

Tipo de Documento : **Guía Técnica**
Nombre del Documento : **Guía técnica para decomisionamiento, almacenamiento, manipulación, inspección y uso de módulos fotovoltaicos de 2da vida**
Fecha : 11 de abril de 2025
Autores : Dr. Edward Fuentealba Vidal, Dr. Jorge Rabanal-Arabach.
Coautores : Dr(c). Sebastián Rodríguez Romero, Dr(c) Valeria Escobar Méndez



| Nivel de diseminación | | |
|-----------------------|---|---|
| PU | Público | |
| PP | Restringido a los autores y a personal de CDEA | |
| RE | Restringido a un grupo específico de personas definido por coautores | |
| CO | Confidencial (únicamente a un grupo de personas definido por los autores) | X |

| Historia | | | |
|----------|---|---|------------|
| Versión | Autor | Modificación | Fecha |
| 1 | Edward Fuentealba V | Modificación de estructura y complemento información | 18/09/2024 |
| 2 | Jorge Rabanal A. / Valeria Escobar M. | Incorporación de contenido y complemento de información en área salud | 22/09/2024 |
| 3 | Sebastián Rodríguez | Incorporación de comentarios – 1ra Mesa técnica | 11/10/2024 |
| 4 | Sebastián Rodríguez | Incorporación de comentarios – 2ra Mesa técnica | 30/10/2024 |
| 5 | Edward Fuentealba | Revisión y complemento de información | 7/12/2024 |
| 6 | Edward Fuentealba / Sebastian Rodriguez | Revisión y complemento de información | 31/03/2025 |

| Aprobación | | |
|------------|--------|-----|
| Fecha | Nombre | V.B |
| | | |

Con el apoyo de



DECLARACION DE DERECHOS DE PROPIEDAD

Este documento contiene información, que es propiedad del CDEA. Este documento ni la información contenida en este documento se utilizarán, duplicarán ni comunicarán por ningún medio a un tercero, en su totalidad o en partes, excepto con el consentimiento previo por escrito del CDEA.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1.1 | PROPÓSITO DE LA GUÍA..... | 8 |
| 1.2 | ALCANCE DEL USO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA..... | 10 |
| 2.1 | BARRERAS REGULATORIO-FINANCIERAS..... | 13 |
| 2.1.1 | Regla I Inciso 3° | 13 |
| 2.1.2 | Exención de IVA a la Importación (19%)..... | 14 |
| 2.1.3 | Ley de hacienda sobre ordenanza de aduanas Artículo 181..... | 14 |
| 2.2 | PELIGROSIDAD DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO | 15 |
| 2.3 | ACOPIO Y TRAZABILIDAD DE LOS MFVS | 17 |
| 2.4 | PROTOCOLO DE DIAGNÓSTICO DE MFVS | 18 |
| 3.1 | REDUCCIÓN DE COSTOS | 19 |
| 3.2 | SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL..... | 21 |
| 3.3 | CONTRIBUCIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS..... | 22 |
| 3.4 | CERTIFICACIÓN DE COMPETENCIAS..... | 23 |
| 4.1 | EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y ESTADO DE LOS MÓDULOS..... | 25 |
| 4.2 | ANÁLISIS TÉCNICO DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA..... | 27 |
| 4.2.1 | Aspectos Clave del Análisis Técnico | 27 |
| 4.2.2 | Resultados Esperados del Análisis Técnico | 29 |
| 4.3 | COMPATIBILIDAD CON EL SISTEMA EXISTENTE | 29 |
| 5.1 | INSPECCIÓN VISUAL..... | 33 |
| 5.2 | AISLACIÓN ELÉCTRICA..... | 34 |
| 5.3 | CURVAS CORRIENTE-VOLTAJE..... | 34 |
| 5.4 | TERMOGRAFÍA INFRARROJA..... | 37 |
| 5.5 | ELECTROLUMINISCENCIAS..... | 38 |
| 6.1 | RETIRO DE MFV EN OPERACIÓN | 40 |
| 6.1.1 | Recomendaciones para la manipulación de MFV | 41 |
| 6.2 | ALMACENAJE DE MFV | 42 |
| 6.2.1 | Clasificación y almacenaje en base al tipo de falla | 43 |
| 6.3 | TRANSPORTE DE MFV | 49 |
| 6.3.1 | Pallet con las dimensiones correctas y en buen estado..... | 49 |
| 6.3.2 | Asegurar la pila de MFV | 50 |
| 6.4 | IMPLICANCIAS SOBRE LA SALUD HUMANA..... | 51 |
| 6.4.1 | Riesgos a la salud humana en el trabajo continuo con paneles fotovoltaicos | 52 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 6.4.2 | Liberación de sustancias potencialmente peligrosas en paneles fotovoltaicos:... | 53 |
| 7.1 | INSPECCIÓN VISUAL EN TERRENO | 57 |
| 7.2 | RECOMENDACIONES PARA MONTAJE | 60 |
| 7.2.1 | Protección de los conectores MC4 | 61 |
| 7.2.2 | Manejo de cables de los MFV..... | 62 |
| 7.2.3 | Conexión entre los MFV | 63 |
| 7.3 | USO DE MICROINVERSORES Y OPTIMIZADORES EN SFV | 64 |
| 7.3.1 | Ventajas | 65 |
| 7.3.2 | Desventajas..... | 66 |
| 7.4 | DISEÑO Y CONEXIONADO DEL CAMPO SOLAR | 67 |
| 7.5 | PROTECCIONES REQUERIDAS PARA LA SEGURIDAD DE LA INSTALACIÓN | 68 |
| 7.6 | OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO | 69 |
| 8.1 | INSPECCIÓN VISUAL DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO | 70 |
| 8.2 | LIMPIEZA Y CUIDADO ADECUADO | 72 |
| 8.3 | MONITOREO DEL RENDIMIENTO Y EFICIENCIA | 73 |
| 9.1 | DIRECTIVA SOBRE RESTRICCIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS | 77 |
| 9.2 | RIESGOS ASOCIADOS AL MANEJO DE MÓDULOS USADOS | 78 |
| 9.2.1 | Módulos sin rotura de vidrio (intactos): | 79 |
| 9.2.2 | Módulos con rotura de cubierta exterior:..... | 79 |
| 9.2.3 | Exposición total de las celdas solares..... | 82 |
| 9.3 | MEDIDAS DE PROTECCIÓN PERSONAL | 82 |
| 9.4 | CUMPLIMIENTO DE NORMATIVAS Y REGULACIONES | 85 |
| 10.1 | IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA A NIVEL INTERNACIONAL | 92 |
| 10.1.1 | Planta FV Cloverleaf (Heusden-Zolder, Bélgica)..... | 92 |
| 10.1.2 | Complejo de viviendas en Waasland (Sint-Niklaas, Bélgica) | 93 |
| 10.1.3 | Micro E-Mobility Charging Hubs (Berlín, Alemania) | 94 |
| 10.2 | IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA A NIVEL NACIONAL | 96 |
| 10.2.1 | Piloto BaPV en CDEA-UA..... | 96 |
| 10.2.2 | Piloto BaPV/TW en vivienda | 99 |
| 10.2.3 | Carport Solar | 101 |
| 10.2.4 | Riego Tecnificado en el Desierto | 103 |
| 10.3 | ADQUISICIÓN DE DATOS | 104 |

10.4 PLATAFORMA DE MONITOREO 106

DEFINICIONES CLAVE

| | |
|--|---|
| FV | : Fotovoltaico, según referencias internacionales se usa PV (Photovoltaic, por sus siglas en ingles) |
| Aplicación activa | : Aquella en la cual el módulo fotovoltaico produce energía eléctrica. |
| Aplicación pasiva | : Aquella en la cual no se necesita que el módulo fotovoltaico produzca electricidad, por lo que no es necesaria una conexión eléctrica. |
| Economía circular | : Modelo económico que busca reducir el desperdicio y maximizar el uso eficiente de los recursos, promoviendo la reutilización, el reciclaje y la renovación de productos y materiales. En lugar de ser desechados, los recursos se mantienen en circulación el mayor tiempo posible, minimizando así el impacto ambiental. |
| Módulos Fotovoltaicos (MFV) | : Equipo que permite la conversión de energía solar a energía eléctrica en corriente continua. Se pueden definir varias tecnologías, pero este documento se focalizará en módulos fotovoltaicos de silicio monofaciales y bifaciales. |
| Sistemas Fotovoltaicos (SFV): | : Sistema compuesto por MFVs, sistema de distribución en corriente continua, inversor, sistema de distribución corriente alterna, protecciones eléctricas y conexión a la red eléctrica |
| Sostenibilidad ambiental | : Enfoque que busca preservar los recursos naturales y proteger el medio ambiente para garantizar que las futuras generaciones puedan satisfacer sus necesidades. Esto implica el uso responsable de los recursos, la reducción de la contaminación y el fomento de prácticas que minimicen el impacto ecológico. Según la definición de la OCDE [1], se entiende por sostenibilidad el “desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas”. |
| Módulos fotovoltaicos de segunda vida | : Corresponden a módulos reutilizados tras haber completado su primera fase de operación. Aunque presentan una menor eficiencia, aún conservan la capacidad de generar energía. Pueden ser empleados en diversas aplicaciones donde las exigencias técnicas no sean tan altas, como en estructuras tipo <i>carport</i> para estacionamientos, instalaciones agrícolas u otros usos alternativos. |

| | |
|--|--|
| Decomisionamiento | : Proceso que contempla el retiro ordenado de la planta fotovoltaica del lugar de operación, incluyendo el desmontaje, almacenamiento temporal y transporte de los módulos fotovoltaicos (MFVs), así como de otros componentes, con el fin de darles una disposición final adecuada, ya sea mediante reutilización, reciclaje o eliminación conforme a la normativa ambiental vigente. |
| Absortividad | : Fracción de la radiación incidente que es absorbida, en determinado rango de frecuencias, para una temperatura dada. |
| Barra de Soporte / Support bars | : Barras de soporte de aluminio anodizado transversales para dar soporte a la estructura del MFV. Usualmente empleadas en MFV de gran área o en algunos que reemplazan el vidrio frontal por polímeros o usan vidrios de espesor inferior a 2 mm. |
| Cable / Cable | : Cable solar de conexión entre la caja de conexión (junction box) y el conector tipo MC4 que conecta eléctricamente los módulos. Su longitud estándar es de 1.2 m (uno para el terminal positivo y otro para el terminal negativo). Usualmente, el calibre es de 4 mm ² de espesor, pero depende de la corriente del MFV. |
| Caja de empalme / Junction Box | : Caja de conexiones ubicada en la parte posterior del módulo fotovoltaico, donde se interconectan los strings internos de celdas con los cables externos del módulo. En su interior se alojan los diodos bypass (generalmente tres), que protegen las celdas frente a sombreados parciales o fallas localizadas. Su nivel de protección suele ser IP67 o superior, garantizando resistencia al polvo y al agua. |
| Celda / Cell | : Sección unitaria de conversión de energía del MFV. Se clasifican según su área efectiva, por ejemplo: M0(156mmx156mm), M6(166mmx166mm) y M10(210mmx210mm). Un MFV está habitualmente compuesto de 60, 72, 144 o más celdas. |
| Conectores / Connectors | : Conector que se ubica en el extremo del cable para interconectar los MFV. Su nomenclatura estandarizada es MC4 o nombre de fantasía según fabricante. Definido para operar en 1000/1500 V, 30 A, IP68 y acorde a la sección cruzada del cable. |
| CC | : Corriente directa / continua, del inglés <i>Direct Current</i> |
| DUT | : Dispositivo bajo prueba, del inglés <i>Device Under Test</i> . |
| Emisividad | : Intensidad de la radiación emitida por un cuerpo, en determinado rango de frecuencias, para una temperatura dada. |

| | |
|----------------------------------|---|
| Marco / Frame | : Estructura metálica que rodea el MFV, generalmente fabricada en aluminio anodizado, cuya función principal es brindar protección mecánica y facilitar su instalación. Existen también módulos sin marco metálico (<i>frameless</i>), utilizados principalmente en tecnologías vidrio/vidrio, los cuales ofrecen ventajas estéticas y menor acumulación de suciedad, aunque requieren sistemas de montaje específicos. |
| Parte trasera / Backsheet | : Cara trasera del módulo fabricada usualmente apilando varios polímeros y revestimientos. En módulos monofaciales puede ser de color blanco. En módulos bifaciales puede ser un polímero transparente o un vidrio templado. |
| PID | : Degradación inducida por potencial eléctrico, del inglés <i>Potential Induced Degradation</i> . Corresponde a una degradación electroquímica de la celda solar causada por la polarización eléctrica a la que está sometida. Usualmente aparece en sistemas que operan a tensión eléctrica superior a 800 V. |
| Vidrio / Glass | : Vidrio templado que brinda estabilidad mecánica al MFV y protección a las celdas. Tiene usualmente un espesor de 2 a 4 mm. El vidrio puede incorporar o no capas antirreflejo (ARC) y/o antipolvo (ASC). |

1 INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de las instalaciones fotovoltaicas en el mundo plantea un desafío significativo para la gestión de residuos de módulos fotovoltaicos (FV) que alcanzan el final de su vida útil [2]. La capacidad instalada de PV, que en la última década ha pasado de ser un mercado de nicho a una tecnología renovable convencional, se estima en más de 500 GWp y proyecta superar 1 TWp en los próximos años. Este crecimiento implica que, para 2050, los residuos fotovoltaicos acumulados podrían alcanzar entre 60 y 78 millones de toneladas a nivel mundial¹. En el caso de Chile, se estima que para 2050 existirán entre 161 y 270 millones de módulos, generando un primer gran pico de residuos de aproximadamente 120,000 toneladas hacia 2046².

La reutilización de módulos fotovoltaicos, a diferencia del reciclaje, surge como una alternativa viable dentro de un enfoque de economía circular. Estudios indican que entre el 45% y el 65% de los módulos desmantelados en los primeros años de operación pueden ser restaurados o renovados, lo que permite extender su uso en lugar de destinarlos a flujo de residuos³. En este contexto, promover la reutilización contribuye no solo a reducir los volúmenes de desechos, sino también a maximizar el valor de los recursos y reducir el impacto ambiental de la energía solar.

Este enfoque requiere, sin embargo, el desarrollo de infraestructura y estándares específicos para la clasificación, pruebas y documentación de los módulos reutilizables, especialmente en países como Chile donde estas capacidades aún son limitadas. La implementación de protocolos eficientes y estandarizados permitirá una reutilización segura y contribuirá a la sostenibilidad en el ciclo de vida de los módulos fotovoltaicos.

¹ J.A Tsanakas, Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re certification (2019)

² M.J Riquelme, Energy Transition, Solar PV and Circular Economy: triple helix approach to a Second Life for PV Modules in Chile (2023)

³ M. Pareek, Supply Chain of Second Life PV Modules for Reuse in Europe.(2021).

1.1 PROPÓSITO DE LA GUÍA

El propósito de la presente guía técnica es proporcionar antecedentes técnicos y prácticos para **establecer y/o adecuar un marco normativo en torno a la reutilización de módulos fotovoltaicos en Chile**. Esto busca fomentar una economía circular en el sector energético, minimizando el impacto ambiental asociado a la generación de residuos fotovoltaicos y promoviendo prácticas sostenibles a lo largo del ciclo de vida de estos dispositivos. Dado el liderazgo del país en la adopción de energías renovables, esta guía responde a la necesidad de gestionar los módulos que alcanzan el final de su vida útil, proponiendo soluciones viables y ecológicas.

En el contexto de la sostenibilidad y gestión responsable de residuos, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) representan un desafío global debido a su crecimiento acelerado y a su impacto ambiental⁴. Según el Informe Global de E-Waste 2024 [3], se generaron aproximadamente 62 millones de toneladas de RAEE en 2022, y se proyecta que esta cifra alcance los 82 millones de toneladas para 2030, con un crecimiento anual del 2,6%. Estos residuos contienen materiales peligrosos, como plomo y mercurio, que pueden dañar el medio ambiente y la salud si no se gestionan adecuadamente. Al mismo tiempo, incluyen materiales valiosos como oro y cobre, cuya recuperación es fundamental para reducir la dependencia de la extracción de nuevos recursos; se estima, por ejemplo, que los RAEE producidos en un solo año contienen 48 mil millones de dólares en metales recuperables. Este marco de economía circular, enfocado en el rediseño, reutilización y reciclaje de productos, también es aplicable al sector fotovoltaico, alineando la gestión de módulos solares con los principios de sostenibilidad.

Para sustentar esta gestión sostenible, la guía toma en cuenta principios como los de la norma **ISO 14067** [4], que establece que las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a un producto durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. En el contexto de la energía solar

⁴ Fundación Chile, Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)

fotovoltaica, estudios indican que la principal fuente de emisiones de CO₂ en la cadena de suministro proviene del proceso de fabricación de los módulos. La reducción de esta huella de carbono depende tanto de la cantidad de energía generada por el módulo como de su tiempo efectivo de exposición a la luz solar. En países como China, con entre 1000 y 3000 horas de sol anuales, el tiempo estimado para recuperar esta huella de carbono varía entre 2 y 6 años⁵, logrando reducciones de 13374 a 23684 toneladas de CO₂, respectivamente. En Chile, donde el promedio anual de horas de sol supera las 3000, se anticipan resultados aún más favorables. Además, la circularidad de los módulos fotovoltaicos —es decir, su reutilización y reciclaje— representa una etapa crítica para disminuir significativamente las emisiones de CO₂ en el suministro de energía, evaluando el ciclo de vida completo⁶.

El objetivo principal, del presente documento, es proporcionar directrices claras para que los distintos actores del sector —incluidos desarrolladores, operadores, recicladores y reguladores— implementen estrategias de reutilización de módulos fotovoltaicos. Esto contribuirá a reducir la cantidad de residuos generados, maximizando el aprovechamiento de los recursos materiales y promoviendo prácticas alineadas con la sostenibilidad. Las recomendaciones técnicas incluyen el reacondicionamiento, la donación, o la reubicación de los módulos en instalaciones de menor demanda energética, garantizando la seguridad y eficiencia.

El desarrollo de esta guía se apoya en estudios previos realizados en Chile, como aquellos impulsados por la Comisión Nacional de Energía (CNE) y el Ministerio del Medio Ambiente, que han identificado la necesidad urgente de gestionar adecuadamente los residuos de las instalaciones solares, además de iniciativas de Corfo para establecer protocolos de pruebas para la reutilización de módulos fotovoltaicos. En particular, se destaca la importancia de alinear estas acciones con la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP) [5] y las metas nacionales de desarrollo sostenible. Los pronósticos indican que para 2035, una proporción

⁵ Xiaopeng Guo, Journal of Cleaner Production Volume 233, 1 October 2019, Pages 626-633

⁶ Government of Canada, Assessment of the Environmental Performance of Solar Photovoltaic Technologies: a Report Funded under the Clean Energy Fund.

significativa de los módulos fotovoltaicos instalados en el país alcanzará su fin de vida útil, lo que plantea un desafío en cuanto a su disposición y un impulso hacia su reutilización.

En resumen, esta guía técnica busca servir como base para que los actores públicos elaboren o ajusten el marco normativo que permita gestionar de manera efectiva los módulos fotovoltaicos desechados. Su objetivo es promover la sostenibilidad ambiental, la eficiencia en el uso de recursos y el cumplimiento de la normativa vigente, posicionando a Chile como líder en la gestión responsable de residuos fotovoltaicos en el contexto de la economía circular.

1.2 ALCANCE DEL USO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA

A mayo del 2025, la capacidad instalada fotovoltaica (FV) en Chile es de 10.870 MW⁷. Para estimar la cantidad de módulos, considerando un rango típico de potencia por módulo de 300 W a 500 W, se puede inferir que hay aproximadamente entre 20 a 34 millones de módulos fotovoltaicos en operación. En cuanto a las tecnologías instaladas se encuentran:

Silicio cristalino (monocristalino y policristalino): Representa la mayoría de las instalaciones debido a su eficiencia y costo competitivo.

Módulos bifaciales: Adoptados en zonas con alta radiación como el desierto de Atacama para aprovechar la reflexión del suelo.

Thin-film o capa delgada: Presencia marginal, utilizada principalmente en proyectos específicos donde sus características son ventajosas.

Considerando que más del 95% de los módulos fotovoltaicos instalados en Chile corresponden a tecnologías de silicio cristalino (c-Si), incluidas las tecnologías

⁷ www.cne.cl

bifaciales, el alcance de la presente guía técnica se centra en dichas tecnologías. Esto tiene como objetivo proporcionar directrices detalladas para su reutilización.

Así, la etapa de diagnóstico se aplica exclusivamente a módulos c-Si (monofacial y bifacial), abordando las fases clave de diagnóstico, decomisionamiento, inspección, acopio y manejo adecuado de estos equipos, con el fin de extender su vida útil y promover la sostenibilidad en el sector energético.

Esta guía excluye el reciclaje de los módulos, limitándose exclusivamente a prácticas que fomenten su reutilización directa.

La guía ofrece un compendio de buenas prácticas para el decomisionamiento, acopio, transporte y reutilización de módulos fotovoltaicos, fundamentado en experiencias nacionales e internacionales. Se consideran aspectos tales como la evaluación del estado funcional de los módulos de silicio cristalino, el reacondicionamiento para nuevas aplicaciones y la identificación de usos potenciales en sistemas de menor demanda energética o en zonas rurales o comunidades vulnerables. Asimismo, se promueven prácticas seguras que cumplan con los estándares de eficiencia y seguridad.

Se incluyen protocolos estandarizados de diagnóstico técnico para evaluar el estado de los módulos de silicio cristalino retirados o cercanos al fin de su vida útil. Estos protocolos contemplan la inspección visual, pruebas eléctricas y de rendimiento, detección de fisuras y degradación, así como la determinación de la capacidad restante de los módulos. Este diagnóstico permite clasificar los módulos reutilizables y aquellos que requieren otro tipo de tratamiento o disposición.

Además, se proporcionan directrices para la inspección post-decomisionamiento y el acopio adecuado de los módulos, garantizando un almacenamiento que minimice daños durante la manipulación y el transporte. Se establecen protocolos para su clasificación según estado y funcionalidad, asegurando que aquellos aptos para reutilización sean gestionados conforme a los mejores estándares.

A lo largo de la guía, se incorporan recomendaciones de expertos en energías renovables, sostenibilidad y gestión de residuos fotovoltaicos. Estas recomendaciones

incluyen consideraciones técnicas y logísticas para la implementación eficaz de programas de reutilización, así como criterios para la toma de decisiones sobre cuándo reutilizar, reacondicionar o destinar los módulos a otro tipo de disposición.

El enfoque de la guía está restringido a prácticas de reutilización directa y reacondicionamiento, ya que el reciclaje implica procesos industriales distintos que están fuera del alcance de este documento.

2 ANÁLISIS DE BRECHAS

El uso de módulos de segunda vida enfrenta diversas dificultades regulatorias, financieras, de seguridad y técnicas, las cuales se detallan en esta guía. Estas problemáticas han sido identificadas a través de un estudio colaborativo entre los sectores público y privado, y se presentan a continuación:

2.1 BARRERAS REGULATORIO-FINANCIERAS

En relación con los módulos fotovoltaicos internados al país para grandes proyectos (aquellos con un valor superior a USD 5 millones), estos pueden acogerse al beneficio de exención del 19% de IVA y del 6% de arancel aduanero sobre el valor CIF⁸. Sin embargo, esta condición limita la reutilización de los módulos fotovoltaicos (MFVs) a proyectos distintos de aquel para el cual fueron originalmente importados [6].

En este contexto, un levantamiento interno realizado por la empresa Enel GP permite identificar tres reglamentos relevantes asociados a esta problemática.

2.1.1 Regla I Inciso 3°

En relación con los Procedimientos de Aforo (6%), la Resolución N° 2.675 del 03 de junio de 2010 de la Dirección Nacional de Aduanas establece que el Agente de Aduana debe presentar al Administrador de Aduana una solicitud documentada que incluya una serie de antecedentes específicos, y realizar dicha presentación ante la jurisdicción correspondiente al proyecto en cuestión. Cada mercancía importada al país es clasificada en una posición determinada del Arancel Aduanero [7].

Asimismo, la aplicación de la Regla 1, inciso 3°, sobre Procedimientos de Aforo, permite que los distintos componentes de una máquina o ingenio productivo sean

⁸ El valor CIF (Costo, Seguro y Flete) corresponde al precio de la mercancía más el costo del flete y el seguro hasta el puerto de destino en Chile. Es la base para calcular los impuestos de importación según Aduanas. www.aduana.cl/

clasificados en la misma posición arancelaria de la máquina o ingenio al que pertenecerán.

2.1.2 Exención de IVA a la Importación (19%).

El solicitante que desee acogerse a la exención de IVA establecida en el artículo 12, letra B, N° 10, del Decreto Ley N° 825 de 1974, sobre Impuesto a las Ventas y Servicios, debe presentar una solicitud formal y documentada que incluya los antecedentes requeridos, utilizando la plataforma online del Ministerio de Hacienda [8].

Este beneficio aplica a proyectos de minería, energía, telecomunicaciones, investigación, desarrollo tecnológico, médico o científico, siempre que involucren una inversión igual o superior a USD 5 millones. Corresponde al Ministerio de Hacienda evaluar si el proyecto de inversión nacional cumple con los requisitos necesarios para acceder a esta exención. Los bienes de capital a importar deben estar incluidos en la lista previamente definida por dicho Ministerio.

Si el Ministerio de Hacienda determina que el proyecto cumple con las exigencias, emitirá una resolución que exime del pago del IVA, aplicable hasta la finalización de la construcción del proyecto.

2.1.3 Ley de hacienda sobre ordenanza de aduanas Artículo 181

Según esta ley, se presume la responsabilidad por el delito de fraude para las personas que cometan o intervengan en los siguientes actos [9]:

- **Emplear mercancías con un fin distinto al declarado**, sin autorización o sin pagar los derechos correspondientes, cuando estas estén sujetas a derechos menores condicionados a un uso específico.
- **Vender, ceder, disponer, consumir o utilizar industrial o comercialmente mercancías sujetas a regímenes suspensivos de derechos de admisión temporal o depósito**, salvo que se trate de actividades autorizadas para esa destinación específica. Esto aplica cuando no se hayan cubierto previamente los derechos, impuestos y gravámenes correspondientes, o cuando no se hayan

retornado las mercancías a la potestad aduanera y cumplido las obligaciones relacionadas, una vez expirado el plazo de la franquicia.

- **Exportar, enajenar, arrendar o destinar a un uso no productivo bienes que hayan recibido el beneficio de pago diferido de tributos aduaneros**, sin haber saldado la totalidad de la deuda tributaria o sin la autorización del Servicio de Aduanas en casos de enajenación o arrendamiento.

Referido a los derechos aduaneros, efectivamente **el darle un uso distinto a dicha mercancía que ingresó libre de pago y condicionada a ese fin productivo, caería en el delito de contrabando o fraude que define la norma.**

2.2 PELIGROSIDAD DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

El año 2022, el Ministerio de Salud emitió una ordenanza donde señalaba:

“(…) se deberá considerar que los paneles solares fotovoltaicos desechados siempre deben ser manejados como residuos peligrosos, a menos que el generador realice una caracterización de estos residuos a través de un laboratorio de caracterización de residuos peligrosos autorizado, de acuerdo con lo señalado en el Reglamento de Laboratorios Privados de Salud Pública de Caracterización de Residuos Peligrosos, D.S N°-173/2005 del MINSAL, demostrando que los paneles en desuso no presentan ninguna de las características de peligrosidad estipuladas en el D.S N°148/2003.

En tanto esto último no ocurra, tanto el almacenamiento, como el transporte, la valorización o eliminación de los paneles fotovoltaicos desechados, debe realizarse en cumplimiento a lo establecido en el D.S N°148/2003 [10].

Los paneles fotovoltaicos desechados que se demuestre que no son residuos peligrosos, pueden ser valorizados o eliminados en instalaciones autorizadas para tales fines, sin embargo, de acuerdo con la estrategia jerarquizada establecida en la Ley N°20.920 [11], es deber del generador priorizar siempre la valorización por sobre la eliminación.”

Representantes de la industria fueron consultados sobre su experiencia con las pruebas de peligrosidad aplicadas a sus módulos, reguladas por el Decreto 148. Para los actores industriales, este procedimiento ha sido percibido como "confuso" debido a la inconsistencia en los resultados proporcionados por los laboratorios. Es decir, para una misma muestra de módulos, los resultados obtenidos varían significativamente entre un laboratorio y otro.

Por otra parte, existe en el Decreto 148 la disposición siguiente:

“El reciclaje de residuos peligrosos será autorizado por la Autoridad Sanitaria cuando ello no implique riesgo para la salud pública o al medio ambiente. Sin perjuicio de lo dispuesto en el presente reglamento el Ministerio de Salud emitirá guías técnicas de orientación e información para el manejo de aquellos residuos cuyo reuso y/o reciclaje sea una práctica común o que se revelen como prioritarios desde el punto de vista sanitario.”

Se señala desde el CDEA-UA que los dispositivos electrónicos deben cumplir con directivas RoHS para ser catalogados como "no peligrosos". Es complejo lograr dicho estándar en la fabricación de MFV, pues deben asegurar fiabilidad en terreno, por lo cual deben tener componentes calificados como peligrosos.

Sin embargo, en la **“Guía para la Aplicación del Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos Destinada a Pequeños Generadores”** [12] del Ministerio de Salud también señala lo siguiente:

“3.1.2 Reúso. *El reúso considera la utilización de los residuos peligrosos generados, en su forma original o previa transformación, en el proceso productivo que les dio origen. Es así como algunas industrias consideran útiles algunos residuos peligrosos, volviéndolos a utilizar en el proceso productivo y en consecuencia no los desechan. Algunos ejemplos de reúso de residuos peligrosos son: Reciclaje de envases de materias primas e insumos como contenedores de residuos peligrosos (deben cumplir los requisitos señalados en la DS N°148/2003).*

Reúso de solventes usados. *Los ladrillos refractarios utilizados como material de revestimiento de hornos y crisoles pueden reutilizarse si su material es de*

buena calidad y se encuentran en buenas condiciones. En las fundiciones, parte de las arenas de moldeo se pueden reutilizar sometiéndolas a un proceso de clasificación mecánica.”

2.3 ACOPIO Y TRAZABILIDAD DE LOS MFVS

En este caso, la problemática radica en que los MFVs retirados de las plantas fotovoltaicas no siempre son acopiados siguiendo un protocolo que garantice una inspección visual expedita ni condiciones adecuadas de manipulación, lo que puede derivar en daños o roturas que los conviertan en residuos potencialmente peligrosos. En ausencia de regulaciones específicas y de infraestructura para su reutilización, es común que estos módulos sean tratados como desechos y enviados a disposición final sin una evaluación técnica previa. Diversos informes del Ministerio del Medio Ambiente de Chile y experiencias documentadas en iniciativas como Solar Circular han evidenciado que, ante la falta de rutas claras para su reacondicionamiento, muchos módulos terminan deteriorándose o siendo descartados, perdiendo así su potencial de segunda vida [13] [14].

Esto no solo presenta un problema para la reutilización, sino que además puede constituir faltas a las normas y afectar la salud de los trabajadores de las plantas y transportistas que manejan la eliminación de estos módulos. Al respecto, la Guía de Manejo de RESPEL señala [15]:

*“1.6. **Vías de Exposición de los Residuos Peligrosos.** La población puede verse expuesta a los residuos peligrosos cuando estos son manejados (por ejemplo, durante su transporte interno, almacenamiento, acondicionamiento, transporte externo o eliminación) de una manera inadecuada. La exposición se puede producir en forma directa o indirecta por la contaminación del medio ambiente. Esta última puede crear “vías” por las cuales los residuos peligrosos pueden alcanzar a las personas. Las principales vías por las cuales la población puede entrar en contacto con los contaminantes presentes en residuos peligrosos que han sido manejados de una forma inadecuada son el aire, agua, suelo y los*

alimentos contaminados. Para evitar la exposición de la población a las sustancias peligrosas presentes en los residuos, los generadores deben manejar sus residuos peligrosos al interior de la empresa de una forma adecuada y asegurar que el transporte y la eliminación se realicen a través de empresas autorizadas.”

Asimismo, un problema asociado es la trazabilidad del MFV, vital para clasificar los MFVs como reutilizables y apoyar un posible reetiquetado o asegurar la seguridad de estos. En las inspecciones a las plantas a nivel internacional y nacional, se ha encontrado que los MFVs tienen las etiquetas incompletas o dañadas. Asimismo, para saber los años que ha estado instalado un módulo, si tuvo fallas y fue reparado, también se hace necesario llevar una trazabilidad. **Si bien muchas plantas solares llevan trazabilidad, será necesario tener una trazabilidad completa del MFV a lo largo de la cadena de valor de un módulo que sea reutilizado, debiendo compartirse información entre proveedores y empresas de servicios.**

2.4 PROTOCOLO DE DIAGNÓSTICO DE MFVS

El proyecto Solar-Circular⁹, en su diseño, aborda esta barrera considerando que la experiencia internacional señala la necesidad de generar protocolos específicos para el diagnóstico de módulos fotovoltaicos reutilizables. Las pruebas existentes, reguladas por entidades como la IEC, no incluyen un protocolo diseñado para identificar módulos fotovoltaicos (MFVs) aptos para reutilización.

En este contexto, Solar-Circular, a través del Centro de Desarrollo Energético de la Universidad de Antofagasta (UA), ha desarrollado una propuesta de Protocolos de Diagnóstico. A partir de la sección 4, se detalla la metodología empleada.

⁹ www.solar-circular.cl

3 BENEFICIOS DE UTILIZAR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA

El uso de módulos fotovoltaicos de segunda vida es una solución tanto económica como ambientalmente sostenible, que se está extendiendo a nivel mundial. Estos módulos reacondicionados continúan operando con un rendimiento que puede variar entre el 70% al 90%, dependiendo de factores como los años de operación acumulados, las condiciones ambientales a las que estuvieron expuestos y la tasa de degradación inherente a la tecnología utilizada. Esta capacidad les permite seguir generando energía durante más tiempo, contribuyendo así a la economía circular y a la sostenibilidad ambiental.

3.1 REDUCCIÓN DE COSTOS

Uno de los beneficios más claros del uso de módulos fotovoltaicos de segunda vida es la **reducción de costos**, lo cual los hace accesibles para una mayor variedad de proyectos y sectores. Esta reducción abarca costos de adquisición, transporte, disposición final y aquellos asociados al impacto ambiental

- **Enfoque internacional:** A nivel global, estudios recientes (CIRCUSOL, 2022) muestran que los módulos fotovoltaicos de segunda vida pueden costar hasta un 50 % menos que los módulos nuevos, lo cual puede traducirse en una reducción de aproximadamente 15 % en el costo total del sistema, mejorando significativamente la viabilidad económica de proyectos fotovoltaicos a gran escala [16]. En México, el uso de módulos fotovoltaicos reutilizados podría reducir los costos de electrificación rural hasta en un 20 %, especialmente en proyectos fuera de red, de acuerdo con un estudio de Domínguez y Geyer [17]. Esta reducción de costos haría que la tecnología solar fuera más asequible para comunidades rurales con menores recursos.

La reutilización de módulos fotovoltaicos representa una alternativa económicamente viable y ambientalmente favorable frente al reciclaje o

disposición final. A nivel internacional, se ha comprobado que esta práctica puede reducir significativamente los costos asociados al manejo de residuos y al transporte, que representan hasta el 15% del impacto ambiental en el ciclo de vida de los módulos. En Europa, por ejemplo, el reciclaje cuesta entre \$450 y \$500 USD por tonelada, mientras que la reutilización evita estos costos y solo requiere pruebas de calidad y transporte local. Además, los módulos de segunda vida pueden costar hasta un 50% menos que los nuevos, y en estudios en Tailandia, el 83% de los módulos retirados mantiene el 70% de su capacidad, lo que permite su uso en aplicaciones de baja demanda [18] [19].

Por otra parte, la reutilización también contribuye a la reducción de emisiones: un análisis en México demuestra que reutilizar módulos evita hasta el 15% de las emisiones relacionadas con el transporte y reduce impactos ambientales en categorías críticas como la escasez de recursos. Iniciativas como el proyecto CIRCUSOL en Europa estiman que hasta el 65% de los módulos desmantelados pueden reacondicionarse, promoviendo así un modelo de economía circular que prolonga la vida útil de los módulos y disminuye la dependencia de materias primas. En conjunto, la reutilización de módulos fotovoltaicos se posiciona como una solución eficaz para reducir costos y contribuir a la sostenibilidad en el ámbito energético global.

- **Enfoque nacional (Chile)**¹⁰: La reutilización de módulos fotovoltaicos en Chile puede reducir costos significativamente. Los costos de transporte, uno de los factores más relevantes, pueden oscilar entre \$18880 y \$58440 CLP por trayectos de 500 a 1500 km. La viabilidad económica se optimiza al instalar estos módulos cerca de las plantas solares, ya que, al aumentar la distancia, el beneficio disminuye.

Los módulos de segunda vida pueden ofrecer un ahorro de hasta un 50% en comparación con paneles nuevos, permitiendo una venta aproximada de

¹⁰ Phibrand, Desarrollo de casos de negocios módulos fotovoltaicos reutilizados.

\$55000 a \$100000¹¹ CLP por módulo, dependiendo del nicho. En un proyecto de cubiertas solares con capacidad de 50 kW, los beneficios económicos proyectados en 20 años pueden alcanzar los \$24 millones CLP, con un ahorro de aproximadamente 18750 kg de CO₂ al año. En aplicaciones residenciales de 1 kW, el costo inicial es de unos \$500000 CLP, con potencial para ahorrar cerca de \$3600000 CLP en gastos eléctricos durante su vida útil de 20 años. Esta estimación se basa en un ahorro anual promedio de \$180.000 CLP, extrapolado proporcionalmente desde un caso de estudio de 50 kW que reporta un ahorro total de \$9.000.000 CLP en dos décadas

Sin subsidios o precios controlados, cuando el costo por panel supera los \$120000 CLP, el transporte a más de 3000 km deja de ser rentable, limitando la factibilidad sin apoyo estatal en ciertos casos.

3.2 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

El uso de módulos fotovoltaicos de segunda vida tiene un impacto positivo en el medio ambiente, ayudando a disminuir tanto la huella de carbono como la generación de residuos electrónicos.

- **Reducción de la huella de carbono:** Un análisis del *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* de Estados Unidos encontró que el reacondicionamiento de módulos fotovoltaicos puede reducir las emisiones de carbono hasta en un 50% a lo largo de su ciclo de vida [20].
- **Reducción de residuos electrónicos:** De acuerdo con el informe de la IEA-PVPS (2024), los módulos fotovoltaicos contienen materiales potencialmente peligrosos como plomo y otros metales pesados que, en ausencia de procesos

¹¹ El valor disponible total no representa únicamente el costo de adquisición del panel reutilizado. Este monto incluye además los costos asociados a las pruebas de funcionamiento (equivalentes a 2 USD por módulo), el transporte (estimado en \$40/km para 250 km) y una ganancia comercial del 30 %. Por ejemplo, en el caso de módulos destinados a cubiertas, el precio base es de \$55.213 CLP, pero el valor final asciende a \$116.018 CLP al incorporar estos factores.

adecuados de reutilización o reciclaje, pueden llegar a vertederos y generar impactos ambientales. La reutilización de módulos permite prolongar su vida útil y mitigar el volumen de residuos electrónicos, disminuyendo el riesgo de liberación de estos materiales al ambiente [21].

- **Reducción de explotación de nuevos recursos:** Estudios de ciclo de vida (LCA) han demostrado que la reutilización puede reducir hasta un 30-40% la necesidad de estos materiales en el sector fotovoltaico. Además, en iniciativas de economía circular, como el proyecto CIRCUSOL en Europa, se estima que hasta el 65% de los módulos retirados de servicio pueden reacondicionarse, lo que implica un ahorro directo en la extracción de recursos y una menor huella ambiental¹².

3.3 CONTRIBUCIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS

La **economía circular** promueve la extensión de la vida útil de productos y materiales, reduciendo el desperdicio y optimizando el uso de recursos. Los módulos fotovoltaicos de segunda vida son un ejemplo claro de este enfoque, donde el reacondicionamiento y la reutilización de estos equipos permiten maximizar el valor de los materiales y minimizar la extracción de nuevas materias primas.

- **Reutilización y reacondicionamiento:** En Europa, la normativa *WEEE* fomenta la reutilización de equipos eléctricos, incluidos los módulos fotovoltaicos. Empresas como *Soren*, en Francia, están implementando programas de reacondicionamiento y reventa de módulos solares, prolongando su ciclo de vida útil [22] y reduciendo el volumen de residuos electrónicos.
- **Nuevos modelos de negocio:** A nivel global, diversas empresas están adoptando modelos de negocio basados en la reventa de módulos

¹² J.A Tsanakas, Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re certification (2019)

reacondicionados, lo cual optimiza el uso de recursos y genera ingresos adicionales en un mercado en expansión [23].

- **Prolongación de la vida útil:** Muchos módulos fotovoltaicos que alcanzan su vida útil técnica todavía tienen la capacidad de generar energía si son reacondicionados. Esto es particularmente importante en países en desarrollo que buscan mejorar su acceso a la energía [17], donde la demanda de acceso a la energía es alta.
- **Reducción en el uso de materias primas:** La reutilización de módulos reduce la demanda de materias primas como el silicio, lo cual es crucial en un contexto global de escasez de ciertos recursos necesarios para la producción de tecnologías limpias [24].

3.4 CERTIFICACIÓN DE COMPETENCIAS

La certificación de competencias en el contexto de la economía circular asegura que los profesionales involucrados en el diagnóstico, reacondicionamiento y mantenimiento de los MFV posean las habilidades específicas necesarias para realizar estas tareas de manera eficiente y segura. Esto permite que los procesos de reutilización cumplan con estándares de calidad, evitando errores que podrían llevar a una disminución de la vida útil o al desperdicio de recursos. Tabla 3.1 se presenta los perfiles ocupacionales certificados por ChileValora que representan los conocimientos mínimos que debe tener un profesional en este ámbito.

Tabla 3.1. Perfiles ocupacionales por ChileValora.

| | |
|---|--|
| Instalador(a) de Sistemas Solares Fotovoltaicos (Código: P-3510-7411-001-V02)¹³ | <p>: Acción clave Capacidad para diagnosticar y reacondicionar módulos fotovoltaicos, extendiendo su vida útil y reduciendo la necesidad de fabricar nuevos</p> <p>Competencias Clave</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos, asegurando su correcto funcionamiento. |
|---|--|

¹³ [Ficha del perfil ocupacional: Instalador\(A\) de Sistemas Solares Fotovoltaicos](#)

| | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del estado de los MFV para determinar su viabilidad en proyectos de reutilización. |
| Mantenedor(a) de Plantas Fotovoltaicas (Código: P-3510-3131-009-V01)¹⁴ | <p>: Acción clave Habilidad para mantener y optimizar el rendimiento de MFV reutilizados, asegurando su eficiencia y prolongando su vida útil en nuevas aplicaciones.</p> <p>Competencias Clave:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realización de mantenimiento preventivo y correctivo en plantas fotovoltaicas, siguiendo protocolos de seguridad y normativas vigentes. • Identificación y solución de fallas en los sistemas fotovoltaicos |
| Instalador(a) Eléctrico(a) Clase D (Código: P-4322-7411-001-V02)¹⁵ | <p>: Acción clave Habilidad para dismantelar y reinstalar MFV de manera segura, facilitando su reutilización en nuevas instalaciones.</p> <p>Competencias Clave:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de proyectos eléctricos conforme a la normativa vigente. • Verificación y mantenimiento de instalaciones eléctricas. |

¹⁴ [Ficha del perfil ocupacional: Mantenedor\(A\) de Plantas Fotovoltaicas](#)

¹⁵ [Ficha del perfil ocupacional: Instalador\(a\) Eléctrico\(a\) Clase D](#)

4 CONSIDERACIONES PREVIAS AL USO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA

El uso de MFVs de segunda vida resulta una alternativa factible para ampliar la vida útil de los equipos previo al reciclaje. Al reutilizar los MFV en lugar de desecharlos, se evita la generación de residuos, la extracción de nuevos recursos y las emisiones asociadas a la fabricación de nuevos módulos, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental.

Según la causa de retiro del MFV desde instalaciones industriales, comerciales o residenciales se deben realizar pruebas visuales y de inspección para verificar si es factible la utilización del MFV. Esta utilización puede ser activa (empleada para la generación de energía eléctrica) o pasiva (empleo del módulo para otras aplicaciones). En ambos casos el MFV debe encontrarse en forma íntegra a nivel estructural, caso contrario el MFV será considerado como un residuo dispuesto para reciclaje.

Este punto se centra en módulos fotovoltaicos dispuesto para la generación de energía eléctrica (uso activo), particularmente para pequeños medios de generación.

En ambos casos, el MFV debe encontrarse en forma íntegra a nivel estructural; de lo contrario, será considerado un residuo dispuesto para reciclaje. A continuación, se describen las pruebas técnicas que permiten evaluar su estado eléctrico y estructural en mayor detalle

4.1 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y ESTADO DE LOS MÓDULOS

Posterior al retiro del MFV de las instalaciones deberán ser inspeccionados visualmente y por las pruebas que validen su reutilización. Esto permite identificar el tipo de falla existente y limitación de potencia de generación eléctrica para su reubicación en una nueva instalación fotovoltaica o un sub-sistema de módulos de 2da vida.

La evaluación de la calidad y el estado de los módulos fotovoltaicos de segunda vida es fundamental para asegurar su viabilidad técnica y económica antes de su reutilización en nuevas instalaciones. Este proceso tiene como objetivo verificar el rendimiento eléctrico residual, identificar posibles defectos físicos o estructurales, y garantizar que los módulos cumplan con los estándares mínimos de seguridad y eficiencia. Entre los principales aspectos a considerar en la evaluación destacan:

| | |
|--|---|
| Inspección Visual | : Verificación de la presencia de daños visibles como grietas, delaminaciones, corrosión en los marcos, y daños en el encapsulante o el vidrio, que puedan comprometer el rendimiento y la seguridad del MFV |
| Prueba Eléctrica (Curva I-V) | : Evaluación de la curva de corriente-voltaje (I-V) para medir la potencia de salida y compararla con las especificaciones originales del módulo. Esto permite determinar la eficiencia residual y la capacidad de generación de energía. |
| Verificación de Microfisuras | : Detección de microfisuras en las células solares mediante métodos de inspección avanzada, como la electroluminiscencia , termografía infrarroja o fluorescencia ultravioleta. Las microfisuras pueden causar una degradación acelerada y reducir significativamente la vida útil del módulo. |
| Prueba de Aislamiento Eléctrico | : Realización de pruebas de aislamiento para detectar posibles fallos eléctricos o cortocircuitos en los módulos, garantizando la seguridad durante su operación en la nueva instalación. |
| Medición de Degradación del Rendimiento | : Evaluación del nivel de degradación que ha sufrido el módulo a lo largo del tiempo, considerando factores como la pérdida de potencia (generalmente medida en porcentaje anual) y la uniformidad del rendimiento entre los diferentes módulos. |
| Ensayo de Desempeño Bajo Condiciones Estándar (STC) | : Realización de pruebas bajo condiciones estándar (irradiancia de 1000 W/m ² , temperatura de 25 °C y espectro AM 1.5) para comparar el rendimiento actual con los valores originales proporcionados por el fabricante. |
| Revisión de Conexiones y Componentes Eléctricos | : Inspección de las conexiones eléctricas, cables, diodos de bypass y cajas de conexiones, asegurando que no presenten corrosión, fallos o desgastes que puedan afectar la funcionalidad y seguridad del módulo |

4.2 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Para la evaluación de los MFV de segunda vida y su capacidad de generación de energía, la información más reciente apunta a que los módulos experimentan una tasa de degradación anual promedio de entre 0.5% y 1.0% en condiciones normales, con una degradación superior en climas cálidos o zonas con mayores tensiones ambientales (como humedad o temperaturas extremas). Estudios recientes del National Renewable Energy Laboratory (NREL) y revisiones de la International Energy Agency (IEA) corroboran que los MFV de segunda vida, aunque degradados, pueden continuar generando energía de manera viable si se gestionan adecuadamente [25] [26].

A pesar de estas tasas de degradación, se ha observado que los módulos pueden mantener hasta un 80% de su capacidad original después de 25 años, dependiendo de las condiciones de operación y mantenimiento. Los estudios también destacan la importancia de las pruebas de aceleración combinada, que simulan condiciones ambientales extremas para prever la degradación futura y ayudar a prolongar la vida útil de los módulos mediante la detección temprana de fallas como microfisuras y delaminación [26].

Se debe considerar que muchos de los primeros MFV de 2da vida retirados de instalaciones industriales presentan problemas de: puntos calientes (hot-spot) con temperaturas sobre 65 °C los cuales son cubierto por garantía y MFV con cables desprendidos de las cajas de unión (junction box), por lo cual las tasas de degradación están restringidas al tiempo de operación del MFV en terreno. Si bien en zonas desérticas de alta radiación la generación de energía eléctrica es mayor, su degradación supera lo presentado por NREL [25] y depende de la zona climática donde este ubicada la instalación.

4.2.1 Aspectos Clave del Análisis Técnico

Evaluación de la Eficiencia Residual: Se refiere a la capacidad de los módulos fotovoltaicos de segunda vida para convertir la luz solar en energía eléctrica en

comparación con su rendimiento original. Se mide la potencia de salida en condiciones estándar (STC: irradiancia de 1000 W/m², temperatura de 25°C, y espectro AM 1.5). Bajo condiciones climáticas continentales, se espera que un módulo fotovoltaico experimente una degradación anual del 0.5% al 1.0%, lo que significa que después de 20 años podría funcionar al 80%-90% de su capacidad original [27]. En la zona norte de Chile dicho nivel de degradación se cumple en tiempos acotados, inferior a 20 años.

Medición de la Potencia de Salida Real: Se realiza una prueba de potencia de salida real bajo condiciones controladas. Este análisis incluye la medición de la curva corriente-voltage (I-V), que proporciona una visión completa de cómo se comporta el módulo bajo diferentes niveles de irradiancia y carga [28]. Esta información es vital para prever cómo funcionará el módulo en condiciones reales de operación.

Impacto de la Degradación por Uso y Condiciones Ambientales: Con el tiempo, los módulos fotovoltaicos experimentan degradación debido a factores ambientales como exposición a rayos UV, ciclos térmicos y humedad. La magnitud de esta degradación afecta directamente su capacidad de generar energía. El análisis técnico debe incluir la identificación de fallas comunes, como la delaminación del encapsulante, la oxidación en las conexiones y las microfisuras en las células fotovoltaicas, ya que estas condiciones pueden reducir drásticamente la eficiencia [29]

Estudio de Desempeño a Largo Plazo: Es esencial para predecir la producción energética de los módulos en su segunda vida. Este análisis se basa en simulaciones o datos históricos que consideran el perfil de irradiancia local, las condiciones climáticas y la inclinación del módulo. Se evalúa la curva de potencia en función del tiempo y se proyecta la producción anual esperada [30].

Factores de Pérdida de Rendimiento: Existen diversos factores de pérdida de rendimiento que deben tenerse en cuenta, como la acumulación de suciedad (soiling), la posible desconexión de células dañadas o la pérdida de transparencia del vidrio protector. Estos factores pueden provocar una pérdida acumulativa en la capacidad de generación de entre un 5% y 15% adicional al desgaste natural del módulo [31].

Pruebas de Uniformidad y Consistencia entre Módulos: Es esencial realizar pruebas de uniformidad entre los módulos reutilizados para garantizar que el sistema no presente grandes disparidades en su rendimiento. Las diferencias significativas en la eficiencia entre los módulos pueden ocasionar pérdidas de desajuste (mismatch losses), especialmente cuando se conectan en serie en un sistema fotovoltaico [32].

4.2.2 Resultados Esperados del Análisis Técnico

Determinar la Capacidad Energética Residual: El análisis técnico permite determinar la capacidad residual de los módulos en términos de kilovatios-hora (kWh) generados anualmente, lo que es clave para definir el valor económico y energético de los módulos en su segunda vida [27].

Identificar Aplicaciones Adecuadas: Basado en el rendimiento medido, se puede establecer qué aplicaciones son más adecuadas para los módulos de segunda vida. Generalmente, son más efectivos en proyectos de baja demanda energética, sistemas aislados o en entornos rurales donde no se requieren altos niveles de eficiencia [30].

Optimizar el Diseño del Sistema: Con los datos obtenidos del análisis, es posible rediseñar el sistema de montaje, optimizar las configuraciones de las conexiones eléctricas y ajustar el inversor para obtener el máximo rendimiento de los módulos reutilizados [31].

4.3 COMPATIBILIDAD CON EL SISTEMA EXISTENTE

El uso de módulos fotovoltaicos de segunda vida junto con módulos nuevos plantea ciertos desafíos y oportunidades que deben ser gestionados adecuadamente para maximizar el rendimiento del sistema. Las recomendaciones clave para implementar este tipo de combinación incluyen:

Pruebas de Compatibilidad Eléctrica: Es fundamental realizar pruebas eléctricas para garantizar que los módulos fotovoltaicos de segunda vida y los nuevos sean compatibles en términos de tensión (voltaje) y corriente. Las diferencias en los niveles de rendimiento pueden causar pérdidas de desajuste (mismatch losses), afectando la

eficiencia del sistema en general [26]. Se recomienda conectar módulos con características eléctricas similares, o utilizar optimizadores de potencia o microinversores que mitiguen las diferencias de rendimiento. De acuerdo con la normativa de la SEC (punto 8.9.b), en los casos donde se conecten módulos de distintos fabricantes dentro de un mismo string, sus valores nominales de tensión de circuito abierto (V_{oc}) y corriente de cortocircuito (I_{sc}) deben ser equivalentes, para asegurar la compatibilidad eléctrica y evitar efectos negativos en la instalación [33].

Segregación por Sub-Sistemas: Una opción eficiente es segregar los módulos de segunda vida y los nuevos en diferentes sub-sistemas (string diferentes de conexión) dentro de la misma instalación. Esto permite optimizar el rendimiento de cada grupo de módulos sin comprometer el sistema en su totalidad. Este enfoque es especialmente útil en instalaciones de gran escala, donde se pueden dividir áreas específicas para módulos reutilizados y nuevos.

Uso de Módulos de Segunda Vida en Aplicaciones Menos Críticas: Se recomienda emplear los módulos fotovoltaicos de segunda vida en aplicaciones de menor demanda energética o en sistemas no críticos. Por ejemplo, pueden ser utilizados para instalaciones secundarias, como en sistemas de almacenamiento de baterías o en áreas rurales, donde la eficiencia máxima no es tan crucial como en proyectos comerciales de gran escala [25].

Para instalaciones de MFV de segunda vida, se deben considerar posibles fallos a largo plazo. Por ello, es recomendable implementar protocolos de mantenimiento preventivo y monitoreo regular, tal como se detalla en la sección de pruebas técnicas (capítulo 5). Asimismo, tecnologías como optimizadores de potencia o microinversores pueden mitigar desajustes entre módulos, pero su uso debe evaluarse según el caso, considerando tanto el beneficio energético como el impacto en los costos de implementación (ver sección 4.3).

5 PROCEDIMIENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MFVS PARA UNA SEGUNDA VIDA

Los procedimientos presentados en este documento han sido elaborados por el CDEA-UA con el propósito de diagnosticar el estado de salud de un módulo fotovoltaico (MFV) retirado de instalaciones industriales/comerciales, identificando la gravedad o compromiso de las fallas que un MFV presenta, con la finalidad de determinar si el dispositivo bajo prueba: 1) puede ser usado en aplicaciones activas o 2) pasivas, 3) debe ser reparado para su reutilización en aplicaciones futuras, o bien 4) debe ser enviado a reciclaje. Cabe destacar que este procedimiento está pensado para la detección de fallas en MFV basados en tecnologías de silicio cristalino.

Para este fin se han seleccionado cinco pruebas, luego de consultar documentación técnica, reportes y estándares internacionales, las cuales se han dispuesto en una secuencia lógica, completando un procedimiento selectivo basado en el descarte. Gracias a este enfoque, los módulos fotovoltaicos (MFV) con fallas más severas son descartados en las etapas tempranas del proceso. Se espera que todo MFV que complete el proceso presente, como máximo, fallas moderadas y que no impliquen riesgos como descargas eléctricas o ignición (riesgo de incendio).

Los módulos fotovoltaicos (MFV) que sean rechazados se considerarán no aptos para su reutilización en aplicaciones de generación de electricidad. Sin embargo, podrán destinarse a otras aplicaciones o ser desechados de acuerdo con las leyes y regulaciones vigentes.

Los procedimientos de pruebas para determinar el estado de un módulo fotovoltaico han sido elaborados con base en estándares IEC, reportes técnicos emitidos por la IEA-PVS y recomendaciones de los fabricantes de los equipos utilizados en las pruebas. Estos procedimientos llevan una secuencia lógica de verificación, mostrada en el diagrama de flujo de la Fig. 5.1, siendo organizados en seis documentos.

El primero corresponde al documento principal general, el cual entrega definiciones, de las directrices generales y resume los procedimientos, indicando los equipos y materiales necesarios para completar el total de las pruebas. Los otros cinco

documentos corresponden a procedimientos de: Inspección Visual, medición de Aislación Eléctrica, medida de Curva I-V, ensayo de Termografía y ensayo de Electroluminiscencia. Cada documento incorpora una planilla de registro (lista de comprobación) respectivo de cada prueba, solicitando la información específica necesaria para el diagnóstico.

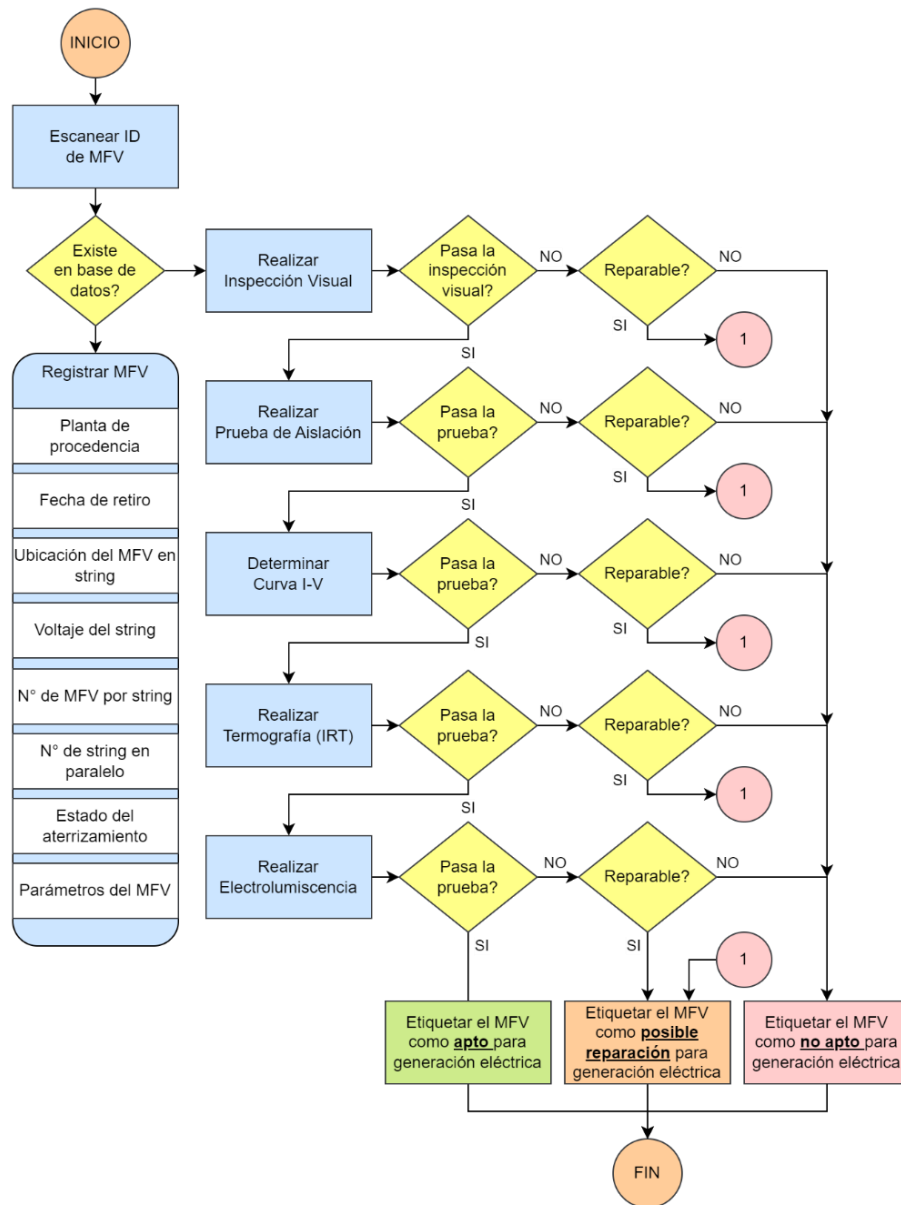


Fig. 5.1: Diagrama de flujo del procedimiento para diagnóstico de MFV de segunda vida.

El diagrama de flujo muestra el proceso de evaluación de módulos fotovoltaicos (MFV) para determinar su estado de reutilización. Comienza escaneando el ID del MFV para

verificar si existe en la base de datos; si no, se registra con datos clave como planta de procedencia y voltaje. Luego, el MFV pasa por pruebas de diagnóstico: inspección visual, prueba de aislamiento, curva I-V, termografía (IRT) y electroluminiscencia. Después de cada prueba, se evalúa si el MFV cumple con los requisitos; si falla, se determina si es reparable. Si no es reparable, el proceso termina etiquetándolo como “no apto”. Si pasa todas las pruebas, el MFV se etiqueta como “apto” para generación eléctrica; si requiere reparación, se etiqueta como “posible reparación”. Este proceso asegura la clasificación adecuada de los MFV para su reutilización eficiente en generación eléctrica. Los documentos en extenso están disponibles para descarga desde la web <https://www.solar-circular.cl/bbpps1/>

5.1 INSPECCIÓN VISUAL

De acuerdo con las normas IEC 61215-1 e IEC 61215-2, la inspección visual constituye una prueba no destructiva cuyo objetivo es identificar fallas en el módulo fotovoltaico (MFV) que sean visibles al ojo humano. Estas pueden incluir defectos de fabricación, degradación de materiales o fallas con manifestaciones físicas evidentes, tales como grietas significativas en las celdas, roturas en las celdas o en el marco, quemaduras, entre otras. La ejecución de este procedimiento, en términos generales, consiste en verificar todos los componentes del módulo fotovoltaico (MFV). El proceso se desarrolla por etapas con el fin de identificar los daños presentes en cada sección del módulo. La inspección se documenta mediante una planilla que guía el procedimiento y permite registrar tanto la información relevante como las imágenes obtenidas. Es importante señalar que este protocolo es aplicable a MFV tanto monofaciales como bifaciales, y es válido para tecnologías basadas en silicio, así como para aquellas de capa fina..

La información clave necesaria para la inspección de los módulos fotovoltaicos incluye los datos de georreferenciación, tales como el lugar de instalación, la fecha de instalación, la fecha de retiro, la ubicación dentro del campo solar, entre otros,

5.2 AISLACIÓN ELÉCTRICA

La resistencia eléctrica de un MFV es un parámetro de gran importancia para la operación de estos. Una baja aislación posibilita fallas a tierra, al mismo tiempo que son un riesgo de seguridad para las personas que entran en contacto con los MFV. Con el paso del tiempo, la resistencia de aislación eléctrica va disminuyendo, viéndose afectada por diversos factores, siendo esta resistencia sensible tanto a la temperatura como a la humedad ambiental, por lo que estos factores se deben considerar para realizar un proceso adecuado de medición de la resistencia de aislación eléctrica. Una correcta medición permite determinar el nivel de desgaste de la aislación, posibilitando identificar el nivel de tensión eléctrica permisible antes de sufrir una ruptura dieléctrica.

Referenciando a los estándares IEC 61215-1 e IEC 61215-2 [34, 35], la medición de aislación corresponde a una prueba de seguridad que permite comprobar si un MFV presenta una aislación adecuada entre sus partes conductoras y el exterior, determinando así la existencia de fugas de corriente.

Los módulos fotovoltaicos a probar deben haber superado previamente una inspección visual. Además, ambos cables del módulo deben estar en buen estado y contar con sus respectivos conectores MC4.

El procedimiento, en términos generales, consiste en conectar un megaóhmetro a los terminales del módulo fotovoltaico (MFV) y a su chasis. Esto permite realizar una serie de mediciones para evaluar la aislación entre la circuitería del módulo y su marco de aluminio.

Este procedimiento es aplicable a módulos fotovoltaicos (MFV) de silicio cristalino, tanto con marco como sin marco, y es válido para módulos monofaciales y bifaciales.

5.3 CURVAS CORRIENTE-VOLTAJE

Una curva de corriente voltaje (curva I-V) es una representación gráfica de la relación existente entre el voltaje aplicado a un dispositivo y la corriente que fluye por él. La

forma de la curva permite entender de mejor manera la operación del dispositivo bajo prueba. Existen tantos tipos de curvas I-V como existen tipos de componente electrónicos, por lo cual estas curvas pueden tener formas muy diferentes entre ellas.

La operación básica de un componente electrónico puede deducirse a partir de la posición de su curva en el plano corriente-voltaje (I-V). Este plano se divide en cuatro cuadrantes, y dependiendo del cuadrante en el que se encuentre la curva, es posible determinar si el dispositivo es activo o pasivo.

Como se muestra en la Fig. 5.2(a), un dispositivo que opera en el primer o tercer cuadrante, donde el voltaje y la corriente tienen la misma polaridad, se clasifica como un dispositivo pasivo, ya que consume potencia eléctrica. Por otro lado, los dispositivos que operan en el segundo o cuarto cuadrante, donde el voltaje y la corriente tienen polaridades opuestas, son dispositivos activos, los cuales generan potencia eléctrica.

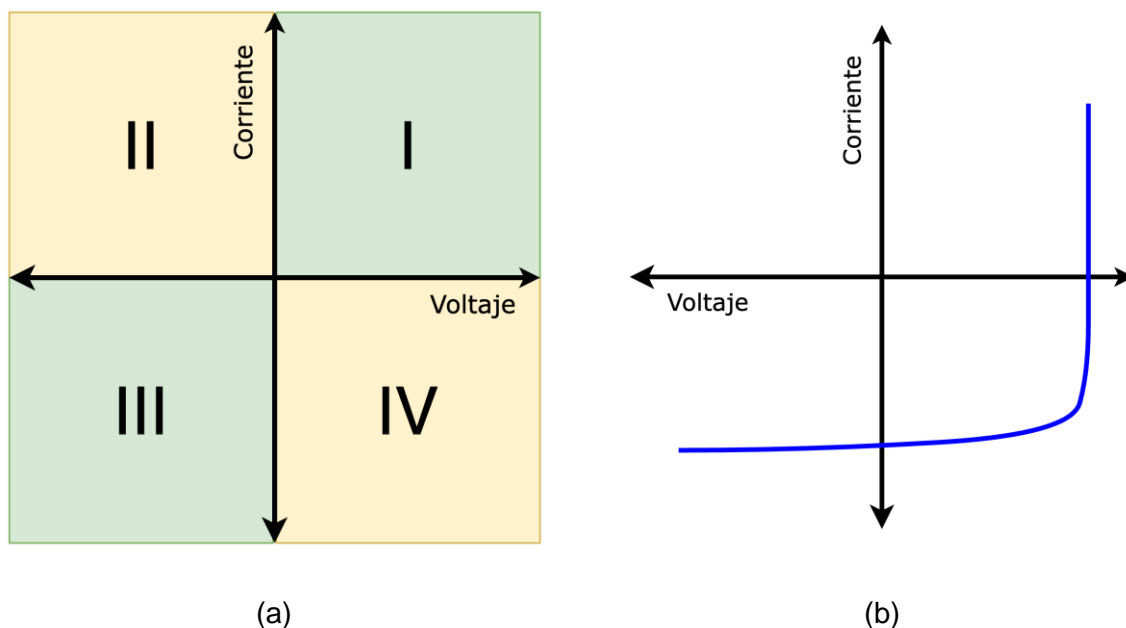


Fig. 5.2: (a) Plano I-V y sus cuadrantes¹⁶; (b) curva I-V de una celda solar iluminada.

En condiciones de oscuridad, las celdas solares se comportan de manera idéntica a un diodo. Sin embargo, al ser expuestas a la luz, su curva I-V se desplaza hacia el

¹⁶ <https://www.ossila.com/pages/iv-curves-measurement>

cuarto cuadrante, como se ilustra en la Fig. 5.2(b). Esto convierte a la celda en un dispositivo activo, capaz de entregar energía al circuito al que esté conectada.

Es importante destacar que, para efectos prácticos, la curva se refleja sobre el eje del voltaje, adoptando la forma mostrada en la Fig. 5.3. A partir de esta curva I-V se pueden obtener varias propiedades importantes de las celdas solares: El voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}) se determinan por los puntos donde la curva intercepta los ejes X e Y, respectivamente.

Además, el gradiente de la curva en estos puntos de intersección permite estimar los valores de la resistencia en serie y en paralelo de la celda. [36].

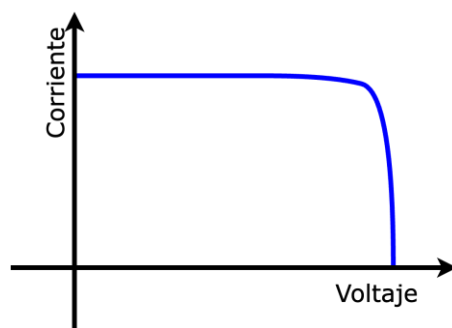


Fig. 5.3: Curva I-V típica de un MFV.

La prueba de medición de curva I-V se usa para conocer las características eléctricas del MFV, siendo necesaria para determinar la potencia que se puede extraer del dispositivo y compararla con los niveles indicados en su etiqueta. Con ello es posible conocer la degradación en términos de potencia del MFV. Esta medición debe ser realizada acorde al estándar IEC 60904-1, usando instrumentos tales como trazadores de curva I-V.

Un trazador de curva I-V es un dispositivo electrónico que produce un barrido de voltaje, que es aplicado al módulo fotovoltaico bajo inspección, el cual responde con una intensidad de corriente acorde al nivel de voltaje, y a la irradiancia y temperatura de operación a la que está sometido. Los MFV por probar deben de haber aprobado previamente una inspección visual y prueba de aislación. Adicionalmente, ambos cables del módulo deben de estar en buen estado y contar con sus respectivos

conectores MC4 (o equivalente). Este procedimiento es aplicable a módulos monofaciales y bifaciales.

5.4 TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La radiación electromagnética que interactúa con la materia también alcanza un estado de equilibrio térmico con una temperatura definida, este tipo de radiación electromagnética es llamado radiación térmica. Un cuerpo que se encuentra en equilibrio térmico se encuentra constantemente emitiendo y absorbiendo radiación. Aquel cuerpo que es un perfecto absorbente de radiación se denomina cuerpo negro, y es con este cuerpo teórico con el que se comparan los objetos reales para estudiar sus emisividades [37].

La termografía es una técnica que utiliza cámaras termográficas para detectar dicha radiación electromagnética, la cual se encuentra en el rango infrarrojo, y producir imágenes a partir de esta radiación térmica. A medida que la temperatura de un objeto aumenta, también lo hace la cantidad de radiación térmica que este irradia, lo que significa que mediante termografía es posible observar las variaciones de temperatura. Al utilizar una cámara termográfica aquellos cuerpos que generan calor contrastan con el fondo a temperatura ambiente, lo que permite aplicar termografías sin importar la hora del día.

Es posible distinguir entre termografías activas y pasivas. La termografía pasiva es aquella que utiliza la temperatura natural de un objeto para crear una imagen, mientras que la activa involucra calentar al objeto para luego observar como este calor se disipa [38]

En un módulo fotovoltaico promedio, entre un 16-22% de la radiación solar es absorbida y convertida en electricidad, mientras que el resto se disipa en forma de calor, o bien no es absorbida pero reflejada de vuelta al entorno. Uno de los factores que inciden en el calentamiento son las áreas de panel que no son celdas fotovoltaicas, ya que estas zonas no generan electricidad y toda la energía que absorben la disipan como calor. Esto se ve influenciado fuertemente por el material y color de la capa

trasera del MFV. Adicionalmente, la radiación infrarroja en rango espectral entre 700-1200 nm contribuye a la generación de energía eléctrica mientras que el resto al calentamiento del dispositivo FV.

Por otra parte, el punto de operación del módulo fotovoltaico también afecta en el calentamiento de este mismo, ya que toda energía eléctrica que el módulo no entrega es disipada sobre este mismo [39, 40].

Los módulos fotovoltaicos por probar deben de haber aprobado previamente una inspección visual y una medición de aislación. Adicionalmente, ambos cables del módulo deben de estar en buen estado y contar con sus respectivos conectores MC4. Los módulos deben de tener su cara frontal limpia y libre de suciedades. Este procedimiento es posible de aplicar en todo tipo de MFV basado en tecnologías del silicio.

Basado en el estándar IEC 62446-3 [41], el ensayo de termografía (IRT) permite determinar puntos o áreas calientes en el MFV, lo cual puede ser un indicador de una falla grave.

5.5 ELECTROLUMINISCENCIAS

La teoría de bandas explica la conductividad de los materiales identificando la existencia de un nivel de energía mayor, ubicado por sobre los orbitales de valencia, denominado banda de conducción. Aquellos electrones ubicados en esta banda son capaces de moverse libremente en ciertos niveles de energía del material.

Existe una banda prohibida (bandgap) entre la última banda de valencia y la primera banda de conducción, representando el ancho de esta la energía necesaria para que el electrón pueda liberarse y pasar a la banda de conducción. Luego que el electrón es excitado y se desplaza en la banda de conducción debe de volver a las bandas de valencia. Al ocurrir la recombinación radiativa, el electrón libera la energía remanente en forma de fotón, cuya energía está directamente relacionada con el ancho de la banda prohibida, y de esta energía depende la longitud de onda (color) de este fotón.

Dependiendo del material, la energía necesaria aumenta o disminuye. En el caso de metales, la banda prohibida es irrelevante. Para los materiales aislantes, el bandgap es muy alto como para liberar electrones usando energía solar. Así, las celdas fotovoltaicas son fabricadas con materiales semiconductores, con una banda prohibida intermedia, emitiendo luminosidad al ser excitadas por una fuente externa, ya sea eléctrica o lumínica. En el caso particular del silicio, dicha luminosidad es emitida en el espectro de los infrarrojos, entre unos 950 nm a 1300 nm [42], haciéndola invisible al ojo humano, y debiendo de ser captadas por cámaras capaces de detectar luz en estas frecuencias.

Por otra parte, debido a que las celdas no están optimizadas para la emisión de dicha luminosidad (dopaje, construcción, etc..) la luz emitida es débil, haciéndose esta más difícil de captar.

Basado en el estándar IEC 60904-13, el ensayo de electroluminiscencia (EL) permite complementar al ensayo de IRT para determinar ciertas fallas y degradaciones en el MFV que podrían llegar a ser graves.

El procedimiento, a grandes rasgos, corresponde a excitar eléctricamente a un módulo fotovoltaico, utilizando una fuente externa de CC, y fotografiarlo utilizando una cámara infrarroja, todo esto en una habitación completamente oscura para evitar el ruido ambiente y poder captar la luminosidad proveniente del módulo fotovoltaico con una SNR lo más alta posible.

Los módulos fotovoltaicos por probar deben haber aprobado previamente una inspección visual, prueba de aislación, termografía y medición de curva I-V. Adicionalmente, ambos cables del módulo deben estar en buen estado y contar con sus respectivos conectores MC4. Cabe destacar que este procedimiento está diseñado específicamente para módulos basados en tecnologías del silicio, tanto monofaciales como bifaciales.

6 DECOMISIONAMIENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA

El decomisionamiento de módulos fotovoltaicos (MFV) de segunda vida es el proceso de desinstalación, manejo y disposición final de estos módulos cuando ya no pueden cumplir con sus funciones de generación de energía de manera efectiva o segura. Este proceso incluye varias etapas críticas, cada una con su propio enfoque para garantizar la seguridad, sostenibilidad y cumplimiento regulatorio. A continuación, se describen los aspectos clave:

6.1 RETIRO DE MFV EN OPERACIÓN

Cuando un MFV presente una falla, ya sea detectada mediante una inspección visual, termografía o medición de la curva I-V, y se decida retirarlo del SFV, se recomienda registrar la información siguiente:

- a) Código de barra del MFV¹⁷
- b) Instalación o Planta de la cual fue retirado (procedencia).
- c) Ubicación del MFV dentro de la planta (cuadrante/string/posición dentro del string). Esto permite identificar si el MFV fue removido de su instalación original y evaluar el impacto de las condiciones ambientales.
- d) Causa del retiro para su posterior clasificación durante el almacenamiento (Por ejemplo: punto caliente, pérdida cable, conector dañado entre otros).
- e) Fecha del retiro.

Se recomienda, como información complementaria, escribir sobre el marco metálico b), c) y e), con un medio rotulador resistente a la abrasión.

¹⁷ Se refiere al número de serie del MFV.

Se debe recordar que todo MFV retirado es un potencial MFV de segunda vida, no un desecho, y que una correcta manipulación es fundamental para evitar daños que coartarían su potencial de reutilización.

6.1.1 Recomendaciones para la manipulación de MFV

Para evitar accidentes y daños en los MFV se recomienda:

- **Transportar los MFV entre al menos dos personas.** Los módulos fotovoltaicos suelen tener una longitud de 1.8 m y un ancho de al menos 1.0 m, con un peso superior a los 20 kg. Manipularlos entre dos personas reduce los riesgos de accidentes laborales y disminuye la posibilidad de que los módulos sufran daños por golpes o caídas.
- **Manipular los MFV con guantes antideslizantes**, sujetándolos por el marco metálico. En el caso de módulos vidrio-vidrio, se recomienda el uso de ventosas para evitar caídas o cortes debido a deslizamientos.
- **Recoger y asegurar los cables del MFV antes de manipularlo.** Esto ayuda a prevenir accidentes y daños en los cables o conectores. Es importante asegurarse de que los conectores y cables no sean pisados, aplastados o arrastrados, para evitar que se enganchen con la estructura durante el montaje.
- **No apoyarse ni colocar objetos sobre el MFV retirado**, para evitar daños en el módulo. En la Fig. 6.1 y Fig. 6.4, se pueden ver ejemplos.
- **Evitar apoyar de manera de inestable los MFV, mientras son manipulados.** Apoyar los MFV en superficies inclinadas o en áreas con ráfagas de viento puede provocar que los módulos caigan y se golpeen, como se muestra en la Fig. 6.2.

La Fig. 6.3 muestra la forma correcta de transportar los MFV.



Fig. 6.1: MFV siendo transportado con un inversor (en su caja) apoyado sobre él. ¹⁸



Fig. 6.2: MFV apoyados de manera inestable.



Fig. 6.3: Instaladores transportando un MFV entre dos personas. ¹⁹



Fig. 6.4: Instalador parado sobre MFV y transportando un MFV de manera incorrecta ²⁰

6.2 ALMACENAJE DE MFV

Una vez retirados de las plantas fotovoltaicas, los MFV deben almacenarse en condiciones adecuadas para su posterior traslado y pruebas. Esto ayuda a prevenir

¹⁸ <https://winaico.com/guides/handling-tips/>

¹⁹ ArtistGNDphotography / getty images

²⁰ <https://newenglandcleanenergy.com/energymiser/2015/10/30/the-good-the-bad-and-the-ugly/>

daños adicionales y reduce los tiempos de transporte, clasificación y pruebas previas a su reutilización en un segundo ciclo de vida. Para una mejor clasificación, se recomienda lo siguiente:

6.2.1 Clasificación y almacenaje en base al tipo de falla

Considerando el motivo de retiro del MFV de la instalación e independiente de su posible uso tanto activo para generación de energía como pasivo, se recomienda lo siguiente:

- **Generar pilas de MFV de nomás de 20 unidades**, organizadas según el tipo de falla: puntos calientes; desprendimiento de cables o daños en conectores y daños leves en los marcos metálicos.

Estas pilas deben organizarse con los MFVs colocados con el vidrio hacia arriba y sujetos con zunchos. Idealmente, se deben utilizar separadores entre los módulos para evitar daños adicionales. Si el daño del MFV lo hace inadecuado para una segunda vida, debe apilarse por separado. Algunos de los daños graves que descalifican a un MFV para su reutilización son:

| | |
|--|--|
| Rotura del vidrio frontal | : No es reparable y compromete la integridad estructural del MFV (ver Fig. 6.5). |
| Rotura del backsheet | : Dependiendo de su magnitud, puede ser reparable. Si la rotura afecta una superficie mayor al tamaño de una celda, el MFV no es apto para una segunda vida y deberá ser separado del proceso (ver Fig. 6.6). |
| Marcas de quemaduras | : Cualquier marca de quemadura en las celdas, metalizaciones o en el backsheet indica puntos calientes peligrosos, los cuales no son reparables y representan un riesgo para la operación del MFV (ver Fig. 6.7). |
| Marcas de corrosión en la metalización o celdas | : Cualquier signo de corrosión impacta negativamente la generación de energía y puede causar puntos calientes en las áreas afectadas. Si la corrosión interna cubre más del 10% de la superficie del módulo, este se considera no apto para su reutilización y debe ser separado del proceso (ver Fig. 6.8). |

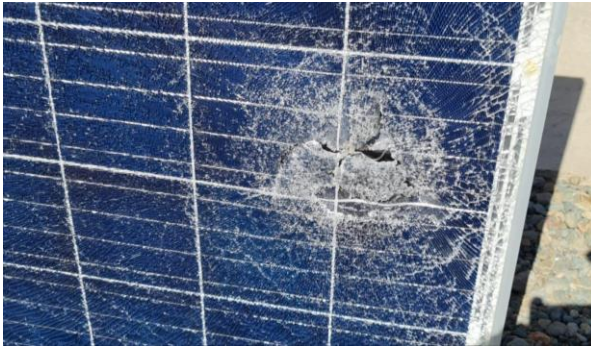


Fig. 6.5: MFV con vidrio frontal roto

Fig. 6.6: MFV con capa trasera (*backsheet*) roto.

Fig. 6.7: MFV con marcas de quemadura.



Fig. 6.8: MFV con marcas de corrosión en la metalización.

NOTA

El límite de 20 unidades se basa en las cargas mecánicas máximas establecidas por la norma IEC 61215-2, que evalúa la resistencia del módulo ante presiones estáticas equivalentes a 2400 Pa (uso estándar). En función del peso individual del módulo (que puede variar entre 20 y 40 kg) la cantidad máxima de unidades apilables sin exceder estas cargas puede fluctuar en valores cercanos a 20 módulos (considerando un área típica de 1.7 m²). Por ello, este valor debe considerarse una referencia general, debiendo ajustarse según el peso específico del módulo y los lineamientos del fabricante, aplicando siempre criterios de seguridad para evitar microfisuras o deformaciones por presión prolongada.

Para aquellos MFVs que son aptos para reutilización, es fundamental almacenarlos adecuadamente para evitar que sufran daños adicionales tras su retiro. A fin de evitar que los módulos reparables se descarten debido a daños adicionales, se recomienda tener en cuenta lo siguiente:

- a) **Almacenamiento en lugares secos y protegidos:** Es importante que los módulos se almacenen en áreas donde estén resguardados de la humedad, el polvo y otros elementos que puedan afectar sus componentes. Además, los módulos deben estar protegidos contra golpes y movimientos bruscos, especialmente durante el transporte y manipulación dentro del almacén.
- b) **Uso de separadores entre módulos:** Colocar separadores entre los MFV apilados evita el contacto directo entre ellos, reduciendo el riesgo de daños por fricción o presión.
- c) **Apilado cuidadoso:** Los MFV, al ser embalados para su transporte, se colocan de manera vertical u horizontal (apoyados sobre su costado más largo), separados entre sí por láminas de cartón en la parte vertical y papel en las caras frontales. Sin embargo, los materiales de embalaje utilizados comúnmente se descartan después del transporte y, por lo tanto, no están disponibles para el almacenamiento de los MFV retirados de las plantas. Por esta razón se recomienda reutilizar materiales de embalaje cuando sea posible, utilizar nuevos materiales de protección, Implementar embalaje reutilizable, embalaje adecuado para transporte prolongado.

Para el apilamiento correcto, se recomienda lo siguiente:

- a. **Apilarlos en forma vertical,** Se recomienda apilar los MFV en forma vertical cuando se disponga de cajas u otro material adecuado para su transporte (véase la Fig. 6.9 como ejemplo). Este método de almacenamiento ayuda a reducir los problemas asociados a sobrecargas por el propio peso de los módulos, evitando la aparición de grietas en las celdas y la rotura del vidrio frontal. Además, durante el almacenamiento es importante asegurarse de que los cables y conectores no sean enganchados o aplastados, para prevenir daños en estos componentes.



Fig. 6.9: MFV almacenados en vertical en terreno para su posterior instalación²¹.

- b. **Apilarlos en forma horizontal sobrepuestos:** Se recomienda no apilar más de 20 módulos para evitar dañar aquellos que se encuentren en la parte inferior de la pila. Aunque las resistencias mecánicas pueden variar según el modelo del MFV, una pila de 20 módulos proporciona un buen equilibrio entre la cantidad de MFV por pila y el estrés mecánico que soportan los módulos. Además, este límite ayuda a prevenir el deslizamiento de los MFV durante el transporte. Por ejemplo, una pila de 45 módulos, como se muestra en la Fig. 6.10, presenta un riesgo considerable tanto para los MFV como para su manipulación, debido al número excesivo de módulos y al apilamiento desigual, lo que en algunos casos ejerce una presión excesiva sobre la cara frontal de ciertos MFV.

²¹ <https://www.longi.com/en/news/6739/>



Fig. 6.10: MFV apilados en cantidades excesivas y de mala manera.

c. **Apilarlos de manera uniforme:** Es fundamental que, al apilar los MFV, estos se apoyen marco con marco (véase Fig. 6.11). Aunque la cara frontal del MFV tiene una buena resistencia mecánica, no está diseñada para soportar grandes presiones. Apoyar un módulo directamente sobre el vidrio puede causar daños en las celdas. Si se apilan más de 20 MFV, esto puede generar una presión excesiva que provoque la rotura total del vidrio, como se muestra en la Fig. 6.12.



Fig. 6.11: MFV apilados de manera uniforme.



Fig. 6.12: MFV al fondo de una pila con su vidrio frontal roto debido al exceso de carga ejercido sobre su cara frontal.

NOTA: El material de los marcos (aluminio anodizado) presenta un bajo coeficiente de fricción entre sí, lo que provoca que la pila de módulos se desalineé con facilidad, ya

sea durante la manipulación de los MFV o durante su transporte. Para evitar esto, se recomienda utilizar **esquineros**, ya sean de cartón o plástico, al apilar los MFV (véase Fig. 6.13). Estos esquineros permiten alinear los MFV con mayor precisión y reducir el deslizamiento entre ellos.



Fig. 6.13: MFV comenzando a ser apilados utilizando esquineros de cartón.

- **Evitar que los cables del MFV queden atrapados entre las pilas:** Los cables deben quedar dentro del espacio existente entre los MFVs cuando estos se apilan. De lo contrario, el cable podría quedar atrapado entre dos módulos (ver Fig. 6.14), lo que dañaría el aislamiento y el conductor, generando presión que podría llegar a cortar los cables si hay suficiente peso sobre los módulos, algo que suele ocurrir con los MFV ubicados en la parte inferior de la pila.



Fig. 6.14: Cables atrapados entre 2 MFV dentro de una pila

6.3 TRANSPORTE DE MFV

Durante el transporte, la tasa de daños que sufren los MFV depende principalmente de dos factores:

- **Embalaje adecuado de los MFV:** Es crucial evitar el deslizamiento y daños por golpes.
- **Condiciones del camino y el vehículo de transporte:** Especialmente cuando los MFV están apilados horizontalmente y sin el uso de cajas adecuadas o esquineros protectores.

Para realizar un embalaje correcto, se recomienda lo siguiente:

6.3.1 Pallet con las dimensiones correctas y en buen estado

El área del pallet debe ser mayor al MFV transportado, por esta razón el pallet debe soportar idealmente toda el área del MFV. Si el pallet es demasiado pequeño, el peso se concentrará en un área reducida, lo que incrementa el estrés mecánico sobre los módulos. Por otro lado, un pallet demasiado grande puede dificultar el transporte, especialmente si los MFVs están amarrados junto con el pallet. Se recomienda sujetar

los MFVs por separado del pallet para evitar desplazamientos y esfuerzos adicionales sobre las bases de los módulos.

Además, un pallet agrietado o deteriorado puede romperse durante el transporte, lo que podría ocasionar la caída y el daño de los módulos fotovoltaicos (MFV). La Fig. 6.15 presenta un ejemplo de MFVs paletizados de forma incorrecta, mientras que la Fig. 6.16 exhibe una buena práctica de MFV correctamente paletizados.



Fig. 6.15: Forma incorrecta de paletizar MFVs.



Fig. 6.16: Forma correcta de paletizar de MFVs.

6.3.2 Asegurar la pila de MFV

Incluso siguiendo todas las recomendaciones para el apilado de módulos fotovoltaicos (MFV), existe el riesgo de que estos se desplacen durante el transporte. Para minimizar este riesgo y los daños asociados, es fundamental sujetar los MFV entre sí. Esto puede lograrse mediante el uso de una caja, envolviendo la pila con cartón, o utilizando algún tipo de amarre, como zunchos, eslingas o cuerdas.

La solución más sencilla y eficiente es emplear zunchos (metálicos o plásticos), colocando idealmente dos vueltas a lo largo y una a lo ancho para garantizar la estabilidad durante el transporte (véase Fig. 6.17).

La Fig. 6.18 presenta un ejemplo donde un pallet de MFV fue asegurado con zunchos, pero estos no fueron correctamente tensados, y no se utilizaron esquineros, lo que permitió que los MFV se desplazaran durante el transporte.



Fig. 6.17: MFV correctamente paletizados siendo recogidos por un montacargas



Fig. 6.18: Pila de MFV con zunchos sueltos.

6.4 IMPLICANCIAS SOBRE LA SALUD HUMANA

Un módulo fotovoltaico está principalmente compuesto de elementos que evitan que su principal componente, la celda fotovoltaica, se deteriore aceleradamente por las inclemencias del entorno, es decir, la celda FV está encapsulada. Los componentes usados para encapsular las celdas FV son usualmente polímeros (EVA, POE, PVDF), vidrio templado bajo en hierro, marco de aluminio, y siliconas para sellar. A su vez, las celdas FV se conectan eléctricamente entre ellas usando cintas de cobre revestidas con aleación de estaño SnPb 60/40 u otra similar. Mientras el módulo fotovoltaico se encuentre encapsulado, no presenta riesgos significativos, ya que su estructura está diseñada para proteger los materiales internos y garantizar la seguridad tanto durante su operación como en su manipulación.

Este encapsulamiento evita la liberación de sustancias potencialmente peligrosas, como plomo en soldaduras, mientras no se rompa la integridad estructural del módulo. Por lo tanto, siempre que el encapsulante permanezca intacto, el módulo no supone riesgos para la salud o el medio ambiente. Sin embargo, si el material encapsulante tiene roturas o daños que comprometan su integridad, es necesario considerar las recomendaciones de la sección 9.

6.4.1 Riesgos a la salud humana en el trabajo continuo con paneles fotovoltaicos

Si bien la energía solar fotovoltaica es una de las formas más limpias y sostenibles de producción de energía, existen impactos negativos que se deben tener en cuenta para prevenir en temáticas relacionadas con la seguridad y la salud en el trabajo (SST).

Desde su fabricación, transporte, instalación, mantenimiento hasta el desmantelamiento y el reciclaje, son muchos los grupos de trabajadores y/o personas que tienen contacto con MFV. Por lo tanto, es importante prestar la debida consideración a la SST, ya que se debe prevenir riesgos potenciales posteriores, en las distintas fases del ciclo vital, estos relacionados con la seguridad y salud en el trabajo, con especial enfoque en las mujeres, personas mayores, personas inmunodeprimidas y/o con tratamientos para cáncer.

Los principales riesgos en el trabajo con MFV están asociados con el trabajo en altura, y estos habitualmente tienen relación con problemas de acceso, caída de objetos, caídas, resbalones, tropezones, entre otros; los cuales pueden generar desde lesiones hasta trastornos musculoesqueléticos (TME); también siempre está el riesgo de trabajar cerca de líneas de alta tensión, los riesgos eléctricos, por ejemplo, si el sistema eléctrico no funciona correctamente o los revestimientos protectores de los componentes están dañados.

Durante la producción de MFV, la salud de los trabajadores puede sufrir efectos negativos debido a una serie de materiales y productos químicos, los cuales están relacionados con la toxicidad, la corrosividad, la inflamabilidad y la explosividad de los materiales. Las cantidades y los tipos de productos químicos empleados son distintos en función del tipo de célula que se esté fabricando, sin embargo, no podemos perder de vista que las juntas de soldadura entre los paneles pueden contener metales pesados, como el plomo.

6.4.2 Liberación de sustancias potencialmente peligrosas en paneles fotovoltaicos:

Los efectos sobre la salud de las personas, siempre va a depender de la exposición a cualquier sustancia peligrosa, y esto comprende la dosis, la duración y el tipo de exposición, la presencia de otras sustancias químicas, así como de las características biológicas y los hábitos de la persona.

La liberación de sustancias potencialmente peligrosas como el plomo, puede ocurrir durante el proceso de fabricación, instalación, mantenimiento o reciclaje de MFV en desuso o en mal estado, y puede tener efectos en la salud humana por exposición crónica (constante), en personas que los manipulan de manera continua.

Dentro de las sustancias potencialmente peligrosas en MFV, también podemos considerar el arseniuro de galio y el telurio de cadmio, los cuales pueden ser peligrosos para la salud si se manejan incorrectamente, por lo que es responsabilidad de los fabricantes asegurar medidas de seguridad adecuadas para proteger a los trabajadores y garantizar una disposición segura de los materiales y subproductos. Esta guía no aborda este tipo de tecnologías concentrándose sólo en los MFV compuestos por silicio monofaciales y bifaciales.

6.4.3 Efectos en la salud humana por exposición crónica al plomo:

El plomo puede entrar al cuerpo por inhalación, ingestión, contacto con cosas contaminadas o inclusive por aguas contaminadas. El plomo es un metal pesado caracterizado por ocasionar efectos tóxicos sobre el tracto gastrointestinal, sobre el sistema renal y sobre el SNC y periférico. El plomo es neurotóxico y puede causar deficiencias cognitivas, trastornos del desarrollo, hipertensión, problemas renales y daño al sistema nervioso. Si consideramos mujeres y hombres en etapa reproductiva, puede significar riesgos como: muerte fetal intraútero, nacimientos prematuros y daños a los órganos reproductores.

6.4.4 Efectos en la salud humana por exposición crónica la cadmio:

El cadmio, es un metal que se encuentra en la corteza terrestre, asociado con minerales de cinc, plomo y cobre.; La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el cadmio es carcinogénico en seres humanos.

El riesgo más alto de exposición ocurre en procesos que involucran calentar materiales que contienen cadmio, como por ejemplo en la fundición de minerales y galvanoplastia.

El riesgo dependerá del lugar de trabajo.

Una ruta importante de exposición es a través de inhalación de polvos y vapores o de la ingestión de cadmio en alimentos, cigarrillos o desde las manos contaminadas.

La exposición se puede controlar mediante el uso de equipo de protección personal, buenas prácticas de higiene industrial, y el control y la reducción de las emisiones de cadmio.

6.4.5 Ensuciamiento de los paneles fotovoltaicos y componentes microbiológicos.

Es importante considerar que la superficie de los módulos fotovoltaicos, junto con el material depositado y los factores atmosféricos locales, propician condiciones favorables para la colonización de microorganismos, es por ello que “la suciedad de los módulos posee un componente microbiológico, el cual se ha adaptado incluso a condiciones extremas del desierto, donde los géneros *Arthobacter*, *Kocuria*, *Dietzia*, *Pontibacter*, *Noviherbaspirillum*, *Massilia*, *Hymenobacter*, entre otros; han sido detectados como diversidad microbiana presente en el ensuciamiento depositado en módulos fotovoltaicos.” (Ortiz et al; 2024).

Las bacterias que se han mencionado anteriormente pueden llegar a generar riesgos en la situación de salud de las personas, con especial énfasis en personas inmunodeprimidas, personas mayores y personas con tratamientos para cáncer, por ejemplo: *Arthobacter*, que principalmente genera infecciones en torrente sanguíneo (bacteriemia), en personas con inmunidad deficiente, entre ellas personas con VIH mal

controlado, personas con SIDA, cáncer, edad avanzada y mieloma múltiple bajo tratamiento de quimioterapia. (LiSY et al, 2021).

Es importante considerar que gran parte de los microorganismos encontrados en la microbiota de los MFV, según estudio de Ortiz et al (2024), son patógenos potenciales que se han relacionado con infecciones en humanos, manifestaciones clínicas graves, que pueden llegar a ser un problema de salud emergente, por lo que se sugiere prestar más atención para el manejo adecuado y especialmente en la prevención, ya que la mayoría de ellos son patógenos que se han descrito por años como bacterias de la flora habitual, sin embargo, existen riesgos potenciales en distintas etapas del ciclo vital o inclusive en personas con los riesgos antes mencionados.

Determinar los escenarios óptimos para los ciclos de limpieza para mantener una alta reflectividad y eficiencia es un gran desafío, y lo es más aún si consideramos no sólo la eficiencia energética, sino que también la prevención de potenciales riesgos en salud para los colaboradores/operadores continuos de estos, siendo ideal que se generen sistemas de limpieza automatizados, como limpiadores robóticos o mecánicos, que puedan ofrecer un enfoque sistemático y eficiente para mantener limpias las superficies del reflector a intervalos óptimos, además de los respectivos procesos enfocados en la prevención en SST.

6.4.6 Recomendaciones para la SST en el trabajo continuo con MFV

El trabajo con módulos fotovoltaicos de segunda vida implica riesgos que deben ser gestionados adecuadamente, especialmente en actividades de limpieza, diagnóstico y reinstalación. Estos riesgos se relacionan con la posible liberación de sustancias peligrosas desde los materiales que componen los módulos, así como con la exposición a agentes biológicos y condiciones ambientales extremas. En este contexto, resulta fundamental establecer medidas preventivas que consideren tanto la naturaleza de los materiales involucrados como la frecuencia e intensidad de la exposición.

En función de los riesgos identificados en esta sección, se recomienda:

- Minimizar la exposición directa a módulos dañados o deteriorados mediante protocolos de manipulación segura.
- Implementar rutinas de limpieza y mantenimiento que reduzcan la acumulación de polvo, microorganismos y contaminantes en la superficie de los módulos.
- Evitar acciones que puedan provocar liberación de partículas o compuestos peligrosos, como roturas, cortes o manipulación sin protección.
- Priorizar la capacitación del personal técnico en riesgos específicos asociados a la manipulación de MFV de segunda vida, así como en procedimientos de actuación ante incidentes.
- Establecer condiciones de trabajo que consideren los factores ambientales del entorno (como radiación, temperatura y viento), especialmente en zonas desérticas o de alta irradiancia.

Los elementos de protección personal requeridos para la manipulación de módulos en función de los materiales y sustancias potencialmente peligrosas están especificados en el capítulo 9.3 "Medidas de protección personal", donde se detallan las protecciones necesarias ante exposición a vidrio, plomo, compuestos de soldadura, encapsulantes, entre otros.

7 RECOMENDACIONES PARA INSTALACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON MÓDULOS DE SEGUNDA VIDA

Los MFV de segunda vida, tras ser sometidos a las pruebas descritas previamente en esta guía, pueden clasificarse en una de las siguientes categorías:

Apto para generación

Estos módulos no presentan fallas o solo tienen fallas menores que no generan puntos calientes ni comprometen la integridad estructural del MFV.

No apto para generación, pero en buen estado mecánico

Estos módulos tienen fallas graves para ser usados de forma segura en la generación de energía eléctrica, pero mantienen una buena condición mecánica. Este tipo de MFV puede reutilizarse en aplicaciones no energéticas, como barreras acústicas, estructuras agrícolas o sombreadores.

Destinado al reciclaje

Son los MFV que no cumplen con los criterios de las dos categorías anteriores y, por lo tanto, no tienen posibilidad de reutilización. Estos módulos deben ser enviados a procesos de reciclaje.

En el caso de reutilización de MFV para sistemas fotovoltaicos (SFV), todos los módulos recibidos deberán estar clasificados como "Apto para generación".

7.1 INSPECCIÓN VISUAL EN TERRENO

Cuando se manipulen MFV de segunda vida para su instalación en un SFV, es siempre recomendable realizar una inspección visual para verificar su buen estado. Esta inspección debe ser rápida y enfocarse en detectar fallas que puedan comprometer la seguridad operativa del MFV. En general, se debe revisar lo siguiente:

- **Conectores:** Verificar si presentan daños o corrosión. Si se detecta alguna de estas condiciones, el conector debe ser reemplazado antes de que el MFV entre en operación.



Fig. 7.1: Conector MC4 sin daño.



Fig. 7.2: Conector MC4 con daño visible.

- **Cables:** Buscar signos de rotura en la aislación, corrosión o aplastamientos que sugieran posibles daños en los conductores. Si se detecta alguna de estas condiciones, el cable debe ser reemplazado o la parte problemática removida, si es posible, antes de la operación del MFV.

Fig. 7.3: Cable MFV con daño visible por apriete²².

- **Caja de conexión (Junction box):** Revisar si hay roturas o si está comenzando a desprenderse la caja del MFV. Si es así, la caja de conexiones (Jbox) debe ser reemplazada antes de que el MFV entre en operación.

²² Elaboración propia



Fig. 7.4: Junction box con evidente daño por quemadura (izquierda) y daño en la tapa (derecha)²³

- **Capa base (Backsheet):** Verificar si hay roturas que expongan las áreas activas del módulo, o una acumulación de rayaduras y roturas que afecten más del 10% de la superficie del MFV.



Fig. 7.5: Capa base con daño por golpe (izquierda) y daño por quemadura (derecha)²⁴

- **Vidrio:** Cualquier tipo de rotura en el vidrio descalifica al módulo para su uso.

²³ Elaboración propia.

²⁴ Elaboración propia.



Fig. 7.6: Daño por golpe de en MFV²⁵.

Es importante considerar que, al tratarse de MFV de segunda vida, es probable que presenten fallas visibles, como decoloración del encapsulante o del backsheet, marcas tipo "snail trail"²⁶, rayaduras en el vidrio o abolladuras leves en el marco. Estas fallas deben haber sido evaluadas durante el proceso de inspección para determinar su potencial de reutilización, por lo que su presencia no impide que el MFV sea instalado para generación.

7.2 RECOMENDACIONES PARA MONTAJE

Durante el proceso de montaje y desmontaje, los módulos fotovoltaicos (MFV) son manipulados repetidamente, lo que los hace susceptibles a sufrir daños debido a malas prácticas o descuidos por parte de los instaladores. Estos daños pueden variar desde leves, como pequeños rayones o abolladuras en el marco, hasta críticos, que afectan tanto al módulo como a la instalación en general. Entre los daños críticos se incluyen la generación de puntos calientes provocados por daños en las celdas, los cables o los conectores. Un ejemplo de una mala práctica durante el proceso de montaje se ilustra en la Fig. 7.7.

²⁵ Elaboración propia

²⁶ Traza de caracol



Fig. 7.7. Conectores siendo pisados durante su manipulación para el montaje²⁷

Además de las recomendaciones de manipulación mencionadas, es fundamental asegurarse de que, durante el montaje de los módulos fotovoltaicos (MFV) en la estructura, estos no golpeen las partes sobresalientes de la misma. Asimismo, los módulos deben manipularse con sumo cuidado, evitando que se golpeen, azoten o caigan bruscamente al momento de posicionarlos para su anclaje.

7.2.1 Protección de los conectores MC4

Además de los daños físicos que los MFV pueden sufrir, como ser aplastados o rotos, es fundamental evitar que ingrese tierra o humedad en su interior. La entrada de tierra u otros tipos de suciedad puede aumentar la impedancia del contacto eléctrico entre los conectores y provocar micro arcos, lo que genera elevadas temperaturas y puede dañar los conectores, con el riesgo de causar incendios.

Por otro lado, la entrada de humedad acelera la corrosión de los contactos metálicos dentro de los conectores, lo que aumenta la impedancia de la conexión y reduce la tensión del arreglo (*string*). Esto puede generar puntos calientes, o incluso interrumpir el flujo de corriente si la corrosión es severa. Para prevenir estos problemas, se debe evitar arrastrar los cables por el suelo durante el transporte de los MFV, y los

²⁷ Elaboración propia

conectores deben estar cubiertos para impedir la entrada de elementos externos. Las tapas protectoras para conectores MC4 se muestran en la Fig. 7.8.



Fig. 7.8 Conectores MC4 con tapas (puestas y de demostración)²⁸

Se recomienda utilizar un soplador para limpiar los conectores antes de realizar la conexión, especialmente si estos han estado expuestos a las condiciones climáticas.

7.2.2 Manejo de cables de los MFV

Después de la instalación de los MFV y la conexión de las cadenas (*string*), es importante sujetar los cables de los módulos a la estructura mediante amarras plásticas, metálicas u otro sistema de sujeción adecuado (véase Fig. 7.9). Dejar los cables colgando (véase Fig. 7.10) genera un estrés mecánico sobre la conexión eléctrica en la caja de conexiones (*Jbox*), un problema que puede agravarse con los fuertes vientos. Además, en instalaciones con sistemas de seguimiento, los cables colgantes pueden engancharse en la estructura del seguidor (*tracker*), lo que es una falla común y puede llegar a arrancar completamente el cable.

²⁸ Risin Energy Co., Ltd.



Fig. 7.9 Cables sujetos al marco de los MFV mediante amarras plásticas

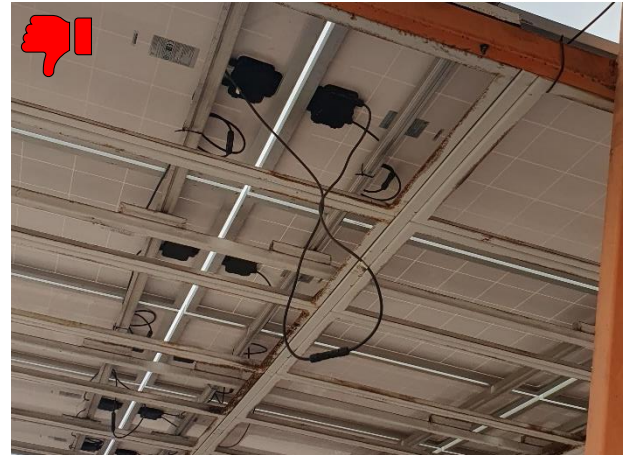


Fig. 7.10. MFV instalados y con sus cables colgando libremente²⁹

7.2.3 Conexión entre los MFV

Cuando algún material ingresa en los conectores, se dificulta que estos se aseguren correctamente. Una conexión deficiente puede provocar el sobrecalentamiento de los conectores, dañarlos e incluso, en casos extremos, generar un incendio. Además, existe el riesgo de un arco eléctrico si los conectores se desconectan mientras hay circulación de corriente. Durante la conexión de los conectores MC4, sus seguros interactúan y se fijan mutuamente, emitiendo un sonido audible (“clic”) que indica una conexión adecuada. Un par de conectores MC4 correctamente asegurados debe resistir un tirón manual sin soltarse, garantizando así la integridad y seguridad de la conexión.

Si los conectores se sueltan fácilmente o no se aseguran adecuadamente, se debe inspeccionar tanto el exterior (estado de los seguros) como el interior en busca de tierra u otros cuerpos extraños, y limpiarlos. Incluso si el conector parece estar en buen estado y limpio, pero aún no se asegura correctamente, debe ser reemplazado para evitar las fallas mencionadas. La Fig. 7.11 se muestra un ejemplo de conectores MC4 mal conectados.

²⁹ Elaboración propia



Fig. 7.11 Conectores MC4 conectados, pero no asegurados³⁰

7.3 USO DE MICROINVERSORES Y OPTIMIZADORES EN SFV

La implementación de microinversores en instalaciones fotovoltaicas es beneficiosa debido a su capacidad para aumentar la eficiencia de la energía generada. Al permitir que cada panel funcione de manera independiente, los microinversores facilitan el monitoreo y diagnóstico de problemas en módulos fotovoltaicos (MFV) específicos, lo que simplifica la reparación o sustitución de los módulos dañados. Además, son más fáciles de instalar y mantener en comparación con los sistemas centralizados.

Los optimizadores (ver Fig. 7.12) y los microinversores (ver Fig. 7.13) son tecnologías diferentes utilizadas en los sistemas fotovoltaicos (SFV) para mejorar su rendimiento. La elección de uno u otro dependerá de la demanda energética requerida por el usuario. Ambos dispositivos se instalan individualmente en cada módulo fotovoltaico con el fin de maximizar su eficiencia, evitando pérdidas de potencia causadas por sombreados o fallas en un módulo que, de otro modo, no afectarían al rendimiento general que llega al inversor principal.

³⁰ Elaboración propia.

La diferencia entre ambos recae principalmente en que los optimizador tiene salida en corriente directa, mientras que un microinversor tiene salida en corriente alterna.

7.3.1 Ventajas

- **Aumento de la eficiencia de la energía generada:** Al gestionar cada MFV de forma individual, se pueden compensar las pérdidas por desajuste (**mismatch**), causadas por sombra, deshomogeneidades o desgaste en un solo módulo, lo que incrementa la producción total de energía.
- **Monitoreo y diagnóstico de problemas en módulos individuales:** Esto facilita la reparación o sustitución de paneles dañados, ya que permite identificar fácilmente qué módulo presenta fallas.
- **Mayor flexibilidad en el diseño de la instalación:** Los microinversores permiten conectar MFV en diferentes orientaciones y ángulos, lo que optimiza la eficiencia del sistema fotovoltaico (SFV) en función de las condiciones del sitio.
- **Mejora en la disponibilidad del SFV:** Si un microinversor o un MFV falla, el impacto se limita únicamente a ese conjunto, en lugar de afectar a toda la instalación, garantizando un mayor rendimiento general del sistema.



Fig. 7.12 Optimizador SolarEdge S1200



Fig. 7.13. Microinversor NEP BDM300

7.3.2 Desventajas

Entre las desventajas del uso de microinversores y optimizadores se encuentran:

- **Mayor costo inicial:** Los microinversores son generalmente más costosos que los inversores centralizados, lo que aumenta el costo inicial de la instalación.
- **Mayor número de componentes electrónicos:** Al tener un microinversor por cada panel, hay más componentes electrónicos susceptibles de fallar. Esto puede incrementar los costos de mantenimiento y reemplazo a lo largo del tiempo.
- **Complejidad de instalación y mantenimiento:** Aunque facilitan la monitorización a nivel de módulo, tener un microinversor por panel puede hacer más compleja la instalación y el mantenimiento, especialmente en sistemas grandes. Reemplazar un microinversor defectuoso puede ser más complicado que en un sistema con inversor centralizado.
- **Vida útil limitada:** La vida útil de los microinversores puede ser menor que la de los paneles fotovoltaicos, lo que podría requerir su reemplazo antes de que el sistema completo llegue al final de su ciclo de vida útil.

- **Pérdida de eficiencia en climas extremos:** Los microinversores están expuestos directamente a condiciones climáticas adversas, lo que puede afectar su rendimiento en lugares con temperaturas extremas o alta humedad.

Optimizadores

- **Costo adicional:** Aunque los optimizadores suelen ser menos costosos que los microinversores, añaden un costo adicional al sistema en comparación con un sistema sin optimización a nivel de módulo.
- **Dependencia del inversor:** Los optimizadores requieren un inversor central, por lo que si el inversor falla, afecta a todo el sistema, a pesar de tener optimización a nivel de módulo.
- **Mayor complejidad del sistema:** Al igual que los microinversores, los optimizadores agregan más componentes electrónicos al sistema, lo que puede aumentar los puntos de fallo y, por tanto, los costos de mantenimiento a largo plazo.
- **Eficiencia limitada en comparación con microinversores:** Aunque los optimizadores mejoran la eficiencia al nivel del módulo, su rendimiento global suele ser ligeramente inferior al de los microinversores, ya que dependen del inversor central para la conversión final de energía.
- **Posibles problemas de compatibilidad:** No todos los inversores son compatibles con optimizadores, lo que puede limitar las opciones de configuración del sistema.

7.4 DISEÑO Y CONEXIONADO DEL CAMPO SOLAR

Al momento de diseñar un campo solar o incorporar MFVs de segunda vida a un sistema fotovoltaico (SFV) existente, es crucial considerar tanto la tensión como la corriente en el punto de máxima transferencia de potencia (MPPT) que pueden generar estos módulos. Idealmente, los MFVs deben combinarse de forma que todas las

cadena (*strings*) tengan la misma tensión, y que todos los módulos dentro de una misma cadena tengan capacidades similares de generación de corriente.

En cuanto a la tensión de trabajo, si se va a incorporar un MFV de segunda vida a un sistema existente, es importante asegurarse de que la tensión de la cadena siga siendo superior a la tensión de arranque del inversor. En caso de diseñar un sistema nuevo, la combinación de MFV en cada cadena debe garantizar que todas las cadenas tengan tensiones similares. El objetivo es evitar grandes diferencias de tensión entre cadenas, ya que esto puede generar corrientes internas no deseadas, causando pérdidas y un sobrecalentamiento de los MFV. Para evitar estos problemas, se recomienda incorporar diodos de bloqueo en el terminal positivo de cada cadena.

Además, se debe tener en cuenta el nivel de tensión permitido según la prueba de aislamiento del MFV. La tensión de operación del SFV no debe superar la tensión máxima permisible del módulo.

En lo que respecta a la corriente generada, si se está incorporando un MFV de segunda vida a un sistema existente, la corriente nominal del nuevo módulo debe ser lo más cercana posible a la de los MFV ya instalados. En un sistema nuevo, todos los MFV de una misma cadena deben tener corrientes de cortocircuito similares. Esto es crucial para evitar pérdidas por *mismatch*, las cuales pueden provocar el sobrecalentamiento de los MFV, ya que la máxima corriente que circula en una cadena (*string*) está limitada por el módulo con la corriente más baja.

7.5 PROTECCIONES REQUERIDAS PARA LA SEGURIDAD DE LA INSTALACIÓN

Las protecciones necesarias para las instalaciones de 2da vida, deben cumplir como mínimo lo exigido la normativa eléctrica chilena (Pliegos RIC³¹). La única consideración de seguridad adicional que se debe tener con este tipo de módulos es que, debido a la variación de potencias entre los MFV, se recomienda añadir un **diodo en serie** con cada *string* cuando se conectan en paralelo. El propósito de estos diodos es evitar la

³¹ <https://www.sec.cl/pliegos-tecnicos-ric>

circulación de corrientes internas entre los *strings*, que podrían originarse debido a las diferencias de tensión causadas por la incorporación de MFV con características diversas.

7.6 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Un MFV de segunda vida debe contar con una hoja de vida que registre de manera precisa las inspecciones visuales y fallas detectadas, su ubicación y magnitud al momento de realizar las pruebas para evaluar su estado. Esta información es fundamental para que, durante el mantenimiento rutinario, se pueda prestar especial atención a dichas fallas y monitorear su evolución.

Se recomienda, desde una perspectiva técnica, realizar inspecciones termográficas de manera semanal para detectar cualquier indicio de posibles focos de incendio que podrían ser causados por la evolución de microfisuras (*microcracks*) en el MFV. Esta recomendación está orientada a maximizar la seguridad operativa, aunque su viabilidad práctica y económica puede variar en función de las condiciones de cada instalación.

8 MANTENIMIENTO Y MONITOREO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON MÓDULOS DE SEGUNDA VIDA

Al igual que en los sistemas fotovoltaicos (SFV) tradicionales, los SFV que emplean MFVs de segunda vida requieren un mantenimiento periódico y un monitoreo constante para evaluar su generación. Este seguimiento es especialmente importante para recopilar información que retroalimente futuras instalaciones, permitiendo una mejora continua y garantizando la viabilidad de estos sistemas con componentes reutilizados. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para mantener la operatividad técnica de las instalaciones.

8.1 INSPECCIÓN VISUAL DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Complementando la información de diversos manuales y procedimientos desarrollados para sistemas fotovoltaicos, este documento se centra en las inspecciones básicas necesarias para los sistemas de segunda vida instalados en el norte de Chile. Estos sistemas enfrentan mayores exigencias debido a las condiciones desérticas y la alta radiación de la zona.

Para la inspección visual del sistema, se recomienda dividir esta actividad en:

- **Inspección a campo solar:** El enfoque está en la inspección visual de los MFVs de segunda vida, descrita detalladamente en este documento, junto con la verificación periódica de las estructuras y el ajuste de los pernos de sujeción de los MFVs a las estructuras. La frecuencia de estas revisiones depende de las condiciones ambientales, variando desde una inspección mensual en zonas con fuertes vientos y gradientes de temperatura hasta cada tres meses, según la ubicación de la instalación. Esta frecuencia deberá ajustarse de acuerdo con la planificación del mantenimiento anual. Se recomienda marcar las tuercas de los pernos para permitir una verificación visual rápida de cualquier movimiento en su posición.

- **Inspección a sistema de distribución de corriente continua (CC) y corriente alterna (CA):** El sistema de corriente continua incluye los conectores MC4, los cables de conexión y la caja de concentración de corriente continua (DC Box) en instalaciones superiores a 10 kWp. En cuanto a los sistemas de corriente alterna, estos se componen de conectores MC4, cables y canalizaciones, y una caja de protecciones previa a la conexión con la red. En configuraciones trifásicas, pueden incorporarse otros componentes antes de la conexión a la red, tales como transformadores, protecciones eléctricas, y desconectores, entre otros, según la potencia instalada. Estos sistemas deben someterse a una inspección visual cada tres meses o después de cualquier evento de falla que interrumpa la operación de la instalación. Entre los aspectos clave a verificar se destacan:
 - Verificación del estado de los cables, asegurando que se encuentren en condiciones óptimas, sin cortes, deterioros ni aplastamientos provocados por curvaturas excesivas o tensiones indebidas.
 - Inspección de los conectores MC4, los cuales deben mantenerse en condiciones óptimas. Señales de deterioro que requieren atención incluyen quemaduras en la cubierta, cortes o daños en el cable asociado al conector, así como conexiones deficientes que afecten la integridad de la unión entre las partes.
- **Sistema de conversión de energía (Inversor):** El inversor, por lo general, presenta una alta robustez cuando se opera adecuadamente. Para su mantenimiento, se recomienda lo siguiente:
 - Mantener los ductos de ventilación y disipadores limpios y libres de obstrucciones. No debe colocarse ningún tipo de caja o material en las proximidades del equipo que impida su ventilación natural.
 - Verificar la conexión de los conectores MC4 y los cables que enlazan el campo solar.
 - Inspeccionar la conexión de salida en corriente alterna.

- Comprobar la conexión de puesta a tierra de la carcasa al sistema de tierra eléctrica. La tierra debe mantenerse limpia y libre de obstrucciones por materiales, vegetación u otros residuos.
- Revisar las luces LED de operación del sistema. Es indispensable disponer de un diagrama o documento que explique el significado de cada luz y la frecuencia de su parpadeo.
- **Protecciones eléctricas:** Las protecciones eléctricas cumplen múltiples funciones, destacándose la protección tanto de las personas como de las instalaciones. Si están correctamente dimensionadas, estas protecciones deben despejar las fallas para prevenir daños a las personas y a la infraestructura. Las protecciones eléctricas se especifican conforme a la normativa técnica vigente (Pliegos RIC y la instrucción técnica RGR N°2/2024), y es necesario considerar varios aspectos importantes:
 - Las protecciones eléctricas están diseñadas para un número determinado de operaciones, tras el cual deben ser reemplazadas.
 - Las protecciones eléctricas no deben ser modificadas sin una revisión del diseño realizada por un profesional electricista.
 - Las protecciones eléctricas funcionan correctamente dentro de los márgenes de temperatura ambiental especificados en el diseño original. Variaciones en la temperatura externa pueden alterar el margen de operación de la protección.

8.2 LIMPIEZA Y CUIDADO ADECUADO

La limpieza y el mantenimiento adecuado de los sistemas fotovoltaicos tienen como objetivo maximizar la generación de energía y prolongar la vida útil de la instalación. Para alcanzar estos objetivos, se recomienda lo siguiente:

- **Limpieza de la superficie de generación de energía:** debe realizarse en la cara frontal para módulos monofaciales y en ambas caras, frontal y trasera, para módulos bifaciales. La limpieza puede realizarse en seco o con agua,

dependiendo de la frecuencia de mantenimiento establecida para las instalaciones.

- **Limpieza en seco:** recomendada para el mantenimiento diario, con el fin de evitar la formación de capas duras de suciedad causadas por la acumulación de humedad y material particulado presentes en el ambiente.
- **Limpieza con agua:** Se recomienda llevar a cabo esta limpieza con una periodicidad que varía entre mensual y semestral, según las condiciones ambientales de la ubicación de la instalación. El agua utilizada debe estar libre de impurezas, preferiblemente agua pura o desmineralizada. La necesidad de limpieza es evaluada anualmente, en función de los objetivos de generación eléctrica y la demanda de energía de la instalación.

8.3 MONITOREO DEL RENDIMIENTO Y EFICIENCIA

Es recomendable efectuar un monitoreo constante de las variables fundamentales de un sistema fotovoltaico, lo cual permite mantener información actualizada sobre la generación real de energía eléctrica, detectar fallas parciales o bajo rendimiento, y facilitar la planificación de los mantenimientos periódicos. Entre las variables que se recomienda registrar se incluyen:

- **Irradiación solar en la inclinación del SFV:** Esta medición, que requiere un piranómetro, se justifica en función del tamaño de la instalación. En áreas con múltiples instalaciones fotovoltaicas, se recomienda que al menos una incluya esta medición. Su propósito es evaluar si la generación eléctrica producida por el MFV de segunda vida corresponde al recurso solar disponible. Esta información es útil para planificar el mantenimiento y la limpieza de las instalaciones, así como para verificar la operación del sistema en caso de fallas o deterioro de los MFVs de segunda vida
- **Temperatura del MFV y ventilación de instalación:** Estos datos proporcionan información valiosa para evaluar el desempeño de la instalación y para

determinar la ubicación e inclinación óptima de futuras instalaciones en la misma área.

- **Tensión, corrientes y potencia de string o campo solar:** Esta información permite verificar el comportamiento eléctrico de los MFVs y la cantidad de energía real que generan en función del recurso solar disponible. Al comparar estos valores con la generación ideal calculada a partir de la irradiación solar, se pueden evaluar las pérdidas atribuibles a factores externos. Estos parámetros son monitoreados por el inversor con un margen de error de entre 5% y 10%; si se requiere mayor precisión, será necesario instalar sensores adicionales externos a la instalación.
- **Tensión, corriente y potencia de salida del inversor:** Este monitoreo, realizado por el inversor, permite evaluar su rendimiento y aproximar la eficiencia general de la planta fotovoltaica.

La mayoría de estos registros se almacenan en plataformas proporcionadas gratuitamente por los fabricantes de inversores para instalaciones de pequeña escala. Para habilitar este sistema, es necesario conectar los inversores a internet y configurar las plataformas de manera remota, lo cual permite al usuario monitorear las principales variables de operación del SFV.

9 CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD EN EL USO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA

Un módulo fotovoltaico de silicio cristalino (c-Si) está compuesto por una variedad de materiales diseñados específicamente para proteger las celdas fotovoltaicas (FV) contra el deterioro acelerado causado por las condiciones ambientales. Las celdas FV, que constituyen el núcleo funcional del módulo, están encapsuladas mediante una combinación de polímeros (como EVA, POE o PVDF), vidrio templado de bajo contenido en hierro, un marco de aluminio y siliconas utilizadas para el sellado hermético. Para garantizar la conectividad eléctrica entre las celdas, se emplean cintas de cobre recubiertas con aleaciones de estaño, como SnPb 60/40 u otras equivalentes. Esta estructura encapsulada proporciona al módulo una protección eficaz contra daños, asegurando su operatividad y seguridad tanto durante el funcionamiento como en su manejo.

Las cantidades específicas de los materiales contenidos en cada tipo de panel solar se detallan en la Tabla 9.1. El vidrio es uno de los componentes principales en los paneles fotovoltaicos de película delgada, ya que actúa como un respaldo sólido y de bajo costo sobre el cual se deposita la capa de material semiconductor. Una excepción a esto es la tecnología de silicio amorfo (a-Si), que emplea aluminio (42%) y acero (40%) como lámina posterior en lugar de vidrio.

El material encapsulante EVA (etil-vinil-acetato) constituye entre el 4% y el 16% de la composición total de los paneles fotovoltaicos. En el caso de la tecnología de silicio cristalino (c-Si), el silicio representa aproximadamente el 0.8% de su composición total, siendo este elemento esencial para la fabricación y funcionamiento de las celdas solares. Por su parte, la tecnología a-Si, al utilizar una capa delgada de silicio, contiene únicamente un 0.0026%.

En cuanto a otros materiales, la tecnología c-Si incluye un 10% de acero, mientras que los paneles basados en telurio de cadmio (CdTe) solo emplean un 1%. El aluminio, ampliamente utilizado en los paneles fotovoltaicos, es el principal material en los marcos de las aleaciones AlMg3, representando entre el 9% y el 42% de la masa total

de los módulos. Cabe destacar que los paneles de película delgada tipo CdTe, así como algunos módulos bifaciales, no cuentan con marco y, por lo tanto, no incluyen magnesio.

Finalmente, el cobre, empleado para las interconexiones eléctricas, representa entre el 0.3% y el 3.0% del peso total de los módulos fotovoltaicos.

Tabla 9.1: Composición promedio de materiales en MFV según tecnología³².

| Material | c-Si | | a-Si | | CdTe | | CIGS | |
|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|
| | [kg/m ²] | [%] | [kg/m ²] | [%] | [kg/m ²] | [%] | [kg/m ²] | [%] |
| Aq | 8.89E-03 | 5.77E-02 | | | | | | |
| Al | 2.54E+00 | 1.65E+01 | 3.24E+00 | 4.16E+01 | 1.50E-02 | 9.04E-02 | 1.51E+00 | 8.58E+00 |
| Cd | | | 4.00E-04 | 5.13E-03 | 2.00E-02 | 1.20E-01 | 3.00E-02 | 1.71E-01 |
| Cr | | | 4.40E-05 | 5.65E-04 | 3.00E-03 | 1.81E-02 | | |
| Cu | 1.13E-01 | 7.31E-01 | 7.00E-02 | 8.99E-01 | 5.00E-01 | 3.01E+00 | 5.00E-02 | 2.84E-01 |
| Ga | | | | | | | 1.00E-02 | 5.68E-02 |
| In | | | 9.00E-04 | 1.16E-02 | | | 5.00E-03 | 2.84E-02 |
| Fe | | | 5.80E-05 | 7.45E-04 | | | | |
| Mg | 8.02E-02 | 5.20E-01 | 1.02E-01 | 1.31E+00 | | | 4.70E-02 | 2.67E-01 |
| Mn | | | 7.30E-05 | 9.37E-04 | | | | |
| Mo | | | | | | | 1.00E-02 | 5.68E-02 |
| Ni | 1.63E-04 | 1.06E-03 | | | | | | |
| Pb | 7.20E-04 | 4.67E-03 | | | 7.00E-04 | 4.22E-03 | 1.00E-02 | 5.68E-02 |
| Se | | | | | | | | |
| Si | 1.22E-01 | 7.91E-01 | 2.00E-04 | 2.57E-03 | 5.00E-02 | 3.01E-01 | 1.00E-02 | 5.68E-02 |
| Sn | 9.02E-06 | 5.86E-05 | | | 2.30E-07 | 1.39E-06 | | |
| Te | | | 5.00E-04 | 6.42E-03 | 2.00E-02 | 1.20E-01 | | |
| Ti | 8.01E-07 | 5.20E-06 | | | 2.30E-08 | 1.39E-07 | | |
| Zn | 1.20E-06 | 7.81E-06 | 2.90E-05 | 3.72E-04 | 3.00E-08 | 1.81E-07 | 1.00E-02 | 5.68E-02 |
| Acero | 1.47E+00 | 9.51E+00 | 3.10E+00 | 3.98E+01 | 2.00E-01 | 1.20E+00 | | |
| EVA | 1.00E+00 | 6.50E+00 | 1.24E+00 | 1.59E+01 | 6.00E-01 | 3.61E+00 | 9.00E-01 | 5.12E+00 |
| Vidrio | 1.01E+01 | 6.54E+01 | 3.58E-02 | 4.59E-01 | 1.52E+01 | 9.15E+01 | 1.50E+01 | 8.53E+01 |
| Total | 1.54E+01 | 1.00E+02 | 7.82E+00 | 1.00E+02 | 1.66E+01 | 1.00E+02 | 1.76E+01 | 1.00E+02 |

³² <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.013>

9.1 DIRECTIVA SOBRE RESTRICCIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS

La directiva sobre restricción de sustancias peligrosas (RoHS) especifica los niveles máximos por peso para los siguientes materiales restringidos³³. Los primeros seis se aplicaban a la RoHS original, mientras que los últimos cuatro se añadieron en virtud de la RoHS 3. Cuatro de las sustancias también tienen números del Chemical Abstracts Service (CAS, un registro mundial de 150 millones de sustancias químicas).

Cadmio (Cd): < 100 ppm (0.01%). Se utiliza en equipos electrónicos, baterías de automóviles, revestimientos metálicos y pigmentos. Es un carcinógeno humano conocido que afecta a múltiples sistemas orgánicos. Número CAS = 7440-43-9.

Plomo (Pb): < 1000 ppm (0.1%). Se usa en soldaduras, baterías de plomo-ácido, componentes electrónicos, revestimientos de cables, blindajes contra rayos X y en el vidrio de los tubos de rayos catódicos. Es un carcinógeno humano conocido que afecta los sistemas nervioso y renal, perturba la biosíntesis de hemoglobina y subsecuentemente anemia, provoca abortos espontáneos, puede llegar al feto a través de la placenta, causando serios daños al sistema nervioso y al cerebro, entre otras afectaciones. Número CAS = 7439-92-1.

NOTA: Las cantidades de plomo del 0.1% de RoHS están exentas cuando se utilizan como elemento de aleación en acero, aluminio y cobre; en soldaduras específicas; y en aplicaciones específicas de vidrio y cerámica hasta 2024. Para obtener más información, consulte [“exenciones de plomo en RoHS”](#)³⁴.

Mercurio (Hg): < 1000 ppm (0.1%). Se utiliza en baterías, interruptores, termostatos y lámparas fluorescentes. Es un carcinógeno humano conocido que afecta a varios sistemas orgánicos. Las formas más tóxicas del mercurio son sus compuestos orgánicos, como el dimetilmercurio y el metilmercurio. El mercurio puede causar intoxicación tanto crónica como aguda. Número CAS = 7439-97-6.

³³ RoHS Guide, 2024. <https://www.rohsguide.com/rohs-substances.htm>

³⁴ <https://www.rohsguide.com/rohs-lead-exemptions.htm>

Cromo hexavalente (Cr VI): < 1000 ppm (0.1%). El cromo VI se utiliza en cromados, tintes y pigmentos. Si bien algunas formas de cromo no son tóxicas, el cromo VI puede producir efectos tóxicos en varios sistemas orgánicos. Número CAS = 18540-29-9.

Bifenilos Polibromados (PBB): < 1000 ppm (0.1%). Los PBB, también conocidos como congéneres, son retardantes de llama que se encuentran en las carcasas de plástico de los monitores de ordenador y los televisores. Se han encontrado en el polvo y el aire de interiores a través de la evaporación. Son carcinógenos humanos conocidos que afectan al sistema endocrino (cáncer hepático).

Polibromodifenil Éteres (PBDE): < 1000 ppm (0.1%). Similares a los PBB, se añaden a los envases de plástico para dificultar su combustión, incluidas las carcasas de plástico de equipos electrónicos. Son carcinógenos humanos conocidos que afectan el sistema endocrino.

Bis(2-Ethylhexyl) phthalate (DEHP): < 1000 ppm (0.1%) (RoHS 3). Se usan para ablandar el aislamiento de PVC y vinilo de los cables eléctricos y los tubos médicos. Son carcinógenos humanos conocidos que afectan los sistemas inmunológico y reproductivo.

Benzyl butyl phthalate (BBP): < 1000 ppm (0.1%) (RoHS 3). Se utilizan para ablandar el aislamiento de PVC y vinilo en cables eléctricos.

Dibutyl phthalate (DBP): < 1000 ppm (0.1%) (RoHS 3). Los DBP son parte de la familia de los di-n-ftalatos que se utilizan para suavizar el aislamiento de PVC y vinilo en cables eléctricos.

Diisobutyl phthalate (DIBP): < 1000 ppm (0.1%) (RoHS 3). Al igual que los DBP, se utilizan para ablandar el aislamiento de PVC y vinilo en cables eléctricos.

9.2 RIESGOS ASOCIADOS AL MANEJO DE MÓDULOS USADOS

Este encapsulamiento evita la liberación de sustancias potencialmente peligrosas, como plomo en soldaduras, mientras no se rompa la integridad estructural del módulo.

Por lo tanto, siempre que el encapsulante permanezca intacto, el módulo no supone riesgos para la salud o el medio ambiente. Sin embargo, si el material encapsulante tiene roturas o daños que comprometan su integridad, es necesario considerar ciertas recomendaciones acorde al nivel de deterioro del panel fotovoltaico.

9.2.1 Módulos sin rotura de vidrio (intactos):

Cuando los MFVs se encuentran intactos, los riesgos para la salud son mínimos, ya que los materiales encapsulantes del MFV actúan como barreras protectoras que evitan la exposición directa a los componentes internos, incluso durante la manipulación. Sin embargo, el polvo acumulado en la superficie puede contener pequeñas partículas contaminantes que, si son inhaladas, podrían causar afecciones respiratorias.

Precauciones principales:

- Uso de guantes para evitar cortes al manipular bordes de vidrio.
- Máscaras contra el polvo al limpiar o manejar módulos con acumulación de suciedad.

9.2.2 Módulos con rotura de cubierta exterior:

La rotura de la cubierta exterior (vidrio y/o backsheet) compromete el encapsulamiento, exponiendo potencialmente los materiales internos y aumentando los riesgos para la salud, especialmente para las tecnologías CdTe. Algunos riesgos específicos incluyen:

- a) **Silicio:** no presenta mayores complicaciones si su integridad física no se ve afectada. Sin embargo, si las celdas solares son trituradas se generan partículas más finas de silicio que pueden dispersarse en el aire o el suelo.
- b) **Plomo:** el **plomo presente en los módulos fotovoltaicos se utiliza principalmente en soldaduras y como dopante, y aunque su filtración es limitada bajo condiciones normales**, puede aumentar significativamente en entornos de pH bajo, como los generados por la lluvia ácida o los lixiviados de rellenos sanitarios. No obstante, las cantidades presentes en MFV de tecnología c-Si es en promedio inferior al 0.005% de su peso, estando dentro de las

concentraciones máxima permitidas por la directiva sobre restricción de sustancias peligrosas (RoHS).

Un almacenamiento adecuado de los módulos fotovoltaicos basados en silicio puede reducir de manera considerable el riesgo asociado al plomo, evitando su exposición a condiciones que favorezcan su liberación. Mantener los módulos en ambientes controlados, protegidos de la intemperie y de sustancias con pH bajo, como el ácido nítrico o la lluvia, puede prevenir la filtración de entre el 13% y el 90% del contenido total de plomo³⁵. Esta práctica no solo limita la liberación de plomo al medio ambiente, sino que también reduce su impacto potencial en los ecosistemas cercanos y minimiza los riesgos para la salud humana.

- c) **Vidrio:** El vidrio es el componente principal de los MFVs basados en silicio cristalino, representando entre 75% y 80% del peso total del módulo. Se utiliza vidrio templado de alta pureza, diseñado para proteger las celdas FV y permitir una óptima transmisión de luz. Los riesgos asociados a la rotura del vidrio son:
- Fragmentación: En caso de rotura, los fragmentos de vidrio pueden causar cortes y heridas durante la manipulación. Es crucial usar guantes y antiparras.
 - Integridad del encapsulamiento: La rotura del vidrio puede exponer los componentes internos del módulo (como el plomo o los polímeros), aumentando los riesgos de contaminación ambiental.
- d) **Aluminio:** es el segundo componente más relevante, en términos de masa, en los MFVs, representando entre 8% y 11% del peso total del módulo, equivalente a aproximadamente 2–3 kg por módulo. Se utiliza principalmente en el marco que rodea el vidrio y sostiene las celdas FV, desempeñando un papel crucial en la estructura para facilitar el montaje del MFV. Algunos riesgos asociados al manejo del aluminio son:
- Corte por bordes afilados: Durante la manipulación de marcos rotos o dañados, existe riesgo de cortes, lo que requiere el uso de guantes apropiados.

³⁵ Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil, informe 3. In Data, 2020.

- e) Plata:** es un componente esencial en los MFVs de silicio cristalino, aunque está presente en cantidades muy pequeñas, representando menos del 0.01% del peso total del módulo, lo que equivale a aproximadamente 1 gramo por módulo. Se utiliza principalmente en las pastas conductoras aplicadas a las celdas FV para formar los contactos eléctricos frontales y traseros, que permiten la recolección de la corriente generada. No representa un riesgo de toxicidad, ya que no se encuentra en formas solubles ni biodisponibles que puedan afectar la salud humana o los ecosistemas.
- f) Polímeros (EVA y Tedlar):** Cuando un MFV sufre rotura de vidrio, los polímeros pueden quedar expuestos al ambiente. Aunque estos materiales no son altamente tóxicos en su estado sólido, ciertas condiciones pueden aumentar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.
- Rotura combinada con temperaturas altas: Los riesgos de liberación de gases tóxicos aumentan significativamente si los polímeros expuestos se queman o están en contacto con fuentes de calor.
 - Lixiviación: Aunque limitada, la exposición prolongada de polímeros a agentes químicos puede causar la liberación de algunos aditivos o compuestos estabilizantes al medio ambiente.
- g) Cobre:** El cobre metálico presente en cables y conectores generalmente no representa un riesgo significativo para la salud humana en condiciones normales, ya que es químicamente estable. El riesgo del cobre en la manipulación de módulos fotovoltaicos rotos es generalmente bajo, pero puede aumentar debido a cortes, contacto con óxidos o inhalación de partículas en entornos no controlados (probabilidad muy baja).
- h) Boro y fosforo:** La **concentración de boro y fósforo** en los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino es extremadamente baja (menos del **0.01% del peso total del módulo**) y **no supone un riesgo significativo para la salud humana** en condiciones normales de uso o manipulación.

9.2.3 Exposición total de las celdas solares

Si las celdas solares quedasen totalmente expuestas, ya sea porque el MFV es triturado o sometido a fuerzas mecánicas excesivas, se generan partículas más finas de silicio que pueden dispersarse en el aire o el suelo.

Aunque poco probable, en condiciones extremas de pH (muy ácido o alcalino), el silicio podría reaccionar formando compuestos solubles como el **silicato de sodio**, que podría alterar la química local del agua o el suelo, aunque sin toxicidad significativa.

9.3 MEDIDAS DE PROTECCIÓN PERSONAL

La manipulación de módulos fotovoltaicos rotos implica riesgos asociados a los materiales que los componen, como vidrio, silicio, polímeros, cobre, plata, plomo, aluminio, boro y fósforo. Aunque muchos de estos materiales son inertes y presentan riesgos mínimos en condiciones normales, la exposición durante la rotura o deterioro del módulo puede generar riesgos físicos (cortes y abrasiones), químicos (inhalación o contacto con partículas o compuestos) y ambientales (liberación de sustancias potencialmente tóxicas). Para garantizar la seguridad del personal involucrado, es fundamental identificar las características de cada material y aplicar las medidas de protección personal adecuadas, minimizando los impactos a la salud y reduciendo las posibles consecuencias ambientales.

| | |
|--------------------|--|
| Vidrio roto | <p>Riesgo: Cortes y heridas por bordes afilados; contacto con partículas de vidrio.</p> <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes resistentes a cortes (nivel de protección anticorte ANSI A3 o superior). • Gafas de seguridad o protección ocular cerrada para evitar el contacto con partículas. • Calzado de seguridad con puntera reforzada para proteger los pies de fragmentos. |
| Silicio | <p>Riesgo: Cortes por fragmentos y posibles irritaciones respiratorias por partículas finas.</p> |

| | |
|--|---|
| | <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes resistentes para evitar cortes. • Mascarilla con filtro de partículas (mínimo N95) para proteger las vías respiratorias en caso de manipulación intensiva o polvo en suspensión. • Gafas de seguridad para evitar el contacto con partículas en los ojos. |
| <p>Polímeros (EVA y lámina posterior)</p> | <p>Riesgo: Irritación dérmica leve por contacto con polímeros degradados; inhalación de gases en caso de exposición a altas temperaturas.</p> <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes de nitrilo o látex para evitar el contacto prolongado. • Mascarilla con filtro de partículas si hay delaminación visible. • Manipulación en áreas ventiladas para minimizar la exposición a posibles gases. |
| <p>Cobre</p> | <p>Riesgo: Cortes por bordes afilados de cables; irritación dérmica o transferencia accidental de partículas.</p> <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes resistentes a cortes y abrasiones. • Lavado de manos después de la manipulación para evitar transferencia accidental a la boca. • Máscaras de partículas si hay fragmentación visible. |
| <p>Plata</p> | <p>Riesgo: Irritación dérmica por contacto prolongado con óxidos o compuestos solubles.</p> <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes de nitrilo o látex para evitar contacto directo. • Mascarilla con filtro de partículas en áreas con polvo visible. • Higiene personal estricta después de la manipulación. |
| <p>Boro y fósforo</p> | <p>Riesgo: Contacto con partículas de dopantes o fragmentos contaminados (riesgo muy bajo en condiciones normales).</p> <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes de nitrilo o de protección estándar. • Mascarilla con filtro de partículas en caso de manipulación intensiva de celdas rotas. • Gafas de seguridad para prevenir irritación ocular. |

| | |
|------------------------|--|
| <p>Plomo</p> | <p>Riesgo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inhalación de partículas de plomo en soldaduras dañadas o fragmentadas. • Contacto dérmico con fragmentos de soldaduras oxidadas, lo que puede causar toxicidad acumulativa. • Ingestión accidental por transferencia de partículas contaminadas. <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes de nitrilo o látex: Para evitar el contacto directo con soldaduras expuestas o fragmentos contaminados. • Mascarilla con filtro de partículas (mínimo N95 o P100): Para prevenir la inhalación de partículas de plomo. • Higiene personal estricta: Lavarse las manos con jabón tras la manipulación para evitar la transferencia oral accidental. • Gafas de seguridad cerradas: Para evitar el contacto con partículas finas de plomo. • Ropa de trabajo de manga larga: Para evitar el contacto con partículas o superficies contaminadas. |
| <p>Aluminio</p> | <p>Riesgo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cortes por bordes afilados de marcos de aluminio dañados. • Inhalación de polvo de aluminio si se fragmenta o genera partículas durante la manipulación. • Contacto prolongado con superficies oxidadas, lo que puede causar irritación leve en la piel. <p>Medidas de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guantes resistentes a cortes: Para evitar lesiones durante la manipulación de bordes afilados. • Mascarilla con filtro de partículas (mínimo N95): Si hay polvo de aluminio en el área. • Ropa de trabajo resistente: Para minimizar el contacto directo con superficies oxidadas o fragmentadas. • Gafas de seguridad: Para proteger los ojos de posibles fragmentos o partículas en suspensión. |

9.4 CUMPLIMIENTO DE NORMATIVAS Y REGULACIONES

El cumplimiento de normativas y regulaciones es esencial para garantizar la seguridad y eficiencia de los módulos fotovoltaicos. A continuación, se detallan las principales normativas nacionales e internacionales aplicables a los materiales comúnmente utilizados en estos módulos:

| Material | Normativas Internacionales | Normativas Nacionales |
|-----------------------|--|---|
| Vidrio | : IEC 61215 [34, 35]: Requisitos de diseño y homologación. | - NCh Elec. 4/2003: Instalaciones eléctricas de baja tensión |
| Silicio | : IEC 61215 [34, 35] : Pruebas específicas para módulos de silicio cristalino. | No existen normativas específicas; se aplican las internacionales. |
| Polímeros | : IEC 61730 [43]: Requisitos de seguridad en módulos fotovoltaicos. | Se adoptan las normativas internacionales. |
| Cobre | : IEC 61730 [43]: Seguridad eléctrica para conductores | NCh Elec. 4/2003: Regulación de conductores eléctricos. |
| Plata | : IEC 61215 [35]: Evaluación de contactos en celdas solares. | No hay normativas específicas; se aplican las internacionales. |
| Plomo | : Directiva RoHS [44]: Restricción de uso en equipos eléctricos. | No hay normativas específicas, se promueve el cumplimiento internacional. |
| Aluminio | : IEC 61215 [35]: Pruebas de resistencia mecánica para marcos. | No existen normativas específicas; se aplican las internacionales. |
| Boro y fosforo | : IEC 61215 [35]: Evaluación de celdas dopadas. | No hay normativas específicas; se aplican las internacionales. |

10 CASOS DE USO DE MFV DE SEGUNDA VIDA Y EJEMPLOS PRÁCTICOS

La elección del nicho proveniente de módulos fotovoltaicos de segunda vida responde a una serie de criterios previamente definidos. Estos criterios son la diversificación de uso, impacto positivo en la población y la disposición de la información. Entre los posibles casos de uso se proponen los siguientes:

a) Carports

El uso de MFVs para la generación de energía en estacionamientos solares constituye una estrategia ampliamente utilizada para optimizar áreas ya destinadas a este propósito. La implementación de módulos de segunda vida permite ampliar el área de sombreado y aumentar la generación de energía con una inversión de capital más reducida. Adicionalmente, pueden integrarse MFVs pasivos para proporcionar una mayor superficie de sombra en zonas de alta radiación, mejorando así la eficiencia energética y el confort en el entorno.



Fig. 10.1: Carport CDEA-UA

b) Cubiertas

Se contempla el uso de MFVs de segunda vida para la implementación de sistemas fotovoltaicos en cubiertas, obteniendo así un doble beneficio: por un lado, la generación de energía eléctrica y, por otro, la provisión de sombra y protección

para actividades deportivas, agrícolas, u otras bajo la cubierta. Estas instalaciones pueden implementarse en recintos deportivos, instituciones educativas, hospitales, comunidades agrícolas y estacionamientos. De este modo, se optimiza el uso del espacio disponible, aprovechando estructuras ya existentes o, en su defecto, incorporando estructuras nuevas, aunque esto último implica un aumento en el costo de instalación.



Fig. 10.2: Pérgola con MFV para sombra.³⁶

c) Barrera acústica

Se proyecta el uso de MFVs de segunda vida para sistemas de aislamiento acústico mediante barreras verticales (PVNB, del inglés PV noise barriers). Esta aplicación está orientada principalmente a la reutilización de las láminas de PVB como barreras acústicas, sin considerar en el corto plazo la recolección de energía fotovoltaica. Países como Corea del Sur han implementado esta reutilización en paneles fotovoltaicos, logrando que las barreras aislen el ruido acústico en aproximadamente 37 dB a una frecuencia de 1000 Hz, una mejora en comparación con las barreras tradicionales que ofrecen un aislamiento de 30 dB a la misma frecuencia. Dependiendo del grado de tratamiento fonoabsorbente requerido, estas barreras pueden ser utilizadas en entornos con mayor vibración, como carreteras,

³⁶ <https://www.quetzalingeneria.es/se-pueden-instalar-paneles-solares-en-pergola-de-madera/>

autopistas y áreas urbanas, lo que incrementa el nivel de tratamiento y el costo asociado. En zonas rurales, agrícolas o con menor tránsito vehicular, el grado de tratamiento requerido es menor.



Fig. 10.3: Barrera acústica de 400 metros en autopista de Holanda³⁷.

d) Electrificación de viviendas sociales

En proyectos destinados a viviendas sociales o familias de bajos ingresos, se propone la reutilización de paneles fotovoltaicos con el objetivo de instalarlos en viviendas, contribuyendo así a reducir los costos por concepto de facturación eléctrica. Aunque el rendimiento de estos módulos no sea óptimo, continúan proporcionando suficiente energía para satisfacer las necesidades eléctricas básicas. Para este segmento, se recomienda una instalación estratégica de los paneles, considerando como ubicación prioritaria el norte de Chile, dado que en esta región se presenta una mayor proporción de viviendas sin acceso a electricidad.

Otros casos interesantes de analizar son:

- Elemento en la construcción: En zonas con alta oscilación térmica, como el desierto, las edificaciones requieren una doble pared para mejorar la aislación

³⁷ <https://es.euronews.com/my-europe/2021/11/08/rolling-solar-grune-energie-entlang-der-autobahnen>

térmica. El uso de MFVs puede contribuir a crear estas capas aislantes, incrementando el confort interno del recinto.

- Muro Trombe fotovoltaico: El "muro Trombe" (TW) es un elemento de diseño de energía solar pasiva que utiliza una pared para absorber energía solar y liberarla lentamente, calentando el edificio. Tradicionalmente, consiste en una doble pared de hormigón o ladrillo orientada hacia el Ecuador, con la cara externa en color negro. Al integrar MFVs, se combinan los beneficios de la generación de electricidad con la calefacción solar pasiva. El canal de aire entre el MFV y la pared interna mejora el rendimiento térmico al permitir la circulación del aire, proporcionando aislamiento adicional al edificio. En esta configuración, la cara externa se reemplaza por una matriz de MFVs, formando lo que se conoce como "PV/TW".

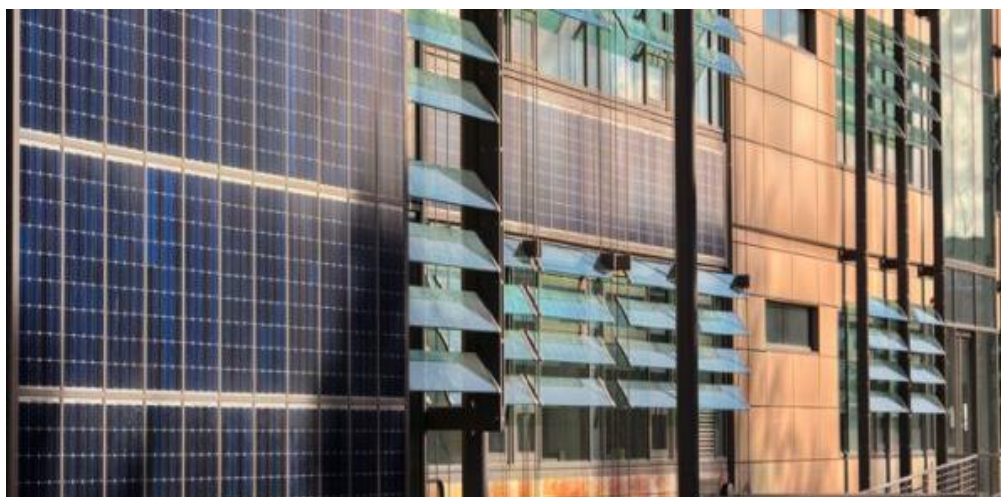


Fig. 10.4: Fachada solar "SolarWall" instalado en conjunto residencial de protección oficial ubicado en Portugalete, España.³⁸

e) Pequeños medios de generación como electrificación rural, sistemas de bombeo y alumbrado público

Los MFVs de segunda vida pueden emplearse para electrificar comunidades rurales o remotas sin acceso a la red eléctrica, donde la demanda energética suele ser baja, ofreciendo así una solución económica y eficiente. Son ideales en

³⁸ <https://www.solarwall.com/es/>

aplicaciones como el bombeo de agua para riego agrícola, donde el consumo energético no requiere ser continuo ni de alta demanda. Además, estos módulos pueden alimentar sistemas de alumbrado público solar en áreas rurales o periurbanas, siendo una alternativa efectiva y económica en usos de baja demanda energética.



Fig. 10.5: Sistema de generación en pueblo de Huatacondo a 230 kilómetros de Iquique³⁹.

Una aplicación emergente en este contexto es el uso de sistemas AgriPV (Agrovoltaicos), los cuales combinan la producción de energía solar con actividades agrícolas, como el cultivo o el riego. Esta sinergia permite optimizar el uso del suelo en zonas rurales, al tiempo que se reutilizan módulos fotovoltaicos degradados para alimentar bombas de riego o sistemas de monitoreo agronómico. La implementación de AgriPV con MEFV no solo mejora la eficiencia del terreno agrícola, sino que también ofrece múltiples beneficios adicionales:

- Mayor rendimiento de los terrenos agrícolas, al favorecer un microclima más estable bajo los paneles.
- Menor consumo de agua para el riego, gracias al sombreado parcial que reduce la evaporación.

³⁹ <http://www.tarapacanoticias.cl/2010/09/huatacondo-se-convierte-en-primer.html>

- Fuente adicional de ingresos para los agricultores, quienes pueden diversificar su producción y reinvertir en su competitividad.



Fig. 10.6: Pilotos Agro PV de Fraunhofer Chile en Lampa con equipo de medición microclimático⁴⁰.

f) Sistemas autónomos de carga de dispositivos

Los MFVs de segunda vida son ideales para estaciones de carga solar de dispositivos móviles, especialmente en áreas con acceso limitado a la red eléctrica. Este tipo de aplicación no demanda grandes cantidades de energía, por lo que los módulos degradados siguen siendo una opción viable y eficiente.



Fig. 10.7: Tótem solar para carga de dispositivos móviles en Universidad de Antofagasta.⁴¹

⁴⁰ <https://www.fraunhofer.cl/>

⁴¹ <https://www.uantof.cl/prensa/serc-chile-instala-totem-solar-en-el-campus-coloso-de-la-ua/>

g) Sistemas de suministro de energía en zonas industriales de baja demanda

Los MFVs de segunda vida pueden ser útiles en pequeñas industrias o talleres que dispongan de superficies libre de sombras en techumbre o suelo, aportando energía para autoconsumo, reduciendo los costos en su facturación eléctrica.



Fig. 10.8: Instalación fotovoltaica en Komatsu Reman Center Santiago.⁴²

h) Sistemas de suministro para estaciones de monitoreo remotas

En aplicaciones como estaciones meteorológicas o de monitoreo ambiental situadas en zonas remotas, los módulos de segunda vida son ideales. Estas instalaciones tienen baja demanda energética, pero requieren una fuente de energía confiable y sostenible.

10.1 IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA A NIVEL INTERNACIONAL

10.1.1 Planta FV Cloverleaf (Heusden-Zolder, Bélgica)

El modelo se aplica en una estación de carga de vehículos eléctricos existente en Bélgica, la que cuenta con una instalación fotovoltaica proporcionada por FUTECH como proveedor en virtud de un Acuerdo de Compra de Energía.

⁴²<https://conecta.pactoglobal.cl/casos-de-empresas/planta-fotovoltaica-en-komatsu-reman-center-santiago/>

De conformidad con dicho acuerdo, Futech —como inversor— sigue siendo el propietario de la planta FV y también es responsable de su mantenimiento. A su vez, el propietario del centro comercial paga una tarifa mensual por el consumo eléctrico que es mucho más baja que los precios de la electricidad de la red.

Con el objetivo de aumentar el autoconsumo eléctrico en las instalaciones de CLOVERLEAF, se incluye un componente de almacenamiento. Así, para decidir el tamaño óptimo de la batería, Futech estudio los cambios de consumo en el emplazamiento desde el momento en que se instala un punto de recarga con 12 supercargadores para vehículos eléctricos en 2017. Según se indica en un artículo de “pv magazine”, en este caso el consumo paso del 22.8 % al 45.4 % en 2020.

La planta ubicada en Heusden-Zolder, Bélgica. cuenta con 7000 paneles solares FV de 2 MW que alimenta un centro comercial con un restaurante, una estación de servicio, un estacionamiento cubierto para camiones climatizados que pueden conectarse cuando están estacionados y un punto de recarga para vehículos eléctricos.



Fig. 10.9: Vista aérea planta FV Cloverleaf.

10.1.2 Complejo de viviendas en Waasland (Sint-Niklaas, Bélgica)

El complejo de viviendas compartidas (modalidad co-housing) de Waasland tiene 22 unidades habitacionales tipo departamentos y viviendas adosadas, además de

espacios comunes e instalaciones compartidas, donde se ha instalado un sistema fotovoltaico constituido por 200 módulos de segunda vida (potencialmente también con baterías). En este caso, el modelo prueba nuevas propuestas de servicio creadas en conjunto con los residentes, como la retroalimentación y la optimización del consumo de energía.

El modelo, dirigido por DAIDALOS como proveedor, tiene como objetivo demostrar las propuestas de valor de un modelo de PSS solar para el mercado residencial belga, un segmento que ha estado dominado por la propiedad convencional. También, tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y el potencial de mercado de la energía fotovoltaica (y baterías) de segunda vida para aplicaciones residenciales.

El sistema FV ubicado en Sint-Niklaas, Bélgica contempla 231 paneles solares de segunda vida y provee la mitad de energía necesaria para todo el complejo de viviendas.



Fig. 10.10: Vista complejo habitacional en Waasland.

10.1.3 Micro E-Mobility Charging Hubs (Berlín, Alemania)

El modelo propuesto por SunCrafter demuestra que la energía solar de segunda vida puede aplicarse de manera efectiva en un entorno urbano bajo un enfoque de negocio. En las ciudades, la demanda de electricidad presenta un crecimiento constante,

impulsado por el aumento en el uso de vehículos eléctricos ligeros, como bicicletas eléctricas (e-bikes) y patinetes eléctricos (e-scooters). La carga de estos vehículos representa aún un desafío significativo, ya que el acceso a la red eléctrica urbana se ve limitado por regulaciones complejas. En este contexto, una solución fuera de la red (off-grid) facilita considerablemente la implementación de infraestructura de carga sostenible.

Los CityHubs de SunCrafter permiten a los municipios estructurar los servicios de MaaS (Mobility as a Service) de una manera sostenible y amigable para los ciudadanos. Todos los tipos de vehículos eléctricos ligeros se pueden cargar con energía solar mientras están acoplados de forma segura. Las estaciones son semiestacionarias y se pueden montar, cambiar de posición y desmontar en un instante. Se adaptan a la necesidad de cada municipio individual integrando diferentes servicios como WiFi, carga de teléfonos públicos y sensores ambientales.

Generadores fotovoltaicos con aporte solar de hasta 1 kW y capacidad de batería de 4,8 kWh. Con carga todas las formas de LEV (es decir, e-scooters, e-bikes, e-mopeds) y monitoreo remoto via GSM. Además, incluye USB y carga inalámbrica de teléfono público en una estación personalizable con punto de acceso WiFi, sistemas de iluminación, sensores de datos ambientales y espacio publicitario.

Datos técnicos:

- Generadores fotovoltaicos con aporte solar de hasta 1 kW y capacidad de batería de 4,8 kWh.
- Carga todas las formas de LEV (es decir, e-scooters, e-bikes, emopeds)
- Monitoreo remoto via GSM
- Incluye USB y carga inalámbrica de teléfono publico
- Estación personalizable con punto de acceso WiFi, sistemas de iluminación, sensores de datos ambientales y espacio publicitario.

Carga descentralizada:

Actualmente, la carga de scooters eléctricos es ineficiente y no sostenible. Este sistema fuera de la red ofrece una oportunidad para crear una infraestructura densa y

descentralizada que se adapte a las necesidades de proveedores de micromovilidad eléctrica, así como a sus municipios anfitriones.

Fuera de la red = Ágil:

Los SunCrafter CityHubs no requieren instalación eléctrica ni movimiento de tierras, lo que los hace ideales para probar rápidamente y expandir el alcance de la micromovilidad eléctrica incluso en los distritos exteriores de la ciudad.



Fig. 10.11: Vista estación de carga para micromovilidad.

10.2 IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SEGUNDA VIDA A NIVEL NACIONAL

10.2.1 Piloto BaPV en CDEA-UA

Esta sección presenta el piloto de una planta fotovoltaica adherida a edificio (Building-attached Photovoltaics, BaPV), instalada en la fachada del edificio del Centro de Desarrollo Energético de Antofagasta (CDEA-UA), ubicado en el Campus Coloso de la Universidad de Antofagasta. Este sistema piloto ha sido diseñado e implementado en el marco del proyecto Solar Circular, con el objetivo de validar tanto el diseño como

la operación de un sistema fotovoltaico que utiliza módulos de segunda vida, adaptado a las condiciones climáticas de la región de Antofagasta..

El piloto BaPV corresponde a un sistema grid-tie⁴³ compuesto por seis módulos fotovoltaicos (MFV) de segunda vida, seis microinversores NEP BDM300, sensores irradiancia, temperatura y parámetros eléctricos, además del sistema de registro de datos y la estructura de montaje para adjuntar los MFVs a la fachada del edificio.

Los seis MFVs van conectados individualmente a cada microinversor, los cuales posteriormente van en paralelo, alcanzando una potencia nominal de 1.8 kW. La Fig. 10.12 corresponde al esquema general del piloto BaPV, mostrando las conexiones entre los módulos fotovoltaicos, los microinversores, el tablero eléctrico, el tablero de adquisición de datos y la integración al tablero eléctrico del edificio.

En la Fig. 10.13 se muestra una vista en terreno del piloto BaPV en edificio CDEA-UA. La Fig. 10.13(A) corresponde a una vista aérea del edificio CDEA-UA destacando en rectángulo rojo la zona de montaje del piloto; en (B) vista frontal del piloto montado, mostrando la disposición de los MFV, y en Fig. 10.13(C) se observar los microinversores conectados a cada uno de los MFV.

⁴³ Sistema que posibilita la inyección de energía generada a la red eléctrica.

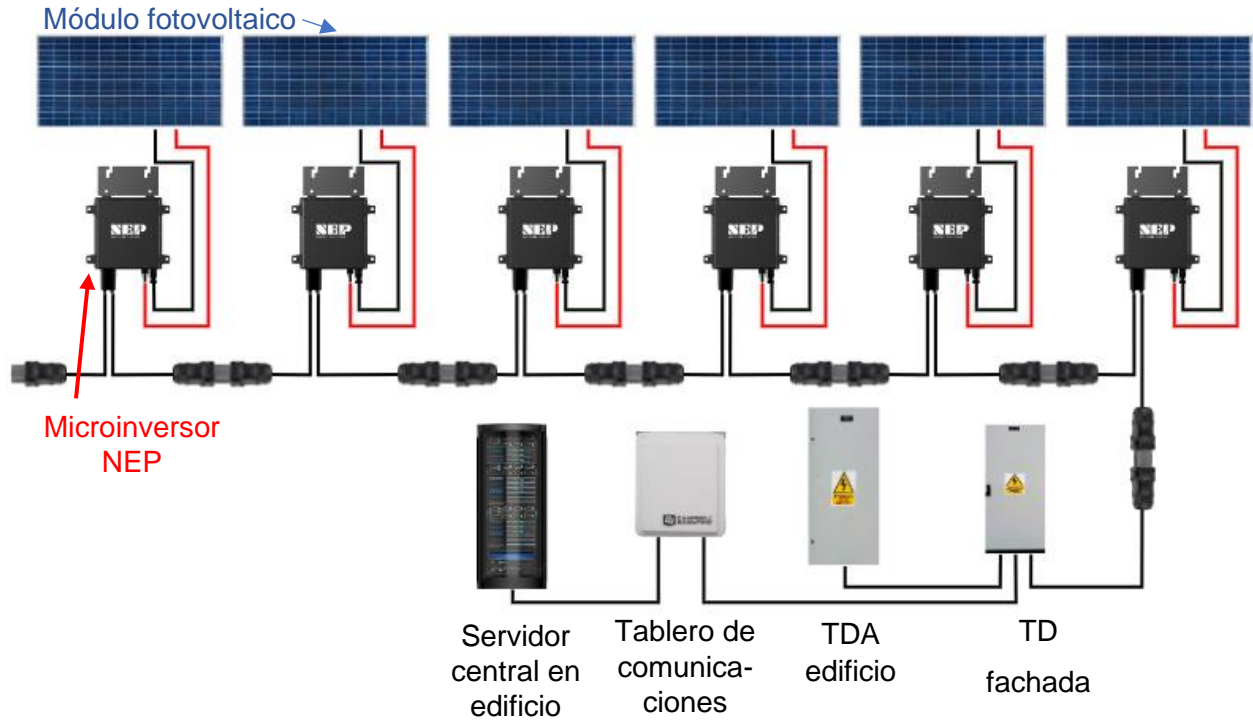


Fig. 10.12: Esquema general para el conexionado del piloto BaPV CDEA-UA.



(A)



(B)



(C)

Fig. 10.13: Vista en terreno del piloto BaPV CDEA-UA.

(A) vista aérea del edificio CDEA-UA que muestra en rectángulo rojo la zona de montaje de la BaPV; (B) vista frontal del piloto montado, y (C) vista de los micro-inversores.

10.2.2 Piloto BaPV/TW en vivienda

Esta sección presenta la planta de pilotaje fotovoltaica aplicada a edificios (Building-attached Photovoltaics, BaPV), implementada en el proyecto MODhabitar, desarrollado en la explanada del Centro de Desarrollo Energético de Antofagasta (CDEA), ubicado en las dependencias de la Universidad de Antofagasta. Esta planta ha sido diseñada en el marco del proyecto Solar Circular, con el propósito de validar el diseño y la operación de un sistema fotovoltaico basado en módulos de segunda vida, adaptado a las condiciones de la región de Antofagasta.

La planta piloto de vivienda MODhabitar corresponde a un sistema híbrido compuesto por seis módulos fotovoltaicos (MFV) de segunda vida, un inversor Huawei SUN2000-5KTL, una batería LUNA2000 de 10 kWh, diversos sensores y una estructura adaptada a la fachada de la vivienda.



Fig. 10.14: Sistema fotovoltaico Piloto ModHabitad.

Los seis MFVs van conectados en serie al inversor huawei, el cual va a la batería LUNA2000, alcanzando una potencia nominal de 1.8 kW. La Fig. 10.15 deja ver el esquema general de la planta piloto BiPV, la cual refleja las conexiones entre los módulos fotovoltaicos, los microinversores, el tablero eléctrico, el tablero de adquisición de datos y la integración al tablero eléctrico del edificio.

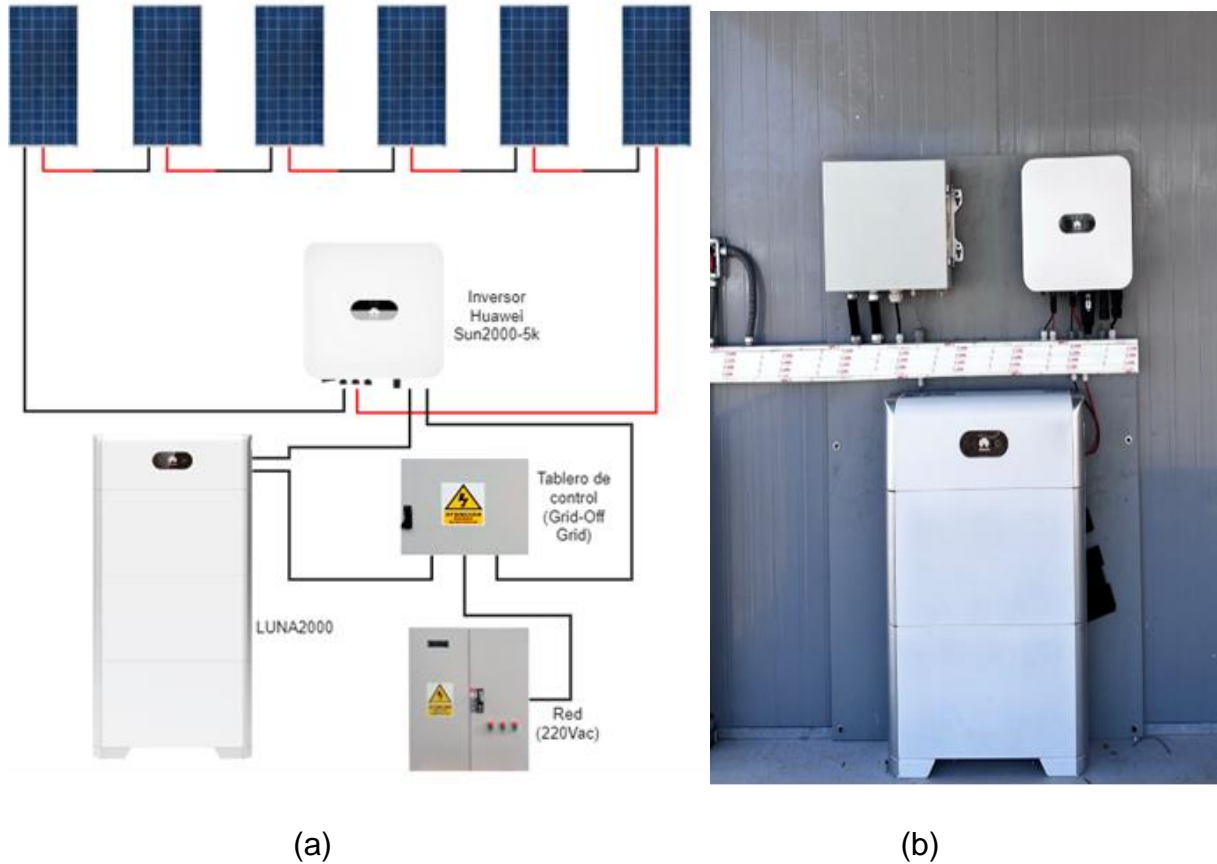


Fig. 10.15: (a) Esquema general para el conexionado de la Planta Piloto MODhabitar, (b) Instalación de SFV, Huawei Sun2000, Luna2000 y Back-Up

La construcción de la casa A0Lab estuvo a cargo de CTEC, quienes mediante su proyecto MODhabitar buscan contribuir a resolver la problemática habitacional de los sectores vulnerables de la región de Antofagasta, y aportar con ello, a la innovación abierta con proyectos piloto de viviendas modulares, sustentables, replicables y escalables.

10.2.3 Carport Solar

Esta sección presenta el piloto de una planta fotovoltaica adherida a la estructura de un carport, ubicada en las dependencias del ClimB de la empresa Servilinares, en el sector La Negra, en la ciudad de Antofagasta.

El piloto denominado Carport Solar corresponde a un sistema tipo grid-tie, compuesto por nueve módulos fotovoltaicos (MFV) de segunda vida, conectados en un único string a un inversor híbrido Huawei SUN2000-3KTL. El sistema incorpora sensores para la medición de irradiancia, temperatura y parámetros eléctricos, además de un sistema de adquisición de datos y una estructura de montaje diseñada para integrar los MFV a la cubierta del carport.



Fig. 10.16: Sistema fotovoltaico Servilinares.

En la siguiente figura se puede observar los tableros de protecciones eléctricas y supervisión del sistema, a través del producto tecnológico iATAMO-Cloud. Asimismo, se aprecia el inversor Huawei instalado, cuya potencia nominal es de 3 kW.



Fig. 10.17: Estructura asociada a instalación de los tableros de protecciones eléctricas y de supervisión (iATAMO-Cloud), como también inversor Huawei.

10.2.4 Riego Tecnificado en el Desierto

Esta sección entrega información sobre el piloto de planta fotovoltaica para riego tecnificado de especies nativas ubicado en las dependencias del predio N°6 del Proyecto Desierto Verde, en la ciudad de Antofagasta.

El piloto para agricultura en el desierto solar corresponde a un sistema off-grid compuesto por diez módulos fotovoltaicos de segunda vida conectados en un string a un inversor Híbrido Huawei Sun2000-3-KTL, un sistema de almacenamiento de litio Huawei LUNA2000 5kWh, diversos sensores (irradiancia, temperatura y parámetros eléctricos), además del sistema de registro de datos y la estructura de montaje para adjuntar los MFVs a la estructura del carport.



Fig. 10.18: Sistema fotovoltaico Desierto Verde.

La Fig. 10.19 muestra los tableros de protecciones eléctricas y supervisión del sistema, a través del producto tecnológico iATAMO-Cloud. Asimismo, se aprecia el inversor Huawei instalado, cuya potencia nominal es de 3 kW.



Fig. 10.19: Sistema eléctrico planta fotovoltaica de Desierto Verde.

10.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se implementa de la misma forma para los sistemas de riego tecnificado y carport solar, integrando cuatro orígenes principales: el EMI, inversor

(solo en desierto verde), el banco de baterías y los optimizadores. Los tres primeros se comunican mediante el protocolo TCP, lo que permite capturar las mediciones ambientales y monitorear el estado de la batería a través del inversor. Paralelamente, la información de los optimizadores se obtiene por técnicas de Web Scrapping, extrayéndola directamente desde la interfaz o el portal web correspondiente. Una vez recopilados todos los datos, el sistema los envía a la nube iATAMO-Cloud para su posterior análisis y visualización en Grafana. En la siguiente figura se puede visualizar un esquema de flujo de la adquisición de datos mencionada.

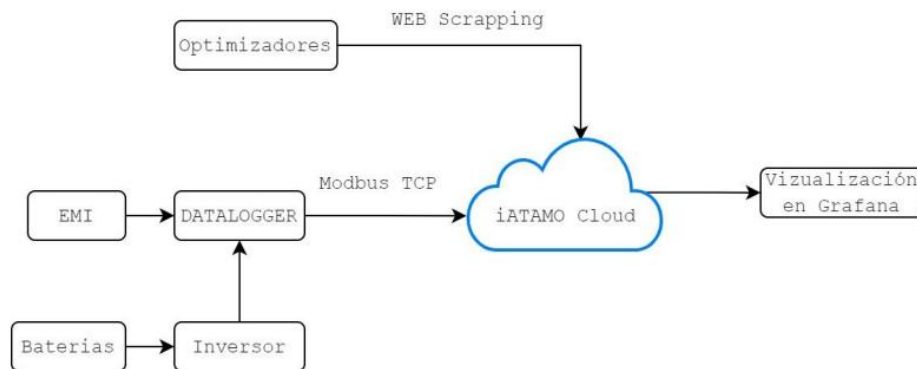


Fig. 10.20: Esquema de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos se aloja en un gabinete eléctrico, instalado físicamente como se puede observar en la siguiente figura. Este sistema está conformado por un disyuntor termomagnético bipolar, una protección diferencial, una placa Rasperry Pi encargada de la adquisición de datos y su respectivo router de comunicación de la red.



Fig. 10.21: Gabinete con iATAMO Cloud.

10.4 PLATAFORMA DE MONITOREO

El dashboard del proyecto “Desierto Verde – Agricultura en el desierto” muestra en tiempo real el estado operativo y energético de un sistema fotovoltaico basado en la reutilización de módulos solares. En la parte superior se identifican los patrocinadores y desarrolladores del proyecto, mientras que al centro se visualiza la potencia generada por cada string, con valores entre 55.1 W y 78.7 W. En la sección inferior central se informa una potencia de entrada solar de 656 W, una salida de 598 W, un estado de carga de baterías (SOC) del 100% y una energía acumulada producida de 916 kWh. A la derecha, se presentan indicadores de eficiencia, con un 12.1% de eficiencia diaria y un 6.76% mensual acumulado. Los gráficos de barras reflejan la producción diaria por módulo y el estado de los optimizadores, todos en operación. Además, se incorpora un gráfico de Performance Ratio (PR) que muestra el rendimiento del sistema entre los días 30 de marzo y 4 de abril, con valores que oscilan

entre 0.15 y 0.29, indicando una variación en la eficiencia relativa del sistema respecto a la irradiancia disponible.

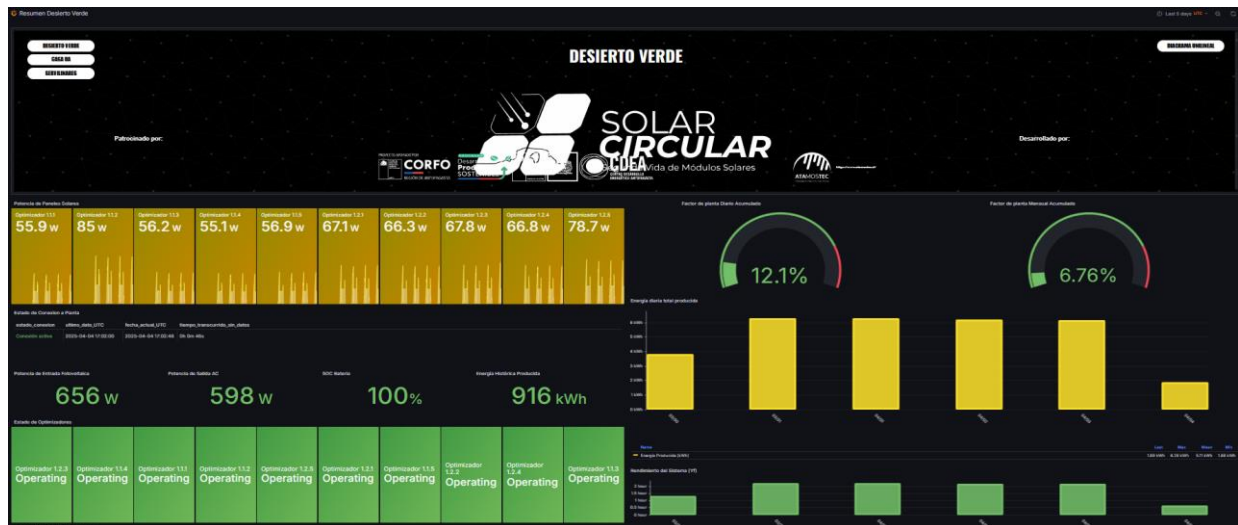


Fig. 10.22: Banner presente al inicio del dashboard público de Desierto Verde

El dashboard a continuación corresponde al monitoreo del sistema fotovoltaico del proyecto “Servilinares – Carport Solar”. En el centro del panel se visualiza la potencia entregada por cada optimizador, con valores que oscilan entre 97.7 W y 124 W, lo que demuestra un desempeño activo y relativamente equilibrado de los módulos solares recuperados. Junto a esto, todos los optimizadores se encuentran en estado "Operating", lo que indica un funcionamiento estable y continuo del sistema.

A la derecha, un gráfico de barras muestra la energía diaria producida, con una media cercana a los 6.5 kWh por día, y un máximo de 6.99 kWh alcanzado en días recientes. En la parte inferior, se presenta el indicador de rendimiento del sistema (Yield) comparado con el rendimiento de referencia (YR), lo que permite evaluar la eficiencia relativa de generación solar frente a condiciones teóricas ideales. En los días más productivos, el sistema se acerca a los 2.5 kWh/kWp.

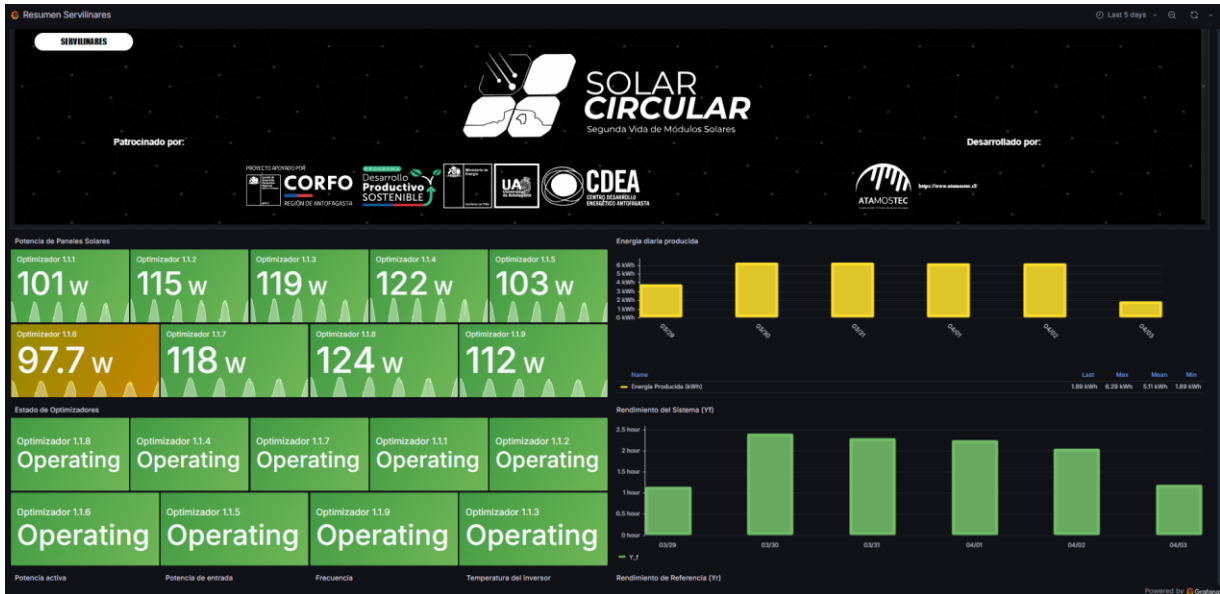


Fig. 10.23: Banner presente al inicio del dashboard público de Desierto Verde.

NOTA

Finalmente, los resultados obtenidos y las mediciones pueden visualizarse a través de la plataforma de monitoreo disponible en <https://www.solar-circular.cl>

11 CONCLUSIONES

La presente guía técnica proporciona un marco detallado para el decomisionamiento, diagnóstico, almacenamiento y reutilización de módulos fotovoltaicos (MFV) de segunda vida, priorizando su valorización en el marco de una economía circular. A través de directrices técnicas y operativas, se establece una ruta para extender el ciclo de vida de estos dispositivos, contribuyendo a la reducción de residuos y al uso más eficiente de recursos materiales.

El documento identifica que en Chile, a octubre de 2024, existen más de 20 a 34 millones de módulos en operación, mayoritariamente de silicio cristalino (más del 95%), los cuales eventualmente llegarán al final de su primera vida útil. Se proyecta que para el año 2046, el país generará un primer gran pico de residuos de aproximadamente 120.000 toneladas de módulos fotovoltaicos. Frente a esta realidad, la reutilización emerge como una estrategia clave.

Estudios internacionales citados en la guía, como los del proyecto CIRCUSOL, indican que entre el 45% y 65% de los MFV retirados pueden ser reacondicionados. Además, el 83% de los módulos evaluados en Tailandia mantienen al menos el 70% de su capacidad original, lo que permite su utilización en aplicaciones de menor demanda energética.

En términos económicos, la reutilización permite una reducción de costos de adquisición de entre 30% y 50% respecto a módulos nuevos. Por ejemplo, en Chile, los MFV reacondicionados pueden venderse entre \$55.000 y \$100.000 CLP, dependiendo del nicho de aplicación. En un sistema de 50 kW, los beneficios económicos proyectados pueden alcanzar los \$24 millones CLP en 20 años, además de evitar la emisión de aproximadamente 18.750 kg de CO₂ anuales.

Desde el punto de vista ambiental, el reacondicionamiento de MFV puede reducir las emisiones de carbono en hasta 50%, según estudios del National Renewable Energy Laboratory (NREL). Además, se evita la disposición prematura de residuos electrónicos que contienen materiales peligrosos, como plomo, y se disminuye la necesidad de extracción de materias primas como silicio, cobre y plata.

La guía define un protocolo diagnóstico basado en cinco pruebas secuenciales (inspección visual, prueba de aislación, curva I-V, termografía infrarroja y electroluminiscencia), el cual permite detectar fallas críticas y clasificar los módulos según su aptitud para reutilización activa, pasiva, reparación o reciclaje. Se estima que este protocolo puede filtrar módulos con fallas graves en las primeras dos etapas, reduciendo significativamente los riesgos operacionales.

Asimismo, se destaca la necesidad de implementar sistemas de trazabilidad para registrar información clave del MFV, como ubicación original, fecha de instalación y causa de retiro. Este tipo de trazabilidad es esencial para garantizar seguridad y transparencia a lo largo del ciclo de reutilización.

Finalmente, se enfatiza la importancia de contar con capital humano calificado. La guía incorpora perfiles ocupacionales definidos por ChileValora, tales como instalador/a fotovoltaico, mantenedor/a de plantas solares e instalador/a eléctrico/a clase D, los cuales aseguran que los procesos de diagnóstico, reacondicionamiento e instalación se realicen conforme a estándares de calidad y seguridad.

12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. a. A. B. Strange, «Desarrollo sostenible: Integrar la economía, la sociedad y el medio ambiente,» OECD Publishing, Paris, 2014.
- [2] A. Limmanee, N. Sitthiphol, S. Jaroensathainchok, R. Pluemkamon, S. Kotesopa, N. Udomdachanut y A. Hongsingthong, «A Survey of Decommissioned Photovoltaic Modules from Solar Power Plants in Thailand: Performance and Second Life Opportunities,» *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 18, nº 12, pp. 1967-1972, 2023.
- [3] C. P. K. R. Y. T. M. R. D. E. e. a. Baldé, «Global E-waste Monitor 2024: Quantities, flows, and the circular economy potential,» ITU and UNITAR, Geneva, Bonn, 2024.
- [4] ISO, «ISO 14067:2018(ES) Gases de efecto invernadero — Huella de carbono de productos — Requisitos y directrices para cuantificación,» 2018.
- [5] G. d. C. Ministerio del Medio Ambiente, «Ley Marco para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje,» 2020.
- [6] G. d. Chile, «Franquicias Tributarias para la Importación de Bienes de Capital: Artículo 12, letra B, N°10 del D.L. N°825».
- [7] S. N. d. Aduanas, «Resolución Exenta N° 2675 del 03.06.2010. Procedimiento de Aforo y Presentación de Solicitudes por el Agente de Aduana.,» 2010.
- [8] G. d. Chile, «Decreto Ley 825 - Ley sobre impuesto a las ventas y servicios,» 1974.
- [9] G. d. Chile, «DFL 30 - Aprueba el texto refundido, coordinado y sistematizado del decreto con fuerza de ley de hacienda N° 213, de 1953, sobre ordenanza de aduanas,» 2005.

- [10] G. d. C. Ministerio de Salud, «Decreto 148 - Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos,» 2003.
- [11] G. d. C. Ministerio del Medio Ambiente, «Ley 20920 - Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje ministerio del medio ambiente,» 2016.
- [12] G. d. C. Ministerio de Salud, «Guía para la Aplicación del Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos Destinada a Pequeños Generadores».
- [13] M. d. M. A. Gobierno de Chile, «Diagnóstico residuos de paneles fotovoltaicos. Informe N°3 de la Hoja de Ruta para la Economía Circular en Chile,» 2021.
- [14] C. D. E. A. Solar Circular, «Resultados de implementación y validación técnica para reutilización de módulos FV,» 2023.
- [15] G. d. Chile y GTZ, «Guía para la elaboración de planes de manejo de residuos peligrosos».
- [16] CIRCUSOL Consortium, «Labelling and certification protocols for second life PV modules,» CIRCUSOL Project, European Union Horizon 2020, Brussels, 2022.
- [17] A. D. y. R. Geyer, «Photovoltaic waste assessment in Mexico, Resources, Conservation and Recycling,» 2017.
- [18] A. W. a. G. H. S. Weckend, «End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels,» 2020.
- [19] N. S. S. J. R. P. S. K. N. U. A. H. Amornrat Limmanee, «A Survey of Decommissioned Photovoltaic Modules from Solar Power Plants in Thailand: Performance and Second Life Opportunities,» *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 18, nº 12, 2023.
- [20] N. R. E. L. (NREL), «Environmental Impacts of Solar Energy: Exploring the Life Cycle,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov>.

- [21] IEA-PVPS Taks 12, «Report on PV Recycling Life Cycle Inventories (LCI) and Environmental Performance Reporting Indicators (EPRI),» Paris, France, 2024.
- [22] Soren, «Circular Solar Economy: New Life for Old PV Modules,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.soren.eco>.
- [23] F. ISE, «Photovoltaics Report,» May 2025. [En línea]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>.
- [24] P. d. I. N. U. p. e. M. A. (PNUMA), «Informe Global de Residuos Electrónicos,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.unep.org>.
- [25] NREL, «Long-term degradation of PV systems matches expectations,» *PV magazine*, 2024.
- [26] IEA PVPS, «Review of failures and degradation of photovoltaic modules,» *IEA PVPS Task 13*, 2024.
- [27] D. C. K. S. R. V. K. & N. J. Jordan, «Compendium of photovoltaic degradation rates,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, pp. 24(7), 978-989, 2016.
- [28] B. S. B. O. C. & R. S. Marion, «Field performance of photovoltaic modules in a hot-dry climate.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, pp. 130, 119-126, 2014.
- [29] E. L. & v. D. E. E. Meyer, «Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters,» *IEEE Transactions on Reliability*, pp. 53(1), 83-92, 2004.
- [30] J. C. & G. R. Domínguez, «Photovoltaic waste assessment in Mexico,» *Renewable Energy*, pp. 52, 480-488, 2013.
- [31] M. & P. J. Cabanillas, «Efectos del ensuciamiento en módulos fotovoltaicos y su impacto en la generación eléctrica,» *Revista Energía Solar*, pp. 25(2), 112-120, 2017.

- [32] K. P. M. J. & P. J. M. Branker, «A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 15(9), 4470-4482, 2011.
- [33] S. d. E. y. C. (SEC) y M. d. Energía, «Instrucción Técnica General RIC N°9.1/2021, Diseño y Ejecución de las Instalaciones Fotovoltaicas Aisladas de las Redes de Distribución».
- [34] IEC, «IEC 61215-1 Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements,» International Electrotechnical Commission, Geneva, Suiza, 2016.
- [35] IEC, «IEC 61215-2 Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures,» International Electrotechnical Commission, Geneva, Suiza, 2016.
- [36] Ossila Ltd., «Measuring and Analysing an I-V Curve,» 19 01 2022. [En línea]. Available: <https://www.ossila.com/pages/iv-curves-measurement>. [Último acceso: 19 Enero 2022].
- [37] D. Kondepudi y I. Prigogine, *Modern thermodynamics : from heat engines to dissipative structures*, Chichester ; New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [38] TWI Global, «What is thermography in engineering?,» TWI Global, [En línea]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-thermography-in-engineering>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [39] D. D. Rooij, «Heat Generation in PV Modules,» SinoVoltaics, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/heat-generation-in-pv-modules/>. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [40] PV Education, «Heat Generation in PV Modules,» PV Education, [En línea]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/heat-generation-in-pv-modules>. [Último acceso: 17 Enero 2022].

- [41] I. E. Commision, «IEC Technical Specification 62446-3: Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 3: Photovoltaic modules and plants - Outdoor infrared thermography,» 2016.
- [42] A. Petraglia y V. Nardone, «Electroluminescence in photovoltaic cell,» Second University of Naples, Department of Environmental Science, Napoli, 2011.
- [43] I. E. Commision, «IEC 61730-1: Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction,» 2023.
- [44] E. Commision, «RoHS Directive 2011/65/EC,» 2011.
- [45] Chauvin Arnaux Group, *Guía de la medición de aislamiento*, 1 ed., 2010.
- [46] Associated Research Inc., «Solar Panel Testing: Insulation and Grounding,» 2013.
- [47] BET-SOLAR, «<https://betsolar.es>,» 06 07 2021. [En línea]. Available: <https://betsolar.es/la-tecnologia-bus-bar-en-los-paneles-fotovoltaicos/>. [Último acceso: 06 07 2021].
- [48] «<https://www.sfe-solar.com>,» 06 07 2021. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-caja-conexiones-diodos-proteccion-bypass/>. [Último acceso: 06 07 2021].
- [49] <https://www.solar-junction-box.com>, «<https://www.solar-junction-box.com>,» 06 07 2021. [En línea]. Available: https://www.solar-junction-box.com/product_category/31695.html. [Último acceso: 06 07 2021].
- [50] J. Rabanal-Arabach, «Development of a c-Si Photovoltaic Module for Desert Climates,» Universität Konstanz, Konstanz, Alemania, 2019.
- [51] O. Ltda, «Measuring and Analysing an I-V Curve,» 19 01 2022. [En línea].

- [52] C. R. P. & B. M. Sánchez, «Evaluación de la degradación en módulos solares,»
Revista de Energías Renovables, pp. 12(4), 45-59., 2018.