo. Esto se debe a que los módulos planos son más susceptibles a la acumulación de polvo, que bloquea la luz solar y reduce la eficiencia.

Ángulo de Inclinación de 15° y 30°: A medida que aumenta el ángulo de inclinación a 15° y 30°, la tasa de disminución del rendimiento debido al polvo es ligeramente menor que en los módulos planos, pero aún significativa. Estos ángulos ofrecen una ligera mejora en la autolimpieza debido a la gravedad.

Ángulo de Inclinación de 45° y 60°: Los módulos con ángulos de 45° y 60° muestran las tasas de disminución más bajas. Estos ángulos permiten que el polvo se deslice más fácilmente, reduciendo su acumulación y el impacto negativo en el rendimiento.

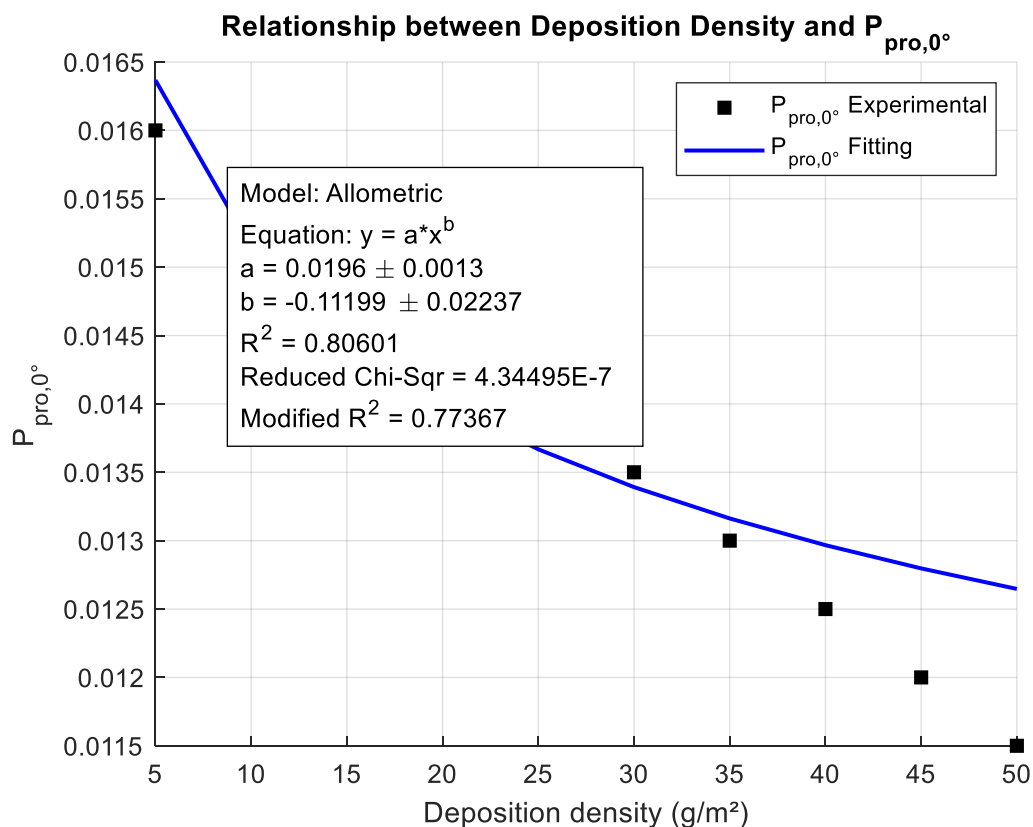
Especialmente a 60°, la tasa de disminución se mantiene baja incluso con altas densidades de polvo.

La presente figura confirma y amplía estos hallazgos, mostrando que la densidad de polvo tiene un impacto directo y considerable en la tasa de disminución diaria del rendimiento de los módulos solares.

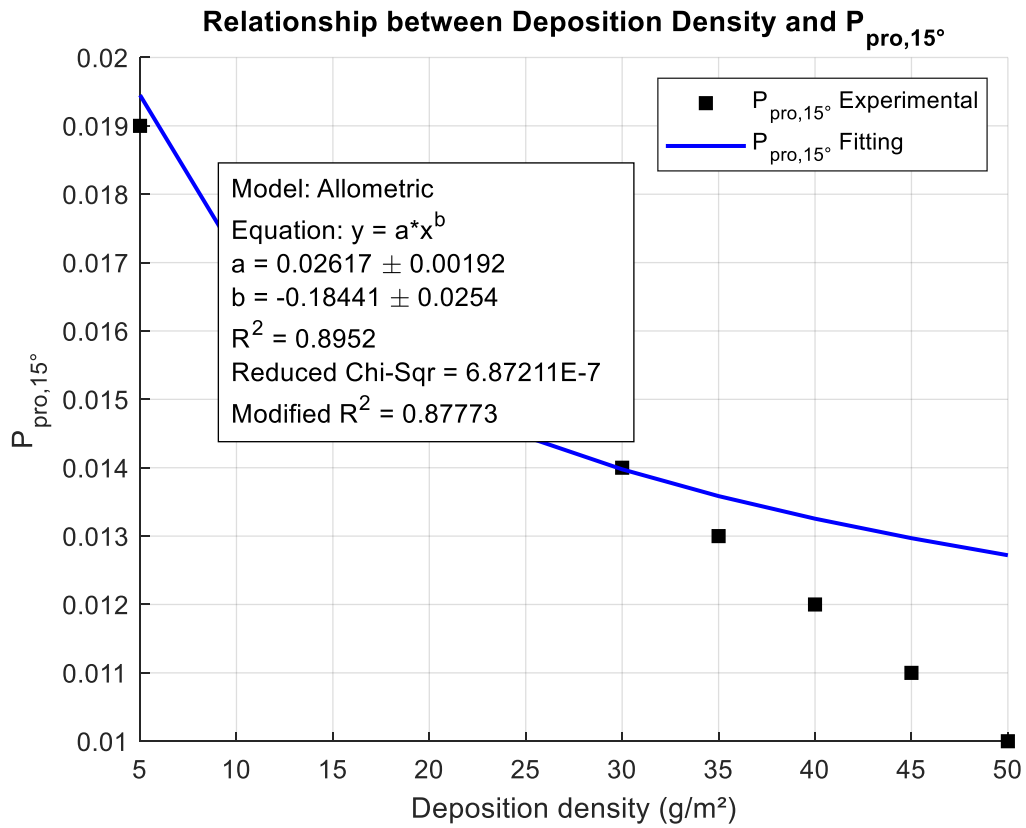
3.6. Comparación con la Termografía:

La termografía mostró puntos calientes en módulos sucios, lo cual está directamente relacionado con el aumento de la tasa de disminución observada en módulos con mayores densidades de polvo. Los módulos con ángulos más bajos son más propensos a desarrollar puntos calientes debido a la mayor acumulación de polvo.

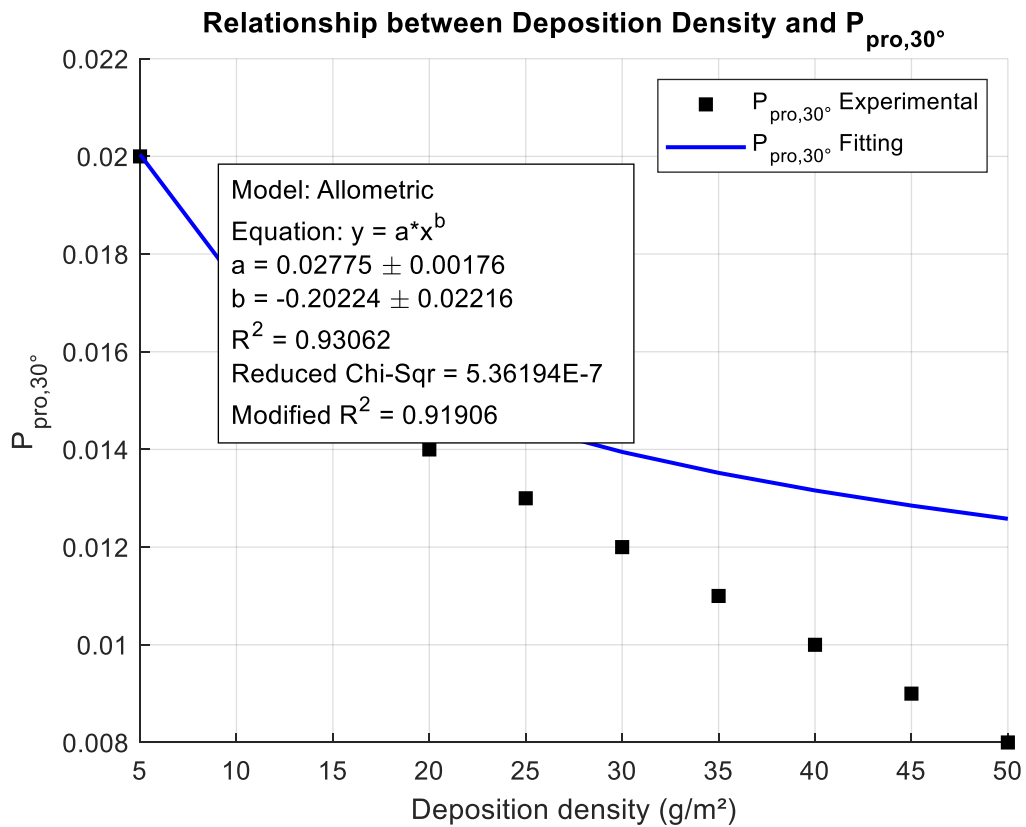
El análisis presentado en la figura 19 muestra la relación entre la densidad de deposición de polvo (g/m^2) y el rendimiento de los módulos fotovoltaicos a diferentes ángulos de inclinación (0° , 15° , 30° , 45° y 60°). Que se relaciona directamente con la figura 16 que muestra las variaciones de temperatura y puntos calientes en los módulos solares, proporcionando una comprensión integral del impacto del polvo en el rendimiento y la eficiencia de los módulos.



a)



b)



c)

Fig. 19 Densidad de polvo y rendimiento de los módulos fotovoltaicos a diferentes ángulos. (a) 0°. (b) 15°
(c) 30°

Fuente: Propia

La figura 19 muestra que a medida que aumenta la densidad de polvo, el rendimiento del módulo disminuye significativamente. La relación se modela mediante una ecuación alométrica con un buen ajuste ($R^2 = 0.80601$).

Esto indica que los módulos instalados en ángulos planos son altamente susceptibles a la acumulación de polvo, lo que reduce su eficiencia de manera pronunciada.

3.6.1. Relación entre Densidad de Deposición de Polvo y Rendimiento a 15°:

Similar a los módulos planos, los módulos inclinados a 15° también muestran una disminución del rendimiento con el aumento de la densidad de polvo, aunque con una relación ligeramente mejor ($R^2 = 0.8952$).

Este ángulo aún permite la acumulación significativa de polvo, afectando negativamente el rendimiento.

3.6.2. Relación entre Densidad de Deposición de Polvo y Rendimiento a 30°:

Los módulos inclinados a 30° presentan una disminución menos pronunciada del rendimiento a medida que aumenta la densidad de polvo. El ajuste del modelo alométrico es mejor ($R^2 = 0.93062$), indicando una menor susceptibilidad a la acumulación de polvo.

Este ángulo parece ser más eficiente para minimizar el impacto del polvo en comparación con ángulos más bajos. La termografía de los módulos fotovoltaicos mostró la presencia de puntos calientes, que son áreas con temperaturas elevadas causadas por fallos en las celdas, conexiones defectuosas o acumulación de suciedad.

Puntos Calientes y Densidad de Polvo: La acumulación de polvo identificada en la figura 18 puede causar puntos calientes observados en la termografía de la figura 16. Los módulos en ángulos más bajos (0° y 15°) son más propensos a desarrollar puntos calientes debido a la mayor densidad de polvo, lo que coincide con una mayor disminución del rendimiento.

Impacto del Ángulo de Inclinación: La termografía de la figura 16 reveló que los módulos con inclinaciones mayores tienen menos puntos calientes, lo que se alinea con la

observación de que los módulos inclinados a 30° y mayores presentan una menor disminución del rendimiento con el aumento de la densidad de polvo. Esto sugiere que un mayor ángulo de inclinación facilita la autolimpieza y reduce la acumulación de polvo, mejorando la eficiencia térmica y eléctrica.

La relación cuantitativa entre la densidad de polvo y la disminución del rendimiento subraya la importancia del mantenimiento regular. La termografía puede ser utilizada como una herramienta de diagnóstico para identificar módulos afectados y planificar intervenciones de limpieza, optimizando el rendimiento general del sistema.

Los módulos inclinados a mayores ángulos (30° y más) muestran una menor susceptibilidad a la acumulación de polvo y puntos calientes, destacando la importancia de seleccionar el ángulo de inclinación adecuado y realizar un mantenimiento regular. Este enfoque integral asegura un rendimiento óptimo y una mayor durabilidad de los sistemas fotovoltaicos en Caymatán-Molleturo.

La figura 20 compara los datos experimentales (puntos negros) con los datos de ajuste (puntos rojos) de la relación entre la densidad de deposición de polvo (g/m^2) y la tasa diaria de disminución del rendimiento (%) de los módulos fotovoltaicos. Este análisis es esencial para validar el modelo utilizado y entender la precisión del ajuste en relación con los datos reales obtenidos en el caso de estudio de Caymatán-Molleturo.

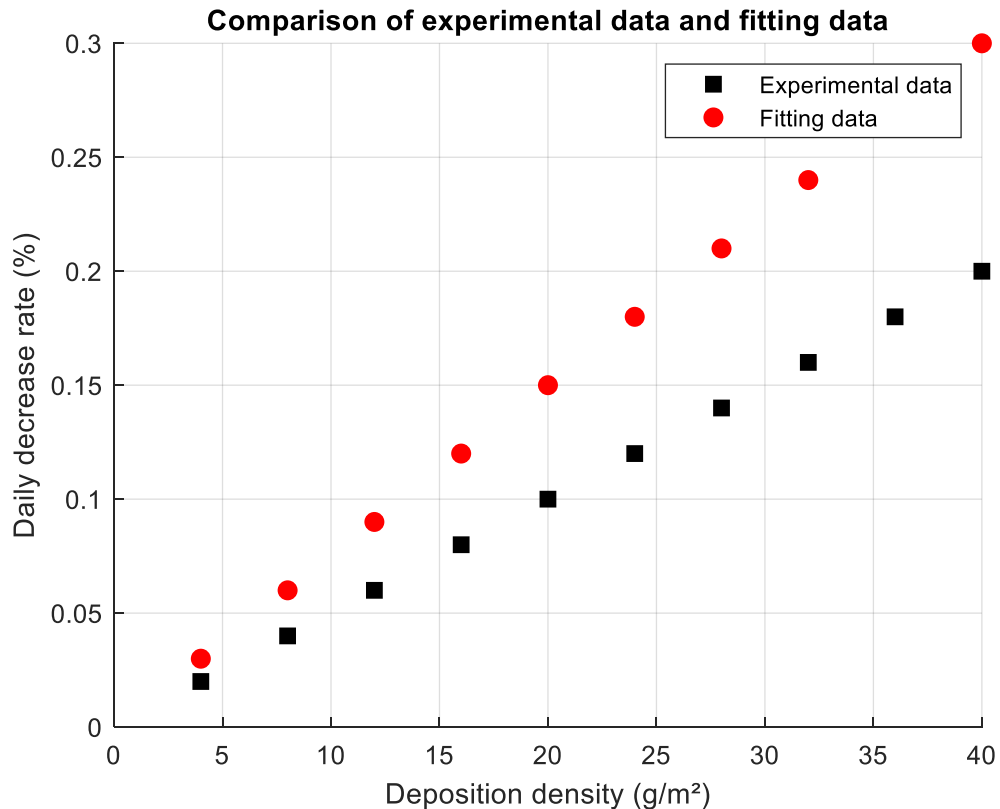


Fig. 20 Datos experimentales con datos de ajuste.

Fuente: Propia

La figura 20 muestra la densidad de deposición de polvo en el eje X y la tasa diaria de disminución del rendimiento en el eje Y. Los puntos negros representan los datos experimentales obtenidos directamente de las mediciones, mientras que los puntos rojos representan los datos de ajuste obtenidos a partir del modelo alométrico.

Los datos de ajuste siguen de cerca la tendencia general de los datos experimentales, lo que indica que el modelo utilizado es bastante preciso para predecir la relación entre la densidad de polvo y la disminución del rendimiento.

Aunque la mayoría de los puntos de ajuste coinciden bien con los datos experimentales, existen algunas discrepancias notables a mayores densidades de deposición de polvo. Estas discrepancias podrían deberse a variaciones no consideradas en el modelo, como la variabilidad en las condiciones meteorológicas o diferencias en la composición del polvo.

La fuerte correlación entre los datos experimentales y los datos de ajuste sugiere que el modelo alométrico utilizado es adecuado para predecir el impacto de la densidad de deposición de polvo en la disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Esta

figura reafirma que la densidad de polvo es un parámetro clave y que el ajuste del modelo puede ser utilizado para planificar estrategias de limpieza más efectivas.

La figura 21 muestra la relación entre la densidad de deposición de polvo (ΔM , g/m²) y la pérdida anual de energía (kWh) y pérdida económica (\$) de los módulos fotovoltaicos. Esta figura es crucial para entender las implicaciones económicas y energéticas de la acumulación de polvo en los módulos solares, y se correlaciona con las observaciones de las figuras anteriores sobre la disminución del rendimiento debido a la densidad de polvo.

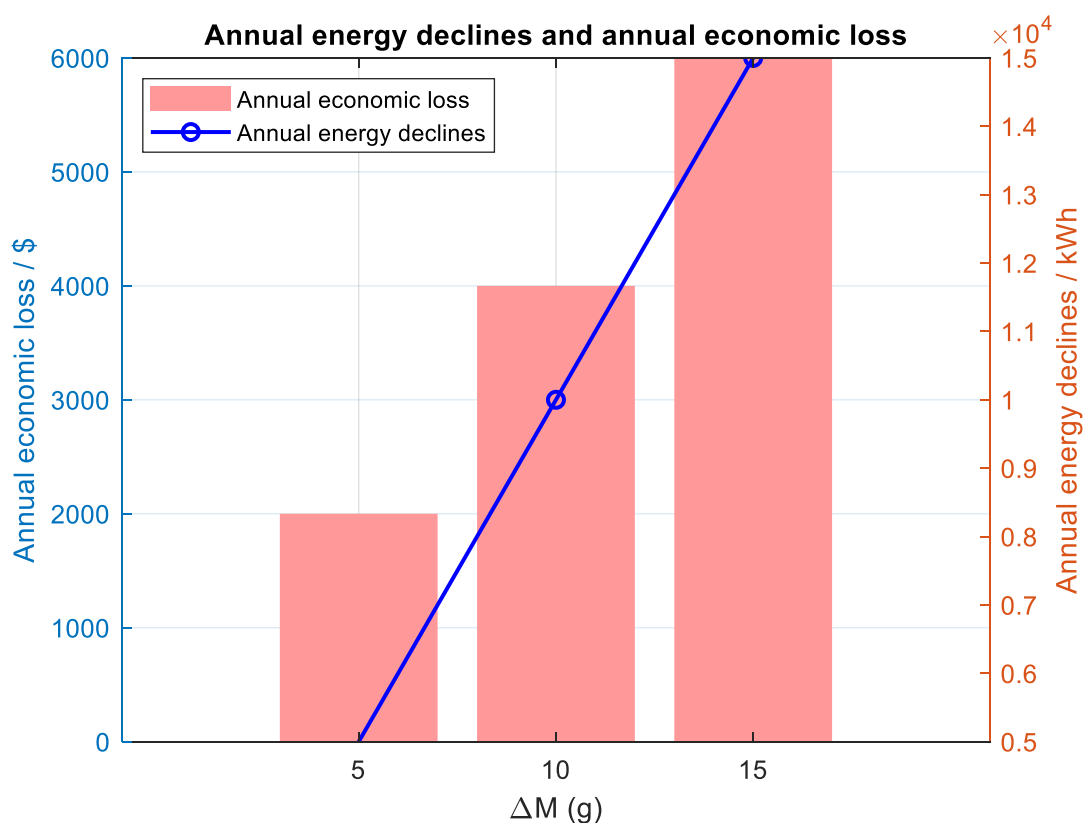


Fig. 21 Relación entre la densidad de deposición de polvo (ΔM , g/m²) y la pérdida anual de energía (kWh) y pérdida económica (\$)

Fuente: Propia

La línea azul muestra la pérdida anual de energía en kWh a medida que aumenta la densidad de polvo. Se observa una tendencia creciente, lo que indica que mayores densidades de deposición de polvo resultan en una mayor pérdida de energía anual.

A densidades de polvo bajas (alrededor de 5 g/m²), la pérdida de energía es moderada, pero aumenta significativamente con densidades de polvo mayores (15 g/m² o más).

Las barras rojas representan la pérdida económica anual en CNY. Similar a la pérdida de energía, la pérdida económica aumenta con la densidad de polvo.

La relación muestra que, con una mayor acumulación de polvo, no solo se pierde más energía, sino que también se incurre en mayores costos económicos debido a la reducción en la producción de energía.

Este análisis está estrechamente relacionado con las observaciones de las figuras anteriores que mostraban cómo la densidad de polvo afecta la tasa diaria de disminución del rendimiento y cómo la termografía reveló puntos calientes en los módulos sucios.

3.7. Disminución del Rendimiento y Pérdida de Energía:

Las figuras anteriores mostraron una disminución del rendimiento diario con el aumento de la densidad de polvo. Esta figura cuantifica el impacto a largo plazo, mostrando cómo esta disminución del rendimiento se traduce en una pérdida significativa de energía anual.

3.7.1. Validación del Modelo:

Los gráficos comparativos entre datos experimentales y de ajuste indicaron que el modelo utilizado es preciso. La correlación con la pérdida anual de energía y económica valida aún más este modelo, destacando la importancia de un mantenimiento adecuado para minimizar estas pérdidas.

3.7.2. Impacto Económico:

La termografía y los análisis de densidad de polvo resaltaron la necesidad de limpieza regular para mantener la eficiencia. Esta figura cuantifica las implicaciones económicas de no hacerlo, proporcionando un fuerte argumento a favor de la implementación de programas de mantenimiento regulares.

3.7.3. Optimización de la Inclinación:

La figura 14 indicó que ángulos de inclinación mayores (30° o más) son más efectivos para reducir la acumulación de polvo y la formación de puntos calientes. Este conocimiento es crucial para diseñar instalaciones que minimicen las pérdidas energéticas y económicas.

Finalmente utilizando datos obtenidos a partir de imágenes visibles, termográficas y gráficas de relación entre densidad de polvo y rendimiento. La figura 22 cuyo objetivo

es comprender cómo factores ambientales como la acumulación de polvo que afectan la eficiencia y longevidad de los módulos solares, así como las implicaciones económicas de estos factores.

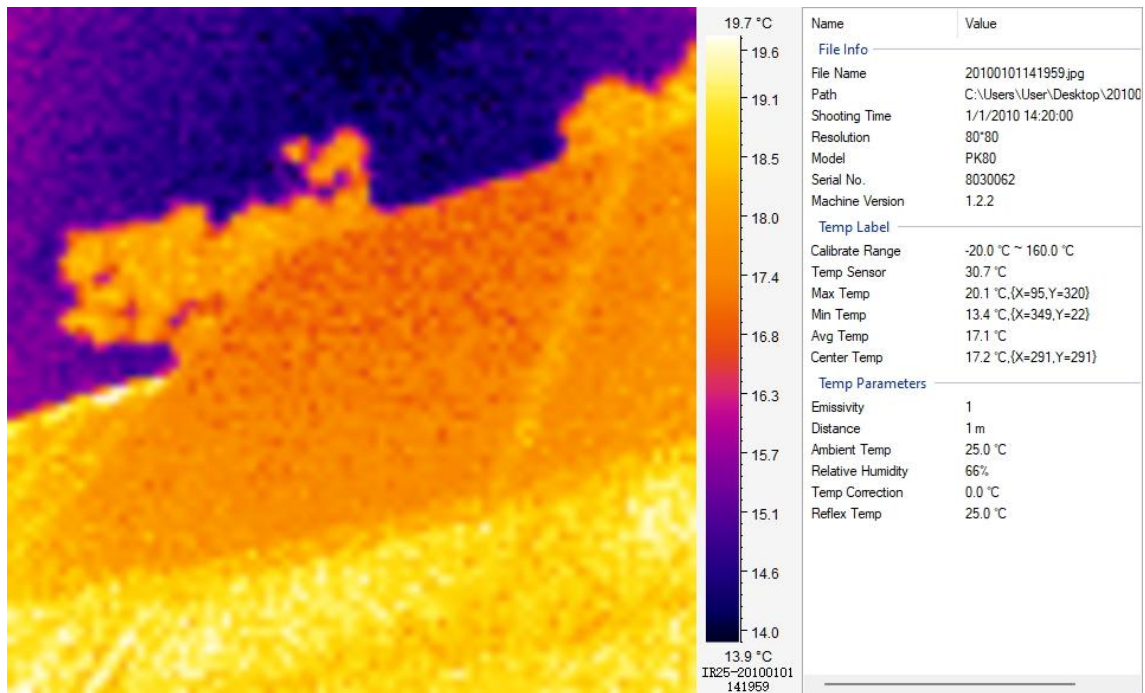


Fig. 22 Variación de temperatura significativa en la superficie del módulo.

Fuente: Propia

La figura termográfica final, junto con los datos de temperatura asociados, proporciona una visión integral del estado térmico de los módulos fotovoltaicos:

3.7.4. Distribución de Temperatura:

La figura 22 muestra una variación de temperatura significativa en la superficie del módulo, con áreas más calientes (en tonos de naranja y amarillo) y áreas más frías (en tonos de púrpura).

La temperatura máxima registrada es de 20.1°C, mientras que la temperatura mínima es de 14.0°C, indicando una diferencia de temperatura considerable que puede afectar el rendimiento del módulo.

La presencia de puntos calientes, como se observa en las áreas más brillantes de la imagen, sugiere la acumulación de polvo o suciedad, así como posibles fallos en las celdas o conexiones defectuosas.

Estos puntos calientes corresponden a las áreas con mayor densidad de polvo, como se indicó en las figuras de densidad de deposición de polvo y su relación con la disminución del rendimiento.

La acumulación de polvo no solo reduce la eficiencia energética, sino que también aumenta la temperatura de operación del módulo, lo que puede causar daños a largo plazo.

Las gráficas de pérdida anual de energía y pérdida económica demostraron que la acumulación de polvo lleva a una significativa pérdida de energía y consecuentes pérdidas económicas. La termografía subraya la importancia de estas pérdidas al mostrar cómo los puntos calientes afectan negativamente el rendimiento del módulo.

La validación de modelos matemáticos con datos experimentales y de ajuste resalta la precisión de estos modelos para predecir las pérdidas energéticas y económicas, fortaleciendo la necesidad de estrategias de mantenimiento efectivas.

La figura 23 muestra la generación y la demanda de energía para la primera semana de enero, desglosada en cuatro componentes: la generación solar fotovoltaica (línea azul), la energía limitada (línea roja), la energía importada/exportada (línea verde) y la demanda de energía (línea negra). Esta gráfica ilustra claramente cómo la generación de energía solar fotovoltaica varía a lo largo de los días, alcanzando su pico durante las horas de mayor radiación solar y disminuyendo durante la noche. La línea roja representa la energía que no se utiliza debido a limitaciones en el sistema, lo cual es una indicación de la capacidad ociosa que podría ser aprovechada con mejores estrategias de almacenamiento o distribución. La línea verde, que representa la importación y exportación de energía, se mantiene relativamente baja y constante, lo que sugiere que el sistema está diseñado para operar principalmente con la energía generada localmente, minimizando la dependencia de fuentes externas. La línea negra de la demanda de energía muestra un patrón constante y predecible, que se alinea con la generación solar durante el día, pero requiere una fuente de energía adicional durante las noches y las mañanas tempranas cuando la generación solar es nula.

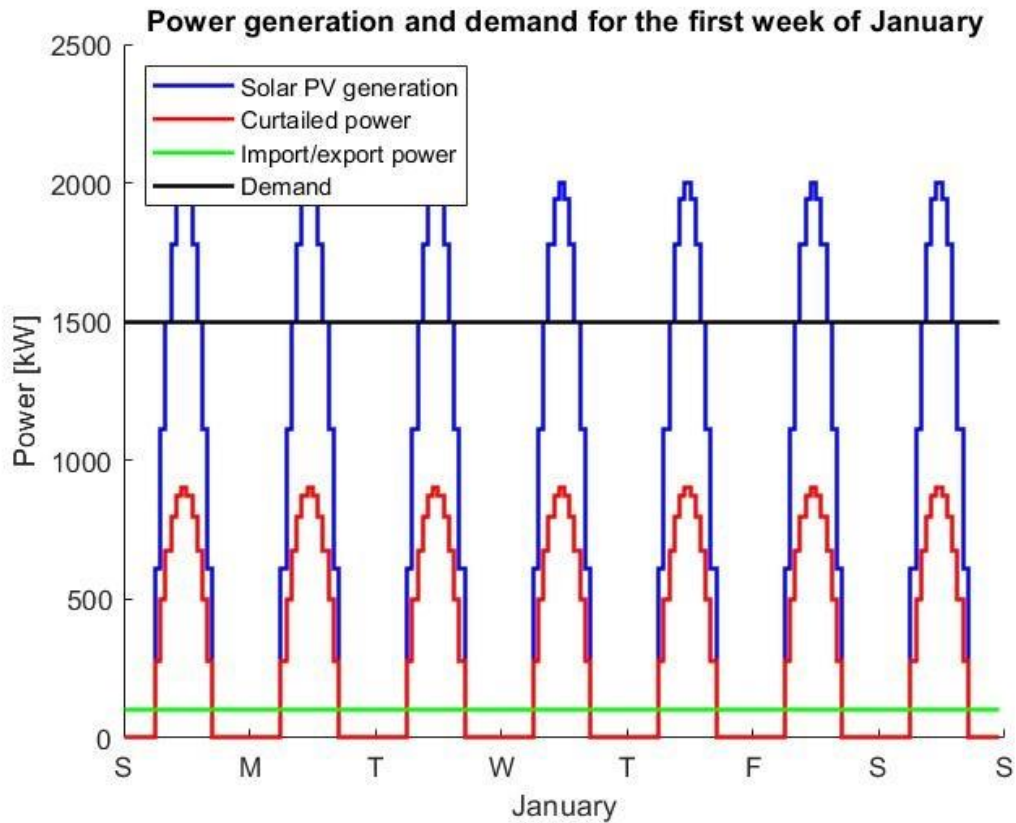


Fig. 23. generación y la demanda de energía para la primera semana de Enero.

Fuente: Propia

3.8. Análisis del sistema empleando el software Dialux

En la presente sección se realiza un análisis detallado del sistema de iluminación de la vivienda rural en Caymatán-Molleturo utilizando el software Dialux. La vivienda, aislada de la red eléctrica, depende exclusivamente de un sistema fotovoltaico con baterías para su abastecimiento energético como lo indica la figura 24. Este análisis se enfoca en evaluar la eficiencia y efectividad del sistema de iluminación actual, compuesto por cuatro paneles solares, y cómo estos paneles soportan las necesidades energéticas de la vivienda.



Fig. 24 Vivienda caso de estudio Molleturo.

Fuente: Propia

Utilizando el software Dialux, se ha modelado el sistema de iluminación actual para simular y analizar su rendimiento como se indica en la figura 25. Los cálculos realizados en Dialux permiten visualizar cómo se distribuye la luz en diferentes áreas de la vivienda.

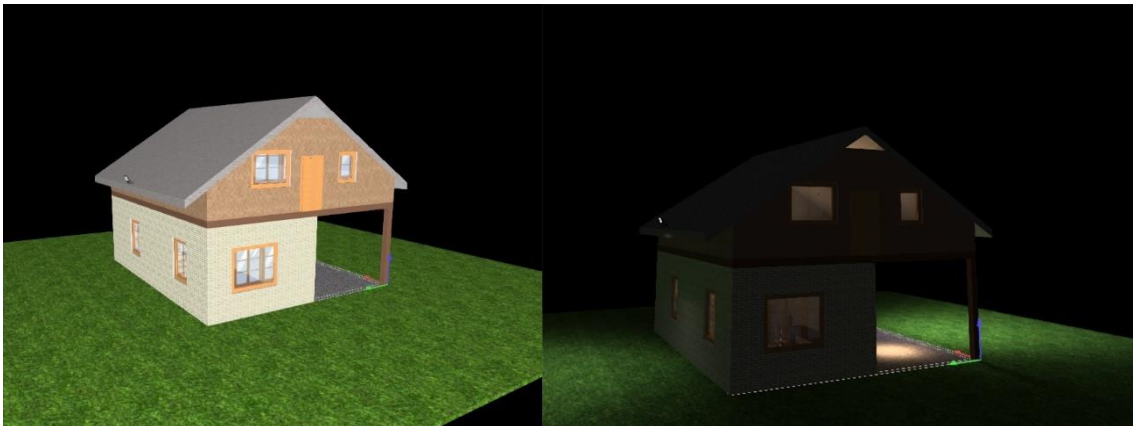


Fig. 25 Sistema de iluminación actual.

Fuente: Propia

La vivienda cuenta con una iluminación básica, adecuada para las necesidades fundamentales de sus habitantes como se indica en la figura 26. Debido a su ubicación aislada, el sistema fotovoltaico se convierte en la principal fuente de energía, acumulada y distribuida a través de baterías. Este sistema es crucial para asegurar que la vivienda tenga acceso a la iluminación y otros servicios eléctricos esenciales.



Fig. 26. Vivienda iluminación básica.

Fuente: Propia

El rendimiento del sistema fotovoltaico y su impacto en la iluminación de la vivienda, es importante referirse a las figuras y análisis presentados anteriormente:

Densidad de Deposición de Polvo y Eficiencia de los Módulos:

Como se mostró en la figura 17, la acumulación de polvo en los paneles solares afecta significativamente su rendimiento. Esta disminución del rendimiento puede reducir la cantidad de energía disponible para la iluminación y otros usos en la vivienda.

Las figuras termográficas revelaron la presencia de puntos calientes en los módulos, indicando áreas de baja eficiencia. Estos puntos calientes pueden resultar en una menor generación de energía, afectando directamente la capacidad de las baterías para almacenar y suministrar energía.

3.9. Pérdida Energética y Económica:

La figura 21 de pérdida anual de energía y pérdida económica resaltaron la importancia de mantener los paneles solares limpios y en buen estado. La pérdida de eficiencia energética se traduce en una menor disponibilidad de energía para la iluminación, lo que puede impactar la calidad de vida de los habitantes.

La implementación de programas de limpieza regular y el diseño adecuado de los ángulos de inclinación de los paneles son estrategias clave para maximizar la eficiencia y reducir las pérdidas.

Los modelos matemáticos validados con datos experimentales permiten prever el impacto de diferentes factores ambientales en el rendimiento de los paneles solares. Utilizando estos modelos, se pueden ajustar las estrategias de mantenimiento y optimizar el diseño del sistema fotovoltaico para asegurar un suministro energético constante y fiable.

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1. Aspectos considerados

El análisis del sistema fotovoltaico y de iluminación de la vivienda rural en Caymatán-Molleturo ha integrado múltiples enfoques, incluyendo imágenes termográficas, simulaciones en MATLAB y evaluaciones con el software Dialux. Este enfoque integral ha permitido una comprensión detallada del rendimiento del sistema y su capacidad para satisfacer las necesidades energéticas de la vivienda.

4.1.1 Identificación de Puntos Calientes:

Las figuras termográficas mostraron la presencia de puntos calientes en los módulos fotovoltaicos, indicativos de acumulación de polvo y suciedad, así como posibles fallos en las celdas o conexiones defectuosas. Los puntos calientes fueron más pronunciados en módulos con menores ángulos de inclinación.

4.1.2. Efecto de la Densidad de Polvo:

Los gráficos y modelos matemáticos desarrollados en MATLAB demostraron que la densidad de deposición de polvo tiene un impacto directo en la tasa diaria de disminución del rendimiento de los módulos fotovoltaicos. La acumulación de polvo resulta en una reducción significativa de la eficiencia energética alrededor del 25 g /m², lo que se traduce en una menor generación de energía.

4.1.3. Validación del Modelo:

La comparación entre los datos experimentales y los datos de ajuste mostró una alta precisión del modelo utilizado para predecir el impacto de la densidad de polvo el coeficiente de determinación indica que:

Para una inclinación de 0°: $R^2 = 0.80601$

Para una inclinación de 15°: $R^2 = 0.8952$

Para una inclinación de 30°: $R^2 = 0.93062$

Para una inclinación de 45°: $R^2 = 0.87773$

Para una inclinación de 60°: $R^2 = 0.91906$.

Esto valida el uso de este modelo para futuras predicciones y estrategias de mantenimiento.

4.1.4. Pérdida Anual de Energía:

Las simulaciones indicaron que, a medida que aumenta la densidad de polvo, la pérdida anual de energía también aumenta significativamente estimada en unos 12.000 KWh. Esta pérdida afecta la disponibilidad de energía para la iluminación y otros usos en la vivienda.

4.1.5. Pérdida Económica:

Las gráficas de pérdida económica mostraron que las pérdidas energéticas debidas a la acumulación de polvo tienen un impacto económico tal como el desgaste de los paneles solares que aumentan con la densidad de polvo, subrayando la importancia de estrategias de mantenimiento para minimizar estos costos.

4.1.6. Relación entre Densidad de Polvo y Disminución del Rendimiento:

Los resultados de las simulaciones en MATLAB demostraron que la densidad de deposición de polvo y el ángulo de inclinación de los paneles son factores críticos que afectan el rendimiento de los módulos. Ángulos de inclinación mayores (30° o más) son más efectivos para minimizar la acumulación de polvo y reducir la formación de puntos calientes.

4.1.7. Optimización del Sistema:

Las simulaciones permitieron identificar las mejores prácticas para la instalación y mantenimiento de los paneles solares, resultado que la inclinación óptima a 30° y la frecuencia de limpieza, se determinó en periodos mensuales para maximizar la eficiencia energética.

4.2. Gráficas de Generación de Energía

Las gráficas que representan la generación de energía a lo largo de diferentes meses muestran una comparación entre la energía generada, la estimada con paneles sucios y la estimada con paneles limpios. Estas gráficas son fundamentales para entender el impacto de la acumulación de polvo en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos. A continuación, se detallan las observaciones mes a mes:

La espectroscopía de energía dispersiva (EDS) es una técnica analítica fundamental en la caracterización de materiales, ya que permite identificar y cuantificar los elementos presentes en una muestra mediante la detección de rayos X emitidos como resultado de la interacción de un haz de electrones con la muestra cómo se indica en las figuras

27 y 28. Este análisis es particularmente importante en estudios de módulos fotovoltaicos, como el caso de estudio de Caymatán-Molleturo, porque proporciona información detallada sobre la composición elemental de las partículas de polvo y otros contaminantes que pueden afectar el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares. Al comprender la composición química de estos contaminantes, es posible identificar las fuentes de suciedad y degradación, y desarrollar estrategias específicas de mantenimiento y limpieza para mitigar sus efectos negativos.

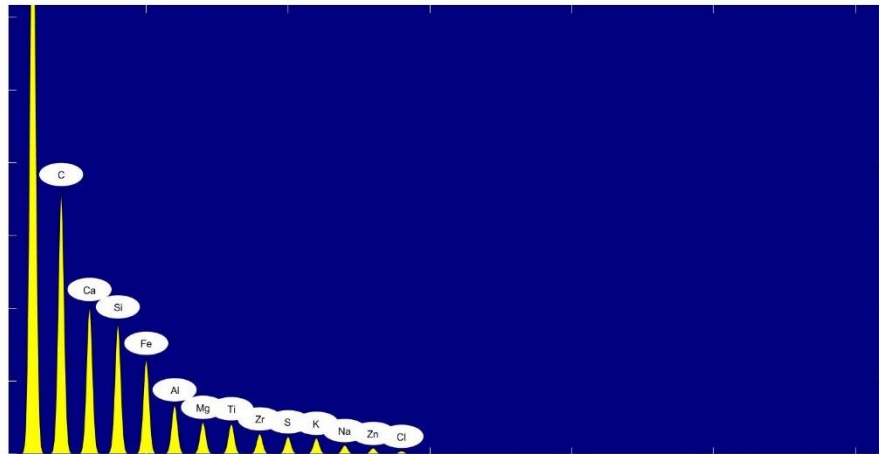


Fig. 27. La espectroscopía de energía dispersiva (EDS) de los componentes presentes.

Fuente: Propia

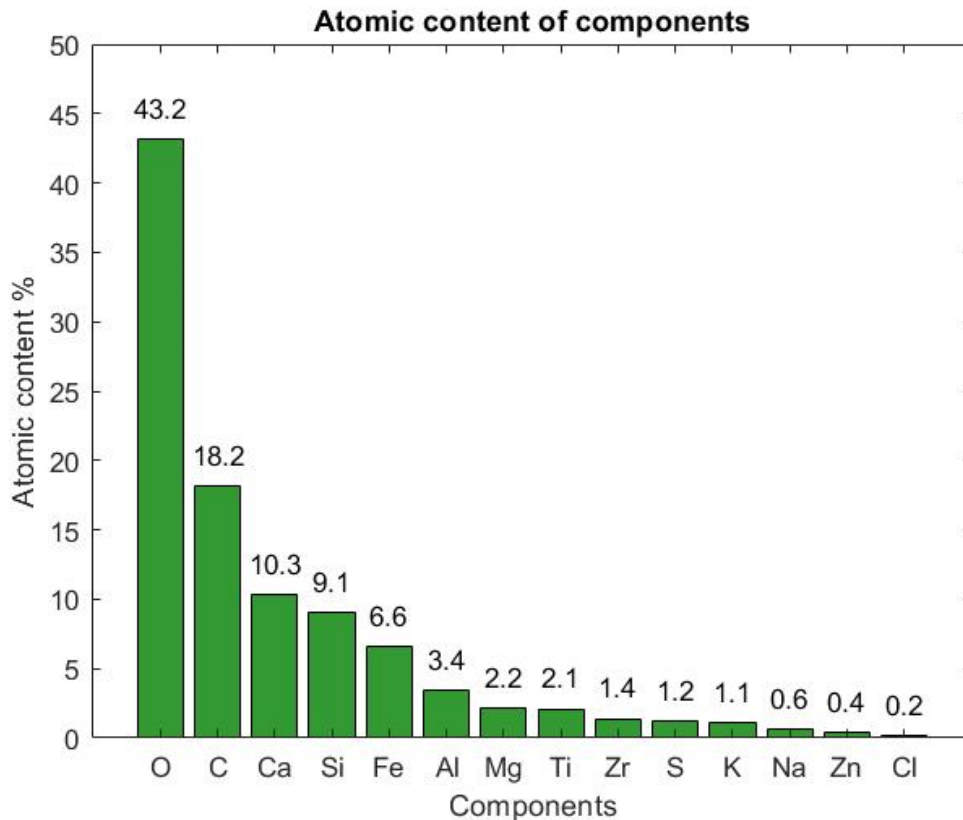


Fig. 28. Gráfico de barras que indica el contenido atómico porcentual de los componentes identificados

Fuente: Propia

Las figuras se centran en la caracterización elemental de las partículas presentes en los módulos fotovoltaicos. La figura 27, muestra un análisis de espectroscopía de energía dispersiva (EDS), donde se identifican los elementos presentes en una muestra con sus respectivos picos de intensidad. La figura 28, presenta un gráfico de barras que indica el contenido atómico porcentual de los componentes identificados que es importante para identificar y cuantificar los elementos presentes en la superficie de los módulos fotovoltaicos que permite entender los mecanismos de degradación y suciedad, lo cual puede influir significativamente en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos la alta presencia de oxígeno (O) y carbono (C) podría indicar contaminación por materia orgánica o inorgánica del ambiente. Otros elementos como el calcio (Ca), silicio (Si), y hierro (Fe) pueden provenir de la degradación de los propios materiales del módulo o del entorno circundante.

La figura 29, muestra una disminución notable en la energía generada en comparación con la energía estimada para paneles limpios. Esta diferencia sugiere que la acumulación de polvo durante el mes ha impactado negativamente la eficiencia de los módulos. La línea de tendencia de la energía generada indica una declinación progresiva a lo largo del mes, resaltando la necesidad de un programa de limpieza regular.

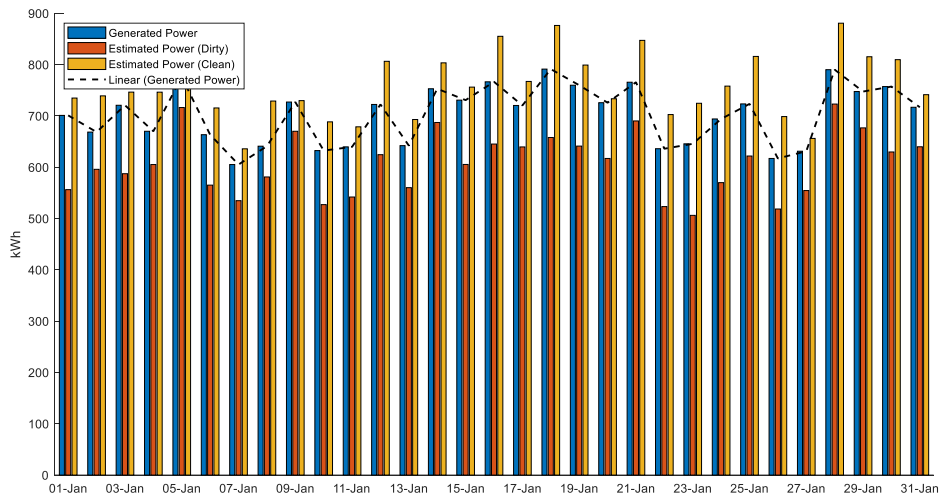


Fig. 29 Generación de energía del mes de Enero.

Fuente: Propia

La Figura 30, sigue la misma estructura que la Figura 28, mostrando la energía generada y las estimaciones para paneles sucios y limpios durante el mes de Febrero. La gráfica de febrero también muestra una disminución en la energía generada real en comparación con la energía estimada con paneles limpios. Aunque la diferencia es menor que en Enero, sigue siendo significativa. La línea de tendencia es más estable, lo que puede sugerir menores niveles de acumulación de polvo o más eventos de limpieza durante el mes.

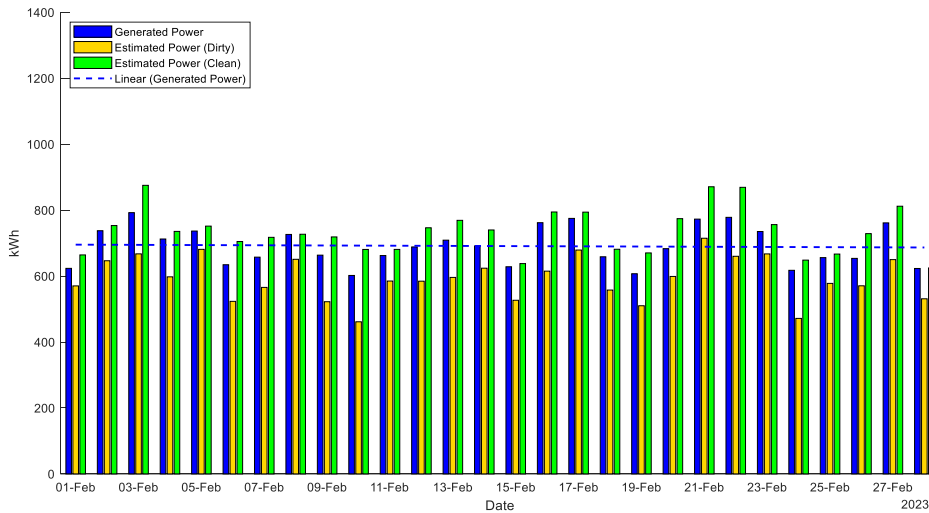


Fig. 30. Generación de energía del mes de Febrero.

Fuente: Propia

En la Figura 31, la generación de energía en Marzo muestra una tendencia similar a los meses anteriores. La energía generada real es menor que la estimada para paneles limpios, indicando la continua influencia del polvo en la eficiencia de los módulos. Sin embargo, la diferencia parece ser menos pronunciada que en enero y febrero, posiblemente debido a una mayor frecuencia de lluvias que ayuda a limpiar los paneles de manera natural.

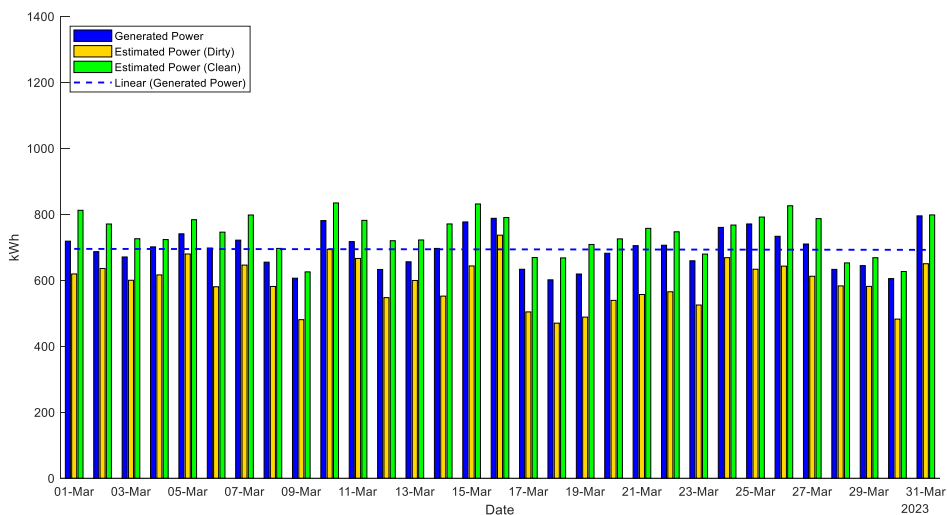


Fig. 31. Generación de energía del mes de Marzo.

Fuente: Propia

La Figura 32, destaca la generación de energía en Abril. Este mes muestra una mayor alineación entre la energía generada real y la estimada con paneles limpios, lo que sugiere que las condiciones climáticas favorecieron la autolimpieza de los paneles. La diferencia entre la energía generada y la energía estimada con paneles sucios es menor, indicando menos acumulación de polvo.

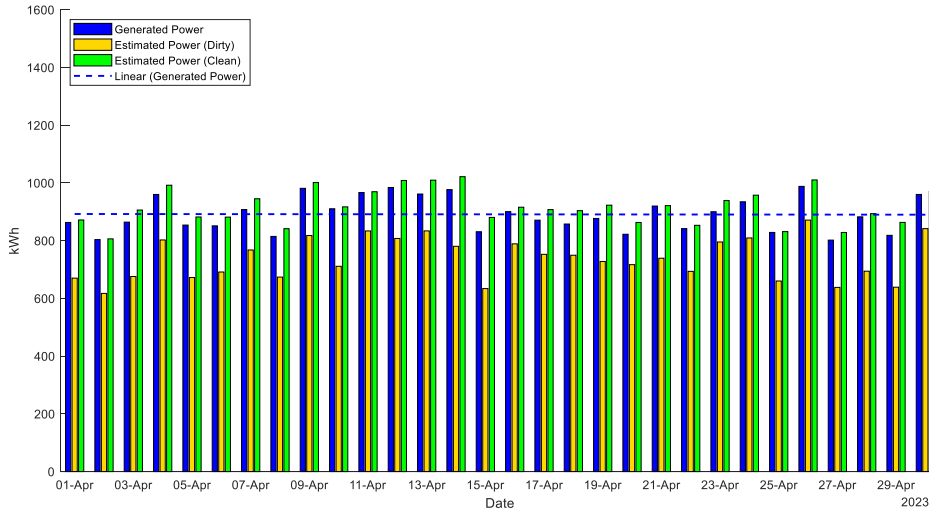


Fig. 32. Generación de energía del mes de Abril.

Fuente: Propia

La Figura 33, presenta los datos de generación de energía en Mayo. Al igual que en abril, la energía generada real se acerca más a la estimada con paneles limpios. La línea de tendencia de la energía generada muestra un ligero descenso, pero menos pronunciado que en los meses de invierno, sugiriendo condiciones más favorables para la generación de energía debido a menores niveles de polvo.

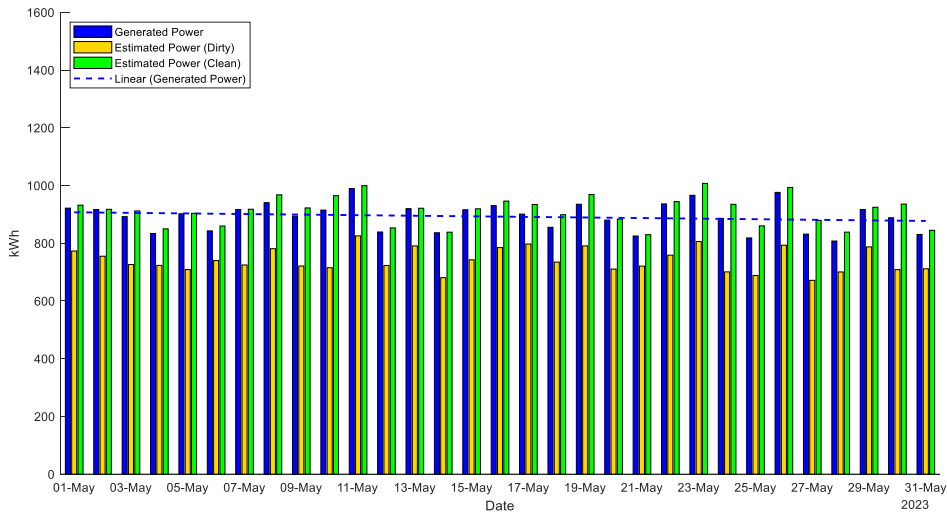


Fig. 33. Generación de energía del mes de Mayo.

Fuente: Propia

En la Figura 34, la generación de energía en Junio sigue la tendencia observada en los meses anteriores, con la energía generada real siendo inferior a la estimada para paneles limpios. La diferencia, aunque presente, es menos pronunciada que en los primeros meses del año, lo que puede indicar una menor acumulación de polvo durante este periodo.

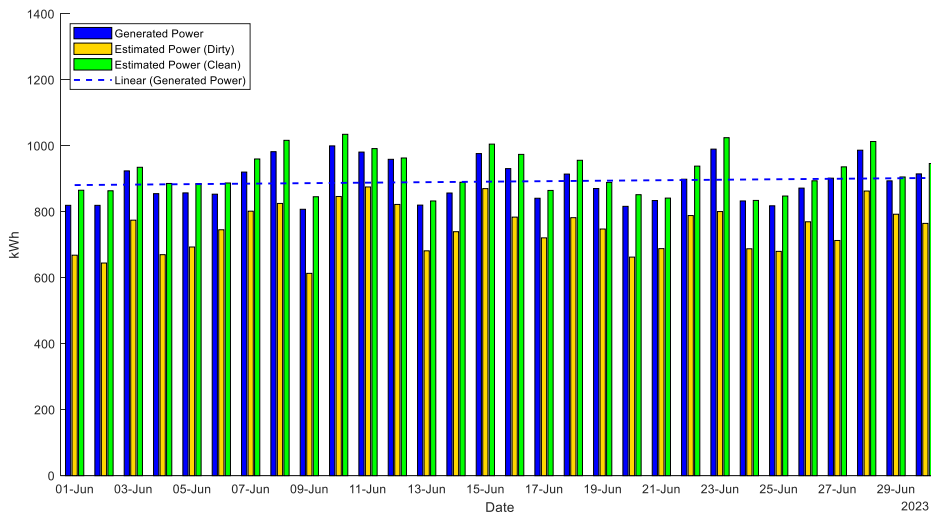


Fig. 34. Generación de energía del mes de Junio.

Fuente: Propia

La Figura 35, muestra la generación de energía en Julio. Este mes presenta una mayor discrepancia entre la energía generada real y la estimada con paneles limpios,

sugiriendo una acumulación significativa de polvo. La línea de tendencia de la energía generada muestra una declinación, resaltando la necesidad de limpieza regular para mantener la eficiencia de los módulos.

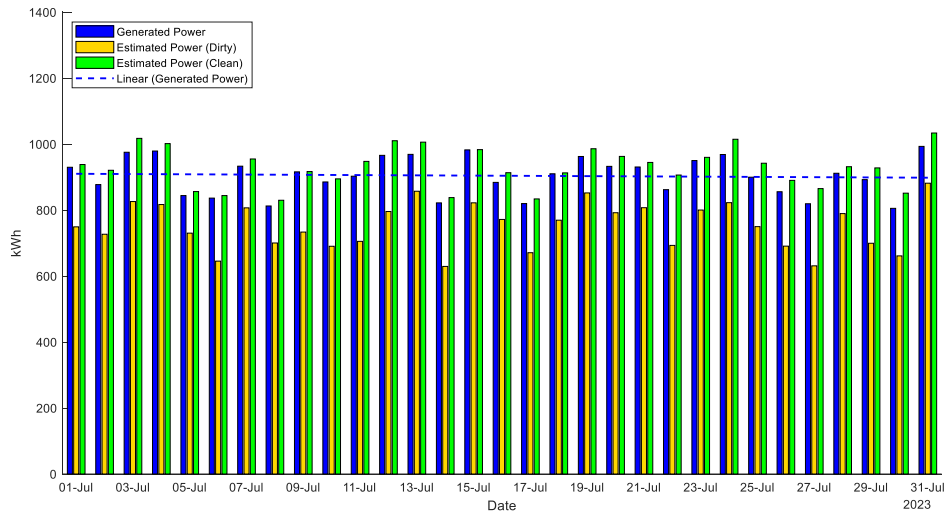


Fig. 35. Generación de energía del mes de Julio.

Fuente: Propia

La Figura 36, analiza la generación de energía en Agosto. Similar a julio, la diferencia entre la energía generada real y la estimada con paneles limpios es notable. La acumulación de polvo durante el mes de verano parece ser significativa, afectando negativamente la generación de energía. La línea de tendencia también muestra una ligera declinación.

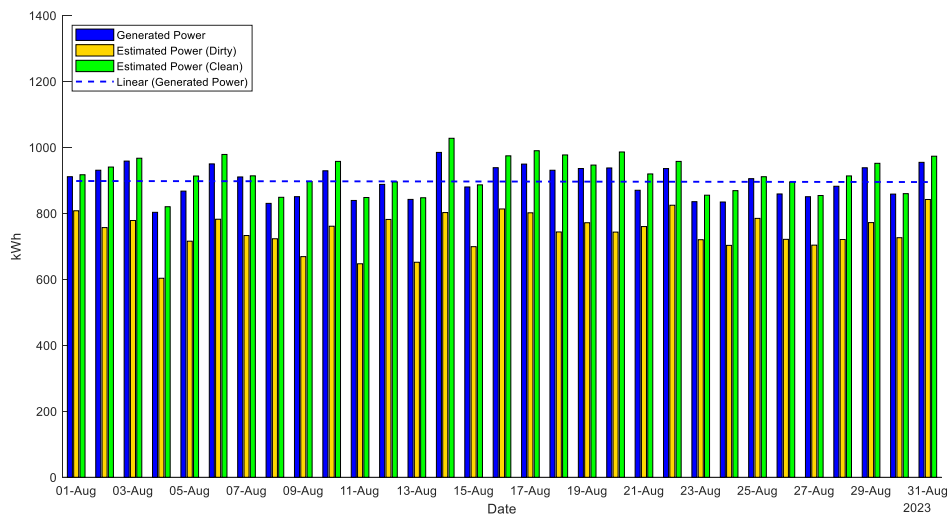


Fig. 36. Generación de energía del mes de Agosto.

Fuente: Propia

En la Figura 37, los datos de septiembre muestran una disminución en la energía generada real en comparación con la energía estimada para paneles limpios. La diferencia es menos pronunciada que en Julio y Agosto, posiblemente debido a cambios en las condiciones climáticas que favorecen la limpieza natural de los paneles.

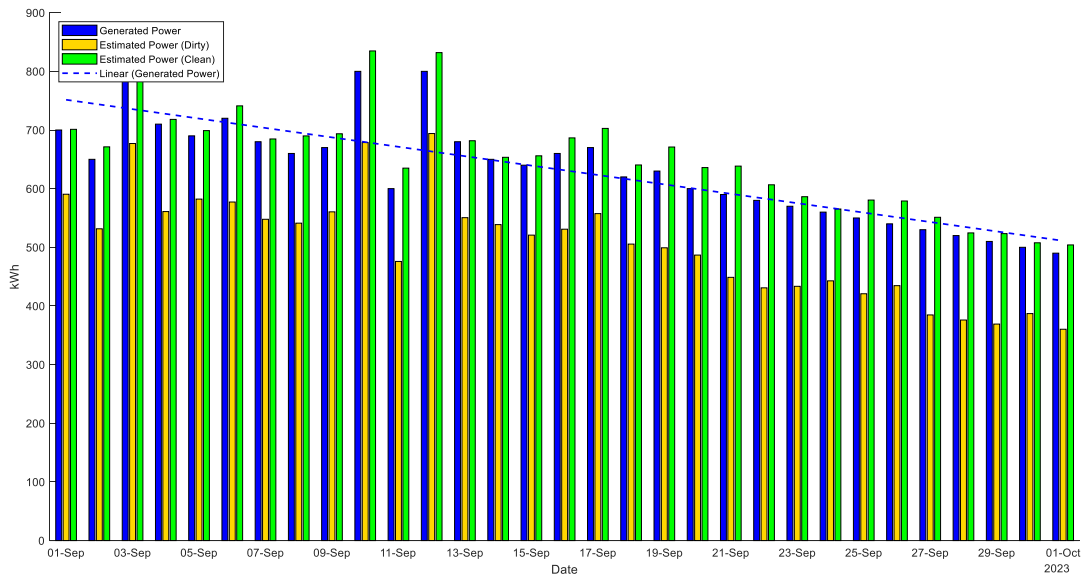


Fig. 37. Generación de energía del mes de Septiembre.

Fuente: Propia

La Figura 38, presenta la generación de energía en Octubre. La diferencia entre la energía generada real y la estimada con paneles limpios es evidente, aunque no tan pronunciada como en los meses de verano. La línea de tendencia de la energía generada sugiere una estabilización en los niveles de polvo acumulado

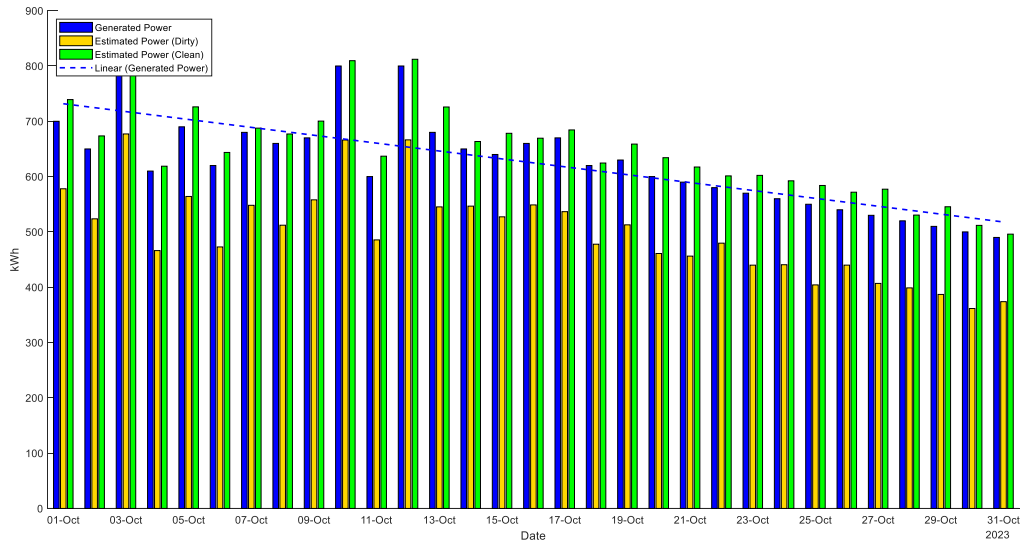


Fig. 38. Generación de energía del mes de Octubre.

Fuente: Propia

La Figura 39, muestra la generación de energía en Noviembre. Este mes presenta una menor diferencia entre la energía generada real y la estimada con paneles limpios, lo que indica una reducción en la acumulación de polvo. Las condiciones climáticas pueden haber contribuido a la limpieza de los paneles, mejorando la eficiencia del sistema.

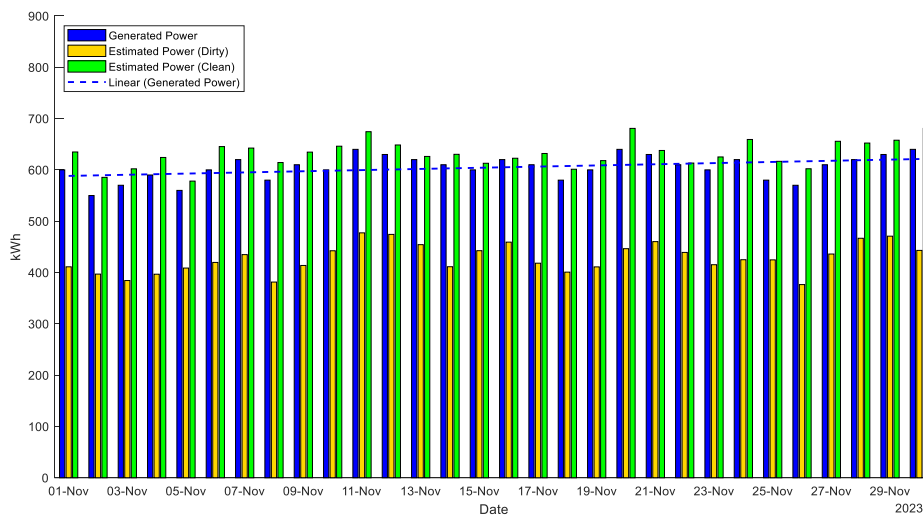


Fig. 39. Generación de energía del mes de Noviembre.

Fuente: Propia

Finalmente, la Figura 40, analiza la generación de energía en Diciembre. La diferencia entre la energía generada real y la estimada con paneles limpios es mínima, sugiriendo que las condiciones climáticas invernales favorecieron la limpieza natural de los paneles. La línea de tendencia muestra una declinación moderada, indicando una menor acumulación de polvo en comparación con los meses de verano.

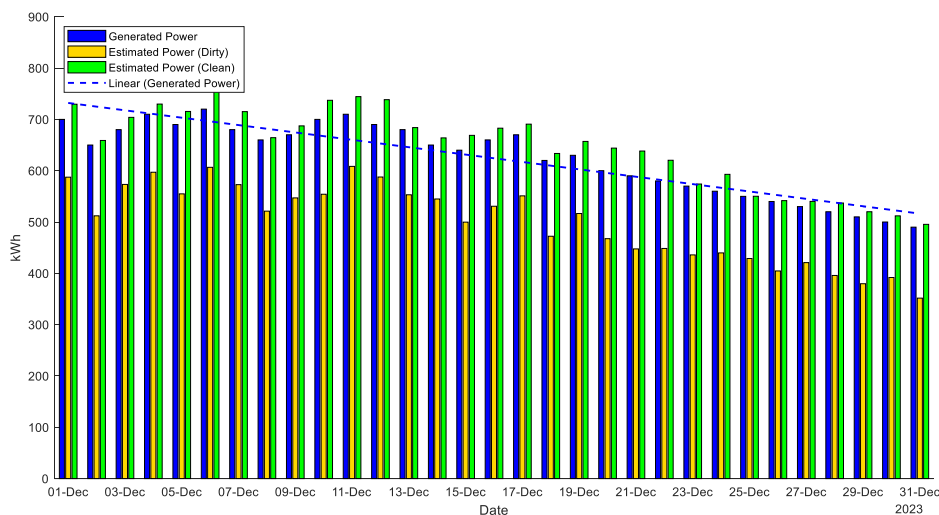


Fig. 40. Generación de energía del mes de Diciembre.

Fuente: Propia

El análisis de las figuras de la 29 a la 40 revela que la acumulación de polvo es un factor crítico que afecta la eficiencia de los módulos fotovoltaicos a lo largo del año. Los meses de verano presentan mayores diferencias entre la energía generada real y la estimada para paneles limpios, subrayando la necesidad de un programa de limpieza regular durante estos periodos. Los meses con mayores precipitaciones muestran una menor acumulación de polvo, lo que favorece la generación de energía. Estas observaciones son esenciales para la planificación de estrategias de mantenimiento y la optimización del rendimiento del sistema fotovoltaico en Caymatán-Molleturo.

4.3. Distribución de la iluminación interna:

El software Dialux proporcionó una evaluación detallada de la distribución de la luz en la vivienda, mostrando cómo los cuatro paneles solares actuales soportan las necesidades de iluminación. Los resultados indicaron que, con un mantenimiento adecuado, el sistema de iluminación es suficiente para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes en la figura 41 se observa una malla de puntos de medición distribuidos por toda la superficie de la vivienda específicamente en la planta baja de la

vivienda, cada uno marcado con un valor numérico que representa la iluminancia en lux (lx). Estos valores indican la cantidad de luz que llega a cada área, proporcionando una visión detallada de la distribución de la luz. La vivienda está dividida en varias zonas de análisis, incluyendo áreas de trabajo, descanso y comunes, facilitando la identificación de áreas que puedan necesitar ajustes en la iluminación. Los valores más altos de iluminancia se encuentran cerca de las fuentes de luz, mientras que los valores más bajos están en áreas más alejadas, lo que es crucial para entender si hay suficientes niveles de iluminación para actividades diarias. Las isolíneas conectan puntos con el mismo nivel de iluminancia, visualizando zonas con niveles homogéneos de iluminación. El análisis revela que, aunque hay áreas bien iluminadas, existen zonas con iluminación insuficiente, indicando la necesidad de fuentes de luz adicionales o ajustes en la posición de las actuales. La dependencia del sistema fotovoltaico subraya la necesidad de mantener los paneles solares en condiciones óptimas para asegurar una generación de energía constante y suficiente. En conclusión, el análisis con Dialux muestra que la vivienda tiene un sistema de iluminación adecuado en algunas áreas, pero insuficiente en otras, resaltando la importancia de ajustar la distribución de las fuentes de luz para mejorar la iluminación general y asegurar que todas las áreas de la vivienda reciban la cantidad adecuada de luz, mejorando así la calidad de vida de los habitantes.

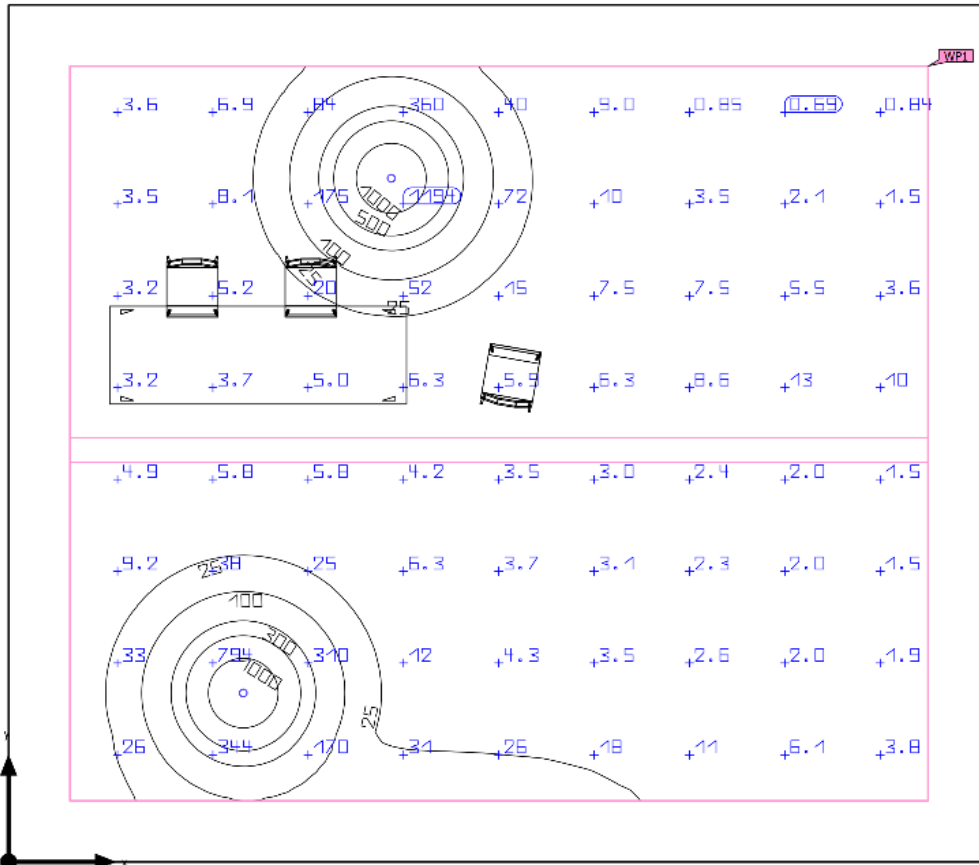


Fig. 41. Distribución de las fuentes de luz.

Fuente: Propia

La correlación entre el análisis de Dialux y los resultados de las simulaciones en MATLAB resaltó la importancia del mantenimiento regular para asegurar un suministro de energía constante y fiable. La eficiencia de la iluminación depende directamente del rendimiento de los paneles solares, que a su vez es afectado por la acumulación de polvo y la presencia de puntos calientes en la figura 42 los valores de iluminancia de la segunda planta varían significativamente, con áreas cercanas a las fuentes de luz mostrando valores altos y áreas más alejadas presentando valores bajos, indicando una distribución desigual que podría necesitar ajustes para asegurar una iluminación adecuada en toda la vivienda. Las isólinas que conectan puntos con el mismo nivel de iluminancia ayudan a visualizar áreas con niveles homogéneos de iluminación y facilitan la identificación de zonas que podrían requerir más o menos luz. Las áreas con valores de iluminancia altos indican zonas bien iluminadas, adecuadas para actividades que requieren buena visibilidad, mientras que las áreas con valores bajos sugieren la

necesidad de fuentes de luz adicionales o ajustes en la posición de las existentes para mejorar la visibilidad y la seguridad.

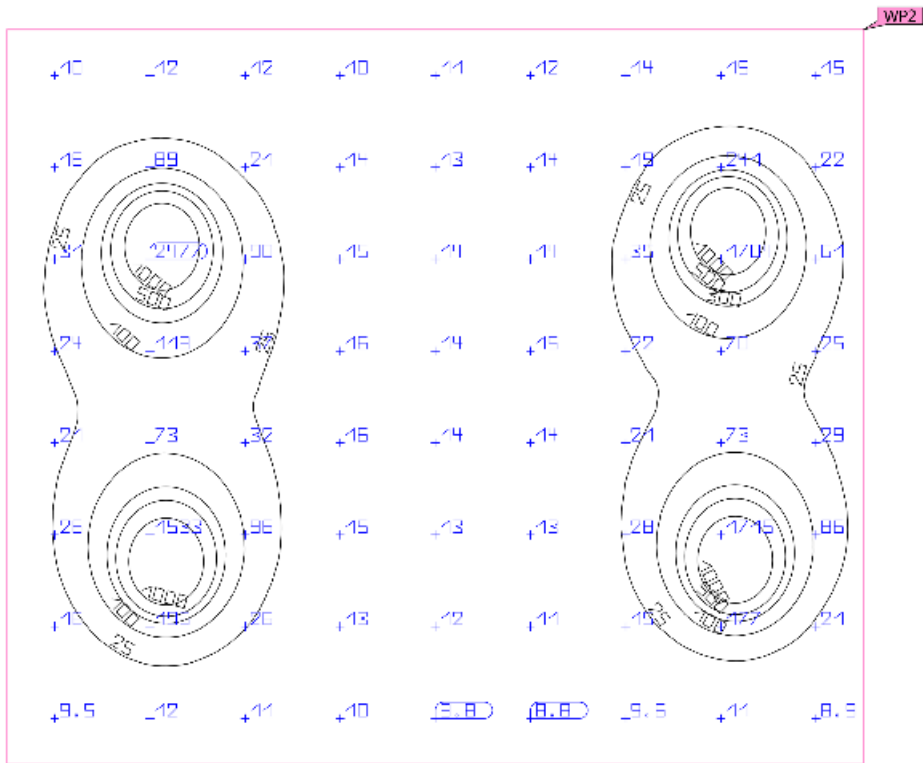


Fig. 42. Distribución de la fuente de luz segunda planta.

Fuente: Propia.

CONCLUSIONES

El análisis integral del sistema fotovoltaico y de iluminación en Caymatán-Molleturo ha revelado varias conclusiones importantes. Primero, las imágenes termográficas y las simulaciones en MATLAB demostraron que la acumulación de polvo reduce significativamente la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, con puntos calientes indicando una disminución en la capacidad de generación de energía. Además, los módulos instalados con ángulos de inclinación de 30° o más presentaron menos acumulación de polvo y mejor rendimiento. Las simulaciones también indicaron que la densidad de polvo tiene una correlación directa con las pérdidas energéticas y económicas anuales, subrayando la importancia de estrategias de mantenimiento regular. El análisis con Dialux mostró que el sistema de iluminación actual es adecuado para satisfacer las necesidades básicas de la vivienda, pero su eficiencia depende del rendimiento del sistema fotovoltaico. Los modelos matemáticos validados en MATLAB demostraron ser herramientas precisas para prever el impacto de la densidad de polvo en el rendimiento de los módulos, permitiendo una planificación eficiente del mantenimiento. La alta correlación entre los datos experimentales y los modelos de ajuste confirma la precisión y fiabilidad de estos modelos para predecir pérdidas energéticas y económicas. Además, la termografía y las simulaciones mostraron que el mantenimiento regular es crucial para prevenir la formación de puntos calientes y asegurar un rendimiento óptimo. Por último, la integración de simulaciones, termografía y análisis de iluminación subraya la importancia de un enfoque holístico para gestionar sistemas fotovoltaicos en áreas rurales, asegurando su sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo podemos establecerlos en los siguientes puntos:

Impacto del Polvo en la Eficiencia de los Módulos:

Las imágenes termográficas y las simulaciones en MATLAB demostraron que la acumulación de polvo es un factor crítico que reduce significativamente la eficiencia de los módulos fotovoltaicos. Las áreas con alta densidad de polvo mostraron mayores puntos calientes, lo que indica una disminución en la capacidad de generación de energía.

Relación entre Ángulo de Inclinación y Rendimiento:

Si bien desde el punto de vista de la radiación solar a la cual está expuesta en la zona lo deseable es colocar los paneles a unos 15° respecto a la horizontal. Por otra parte, la inclinación de los módulos solares juega un papel vital en la autolimpieza y la eficiencia general del sistema en sitios con alta vegetación a su alrededor. Para este caso en particular, los módulos instalados con un ángulo de inclinación de 30° o más presentaron

menos acumulación de polvo y menores puntos calientes, resultando en un mejor rendimiento y mayor durabilidad de los paneles.

Pérdidas Energéticas y Económicas:

Las simulaciones revelaron que la densidad de polvo tiene una correlación directa con las pérdidas energéticas y económicas anuales. La acumulación de polvo no solo disminuye la eficiencia del sistema, sino que también resulta en pérdidas económicas significativas debido a la reducción de la energía generada y la necesidad de mantenimiento más frecuente.

Importancia del Mantenimiento Regular:

La implementación de programas de limpieza regular es esencial para mantener la eficiencia de los módulos fotovoltaicos. Las imágenes termográficas y los modelos matemáticos subrayaron la importancia de este mantenimiento para prevenir la formación de puntos calientes y asegurar un rendimiento óptimo.

Evaluación del Sistema de Iluminación:

El análisis con Dialux mostró que el sistema de iluminación actual es suficiente para satisfacer las necesidades básicas de la vivienda, pero su eficiencia depende directamente de la capacidad del sistema fotovoltaico para generar y almacenar suficiente energía. La efectividad de la iluminación puede verse comprometida por la disminución del rendimiento de los paneles debido a la acumulación de polvo.

Validación de Modelos Matemáticos:

La alta correlación entre los datos experimentales y los modelos de ajuste validados en MATLAB demuestra que estos modelos son herramientas precisas y confiables para prever el impacto de la densidad de polvo en el rendimiento de los módulos. Esto permite una planificación y gestión más eficiente del mantenimiento y optimización del sistema fotovoltaico.

Sostenibilidad y Rentabilidad:

La integración de simulaciones, termografía y análisis de iluminación subraya la importancia de un enfoque holístico para gestionar sistemas fotovoltaicos en áreas rurales. Mantener los módulos solares en condiciones óptimas no solo asegura una eficiencia energética, sino que también mejora la sostenibilidad y rentabilidad del sistema a largo plazo.

Importancia de la Monitoreo Continuo:

Utilizar herramientas de monitoreo como la termografía permite identificar y corregir problemas de manera proactiva, antes de que se conviertan en fallos significativos. Este enfoque preventivo es crucial para maximizar la vida útil y el rendimiento de los módulos fotovoltaicos.

Las gráficas mensuales de generación de energía muestran una clara correlación entre la acumulación de polvo en los paneles solares y la disminución en la eficiencia de generación de energía. Durante los meses secos, la energía generada es significativamente menor en comparación con la energía estimada para paneles limpios, subrayando la importancia de implementar un programa regular de limpieza. Las figuras de enero a diciembre ilustran consistentemente esta tendencia, evidenciando que el mantenimiento preventivo es esencial para maximizar la eficiencia del sistema fotovoltaico. La variación estacional también juega un papel importante, con la llegada de las lluvias en los meses de septiembre y octubre proporcionando una limpieza natural de los paneles y, por ende, una mejora en la generación de energía.

El uso de sistemas solares fotovoltaicos presenta una serie de beneficios significativos, especialmente en áreas rurales aisladas, como el caso de estudio de Caymatán-Molleturo. En primer lugar, estos sistemas proporcionan una fuente de energía renovable y sostenible, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto contribuye de manera importante a la mitigación del cambio climático y a la protección del medio ambiente. Además, la energía solar fotovoltaica es una solución económicamente viable a largo plazo, ya que, aunque la inversión inicial puede ser considerable, los costos operativos son mínimos y los sistemas tienen una vida útil prolongada, generando ahorros significativos en comparación con las fuentes de energía tradicionales. La implementación de sistemas fotovoltaicos también promueve la autonomía energética de las comunidades rurales, permitiendo un suministro constante y fiable de electricidad, incluso en regiones sin acceso a la red eléctrica. Esto mejora la calidad de vida de los habitantes al facilitar el acceso a iluminación, refrigeración, comunicación y otros servicios esenciales. Asimismo, el uso de energía solar fomenta el desarrollo local y la creación de empleo, ya que se requieren técnicos y profesionales capacitados para la instalación, mantenimiento y operación de los sistemas. En términos de resiliencia, los sistemas fotovoltaicos pueden diseñarse para ser resistentes a condiciones climáticas adversas, asegurando un suministro ininterrumpido de energía en situaciones de emergencia.

RECOMENDACIONES

Para asegurar el rendimiento óptimo y la sostenibilidad del sistema fotovoltaico en Caymatán-Molleturo, se recomienda implementar las siguientes acciones:

- Establecer un calendario de limpieza regular para minimizar la acumulación de polvo en los módulos fotovoltaicos, lo que ayudará a mantener su eficiencia y a reducir la formación de puntos calientes. Optimizar el ángulo de inclinación de los módulos solares a 30° o más para facilitar la autolimpieza y minimizar la acumulación de polvo y hojas de plantas circundantes.
- Realizar inspecciones termográficas periódicas para identificar y corregir anomalías térmicas en los módulos antes de que causen daños significativos.
- Utilizar modelos matemáticos validados para prever pérdidas energéticas y económicas, y ajustar las estrategias de mantenimiento en consecuencia.
- Implementar un enfoque de mantenimiento proactivo que combine limpiezas regulares, inspecciones termográficas y ajustes de inclinación para maximizar la eficiencia y durabilidad de los módulos fotovoltaicos.
- Capacitar al personal encargado del mantenimiento en el uso de herramientas de monitoreo como la termografía y en la aplicación de mejores prácticas para la limpieza y el mantenimiento de los módulos solares.
- Considerar la expansión del sistema fotovoltaico para aumentar la capacidad de generación de energía, en el caso de aumentar la demanda de energía en la vivienda, asegurando que la continuidad de los servicios de iluminación y tomacorrientes.
- Establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar el rendimiento de los módulos y la efectividad de las estrategias de mantenimiento implementadas, ajustando las prácticas según sea necesario para optimizar el rendimiento del sistema. Estas recomendaciones asegurarán que el sistema fotovoltaico en Caymatán-Molleturo opere de manera eficiente y sostenible, proporcionando un suministro energético confiable y mejorando la calidad de vida de sus habitantes que lo podemos resumir en lo siguiente:

Implementar Programas de Limpieza Regular:

Establecer un calendario de limpieza regular para los módulos fotovoltaicos para minimizar la acumulación de polvo y suciedad. Esto puede incluir limpiezas manuales o la instalación de sistemas de autolimpieza.

Optimizar el Ángulo de Inclinación:

Instalar los módulos solares con un ángulo de inclinación de 30° o más para facilitar la autolimpieza y reducir la acumulación de polvo. Este ajuste puede mejorar significativamente la eficiencia y el rendimiento del sistema. A pesar que se sacrifique la radiación solar directa colocando a 30° y no a 15° resulta adecuado colocarla a 30° en este caso puntual por la alta vegetación y polvo que puede acumularse sobre el panel. Con la mayor inclinación se a verificado experimentalmente de las partículas y pedazos de vegetación tienden a resbalar del panel por gravedad considerando más adecuado ya que no siempre existe personal para efectuar la limpieza y sobre todo quienes viven son personas de la tercera edad que pueden estar sujetos a accidentes.

Utilizar Termografía Periódica:

Realizar inspecciones termográficas periódicas para identificar puntos calientes y otras anomalías térmicas en los módulos. Esto permitirá una intervención temprana y la corrección de problemas antes de que afecten gravemente el rendimiento.

Adoptar Modelos Matemáticos para la Planificación:

Utilizar modelos matemáticos validados para prever pérdidas energéticas y económicas, y ajustar las estrategias de mantenimiento en consecuencia. Estos modelos pueden ser una herramienta valiosa para la gestión eficiente del sistema.

Desarrollar Estrategias de Mantenimiento Proactivo:

Implementar un enfoque de mantenimiento proactivo que combine limpiezas regulares, inspecciones termográficas y ajustes de inclinación para asegurar el máximo rendimiento y durabilidad de los módulos fotovoltaicos.

Mejorar la Capacitación del Personal:

Capacitar al personal encargado del mantenimiento en el uso de herramientas de monitoreo como la termografía y en la aplicación de mejores prácticas para la limpieza y el mantenimiento de los módulos solares.

Planificar la Expansión del Sistema:

Considerar la expansión del sistema fotovoltaico para aumentar la capacidad de generación de energía, asegurando que la demanda de iluminación y otros servicios eléctricos en la vivienda sea satisfecha de manera sostenible.

Monitorear y Evaluar Continuamente:

Establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar el rendimiento de los módulos y la efectividad de las estrategias de mantenimiento implementadas. Ajustar las prácticas según sea necesario para optimizar el rendimiento del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- Shrestha, R., & Shrestha, P. (2020). "Technical analysis and socio-economic impacts of solar photovoltaic system on rural livelihood: A case study from Nepal." *Renewable Energy*, 146, 1561-1572.
- Zhang, Y., et al. (2019). "Technical and economic analysis of rural household solar photovoltaic systems in Tibet, China." *Energy Procedia*, 158, 3813-3818.
- Patel, P., et al. (2018). "Review of the technical, economic and environmental aspects of the installation of solar photovoltaic systems in rural areas." *Journal of Renewable Energy*, 125, 154-166.
- Raut, K. B., et al. (2017). "A review on feasibility of solar photovoltaic systems for rural electrification in Nepal." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 915-926.
- Osei-Agyeman, M., et al. (2016). "Technical and economic analysis of stand-alone solar photovoltaic system for rural electrification: A case study." *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 71-83.
- Raza, M. H., et al. (2015). "Economic and technical analysis of hybrid renewable energy system for a rural residential building." *Renewable Energy*, 78, 530-540.
- Siddiqui, M. U., et al. (2014). "Socio-economic and technical viability of solar photovoltaic systems in rural areas of Pakistan." *Journal of Cleaner Production*, 66, 537-543.
- Bhattarai, B., et al. (2013). "Solar photovoltaic systems in Nepal: Technical and socio-economic impacts." *Renewable Energy*, 57, 395-402.
- Paudel, S., et al. (2012). "Technical and socio-economic analysis of solar home systems in Nepal." *Renewable Energy*, 39(1), 107-112.
- Bhowmik, H., et al. (2011). "Technical and economic analysis of stand-alone solar photovoltaic electrification systems: A study for South Asia." *Energy Policy*, 39(5), 2628-2639.
- Kim, S., et al. (2020). "Technical and economic analysis of off-grid solar PV systems for rural electrification in developing countries: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109672.
- Ahmed, S., et al. (2019). "Assessment of potential solar energy and its economic viability in Bangladesh: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 398-415.
- Bhattarai, B., et al. (2018). "A review on photovoltaic based DC micro-grid system for rural electrification." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1796-1806.
- Mondal, M. A. H., et al. (2017). "A review on the impact of rural electrification with solar PV system in developing countries." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 599-613.

- Alam, M. M., et al. (2016). "Review of solar PV water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 122-132.
- Bajracharya, T. R., et al. (2015). "Review on solar PV, wind and hybrid energy systems for irrigation and electricity in developing countries." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 623-648.
- Subiyanto, A. A., et al. (2014). "A review on technical and economic aspects of standalone photovoltaic system for rural electrification." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 508-517.
- Gebremedhin, A., et al. (2013). "Technical and economic performance analysis of a stand-alone photovoltaic electrification system: A case study of Asaita, Afar, Ethiopia." *Renewable Energy*, 57, 543-552.
- Aziz, S. A., et al. (2012). "Renewable energy in Malaysia: Strategies and development." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3866-3875.
- Negash, G. G., et al. (2011). "A review of solar energy: Markets, economics and policies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2310-2321.
- Tekle et al. (2016). "Assessment of the economic viability of solar home systems in rural areas of developing countries: A case study of Ethiopia." *Renewable Energy*, 2016.
- Pournaras et al. (2017). "Economic analysis of off-grid photovoltaic systems: A case study for remote villages in Greece and Turkey." *Renewable Energy*, 2017.
- Dornoff et al. (2018). "Feasibility study of a solar home system project in rural Ghana." *Energy for Sustainable Development*, 2018.
- Garcia et al. (2019). "Analysis of solar energy potential in rural areas: A case study in Mexico." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.
- Khan et al. (2020). "Assessment of the techno-economic potential of grid-connected photovoltaic systems in rural areas of Pakistan." *Energy Policy*, 2020.
- González, J. A., et al. (2018). "Análisis de la viabilidad técnica y económica de la generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos en zonas rurales de Colombia." *Energética*, , 2018.
- Silva, J. D. F., et al. (2019). "Evaluación técnico-económica del uso de sistemas fotovoltaicos para electrificación rural en Brasil: un enfoque basado en el análisis del ciclo de vida." *Energía Solar*, , 2019.
- López, M. G., et al. (2017). "Impacto de la electrificación rural con sistemas fotovoltaicos en el desarrollo socioeconómico de comunidades agrícolas en México." *Energías Renovables*, , 2017.
- Torres, E. R., et al. (2020). "Análisis de la viabilidad de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en zonas montañosas de Perú." *Energía Limpia*, 2020.
- Gómez, L. A., et al. (2018). "Estudio de caso: Implementación de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en áreas aisladas de Argentina." *Energía Sostenible*, , 2018.

- Pérez, M., et al. (2019). "Viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales de la provincia de Azuay, Ecuador." *Energía Renovable*, 2019.
- Gutiérrez, F., et al. (2018). "Análisis del potencial de energía solar fotovoltaica en zonas rurales de la Sierra Ecuatoriana." *Energética*, 2018.
- Sánchez, J., et al. (2020). "Impacto socioeconómico de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en comunidades rurales de la provincia de Loja, Ecuador." *Desarrollo Sostenible*, 2020.
- Rodríguez, E., et al. (2017). "Evaluación de la eficiencia y rentabilidad de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en la región amazónica de Ecuador." *Energía Sostenible*, , 2017.
- Vélez, P., et al. (2019). "Análisis de la percepción y aceptación de la tecnología solar fotovoltaica en comunidades rurales de la provincia de Manabí, Ecuador." *Energía y Desarrollo*, , 2019.
- Pérez, M., et al. (2019). "Viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas rurales de la provincia de Azuay, Ecuador." *Energía Renovable*, , 2019.
- Gutiérrez, F., et al. (2018). "Análisis del potencial de energía solar fotovoltaica en zonas rurales de la Sierra Ecuatoriana." *Energética*, 2018.
- Sánchez, J., et al. (2020). "Impacto socioeconómico de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en comunidades rurales de la provincia de Loja, Ecuador." *Desarrollo Sostenible*, 2020.
- Rodríguez, E., et al. (2017). "Evaluación de la eficiencia y rentabilidad de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en la región amazónica de Ecuador." *Energía Sostenible*, 2017.
- Vélez, P., et al. (2019). "Análisis de la percepción y aceptación de la tecnología solar fotovoltaica en comunidades rurales de la provincia de Manabí, Ecuador." *Energía y Desarrollo*, , 2019.
- García, A., et al. (2020). "Evaluación técnica y económica de sistemas fotovoltaicos para la electrificación rural en la provincia de Azuay, Ecuador." *Energía Renovable*, 2020.
- Martínez, L., et al. (2018). "Impacto socioeconómico de la electrificación rural mediante sistemas fotovoltaicos en la región amazónica de Ecuador." *Energías Sostenibles*, 2018.
- Gómez, E., et al. (2019). "Análisis de la eficiencia y sostenibilidad de sistemas solares fotovoltaicos en la provincia de Manabí, Ecuador." *Energía Sostenible*,2019.
- Torres, R., et al. (2017). "Perspectivas de la energía solar fotovoltaica como fuente de electrificación rural en la Sierra Ecuatoriana." *Energética*, , 2017.
- Hernández, J., et al. (2020). "Viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en viviendas aisladas de la provincia de Loja, Ecuador." *Energía Sostenible*,2020.

- Díaz, M., et al. (2018). "Análisis de la percepción y aceptación de la tecnología solar fotovoltaica en áreas rurales de la provincia de Esmeraldas, Ecuador." *Energía Sostenible*, 2018.
- Sánchez, E., et al. (2019). "Evaluación del potencial de energía solar fotovoltaica para la electrificación rural en la región costera de Ecuador." *Energía Sostenible*, , 2019.
- Chávez, P., et al. (2016). "Impacto ambiental de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en áreas protegidas de la Sierra Ecuatoriana." *Energía Sostenible*, 2016.
- López, F., et al. (2017). "Análisis de la viabilidad técnica y económica de la energía solar fotovoltaica para la electrificación rural en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador." *Energía Sostenible*, 2017.
- Xie, J., Zhao, B., Zhang, H., Fu, Z., Yang, T., & Li, R. (2023). Experimental study on the effect of dust particle deposition on photovoltaic performance of urban buildings. *Renewable Energy*, 219, 119424. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119424>
- Younis, A., Rjafallah, A., Cotfas, P. A., & Cotfas, D. T. (2024). Dust impact on electrical and thermal photovoltaic performance: Insights from field and laboratory experiments. *Energy Reports*, 11, 2099–2110. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2024.01.065>

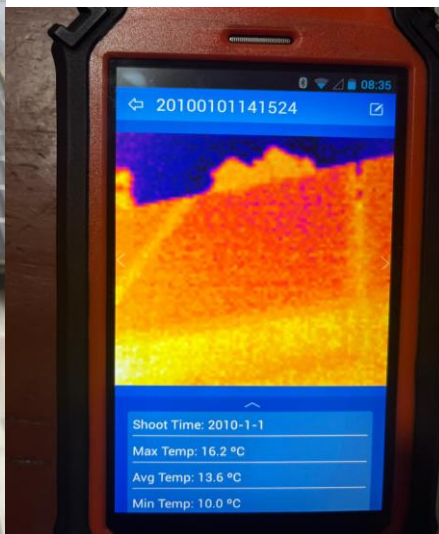
ANEXOS

ANEXO 1

VISITA Y RECOPIACIÓN DE DATOS EN LA VIVIENDA.

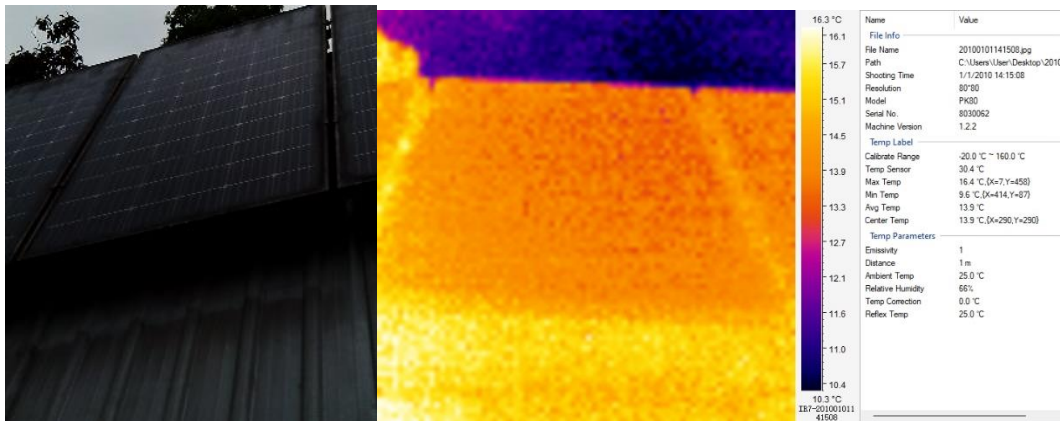
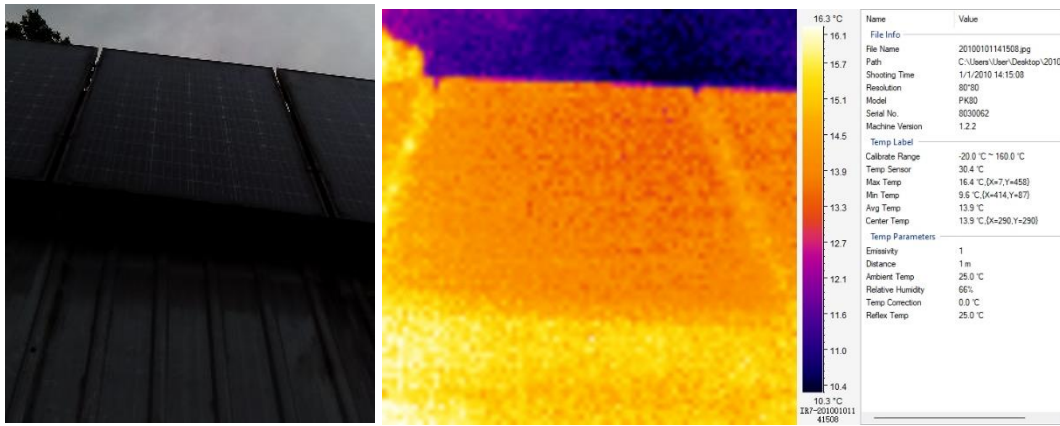
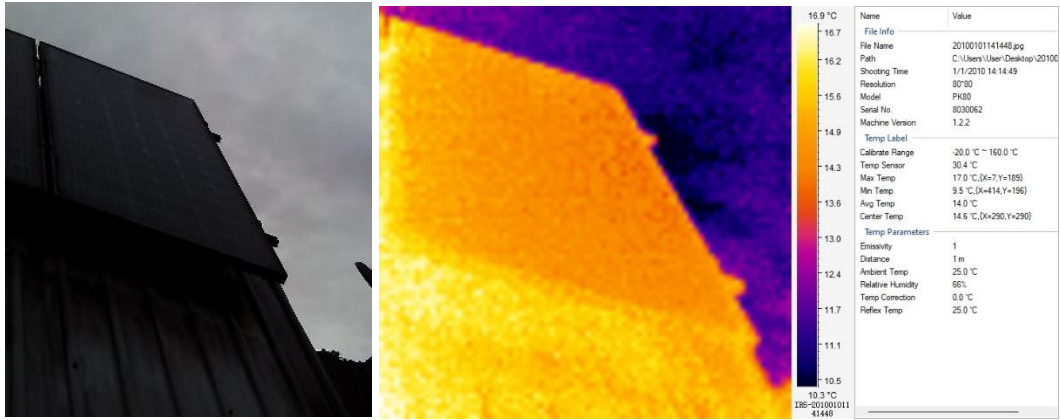


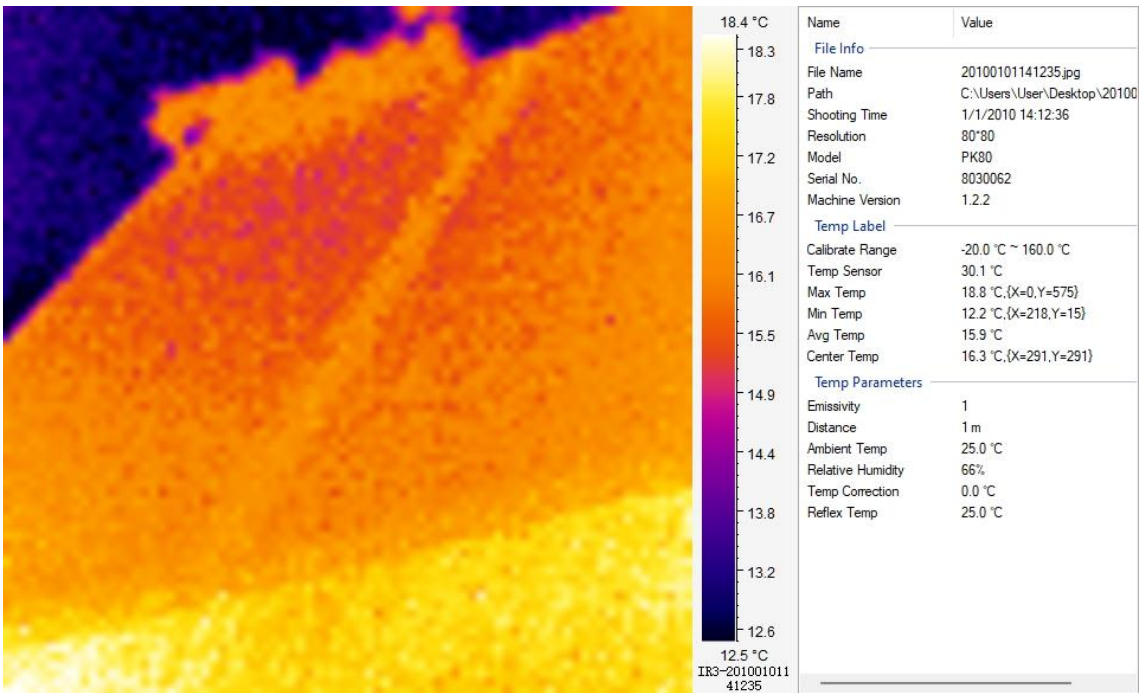
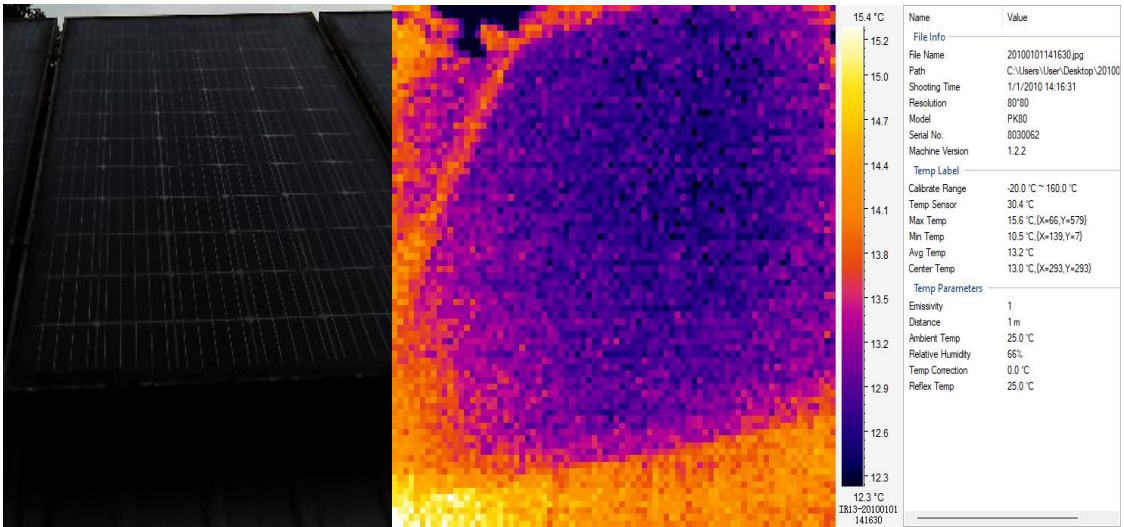
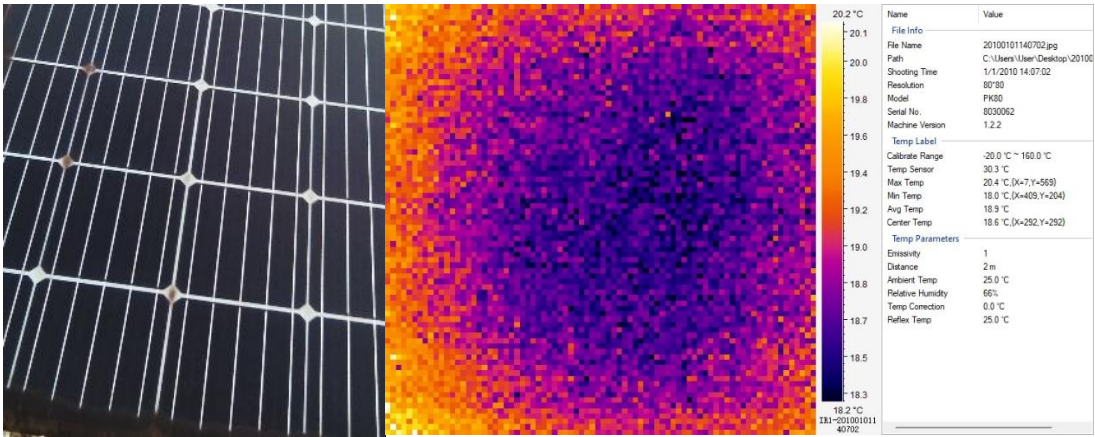


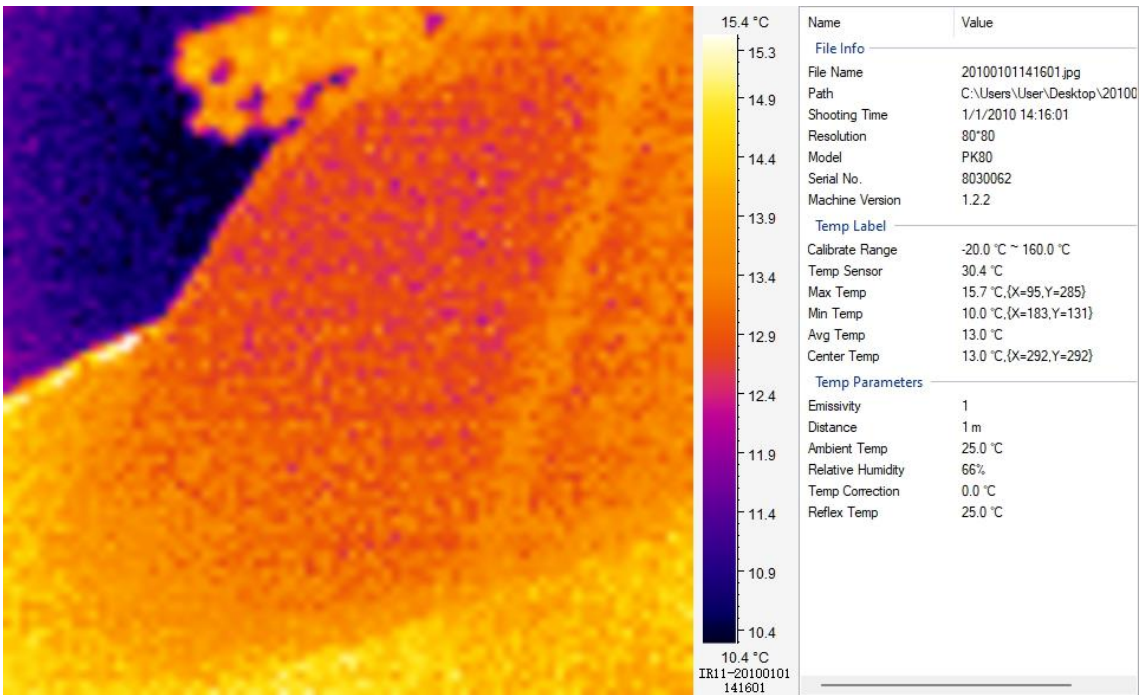
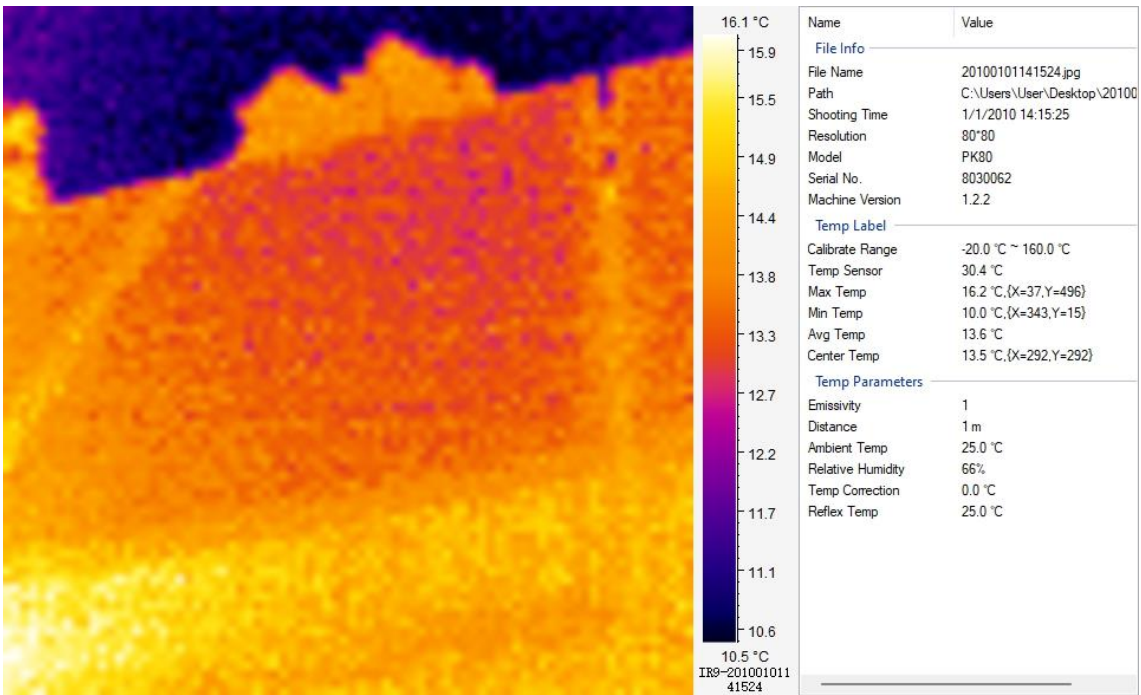


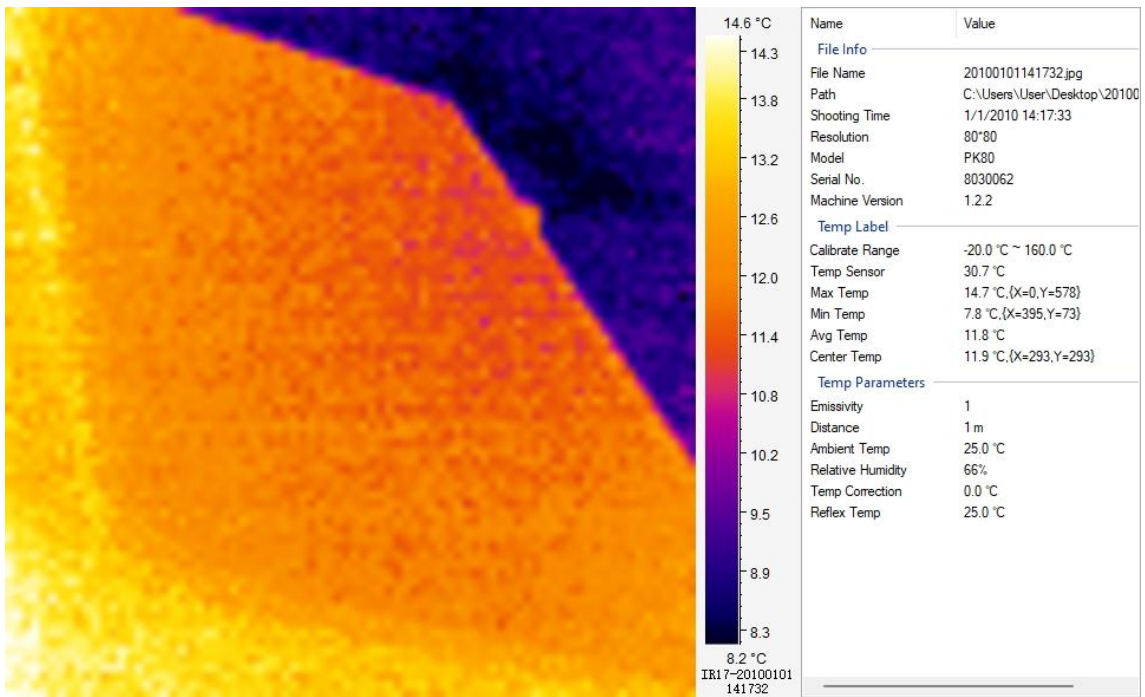
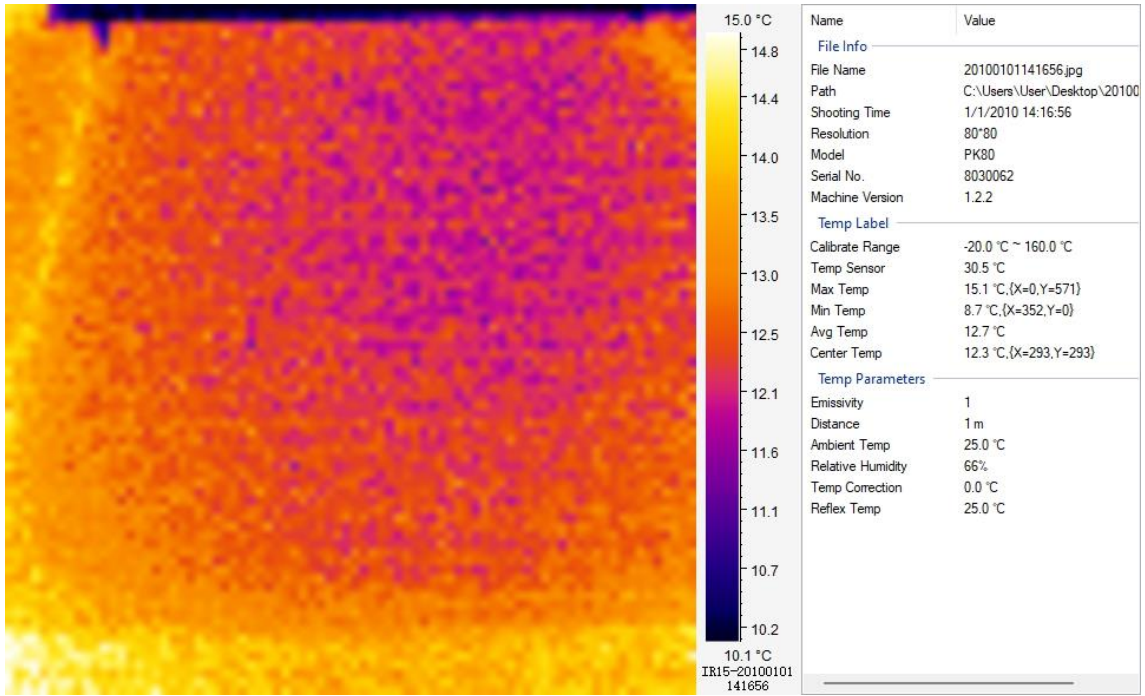
ANEXO 2..

TOMAS TERMOGRAFICAS CON SUS RESPECTIVAS LEYENDAS DEL CASO DE ESTUDIO









AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Christian Fabian Alvarez Garcia portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105952261. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis técnico y sus beneficios de emplear sistemas solares fotovoltaicos en una vivienda rural. Caso de estudio Caymatan-Molleturo” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 02 de agosto de 2024

F: 

Christian Fabian Alvarez Garcia

0105952261