

PROYECTO DE BIEN PÚBLICO

BUENAS PRACTICAS PARA LA MANIPULACION, ALMACENAJE Y TRASLADO DE MFV



Proyecto Ejecutado por:



SUDTRADE

Proyecto apoyado por



Proyecto Financiado por:



Autoras y Autores

Dr. Edward Fuentealba Vidal, Ing. Javier Astudillo Ledezma,
Ing. Sonia Beltrán Condori, Dr. Jorge Rabanal-Arabach

Antofagasta, julio de 2023

Tabla de contenido

I. PRESENTACIÓN	4
I.1 Tecnologías fotovoltaicas empleadas en Chile.....	4
I.2 Descripción de los módulos fotovoltaicos.....	5
I.2.1 Celda Fotovoltaica	6
I.2.2 Vidrio Frontal y/o Trasero	6
I.2.3 Backsheet	7
I.2.4 Marco de Aluminio Anodizado	7
I.2.5 Caja de conexiones	8
I.2.6 Cable de interconexión.....	9
I.2.7 Conectores.....	9
I.2.8 Etiqueta.....	10
I.3 sistemas fotovoltaicos	10
I.3.1 Componentes de un SFV	11
I.3.2 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos.....	11
II. PRINCIPALES FALLAS POR FABRICACIÓN, TRANSPORTE, MANIPULACIÓN Y ALMACENAJE de MFV	14
III. BUENAS PRÁCTICAS PARA RETIRO, ALMACENAJE, TRANSPORTE Y CLASIFICACIÓN DE MFV DE 2DA VIDA	20
III.1 Retiro de MFV en operación	20
III.1.1 Recomendaciones para la manipulación de MFV	20
III.2 Almacenaje de MFV.....	22
III.2.1 Clasificación y almacenaje en base al tipo de falla.....	22
III.3 Transporte de MFV.....	26
III.3.1 Pallet de las dimensiones correctas y en buen estado	26
III.3.2 Asegurar la pila de MFV.....	26
IV. RECOMENDACIONES PARA INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE MFV DE 2DA VIDA.....	27
IV.1 Inspección visual en terreno	27
IV.2 Recomendaciones para montaje	28
IV.2.1 Protección de los conectores MC4.....	29
IV.2.2 Manejo de cables de los MFV	29
IV.2.3 Correcto conexionado entre los MFV	30

- IV.3 Uso de microinversores y optimizadores en SFV 31
 - IV.3.1 Ventajas..... 31
- IV.4 Diseño y conexionado del campo solar..... 32
- IV.5 Protecciones requeridas para la seguridad de la instalación..... 33
- IV.6 Operación y Mantenimiento 33

I. PRESENTACIÓN

Considerando que los módulos fotovoltaicos de 2da vida pueden utilizarse en diversas aplicaciones que requieran la generación de electricidad u otros usos, previos al reciclaje, se genera este manual de buenas prácticas con el fin de contar con una breve descripción de las tecnologías y los cuidados necesarios para disminuir los daños en los módulos fotovoltaicos posterior al retiro, almacenamiento y transporte desde las plantas fotovoltaicas.

Se presentan alguna fallas típicas fáciles de identificar antes de definir el destino final de los módulos fotovoltaicos y algunas recomendaciones en proyectos de generación con el empleo de estas tecnologías.

I.1 TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS EMPLEADAS EN CHILE

Los módulos fotovoltaicos aprovechan la energía solar para convertirla en energía eléctrica, a través del efecto fotovoltaico. Existen diversas tecnologías fotovoltaicas, pero este manual se centra en las tecnologías monofaciales de silicio cristalino, c-Si (ver Fig. I.1). Estas tecnologías son las empleadas con mayor volumen en diversos proyectos de generación de electricidad de grandes plantas fotovoltaicas. Adicionalmente, se describen algunas recomendaciones para tecnologías bifaciales sin marco metálico.

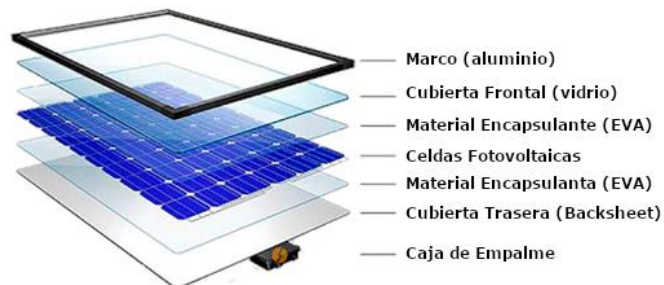


Fig. I.1. Composición de un módulo fotovoltaico.

Las tecnologías monofaciales han avanzado contantemente mejorando la eficiencia e incrementándose en potencia año a año, con la limitación teórica¹. Entre sus variaciones se encuentran: incremento en el número de celdas de 60 a 72 celdas, incremento en el tamaño de la celda, cortar las celdas (HC:haf-cut-cells), incrementar los busbar entre otros, como presenta la siguiente.

¹ límite Shockley-Queisser 33,7%.

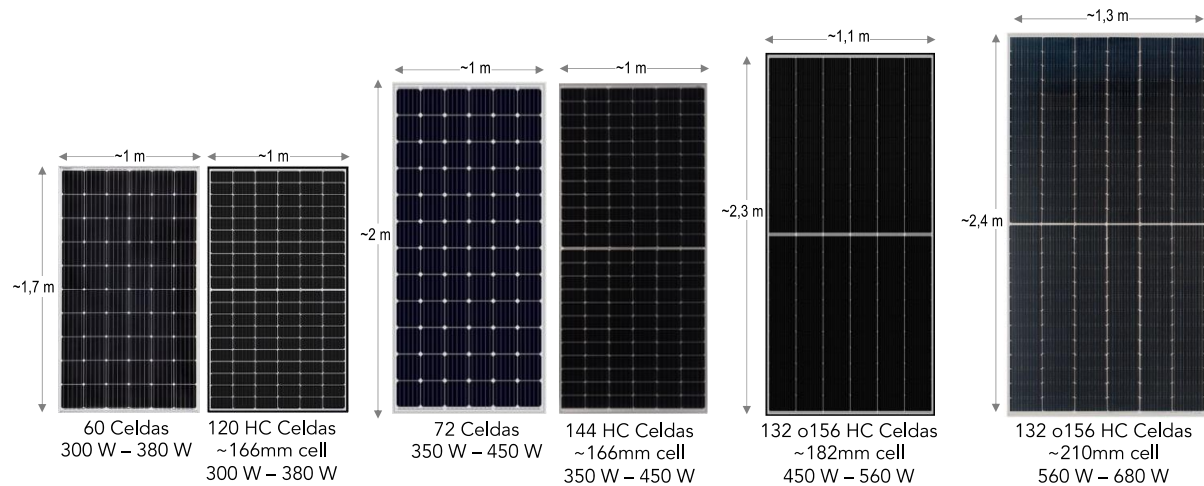


Fig. I.2. Módulos fotovoltaicos comerciales

I.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

El silicio cristalino (c-Si) es el material más empleado para fabricar obleas (*wafer*) de diversos tamaños. Estas obleas se transforman en celdas fotovoltaicas (ver Fig.I.3) después de un proceso de metalización y otras etapas que entregan las celdas para ser agrupadas en la formación de un módulo fotovoltaico.

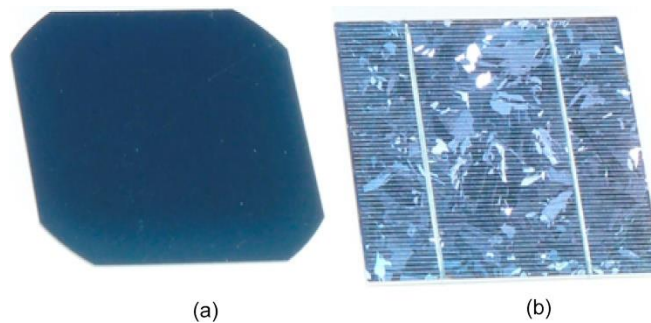


Fig. I.3. (a) Celda monocristalina, (b) Celda Policristalina²

El conjunto de celdas conectadas en configuraciones serie-paralelo permiten formar los MFV, los cuales se componen por:

- a) Celda fotovoltaica
- b) Vidrio Frontal y/o Trasero
- c) Cara trasera (*Backsheet*)
- d) Marco Aluminio Anodizado
- e) Caja de conexiones (Juntion Box)
- f) Cable

² Fuente : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116308152>

g) Conectores

h) Etiqueta

I.2.1 Celda Fotovoltaica

Las celdas de silicio cristalino se encargan de convertir la energía solar en electricidad. Estas se componen de líneas muy finas que cruzan toda la celda. Estas líneas, denominadas "*fingers*", tienen como función recoger los portadores de carga generados por las celdas y canalizarlos hacia el *busbar*, las cuales son unas barras metálicas que conducen la electricidad, que van impresas sobre las caras de la celda, donde se conecta el *ribbon* por medio de una soldadura de estaño. Este *ribbon* o *tabbing wire*, es un conductor, usualmente de cobre recubierto de plata y estaño, que conecta cada celda con las demás formando una serie eléctrica.

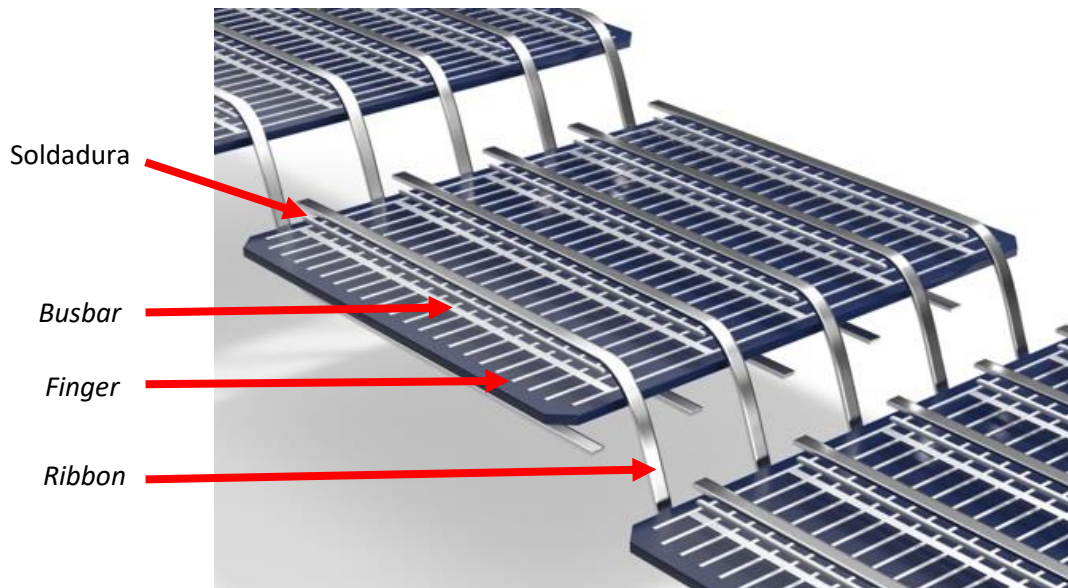


Fig. I.4. Conexión front-to-back típico de celdas solares c-Si.

I.2.2 Vidrio Frontal y/o Trasero

El vidrio fotovoltaico es de bajo contenido de hierro para mejorar su transmisividad, además de ser templado para resistir a impactos y fuerzas de torsión provocadas por el viento. Se fabrica usualmente con espesores de 2.0 a 3.2 mm (ver Fig. I.1).

El vidrio trasero es de similares condiciones que el frontal, para tecnologías bifaciales. El espesor del vidrio puede disminuir para reducir el peso del módulo, pero sin sacrificar su resistencia. Es usual ver configuraciones de doble vidrio con espesores de 2.0 mm por cada cara.

I.2.3 Backsheet

La parte trasera de los módulos se conoce como *backsheet*. Es usualmente una lámina polimérica de tipo TPT o PVF (poliéster y polivinilos) de color blanco. Esta superficie es la más frágil del MFV.

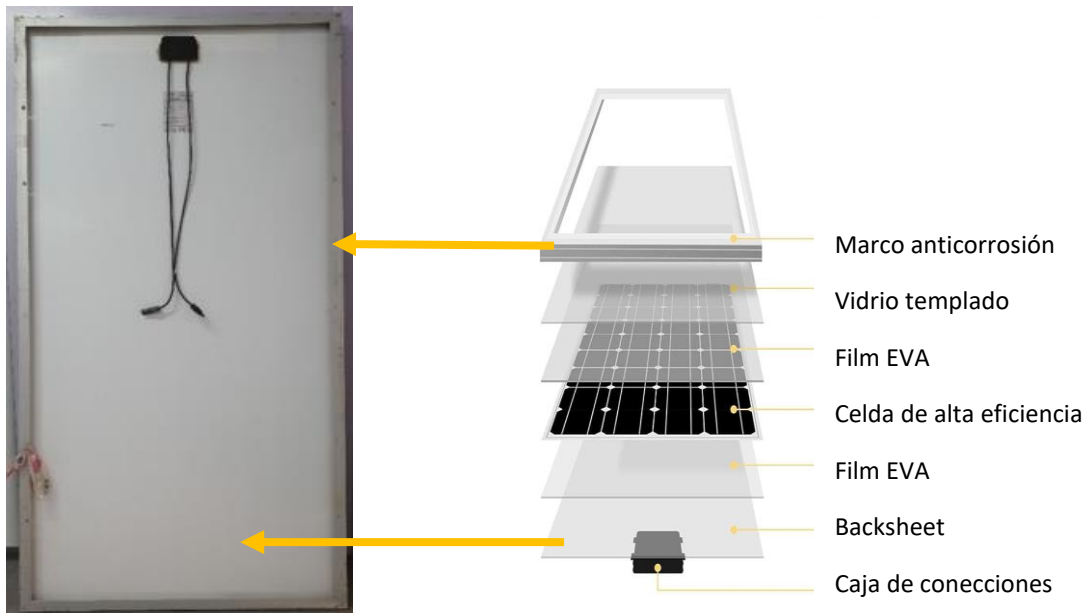


Fig. I.5. Módulo Fotovoltaico monocelular si-c

I.2.4 Marco de Aluminio Anodizado

El marco de aluminio anodizado cumple la función de dar resistencia al MFV para su traslado, instalación y operación (ver Fig. I.6), además de ofrecer un punto metálico de conexión para drenar a tierra la estática generada por el roce del viento, reduciendo los fenómenos de PID³. El mercado ofrece MFV con marco y sin marco metálico (vidrio-vidrio). El marco permite la sujeción del MFV a la estructura de soporte, a través de abrazaderas metálicas de sujeción (clips). Algunas abrazaderas tienen bordes de gomas, resistentes a la radiación, para uso con MFV vidrio-vidrio. Ejemplos de estos se muestran en la Fig. I.7.

³ Degradación por potencial inducido

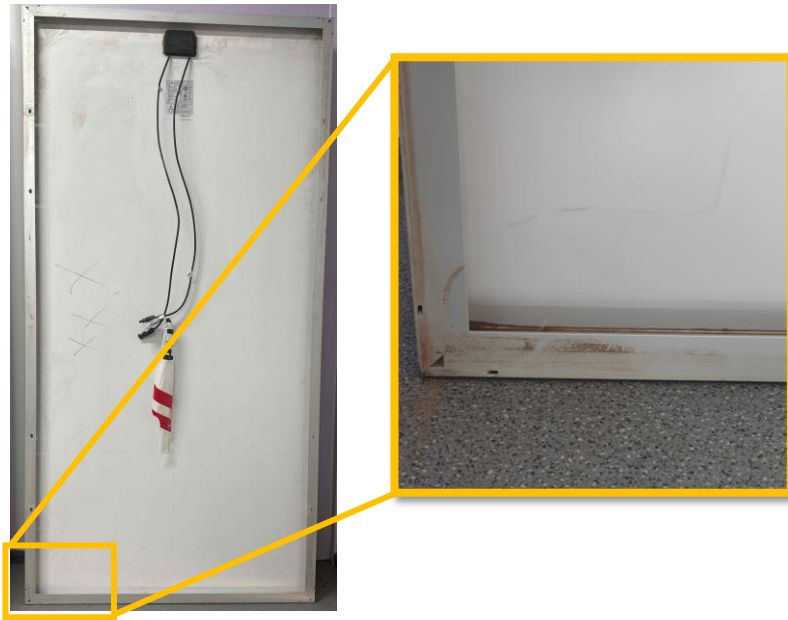


Fig. I.6. Marco de aluminio con claros rastros de corrosión



Fig. I.7. Tipos de clips metálicos de sujeción

1.2.5 Caja de conexiones

La caja de conexiones o Junction Box (j-box) se ubica en la cara trasera superior de los módulos monofaciales y bifaciales de celdas sin cortar. Cuando las celdas son cortadas (HC), la caja de conexiones se ubica usualmente en la parte trasera central del MFV, así evita sombras y el incremento de la resistencia serie de la conexión entre celdas. Esto se realiza para evitar pérdidas por sombreadamiento. La caja de conexiones permite unir los string de celdas y generar un polo positivo y negativo del módulo total. La j-box lleva diodos de *bypass*, que permiten aislar los string que presentan problemas de generación por **puntos calientes y sombreados** en el MFV. Ejemplo de j-box al centro del MFV se muestra en la Fig. I.8.

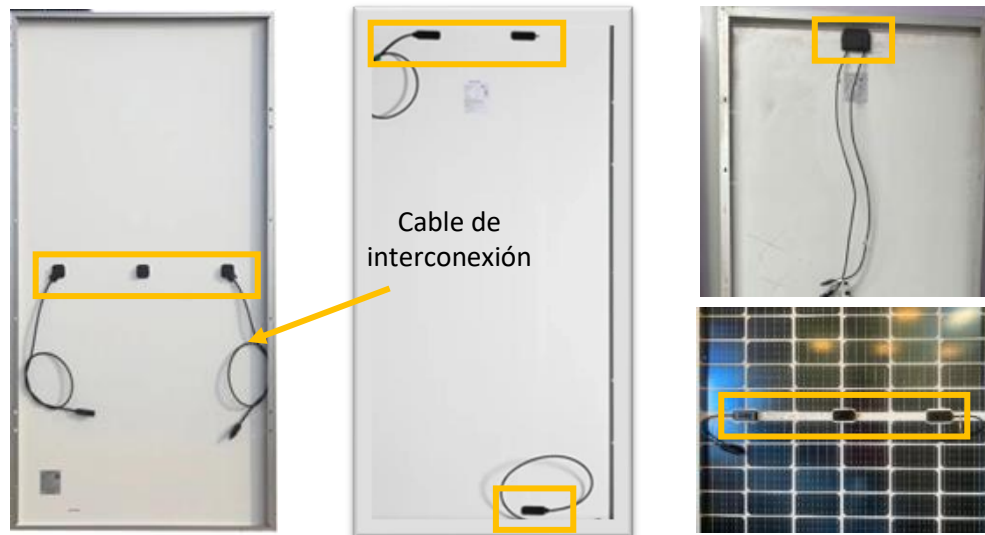


Fig. 1.8. Tipo de caja de conexiones (junction box)

1.2.6 Cable de interconexión

El cable empleado para interconectar los MFV (terminal positivo y terminal negativo) se conoce usualmente como cable solar⁴. Normalmente su dimensión es de 1 a 1,2 m de largo y de un calibre de 4 mm². Existen de diversos colores, pero en el MFV son de color negro. Este cable tiene una protección para radiación ultravioleta, pero no se aconseja exponerlo directo al sol (considerando la vida útil del proyecto).

1.2.7 Conectores

Los conectores se emplean para generar una conexión fiable y fácilmente reversible entre los MFV y el resto del circuito. Actualmente el estándar es el MC4⁵. Para unir el cable y el conector es necesario emplear una crimpadora, que permite remover el aislante del cable y presionar éste con el conector metálico. Luego, se cierra el conector, y se aprieta mediante la rosca del conector con la ayuda de una herramienta adicional, diseñada para este fin. Esto se puede apreciar en la Fig. 1.9.

⁴ Cable con mejores capacidades de resistir la radiación UV debido a la composición de sus materiales. Este cable presenta mayor durabilidad al exponerse directamente al Sol que otros conductores del mercado.

⁵ Conjunto de siglas en donde "MC" son las siglas del fabricante "Multi-Contact" y el "4" se refiere al diámetro pasador de clavija de contacto de 4 milímetros



Fig. I.9. Tipos de conectores en PFV

1.2.8 Etiqueta

Las etiquetas en los módulos fotovoltaicos presentan los parámetros básico del MFV, además de identificar el fabricante y modelo del MFV empleado. Esta etiqueta debe mantenerse durante toda la vida útil del MFV. La pérdida de esta puede dificultar su reemplazo y reutilización.

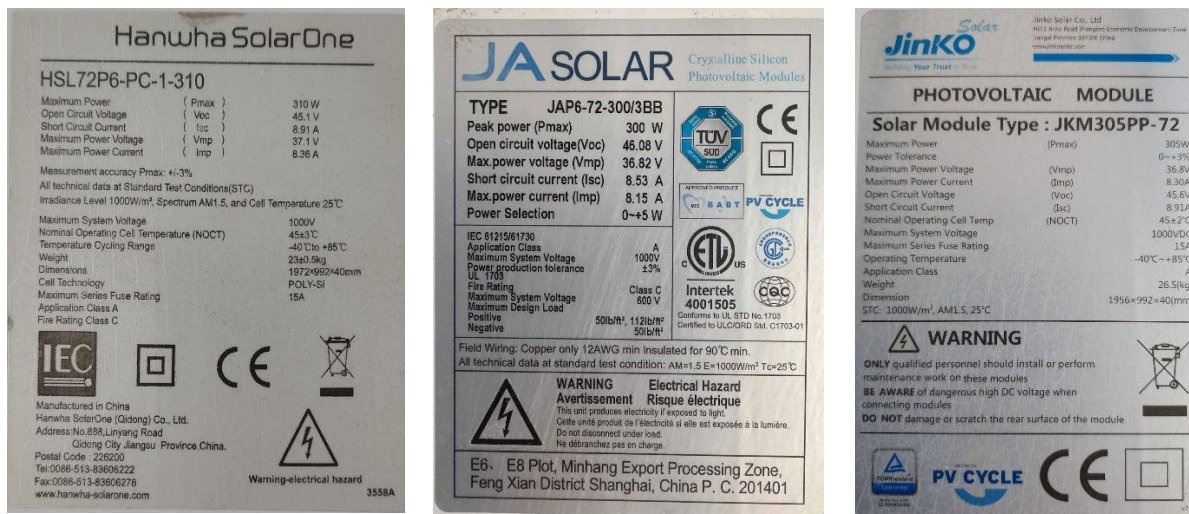


Fig. I.10. Tipos de etiquetas en módulos comerciales.

I.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un Sistema Fotovoltaico (SFV) es un sistemas eléctrico compuesto por; MFV, que permiten la conversión de energía solar en electricidad (corriente continua), un sistema de distribución en corriente continua, un inversor que permite convertir la corriente continua a corriente alterna o regulador si la corriente continua es condicionada en otros parámetros de corriente continua. Si la configuración es desconectada de la red eléctrica (off-grid) la energía producida se emplea para alimentar cargas eléctricas o disponerla en baterías. Para la configuración conectada a la red (on-grid o grid-tie) la energía producida alimenta cargas eléctricas o es drenada a la red eléctrica.

I.3.1 Componentes de un SFV

El sistema fotovoltaico se compone por:

Campo Solar : Compuesto por los módulos fotovoltaicos (MFV) y las estructuras de montaje que se emplean para sujetar los MFV al techo de las viviendas o al suelo. Los MFV pueden ser construidos de distintas tecnologías, tales como Silicio (policristalino o monocristalino), capa fina (Telurio de cadmio, silicio amorfo), Perovskita, CPV (Concentrator Photovoltaic) y multiunión.

Sistema de Distribución : Divido en: a) sistema de distribución en corriente continua, correspondiente a los conectores MC4, cables y conductores eléctricos que conectan los paneles al inversor, Conduit y accesorios para conectar los MFV con el inversor y b) sistema de distribución en corriente alterna, correspondiente a los conectores, cables y conductores eléctricos que conectan el inversor a la red eléctrica y accesorios que permiten conectar el inversor con el tablero de protecciones eléctricas.

Inversor Fotovoltaico : Equipamiento encargado de convertir la energía generada en corriente continua a corriente alterna para poder realizar la conexión con la red eléctrica del sistema.

Tablero de protecciones : Conjunto de dispositivos eléctricos, de acuerdo con la normativa eléctrica chilena y SEC, para dar protección al sistema eléctrico de la residencia y controlar el suministro eléctrico a un consumo. Debe ubicarse en un lugar accesible y a lo menos debe contener: tablero (caja), protecciones termomagnéticas y diferenciales.

Medidor de Energía Bidireccional (on-grid): Dispositivo aprobado por la SEC que permite medir el flujo de energía desde la red a la vivienda y desde la vivienda a la red si hubiera energía sobrante.

Todos los componentes empleados en las instalaciones deben tener certificación SEC y ser instalados de acuerdo con la normativa eléctrica chilena.

Es importante tener en cuenta que los componentes específicos de un sistema fotovoltaico pueden variar según el tamaño del sistema, su ubicación geográfica, la cantidad de energía que se espera producir y otros factores.

I.3.2 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes configuraciones para los SFV, las cuales son definidas si el SFV se conectará a una red eléctrica existente o si generará su propia red aislada. En base a esto, podemos identificar las configuraciones siguientes:

- a) Sistema on-grid: también llamado *grid-tie* (atado a la red) se refiere a aquellos sistemas que inyectan la energía generada por los MFV a un sistema eléctrico ya existente. Sus componentes son; inversores on-Grid, módulos fotovoltaicos, tablero DC Box y tablero de distribución AC Box.

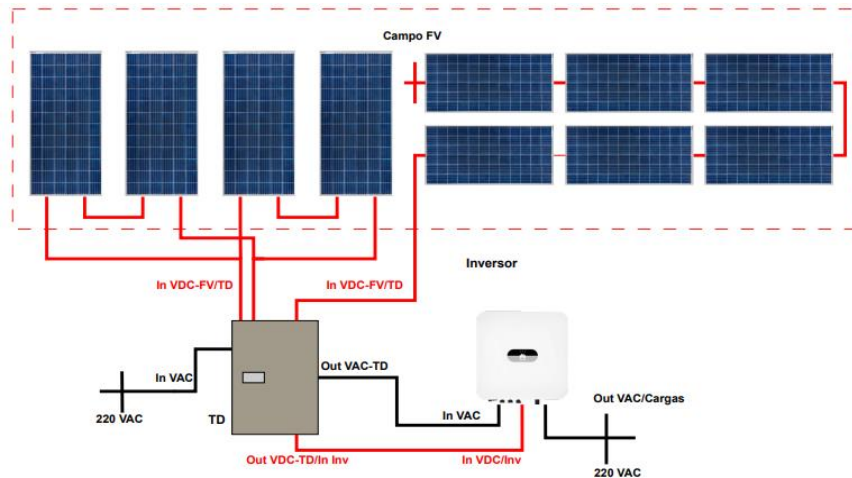


Fig. I.11. Esquema referencial de un SFV Grid-Tie

- b) Sistema off-grid: Este tipo de sistemas operan de manera aislada, generando su propia red eléctrica. Para este tipo de sistemas se debe de utilizar un inversor capaz de operar de manera aislada (modo isla). Los componentes se distribuyen de la siguiente manera; inversor off-Grid, módulo fotovoltaico, controlador de carga, baterías, tablero DC Box y tablero de distribución AC Box.

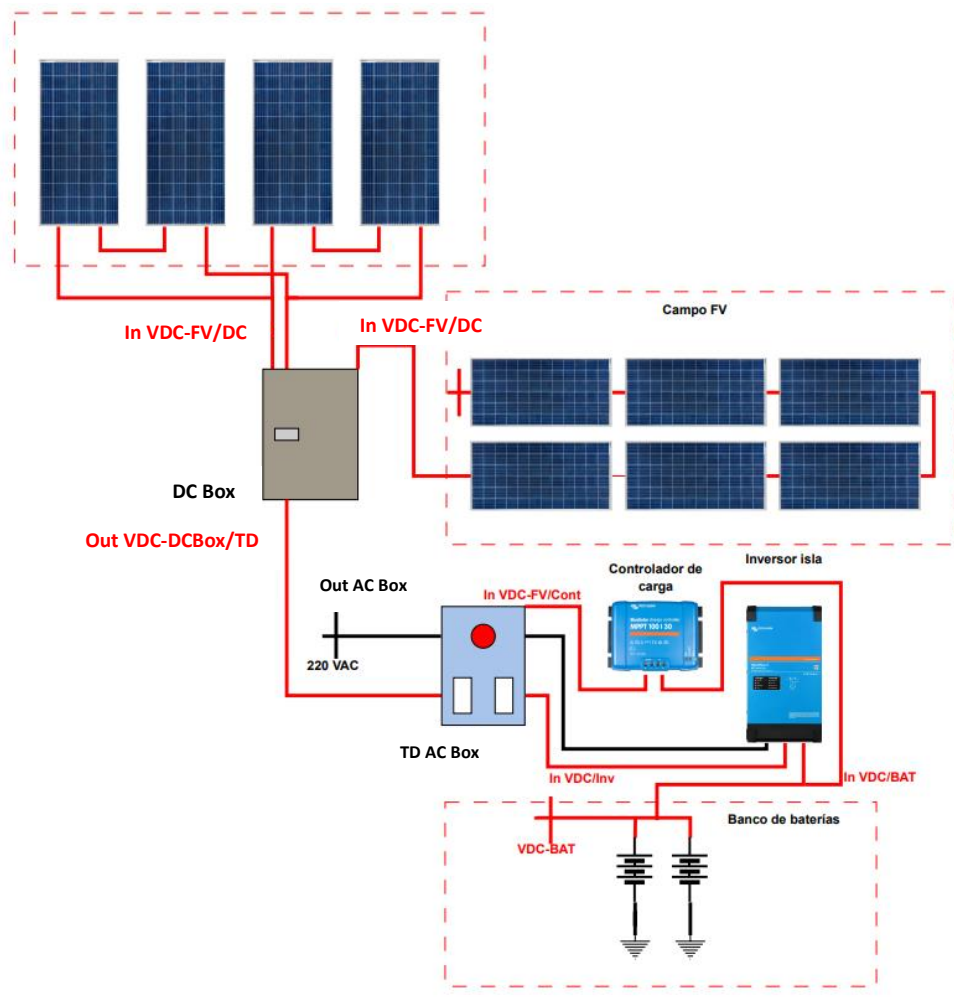


Fig. I.12. Esquema referencial de un SFV Off-Grid

- c) Sistema híbrido: Se refiere a aquellos sistemas que utilizan una combinación de inversores on-grid y off-grid para generar un sistema eléctrico aislado. Esta configuración nace del hecho que, generalmente, los inversores on-grid son más baratos, por lo que en lugar de utilizar únicamente inversores off-grid en paralelo (para aumentar la capacidad del sistema), se utiliza un inversor off-grid para generar una señal de referencia y, en paralelo, se conectan inversores on-grid, que copian esta señal, permitiéndoles así entregar su energía al sistema.

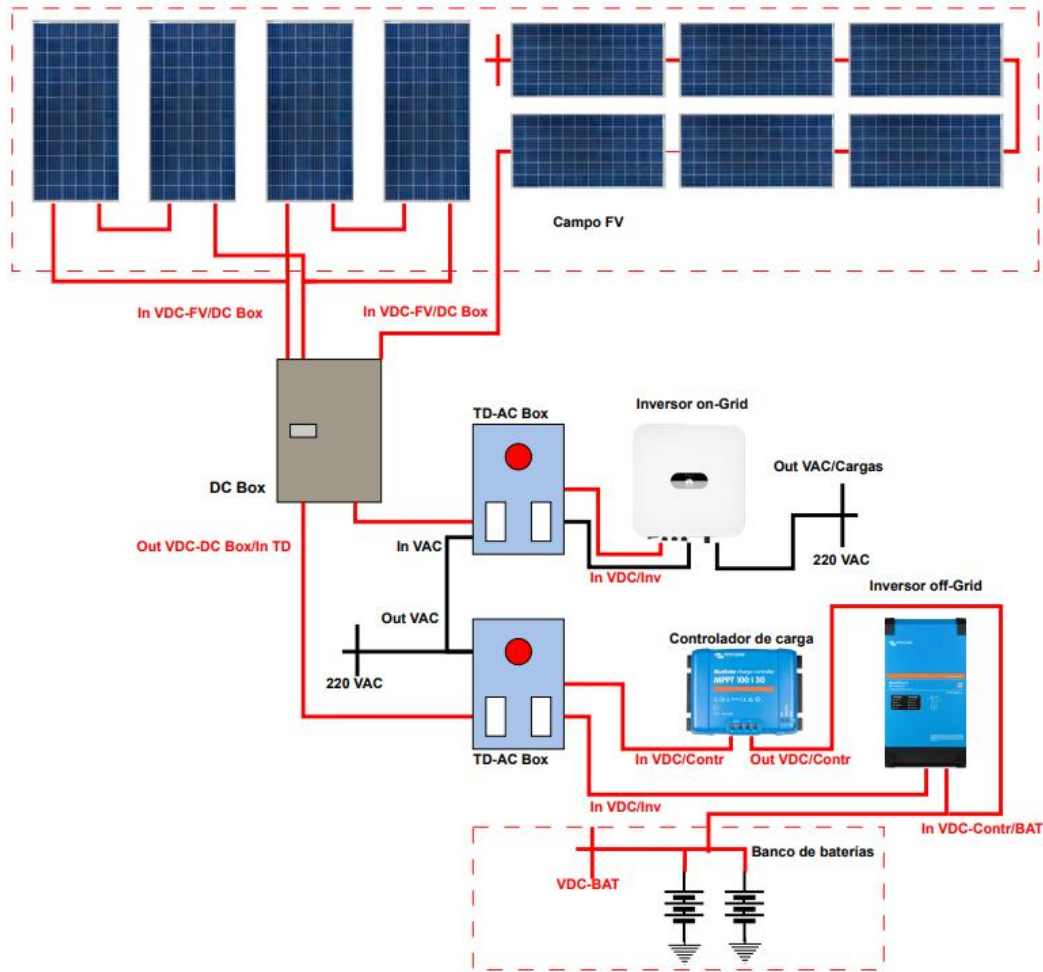


Fig. I.13. Esquema referencial para SFV híbrido.

II. PRINCIPALES FALLAS POR FABRICACIÓN, TRANSPORTE, MANIPULACIÓN Y ALMACENAJE DE MFV

Desde que un MFV se fabrica hasta que es instalado en un SFV, este experimenta una extensa manipulación, lo cual lo hace propenso a desarrollar una serie de fallas. También se deben considerar las condiciones ambientales en donde el MFV es almacenado o instalado, ya que las condiciones climatológicas extremas facilitan la aparición de algunos tipos de fallas. Con el fin de dar a conocer el análisis de módulos retirados de plantas fotovoltaicas industriales en el Desierto de Atacama se presentan las fallas más comunes observadas en MFV dados de baja de SFV, además de una breve descripción de cada uno y las condiciones asociadas a la aparición de dichas fallas:

- **Daño en cables / conectores**

El daño más común en cables y conectores se provoca por aplastamiento, lo cual produce una rotura en conectores y un daño de la aislación en los cables. Principalmente son producidos por:

- ✓ No respetar las curvaturas de cables y presionarlos excesivamente por amarras plásticas a la estructura.
- ✓ Almacenaje inadecuado provocado al apilar de manera incorrecta los MFV, dejando atrapados los cables/conectores entre los MFV de la pila. Esto puede provocar la pérdida de aislación o corte del cable
- ✓ Daños de manera fortuita durante la manipulación (generalmente al ser pisados por los instaladores).

Ejemplos de este tipo de daño se muestra en la Fig. II.1 y Fig. II.2



Fig. II.1. Cables aplastados



Fig. II.2. Conector dañado por aplastamiento

- **Desprendimiento de Cables de la J-Box**

El desprendimiento del cable se puede producir por diversas situaciones tales como:

- ✓ Corte de amarras que aseguran los cables a la estructura. Esto provoca esfuerzos adicionales que son agravados si el campo solar se encuentra en movimiento y existen condiciones de fuertes viento.
- ✓ Los cables sueltos pueden enredarse y ser arrancados por el tracker.

En la Fig. II.3 se muestra un MFV cuyo cable del polo positivo fue arrancado desde la Jbox.



Fig. II.3. MFV con un cable arrancado

- **Daño en la Jbox**

Generalmente producida por:

- ✓ Golpes al momento de apilar los MFV o al dejados caer durante la manipulación.
- ✓ Elevación de temperatura del circuito de los diodos de bypass, debido a sobrecorrientes por fallas en las celdas.

Un ejemplo de rotura por impacto se presenta en la Fig. II.4, mientras que un ejemplo por daño térmico se muestra en la Fig. II.5



Fig. II.4. Jbox con la tapa rota



Fig. II.5. Jbox rota por un fenómeno térmico

- **Daños en el marco de Aluminio**

Los daños en el marco se pueden producir por:

- ✓ Desprendimiento de MFV de las estructuras por mal apriete o falta de mantenimiento de instalaciones.

- ✓ Mala manipulación, lo que provoca golpes o caídas en la manipulación o el transporte, consecuencia de un mal embalaje.
- ✓ Almacenamiento inadecuado, provocado por apilar los MFV en forma excesiva y de manera desordenada o por quiebre de pallet en el transporte, carga o descarga.

Ejemplos de daño al marco se muestran en las Fig. II.6 y Fig. II.7.



Fig. II.6. Rotura en el marco de un MFV



Fig. II.7. Marco doblado

- **Daño del vidrio frontal por rotura**

Se refiere a la rotura, total o parcial, del vidrio frontal. Esto compromete la estabilidad mecánica del módulo además de permitir el ingreso de humedad y partículas externas hacia el interior del MFV. Esto ocurre por diversas razones como:

- ✓ Golpes por mala manipulación en el montaje y desmontaje del MFV.
- ✓ Mantenimiento deficiente en el apriete de pernos provoca desprendimiento de los MFV por ráfagas de viento.
- ✓ Ráfagas de viento o turbulencias con material que golpea los MFV.
- ✓ Almacenaje incorrecto. MFV apilados erróneamente; apoyados sobre la cara frontal del MFV que tienen debajo, montaje de MFV apilados en exceso producen la rotura del vidrio.

En la Fig. II.8 se muestra un MFV cuyo vidrio frontal se rompió por un impacto fuerte en el costado (marco).

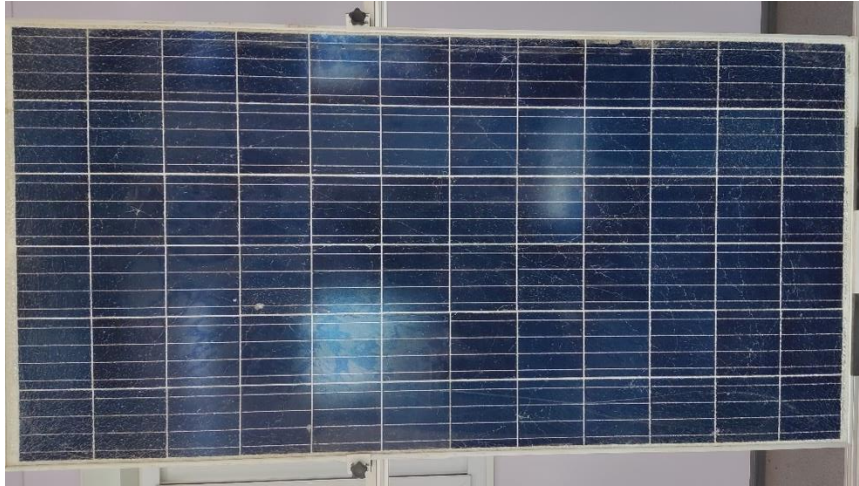


Fig. II.8. MFV con vidrio frontal roto

- **Rayaduras en el vidrio frontal**

Principalmente las rayaduras en el vidrio frontal son producidas por:

- ✓ Manipulación errónea, principalmente al retirar o depositar MFV en una pila y dejar que los MFV se arrastren en lugar de levantarlos.

Las rayaduras superficiales menores en vidrios de MFV no provocan daños en las celdas. Estas solo pueden generar alteraciones en la óptica para el paso de la luz solar. En caso de que la rayadura provoque un quiebre o sea provocada por compresión del vidrio existe la posibilidad que las celdas presenten daños. En la Fig. II.9 se muestra un ejemplo de este tipo de daño.

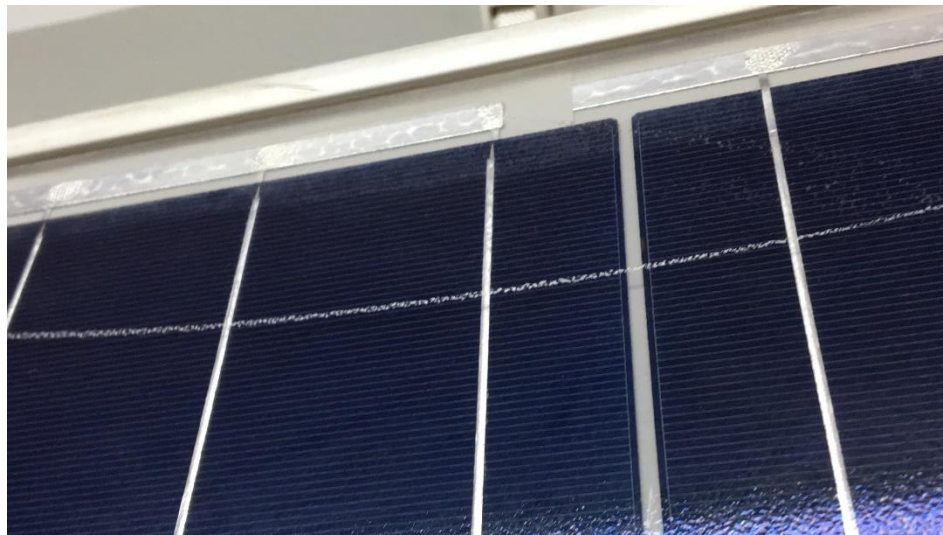


Fig. II.9 Rayadura en el vidrio frontal de un MFV

- **Daño en la backsheet**

La backsheet es un conjunto de varias capas, las roturas pueden ser parciales (no atraviesan completamente la backsheet) o totales (causan exposición de las áreas activas del MFV). Los daños provocados generalmente en la cubierta trasera se deben a:

- ✓ Manipulación descuidada, principalmente al retirar o depositar MFV en una pila y dejar que los MFV se arrastren en lugar de levantarlos.
- ✓ Golpes al momento de ubicar los MFV en las estructuras de montaje.
- ✓ Almacenaje incorrecto. Dejar la cara trasera expuesta a degradación o daño por condiciones medioambientales (por ejemplo: exposición prolongada a radiación directa, vientos con material abrasivo)

Existe una alta probabilidad de que se agrieten las celdas que se encuentran bajo el área afectada. La rotura de la backsheet permite el ingreso de humedad, propiciando así la corrosión de los componentes internos. Un ejemplo de rotura total de la backsheet de muestra en la Fig. II.11, mientras que una rotura parcial se puede apreciar en la Fig. II.10.



Fig. II.10. Backsheet rota que expone la celda



Fig. II.11. Rotura parcial de la backsheet⁶

⁶ Fuente : <https://www.cleanenergyreviews.info/solar-panel-failure-degradation>

III. BUENAS PRÁCTICAS PARA RETIRO, ALMACENAJE, TRANSPORTE Y CLASIFICACIÓN DE MFV DE 2DA VIDA

III.1 RETIRO DE MFV EN OPERACIÓN

Al momento de que un módulo presente una falla, producto de una inspección visual, termografía o medición de curva V/I y se decida retirarlo del SFV, se recomienda registrar la siguiente información:

- a) Código de barra
- 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 el impacto a través de las condiciones ambientales.
- d) Causa del retiro para su posterior clasificación en el almacenaje (Por ejemplo: punto caliente, pérdida cable, conector dañado entre otros)
- e) Fecha del retiro

Adicionalmente se debiera contar con la información de la instalación del MFV siguiente:

- Código de barra
- Fecha de la instalación
- Ubicación del MFV dentro de la planta (cuadrante/string/posición dentro del string).

Se recomienda, como información complementaria, escribir sobre el marco metálico b), c) y e).

Se debe de 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. En el subcapítulo siguiente, se muestran recomendaciones para la manipulación, mientras que en el resto del capítulo se pueden encontrar recomendaciones para almacenaje y transporte.

III.1.1 Recomendaciones para la manipulación de MFV

Para evitar accidentes y daños en los MFV se recomienda:

- ✓ Transportar los MFV por al menos dos personas. Los MFV tienen una longitud de 1,8 m y un ancho de 1,0 m como mínimo y su peso esta sobre los 20 kg, lo que dificulta la manipulación por una sola persona. Esto puede generar accidentes en los trabajadores, además de incrementar las posibilidades de daños en los MFV por golpes y caídas.
- ✓ Manipular los MFV con guantes antideslizantes, a través del marco metálico. Para el caso de MFV vidrio-vidrio se recomienda el uso de ventosas para evitar caídas o cortes por deslizamientos.
- ✓ Recoger y amarrar los cables del MFV antes de manipularlos. Así se evitan accidentes y daños en cables y conectores.
- ✓ Apoyarse o dejar objetos sobre el MFV o dejar algún objeto sobre él,

Algunos ejemplos se pueden observar en la Fig. III.1. La Fig. III.3 muestra la forma adecuada en que los MFV deben ser transportados, mientras que para una mala práctica véase la Fig. III.2 y la Fig. III.4.

Adicionalmente, se debe cuidar que los conectores y cables no sean pisados, aplastados y tirados, para evitar su enganche con la estructura al momento del montaje. Apoyar los MFV en superficies inclinadas o en sectores con ráfagas de viento pueden causar que los MFV caigan y se golpeen, ejemplo de esto en la Fig. III.2.



Fig. III.1. MFV siendo transportado con un inversor (en su caja) apoyado sobre él.⁷



Fig. III.2. MFV apoyados de manera inestable



Fig. III.3. Instaladores transportando un MFV entre dos personas.⁸



Fig. III.4. Instalador parado sobre MFV y transportando un MFV de manera incorrecta⁹

⁷ <https://winaico.com/guides/handling-tips/>

⁸ ArtistGNDphotography / getty images

⁹ <https://newenglandcleanenergy.com/energymiser/2015/10/30/the-good-the-bad-and-the-ugly/>

III.2 ALMACENAJE DE MFV

Una vez retirados de las plantas fotovoltaicas los MFV deben de ser almacenados en condiciones adecuadas para su traslado y pruebas posteriores. Esto permite evitar daños adicionales y disminuir los tiempos en el transporte, clasificación y pruebas adicionales antes de destinarlos para su segundo uso. Para una mejor clasificación se recomienda:

III.2.1 Clasificación y almacenaje en base al tipo de falla

Considerando el motivo de retiro del MFV desde la instalación se recomienda:

- ✓ Generar pilas de MFV de no más de 20 unidades, separadas por:
 - ✓ Fallas sólo por puntos calientes.
 - ✓ Fallas por desprendimiento de cables y/o daño en conectores
 - ✓ Daños leves en marcos metálicos

Estas pilas de MFV deben ser ordenadas con los MFV con el vidrio hacia arriba y enhuinchadas. Idealmente con separadores entre MFV. Si el daño del MFV indica que no es apto para una segunda vida, este debe de ser apilado en forma separada. Algunos daños graves de los MFV son:

- Rotura del vidrio frontal: No es reparable y compromete la integridad estructural del MFV
- Rotura de la backsheet: Dependiendo de su magnitud puede ser reparable. Si la rotura compromete una superficie mayor al tamaño de una celda, el MFV no es apto para segunda vida y debe de ser separado.
- Marcas de quemaduras: Cualquier marca de quemadura en las celdas, metalizaciones o backsheet del MFV es indicativo de puntos caliente peligrosos, los cuales no son reparables y son un peligro para la operación del MFV
- Marcas de corrosión en la metalización o celdas: Cualquier indicio de corrosión impacta negativamente a la generación del MFV y presenta el riesgo de puntos calientes en las zonas afectadas. Todo MFV con corrosión interna que afecta una superficie mayor al 10% del total se considera no apto para reutilización y debe de ser separado.

Para aquellos MFV que si tienen potencial de reutilización, es de suma importancia almacenarlos de manera correcta para evitar que sufran daños adicionales a su retiro.

Para evitar daños adicionales que descarten MFV que puedan ser reparados se recomienda tener presente lo siguiente:

- **Apilamiento de MFV**

Los MFV al ser embalados para su transporte se ubican de manera vertical u horizontal (con el MFV apoyado sobre su costado más largo), separado en su vertical por cartón y en sus caras frontales por láminas de papel. Los material de embalaje habitualmente son descartados. Así, no están disponibles para el almacenaje de MFV retirados de las plantas. Por este motivo, se recomienda:

1. **Apilarlos en forma vertical**, cuando se disponen de las cajas u otro material para el transporte. (véase la Fig. III.5 para un ejemplo). Dicha forma de almacenamiento permite

disminuir problemas asociados a sobrecargas por su propio peso evitando generar grietas en las celdas y rotura del vidrio frontal. Se debe evitar enganchar o aplastar los cables y conectores cuando los MFV se estén almacenando.



Fig. III.5 MFV almacenados en vertical en terreno para su posterior instalación¹⁰

2. Apilarlos en forma horizontal sobrepuestos

Cuando se requiera transportar los MFV en forma horizontal sobrepuestos se recomienda no apilar más de 20 MFV para evitar causar daños a aquellos módulos que se encuentren en el fondo de la pila. Si bien las resistencias mecánicas varían dependiendo del modelo del MFV, una pila de 20 módulos ofrece un buen compromiso entre cantidad de MFV por pila y el estrés mecánico que soportan los MFV dentro de la pila, además evita deslizamiento de MFV en el transporte. En la Fig. III.6 se muestra una pila de 45 MFV, una cantidad excesiva, además de estar apilados disporejamente, en algunos casos claramente ejerciendo fuerza sobre la cara frontal de algunos MFV.

¹⁰ <https://www.longi.com/en/news/6739/>



Fig. III.6. MFV apilados en cantidades excesivas y de mala manera

3. Apilarlos de manera uniforme

Es de vital importancia al momento de apilar los MFV que estos se apoyen marco con marco (véase Fig. III.7). La cara frontal de los MFV, aunque tenga buena resistencia mecánica, no está pensada para soportar grandes cantidades de peso sobre ella. Al apoyar un MFV sobre el vidrio que tiene debajo produce daños en las celdas y según el número de MFV apilados se puede producir una rotura total del vidrio lo cual se presenta en la Fig. III.8.



Fig. III.7 MFV apilados de manera uniforme



Fig. III.8. MFV al fondo de una pila con su vidrio frontal roto debido al exceso de carga ejercido sobre su cara frontal

4. Empleo de esquineros

Debido al material de los marcos (aluminio anodizado) existe un bajo coeficiente de roce entre ellos. Esto causa que la pila de módulos se desalinee con facilidad, ya sea durante la manipulación de los MFV que hay en ella o durante el transporte. La manera de evitar esto

es empleado esquineros, ya sea de cartón o plástico, al momento de apilar los MFV (véase Fig. III.9). Dichos esquineros permiten alinear con mayor facilidad los MFV y disminuir el deslizamiento entre estos.



Fig. III.9 MFV comenzando a ser apilados utilizando esquineros de cartón

5. Daño en cables por apilamiento

Los cables deben de quedar dentro del espacio existente entre MFV cuando estos son apilados, caso contrario el cable quedará atrapado entre dos MFV (ver Fig. III.10). Esto produce daño en la aislación y el conductor generando presión que puede llegar a cortar los cables si es que hay suficiente peso sobre los MFV (lo cual suele suceder con los MFV que quedan en la mitad inferior de la pila)



Fig. III.10 Cables atrapados entre 2 MFV dentro de una pila

III.3 TRANSPORTE DE MFV

Durante el transporte la tasa de daños que sufren los MFV depende exclusivamente de:

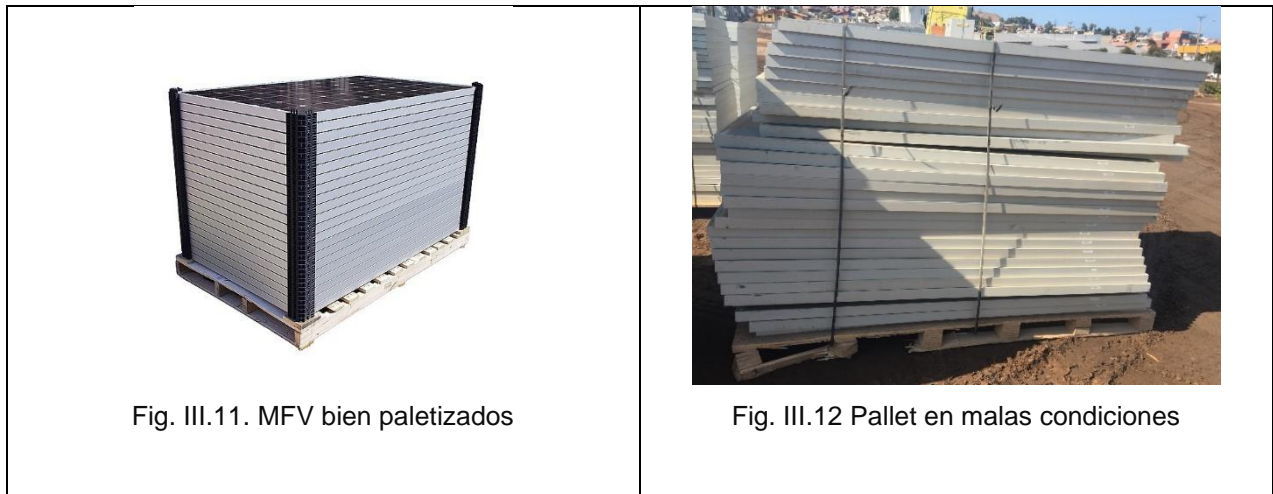
- ✓ Embalaje correcto de los MFV, para evitar deslizamiento y daño por golpes.
- ✓ Estado de camino y vehículo de transporte, considerando que los MFV están aplicados en forma horizontal sobrepuestos y no están en cajas adecuadas sin esquineros.

Para realizar un embalaje correcto se recomienda:

III.3.1 Pallet de las dimensiones correctas y en buen estado

Idealmente, el pallet debe cubrir el área completa del MFV. Un pallet demasiado pequeño causará que el peso se concentre en un área más pequeña aumentando así el estrés mecánico sobre los MFV. Un pallet demasiado grande dificulta el transporte si los MFV están enhuinchados juntos con el Pallet. Se recomienda que los MFV se enhuinche separadamente a los pallet para evitar desplazamientos y esfuerzos adicionales sobre sus bases.

Adicionalmente, un pallet agrietado o deteriorado puede romperse durante el transporte, dejando así que los MFV caigan y se dañen. Un ejemplo de MFV paletizados en un pallet en mal estado se muestra en la Fig. III.12, mientras que un ejemplo de MFV correctamente paletizados se muestra en la Fig. III.11.



III.3.2 Asegurar la pila de MFV

Inclusive si son consideradas todas las recomendaciones para apilar los MFV, igual existe la probabilidad de que los MFV se desplacen durante el transporte. Para minimizar esto y los daños que conlleva, se deben de sujetar los MFV entre ellos a través de una caja (o forrar la pila con cartón) u algún tipo de amarre (zunchos, eslingas, cuerdas, etc.). La manera más simple de lograr esto es utilizando zunchos (ya sea metálicos o plásticos), idealmente colocando dos vueltas a lo largo y una a lo ancho (véase Fig. III.13). Un ejemplo de lo anterior se puede observar en la Fig. III.14, en la cual un pallet de MFV fue enzunchado, pero los zunchos no fueron correctamente tensados (además de no usar esquineros), lo cual permite que los MFV se desplazaran durante el transporte.



Fig. III.13 MFV correctamente paletizados siendo recogidos por un montacargas



Fig. III.14 Pila de MFV con zunchos sueltos

IV. RECOMENDACIONES PARA INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE MFV DE 2DA VIDA

Los MFV de segunda vida, luego de ser sometido al proceso de pruebas, mencionado anteriormente en este informe, pueden tener una de las siguientes clasificaciones:

- a) **Apto para generación:** Estos módulos pueden no tener fallas o contar con fallas menores, las cuales no manifiestan puntos calientes y no comprometen la integridad estructural del MFV
- b) **No apto para generación, pero en buen estado mecánico:** Estos módulos presentan fallas demasiado severas como para ser usados en generación de manera segura, pero su condición mecánica aún es buena. Este tipo de MFV puede ser utilizado como barreras acústicas o de agricultura o como sombreadores
- c) **Destinado para el reciclaje:** Corresponden a los MFV que no entran en ninguna de las dos categorías anteriores, estos MFV no tienen posibilidad de reutilización y por lo tanto deben de ser reciclados.

En el caso de reutilización de MFV para SFV, todos los MFV que se reciban deberán tener la clasificación de "Apto para generación".

IV.1 INSPECCIÓN VISUAL EN TERRENO

Cuando se manipulen MFV de 2da vida para su instalación en un SFV, siempre es recomendable realizar una inspección visual para verificar el buen estado de los MFV. En terreno, la inspección visual debe ser expedita y orientarse a detectar fallas que comprometan la seguridad operativa del MFV. En general, se debe de buscar lo siguiente:

- **Conector:** Cualquier daño o corrosión. En caso de estar presentes, el conector debe de ser reemplazado antes de entrar el MFV a operación

- **Cables:** Rotura de aislación, indicios de corrosión o un aplastamiento lo suficientemente grande como para sospechar daño en los conductores. En caso de estar presente alguna de estas condiciones, el cable debe de ser reemplazado (o el área problemática removida en caso de ser posible) antes de entrar el MFV a operación
- **Junction box:** Roturas o se ha comenzado a desprender. En caso de estar presentes, la Jbox debe de ser reemplazado antes de entrar el MFV a operación
- **Backsheet:** Alguna rotura que exponga las áreas activas (interior) del MFV, o bien una acumulación de rayaduras y roturas que afecten más del 10% de la superficie del MFV.
- **Vidrio:** Cualquier tipo de rotura

Se debe de considerar que, al tratarse de MFV de 2da vida, es altamente probable que estos presenten fallas visibles a simple vista, como, por ejemplo: Decoloración del encapsulante o backsheet, snail track, rayaduras en el vidrio o abolladuras leves del marco. Dichas fallas deben de haber sido consideradas en el procedimiento de inspección para potencial de reutilización, por lo que su presencia no impide que el MFV sea instalado para generación.

IV.2 RECOMENDACIONES PARA MONTAJE

Durante el proceso de montaje (y desmontaje) los módulos fotovoltaicos (MFV) son manipulados reiteradamente. Esto los hace propensos a sufrir daños producto de malas prácticas, o descuidos, por parte de los instaladores. Los daños pueden ser leves, por ejemplo: pequeños rayones o abolladuras del marco, o ser críticos para el MFV e incluso para la instalación, por ejemplo: generación de puntos calientes causados por daños en las celdas, cables y/o conectores. Un ejemplo de mala práctica durante el proceso de montaje se muestra en la Fig. IV.1.



Fig. IV.1 Conectores siendo pisados durante su manipulación para el montaje

Además de las recomendaciones de manipulación mencionadas en el capítulo III.1.1. se debe tener presente que, cuando los MFV estén siendo montados a la estructura, estos no se golpeen con las partes

sobresalientes de la estructura, además de apoyarlos con cuidado (no dejar que se azoten o dejarlos caer) al momento de posicionarlos para su anclaje.

IV.2.1 Protección de los conectores MC4

Además de los daños físicos que estos pueden sufrir (ser aplastados o rotos) se debe cuidar que no ingrese tierra ni humedad hacia el interior de estos. El ingreso de tierra, u otro tipo de suciedad, aumenta la impedancia del contacto eléctrico entre los conectores y puede causar micro arcos. Ambos factores generan elevadas temperaturas y causan daño al conector, pudiendo llegar a causar incendios.

Por otra parte, el ingreso de humedad acelera la corrosión de los contactos metálicos dentro de los conectores, lo que aumenta la impedancia de la conexión, disminuyendo la tensión del string, e incluso pudiendo generar puntos calientes, o bien interrumpir el flujo de corriente si la corrosión es severa. Para evitar esto, se debe evitar arrastrar los cables por el suelo cuando se transportan los MFV. Los conectores deben de ser cubiertos para evitar el ingreso de elementos externos. Las tapas usadas para conectores MC4 se muestran en la Fig. IV.2



Fig. IV.2 Conectores MC4 con tapas (puestas y de demostración)¹¹

Se recomienda emplear un soplador para limpiar los conectores, previamente a la conexión cuando estos han quedado expuestos a las condiciones climáticas.

IV.2.2 Manejo de cables de los MFV

Luego de ser instalados los MFV y realizado el conexionado de los strings, es importante que los cables de los módulos sean sujetos a la estructura, a través de amarras plásticas, metálicas u otro sistema de sujeción, un ejemplo de esto se muestra en la Fig. IV.3. El dejar el cable colgado (véase Fig. IV.4) causa un estrés mecánico sobre la conexión eléctrica dentro de la Jbox. Esto puede verse incrementado por el viento. Además, el cable puede atraparse con la estructura del tracker en las instalaciones con seguimiento siendo una falla común que puede llegar a arrancar completamente el cable.

¹¹ Risin Energy Co., Ltd.



Fig. IV.3 Cables sujetos al marco de los MFV mediante amarras plásticas



Fig. IV.4. MFV instalados y con sus cables colgando libremente

IV.2.3 Correcto conexionado entre los MFV

Cuando entra tierra hacia el interior de los conectores se hace más difícil que estos se aseguren correctamente, una conexión pobre puede dañar a los conectores por exceso de temperatura e incluso generar fuego, además de existir un riesgo de arco eléctrico en caso de la desconexión mientras haya circulación de corriente. Cuando los conectores MC4 se conectan, sus seguros interactúan y aseguran a ambos conectores, lo cual produce un sonido (clic) audible. Un par de conectores MC4 bien asegurados debe de resistir un tirón (con las manos) sin soltarse. En caso de que los conectores se suelten fácilmente o bien no se aseguren entre ellos, se debe de ver tanto el exterior (estado de los seguros) y el interior en busca de tierra u otros cuerpos extraños y limpiarlos. Incluso si el conector se ve limpio y en buen estado, pero aun así no se asegura, este debe de ser reemplazado para evitar las fallas anteriormente mencionadas. En la Fig. IV.5 se muestra un par de conectores MC4 mal conectados.



Fig. IV.5 Conectores MC4 conectados, pero no asegurados

IV.3 USO DE MICROINVERSORES Y OPTIMIZADORES EN SFV

La implementación de microinversores en instalaciones fotovoltaicas es favorable debido a su capacidad para aumentar la eficiencia de la energía generada. Además, al permitir que cada panel funcione de forma independiente, es posible monitorear y diagnosticar problemas en un MFV específico, lo que facilita la reparación o sustitución de módulos dañados. También son más fáciles de instalar y mantener que los sistemas centralizados.¹²

Los optimizadores (Fig. IV.6) y microinversores (Fig. IV.7) son tecnologías diferentes empleados en los SFV a fin de mejorar su rendimiento. La implementación de alguno de ellos dependerá de la demanda requerida por el usuario. Ambos dispositivos son instalados individualmente en cada módulo fotovoltaico con el propósito de maximizar su eficiencia. De esta forma, se evitan las pérdidas de potencia que se producen por sombreadamientos o fallas de un módulo mas no afectan a la potencia general que se dirige al inversor principal.

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

IV.3.1 Ventajas

- Aumento de la eficiencia de la energía generada, al gestionar de forma individual cada MFV se pueden compensar las pérdidas de *mismatch*, causadas por sombra, no homogeneidades o desgaste en un solo módulo, aumentando así la producción total de energía.
- Monitoreo y diagnóstico de problemas en MFV individuales, facilitando la reparación o sustitución de paneles dañados.
- Permiten una mayor flexibilidad en el diseño de la instalación, ya que se pueden conectar a MFV en diferentes orientaciones y ángulos, aumentando la eficiencia del SFV.
- Mejoran la disponibilidad del SFV ya que, si falla un microinversor o un MFV, el impacto en el SFV será limitado a sólo ese conjunto en lugar de afectar a toda la instalación.

¹² <https://ecoinventos.com/microinversores/>



Fig. IV.6 Optimizador SolarEdge S1200



Fig. IV.7. Microinversor NEP BDM300

IV.4 DISEÑO Y CONEXIONADO DEL CAMPO SOLAR

Al momento de realizar el diseño del campo solar, o bien incorporar MFV de segunda vida a un SFV existente, es de suma importancia considerar tanto la tensión como la corriente a MPP que son capaces de generar estos MFV. Idealmente, se debe de combinar los MFV de tal manera que todas las *strings* tengan la misma tensión y que todos los MFV dentro de una misma *string* tengan la misma capacidad de generación de corriente.

Respecto a la tensión de trabajo, si se está incorporando un MFV de segunda vida a un sistema existente, se debe procurar que la tensión del *string* siga siendo superior a la tensión de arranque del inversor. En caso de ser un sistema nuevo, la combinación de MFV en cada *string* debe de ser tal que todas las *strings* tengan una tensión similar. El objetivo es evitar grandes diferencias de tensión entre *strings* ya que esto produce circulaciones de corriente internas, lo cual genera pérdidas y puede causar que los MFV se calienten más de lo normal. Esto se evita incorporando diodos de bloqueo en el terminal más positivo de cada *string*.

Adicionalmente, se debe de tener en cuenta el nivel de tensión del MFV indicado por la prueba de aislación, el cual no debe ser superado. Es decir, la tensión de operación del SFV debe ser menor o igual a la tensión máxima permisible del MFV.

En cuanto a la corriente generada, si se está incorporando un MFV de segunda vida a un sistema existente, se debe procurar que la corriente nominal sea lo más cercana posible a la de los MFV ya instalados. En caso de ser un sistema nuevo, todos los MFV de un determinado *string* deben de tener corrientes de cortocircuito similares. Esto se hace con el fin de evitar pérdidas de *mismatch*, las cuales causan el recalentamiento de los MFV, ya que la máxima corriente circulante en un *string* está definida por el MFV con la corriente más baja.

IV.5 PROTECCIONES REQUERIDAS PARA LA SEGURIDAD DE LA INSTALACIÓN

La única consideración adicional de seguridad que se debe de tener con este tipo de módulos es que, debido a la variación de potencias entre los MFV, se recomienda que al conectar *strings* en paralelo se adicione un diodo en serie con cada uno de estos *strings*. El propósito de estos diodos es evitar la circulación de corrientes internas (entre *strings*) debido a las diferencias de tensión que podría causar la incorporación de MFV de diversas características.

IV.6 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Un MFV de segunda vida debe de tener una hoja de vida, que permita saber de manera certera que fallas lo afectan, la ubicación y magnitud de estas al momento de habersele realizado las pruebas para determinar su estado. En base a esto, cuando se realice un mantenimiento rutinario, se debe poner atención a dichas fallas para monitorear su evolución.

Es recomendable realizar inspecciones de termografía con periodicidad semanal, con tal de hacer seguimiento a posibles amagues de incendio que podrían ser causados por evolución de microcracks en el MFV.