

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL Y POTENCIAL REUTILIZACIÓN DE  
PANELES FOTOVOLTAICOS EN LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
CHILLÁN**

**NIKOL PILAR FIERRO SEPÚLVEDA**

HABILITACIÓN PROFESIONAL  
PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL

**CHILLÁN - CHILE**

**2024**

**ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL Y POTENCIAL REUTILIZACIÓN DE PANELES  
FOTOVOLTAICOS EN LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, CHILLÁN**

**Aprobado por:**

David Lara Castells  
Ingeniero Civil Eléctrico Dr.  
Profesor Asociado

---

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona  
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Profesor Asistente

---

Asesor

Roberto Medina Correa  
Ingeniero Agrícola, Mg.  
Evaluador Externo

---

Asesor

Christian Correa Farias.  
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Profesor Asociado

---

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniero Agrónomo, Ph.-D.  
Profesor Asociado

---

Decana

## ÍNDICE DE MATERIAS

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
2.	OBJETIVOS .....	5
2.1	OBJETIVO GENERAL .....	5
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3.	ANTECEDENTES GENERALES.....	6
3.1	ENERGÍAS RENOVABLES .....	6
3.2	CONTEXTO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN CHILE .....	7
3.3	ENERGÍA SOLAR.....	9
3.3.1	APROVECHAMIENTO DIRECTO DE LA ENERGÍA SOLAR:.....	10
3.4	PANELES FOTOVOLTAICOS .....	10
3.4.1	FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES MEDIANTE DOPAJE Y SEMICONDUCTORES .....	12
3.4.2	TECNOLOGÍAS DOMINANTES EN PV ACTUALES.....	12
3.5	FALLAS EN PANELES FOTOVOLTAICOS.....	16
3.6	ANÁLISIS TERMOGRÁFICO.....	21
3.7	CURVA I-V .....	22
3.7.1	PARÁMETROS FOTOVOLTAICOS CLAVES: .....	22
3.7.2	CONDICIONES ÓPTIMAS DE MEDICIÓN PARA UNA CURVA I-V	23
3.7.3	BENEFICIOS DEL USO DEL TRAZADOR DE CURVAS I-V .....	24
3.7.4	TIPOS DE CURVAS I-V DESPUÉS DE AÑOS DE USO.....	25
3.8	LA PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS DE PANELES SOLARES....	27
4.	METODOLOGÍA.....	32
4.1	JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	32
4.2	ESTUDIO .....	32
4.3	ESTADO ACTUAL Y DETECCIÓN DE DAÑOS DE LOS PANELES .....	32
4.3.1	PRUEBA DE AISLAMIENTO .....	33
4.3.2	INSPECCIÓN VISUAL.....	33
4.3.3	ANÁLISIS TERMOGRÁFICO.....	35
4.4	EVALUACIÓN PARA DETERMINAR EFICIENCIA, DEGRADACIÓN Y VIDA ÚTIL RESTANTE .....	38
4.4.1	CURVA I-V .....	38
4.4.2	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ACTUAL .....	39

4.4.3	ANÁLISIS DE DEGRADACIÓN: .....	40
4.4.4	ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL RESTANTE .....	40
4.4.5	GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS PANELES .....	41
4.5	. VIABILIDAD DEL RECICLAJE O DESECHO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL .....	42
4.5.1	COMPARACIÓN DE FORMAS DE RECICLAJE .....	42
4.5.2	VIABILIDAD DE DESHECHAR LOS PV EN VERTEDERO.....	43
5.	RESULTADOS .....	44
5.1	EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL Y DETECCIÓN DE DAÑOS DE LOS PANELES .....	44
5.1.1	PRUEBA DE AISLAMIENTO .....	44
5.1.2	INSPECCIÓN VISUAL.....	46
5.1.3	ANÁLISIS TERMOGRÁFICO.....	51
5.2	EVALUACIÓN PARA DETERMINAR EFICIENCIA, DEGRADACIÓN Y VIDA ÚTIL RESTANTE .....	57
5.2.1	CURVA I-V.....	57
5.2.2	ANÁLISIS DE CURVA I-V Y CURVA P-V .....	60
5.2.3	ANÁLISIS DE EFICIENCIA, DEGRADACIÓN Y VIDA UTIL RESTANTE DE LOS PANELES .....	66
5.2.4	GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	68
5.3	EMPRESAS DE RECICLAJE EN CHILE .....	70
5.4	OPCIÓN MÁS VIABLE PARA EL DESTINO FINAL DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.....	73
6.	REFERENCIAS.....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Composición típica de materiales en un panel fotovoltaico unifacial basado en silicio, mono y policristalino. ....	11
<b>Tabla 2.</b>	Anomalías en Curvas IV - Pendiente y Voltaje. ....	25
<b>Tabla 3.</b>	Anomalías en Curvas IV – Corriente ....	26
<b>Tabla 4.</b>	Anomalías en Curvas IV – Combinadas.....	27
<b>Tabla 5.</b>	Patrones de fallas fotovoltaicas mediante termografía parte 1.....	36
<b>Tabla 6.</b>	Patrones de fallas fotovoltaicas mediante termografía parte 2.....	37
<b>Tabla 7.</b>	Resultado de la prueba de aislamiento en paneles solares. ....	45
<b>Tabla 8.</b>	Imágenes termográficas del panel 1.....	52
<b>Tabla 9.</b>	Imágenes termográficas panel 2. ....	53
<b>Tabla 10.</b>	Imágenes termográficas panel 3.....	54
<b>Tabla 11.</b>	Imágenes termográficas panel 4.....	55
<b>Tabla 12.</b>	Parámetros iniciales (STC) para los paneles.....	57
<b>Tabla 13.</b>	Condiciones bajo las cuales se midieron los parámetros en terreno para los cuatro paneles. ....	58
<b>Tabla 14.</b>	Parámetros actuales de los paneles en condiciones de terreno. ....	58
<b>Tabla 15.</b>	Parámetros actuales de los paneles en condiciones STC. ....	58
<b>Tabla 16.</b>	Diferencia de valores iniciales y actuales en condiciones STC.....	59
<b>Tabla 17.</b>	Curva I-V de condiciones iniciales y actuales de los paneles. ....	61
<b>Tabla 18.</b>	Análisis de pendientes de la curva I-V de los paneles solares ....	62
<b>Tabla 19.</b>	Curva P-V de condición iniciales y actuales de los paneles. ....	64
<b>Tabla 20.</b>	Análisis de pendientes de la curva P-V de los paneles solares ....	65
<b>Tabla 21.</b>	Características módulos fotovoltaicos ISOFOTON (24V). ....	67
<b>Tabla 22.</b>	Análisis de la eficiencia y degradación de los paneles solares tras 20 años de operación.....	67
<b>Tabla 23.</b>	Generación de energía para diferentes condiciones.....	68
<b>Tabla 24.</b>	Comparación de la generación de energía promedio del mes de enero actual vs inicial para cada panel .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Distribución de la Energía Acumulada por Tecnología en el Periodo 2010-2027 9	
<b>Figura 2.</b>	Capas de un panel fotovoltaico en despiece. ....	11
<b>Figura 3.</b>	Panel fotovoltaico monocristalino.....	13
<b>Figura 4.</b>	Panel fotovoltaico policristalino. ....	14
<b>Figura 5.</b>	Comparación entre Célula Convencional y Célula PERC.....	15
<b>Figura 6.</b>	Modulo fotovoltaico bifacial.....	16
<b>Figura 7.</b>	Evidencia visual de la delaminación celular en paneles fotovoltaicos. 17	
<b>Figura 8.</b>	Imágenes de un panel con grietas y microgrietas.....	18
<b>Figura 9.</b>	Módulos fotovoltaicos dañados por puntos calientes.....	19
<b>Figura 10.</b>	Paneles dañados por la corrosión en el encapsulante.....	20
<b>Figura 11.</b>	Termografía de un panel solar que muestra puntos calientes. ....	22
<b>Figura 12.</b>	Efecto de la temperatura en el voltaje de circuito abierto (Voc).....	25
<b>Figura 13.</b>	Prueba de aislamiento aplicando una tensión de 500 V. ....	45
<b>Figura 14.</b>	Prueba de aislamiento con tensión de prueba de 1.000 V.....	46
<b>Figura 15.</b>	Imagen panel fotovoltaico 3. ....	47
<b>Figura 16.</b>	Células agrietadas y decoloración del encapsulante. ....	48
<b>Figura 17.</b>	Delaminación en la parte trasera del panel 3.....	48
<b>Figura 18.</b>	Parte trasera del panel 3 con rotura en la cubierta e inflamación ....	49
<b>Figura 19.</b>	Falla en la celda del panel 3 .....	49
<b>Figura 20.</b>	Lamina traseras iguales en paneles 1, 2 y 4.....	50
<b>Figura 21.</b>	Cambio de color y delaminación en las interconexiones. ....	50
<b>Figura 22.</b>	Deterioro de la caja y tornillos Hundidos.....	51
<b>Figura 23.</b>	Musgo en la orilla de los paneles solares .....	51
<b>Figura 24.</b>	Imagen termográfica parte trasera del panel 1. ....	56
<b>Figura 25.</b>	Imagen termográfica parte trasera panel 1 y 2 .....	56

## ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL Y POTENCIAL REUTILIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, CHILLÁN

**Palabras claves:** Paneles solares, eficiencia, degradación, prueba de aislamiento, inspección visual, análisis termográfico, curva. I-V, segunda vida, legislación ambiental.

### RESUMEN

Los paneles solares, después de 20 años, pueden deteriorarse y perder eficiencia debido a la degradación lineal, que es una disminución gradual de su capacidad para generar electricidad. Es crucial evaluar regularmente su estado para asegurar su rendimiento, mantenimiento o reemplazo. Se estudiaron cuatro paneles fotovoltaicos modelo I-94/24V de ISOFOTON, instalados en 2004 en la estación de mediciones ambientales de la Universidad de Concepción en Chillán, Chile. Estos paneles monocristalinos están ubicados en un clima mediterráneo.

Se utilizaron técnicas como pruebas de aislamiento, inspección visual y análisis termográfico para evaluar y detectar daños en los paneles. Las pruebas de aislamiento verificaron la integridad eléctrica, mientras que la inspección visual y el análisis termográfico identificaron defectos físicos y térmicos. Para evaluar la eficiencia y degradación, se midió curva i-v y se calculó la eficiencia actual. La vida útil restante se estimó comparando la eficiencia actual con la inicial y considerando la tasa de degradación anual.

Se calculará la generación de energía de los paneles usando datos de irradiancia, capacidad instalada y otros factores específicos del sitio de instalación. Se analizará la literatura sobre reciclaje y gestión de residuos de paneles solares en Chile, clasificando las empresas de reciclaje según el valor de los materiales recuperados y evaluando la eficiencia, costos y tecnologías utilizadas. También se evaluará la viabilidad de desechar los paneles en vertederos considerando la legislación y los riesgos ambientales.

## **ANALYSIS OF THE USEFUL LIFE AND POTENTIAL REUSE OF PHOTOVOLTAIC PANELS AT THE UNIVERSITY OF CONCEPCIÓN, CHILLÁN**

**KEYWORDS:** Solar panels, efficiency, degradation, insulation test, visual inspection, thermographic analysis, curve. I-V, recycling, environmental legislation.

### **SUMMARY**

Solar panels, after 20 years, can deteriorate and lose efficiency due to linear degradation, which is a gradual decrease in their ability to generate electricity. It is crucial to regularly assess their condition to ensure their optimal performance and plan for their maintenance or replacement. The thesis studies four ISOFOTON model I-94/24v photovoltaic panels, installed in 2004 at the environmental measurement station of the University of Concepción in Chillán, Chile. These monocrystalline panels are located in a controlled environment and in a Mediterranean climate.

Techniques such as insulation testing, visual inspection, and thermographic analysis will be used to assess and detect damage to the panels. Insulation testing will verify electrical integrity, while visual inspection and thermographic analysis will identify physical and thermal defects. To evaluate efficiency and degradation, the i-v curve will be measured and the current efficiency will be calculated. The remaining useful life will be estimated by comparing the current efficiency with the initial one and considering the annual degradation rate.

The power generation of the panels will be calculated using irradiance data, installed capacity, and other factors specific to the installation site. The literature on solar panel recycling and waste management in Chile will be analyzed, classifying recycling companies according to the value of the materials recovered and evaluating the efficiency, costs and technologies used. The feasibility of disposing of the panels in landfills will also be evaluated considering the legislation and environmental risks.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto del cambio climático y la creciente necesidad de fuentes de energía sostenibles, las tecnologías fotovoltaicas han emergido como una solución viable para la generación de energía limpia. La Universidad de Concepción, ubicada en Chillán, ha implementado sistemas fotovoltaicos principalmente con fines educativos. Aunque la cantidad de energía generada para la reducción de emisiones es modesta, estos sistemas proporcionan una plataforma valiosa para la investigación y la enseñanza en el campo de las energías renovables.

La curva I-V (corriente-voltaje) es una herramienta fundamental en la evaluación de la eficiencia y rendimiento de los paneles solares. Esta curva permite identificar pérdidas en la eficiencia de conversión de energía, así como defectos eléctricos internos. La inspección visual es esencial para detectar defectos físicos como microfisuras, decoloración y delaminación que pueden afectar el rendimiento del panel. El análisis termográfico, por su parte, ayuda a identificar puntos calientes y problemas térmicos que no son visibles a simple vista, pero que pueden indicar fallos internos significativos (Gallardo-Saavedra, 2020).

La potencial reutilización de paneles fotovoltaicos no solo ofrece beneficios económicos al reducir la necesidad de adquirir nuevos equipos, sino que también tiene un impacto ambiental positivo al disminuir la generación de residuos electrónicos. La economía circular en el contexto de las energías renovables es una estrategia cada vez más relevante para maximizar el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental.

Este estudio se centra en el análisis de la vida útil y el potencial de reutilización de los paneles fotovoltaicos instalados en la Universidad de Concepción. Para este análisis se utilizaron métodos como la evaluación de la curva I-V, inspección visual y análisis termográfico. Estos métodos proporcionan una visión integral del estado funcional y estructural de los paneles.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la degradación de los paneles fotovoltaicos de la estación experimental de la Universidad de Concepción para determinar una potencial segunda vida.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar posibles daños o fallas en los paneles fotovoltaicos, incluyendo su estado actual, mediante inspección visual y pruebas de termografía.
- Evaluar la eficiencia y la capacidad de generación de energía de los paneles fotovoltaicos para determinar su rendimiento actual y su vida útil restante
- Analizar las posibles oportunidades de segunda vida para los paneles fotovoltaicos, explorando estrategias de reutilización, reciclaje y plan de gestión para sus residuos sólidos.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES

#### 3.1 ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son esenciales para un futuro energético más sostenible. Estas fuentes provienen de recursos naturales inagotables, como el sol, el viento y el agua, y se renuevan de forma natural, lo que significa que no se agotan con el tiempo. Además, su uso no produce emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub>, responsables del cambio climático.

Para ser consideradas como tales, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) deben cumplir con las características especificadas en el artículo 225 letra aa) de la Ley General de Servicios Eléctricos (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2008), las cuales se resumen a continuación:

##### a) Fuente de energía primaria:

- **Biomasa:** Energía obtenida de materia orgánica y biodegradable, que puede usarse directamente como combustible o convertirse en biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. Incluye residuos sólidos biodegradables.
- **Hidráulica:** Energía generada por agua con una potencia máxima inferior a 20.000 kW.
- **Geotérmica:** Energía obtenida del calor natural del interior de la tierra.
- **Solar:** Energía capturada de la radiación solar.
- **Eólica:** Energía derivada del movimiento del viento.
- **Mares:** Energía mecánica generada por el movimiento de las mareas, olas y corrientes marinas, así como la energía del gradiente térmico del océano.
- **Otras fuentes:** Cualquier otra fuente determinada por la Comisión que utilice energías renovables, contribuya a la diversificación de fuentes energéticas y tenga bajo impacto ambiental, conforme a los procedimientos reglamentarios.

- b) Impacto ambiental:** Las ERNC deben causar un bajo impacto ambiental, lo que significa que no deben contaminar el aire, el agua o el suelo, ni generar residuos peligrosos.
- c) Diversificación de las fuentes de energía:** Las ERNC deben contribuir a diversificar las fuentes de energía en los sistemas eléctricos, lo que significa que no deben depender de una sola fuente de energía, como el carbón o el petróleo.
- d) Generación de electricidad:** Las ERNC deben ser capaces de generar electricidad, lo que significa que no pueden ser utilizadas únicamente para la producción de calor o frío.

### 3.2 CONTEXTO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN CHILE

Chile siempre ha tenido una fuerte tradición en la generación de energía renovable, especialmente hidroeléctrica, que en los años 80 alcanzaba el 80% de la producción total de energía. Sin embargo, en los últimos años, esta participación ha bajado al 32%, a pesar del gran potencial existente. La Política Energética busca revertir esta tendencia y propone que las energías renovables lleguen al 60% de la matriz energética para 2035 y al 70% para 2050. Chile tiene una ventaja especial en radiación solar en el norte, lo que permite desarrollar liderazgo mundial en energía solar (Ministerio de Energía, 2015).

La Ley N°20.257, también conocida como Ley de ERNC, juega un rol fundamental en este proceso al establecer un marco legal obligatorio para el crecimiento de las energías renovables. Esta ley exige que las empresas distribuidoras de electricidad compren un porcentaje creciente de su energía a partir de ERNC, lo que ha impulsado un importante desarrollo del sector en los últimos años (BCN, 2008).

El boletín de Generadoras de Chile a noviembre de 2023 confirma el avance sostenido del país hacia una matriz energética más limpia y sostenible. Las fuentes renovables ya representan el 64% de la capacidad instalada neta (33.280 MW), un

aumento significativo en comparación al 62,0% registrado en 2022 (Boletín Generadoras de Chile, 2023).

Se espera que la capacidad renovable de Chile para 2027, alcance 45 GW ya que la energía solar fotovoltaica junto con la energía eólica es fundamental para abastecer los proyectos de producción de hidrógeno verde. En diciembre de 2021, la Agencia de Desarrollo Nacional de Chile (Corfo) lanzó una convocatoria para financiar proyectos de hidrógeno verde, otorgando un total de 50 millones de dólares a seis iniciativas. Estos proyectos utilizarán energía 100% renovable suministrada por plantas fotovoltaicas y eólicas (International Energy Agency, 2021)

A continuación, se detallan las tecnologías energéticas líderes en operación en Chile recolectados del Boletín Generadoras de Chile:

#### **Tecnologías líderes:**

- **Hidroeléctrica:** con una participación del 22,5%, sigue siendo una fuente renovable fundamental en Chile, aunque su participación ha disminuido levemente debido al crecimiento de otras tecnologías.
- **Solar:** continúa su expansión con un 25,2% de la capacidad instalada, principalmente gracias al desarrollo de la energía solar fotovoltaica.
- **Eólica:** en constante crecimiento, alcanza un 13,8% de la matriz, con un gran potencial en zonas ventosas del país.
- **Biomasa:** 2,1% de la capacidad instalada.
- **Geotérmica:** 0,4% de la capacidad instalada.

En los próximos cinco años (2022-2027) según International Energy Agency (IEA), se espera que la capacidad de energías renovables crezca en casi 2.400 GW, lo que representa un aumento del 85% en comparación con los cinco años anteriores. Este crecimiento se debe principalmente a las políticas implementadas por China, la Unión Europea, Estados Unidos e India. Las energías renovables se convertirán en la mayor fuente de generación eléctrica mundial a principios de 2025, superando al carbón, y se espera que representen el 38% de la generación eléctrica mundial para 2027 (IEA,2021)

La capacidad instalada de energía solar fotovoltaica superará a la del carbón para 2027, triplicándose casi en capacidad y añadiendo cerca de 1.500 GW. Las adiciones anuales de capacidad solar fotovoltaica aumentarán cada año a pesar de los elevados costos de inversión (IEA, 2021). Consolidándose como una de las principales fuentes de generación eléctrica como se puede apreciar en la Figura 1.

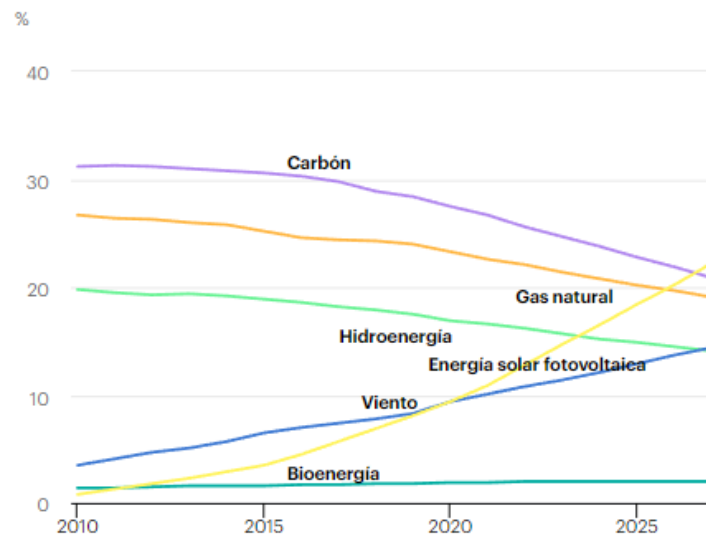


Figura 1. Distribución de la Energía Acumulada por Tecnología en el Periodo 2010-2027

Fuente: (IEA, 2021)

### 3.3 ENERGÍA SOLAR

Las corrientes energéticas que dan vida a nuestro planeta provienen principalmente de la radiación solar. Esta energía radiante, emitida por el Sol, impulsa una gran variedad de fenómenos naturales. Seguidamente, se describen algunos de estos fenómenos:

- **Los vientos:** La energía solar calienta de forma desigual la superficie terrestre, creando diferencias de presión que dan lugar a los vientos.

- **Evaporación del agua:** El calor solar evapora el agua de océanos, ríos y lagos, formando las nubes que alimentan las lluvias.
- **Formación de nubes:** La energía solar impulsa el ciclo del agua, evaporando el agua y condensándola en las nubes.
- **Cursos de agua:** El agua caída en forma de lluvia o nieve alimenta los ríos y arroyos que surcan la Tierra.

### 3.3.1 APROVECHAMIENTO DIRECTO DE LA ENERGÍA SOLAR:

El aprovechamiento directo de la energía solar se refiere a la utilización de la radiación solar de manera inmediata y sin la necesidad de procesos intermedios para generar energía. Esta se puede dividir en dos categorías principales:

- **Energía solar fotovoltaica:** Consiste en la conversión de la luz solar en electricidad mediante el uso de células fotovoltaicas, que están hechas de materiales semiconductores como el silicio. Estas células generan corriente eléctrica cuando se exponen a la luz solar.
- **Energía solar térmica:** Se refiere al uso de la energía del sol para calentar un fluido, que puede ser agua o aire, utilizado luego para calefacción, producción de agua caliente sanitaria o generación de electricidad a través de plantas termosolares.

### 3.4 PANELES FOTOVOLTAICOS

Un módulo fotovoltaico es un equipo estático con una vida útil estimada entre 25-30 años. Su estructura básica consta de varias capas ensambladas en un orden específico, incluyendo un marco de aluminio, vidrio protector, encapsulante, celda solar, interconexiones metálicas, cubierta posterior y cubierta final. En la Figura 2 se presentan de manera general algunos de los componentes de un panel solar.

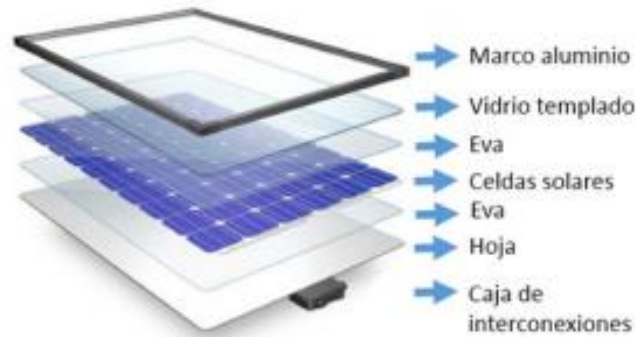


Figura 2. Capas de un panel fotovoltaico en despiece.

Fuente: (Ramos-Sánchez et al., 2022)

En la Tabla 1, se detalla el contenido en peso (%) de cada material de un panel fotovoltaico y el propósito de cada uno de ellos:

Tabla 1. Composición típica de materiales en un panel fotovoltaico unifacial basado en silicio, mono y policristalino.

Material	Contenido en peso (%)	Propósito
Silicio	2-3	Efecto fotovoltaico
Vidrio	69-75	Protección del módulo solar, permite paso de luz
Polímeros (Eva, Tedlar)	7	Protección del módulo solar, protege del calor
Cobre	0,6-1	Conductor de la corriente
Plata	0,006-0,06	Conductor de la corriente
Aluminio	10-20	Estructura del panel – dopaje “p” del Si – conductor
Boro	<0,1	Dopaje “p” del Si
Fósforo	<0,1	Dopaje “n” del Si
Dióxido de estaño	<0,1	Recubrimiento antirreflectante
Plomo	<0,1	Recubrimiento del cobre

Estaño	<0,1	Recubrimiento del cobre
--------	------	-------------------------

(Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, 2020)

### 3.4.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES MEDIANTE DOPAJE Y SEMICONDUCTORES

A continuación, se explica cómo el proceso de dopaje se utiliza para modificar las propiedades eléctricas de los semiconductores, específicamente en el silicio, y cómo este proceso impacta su conductividad y aplicaciones en dispositivos electrónicos.

El dopaje es el proceso de añadir intencionalmente impurezas a un semiconductor para modificar sus propiedades eléctricas y hacerlo más conductor. En los semiconductores, como el silicio, los electrones pueden moverse a través de las bandas de energía dentro del material, en cambio el silicio puro tiene cuatro electrones de valencia que forman enlaces covalentes entre sí, creando una estructura cristalina. En esta forma, no tiene electrones libres ni huecos, lo que resulta en baja conductividad (Valencia, 2022).

- **Dopaje Tipo-n:** Al añadir fósforo (que tiene cinco electrones de valencia) al silicio, se crean cuatro enlaces covalentes con los átomos de silicio y queda un electrón extra libre. Este electrón adicional puede moverse libremente, aumentando la conductividad del material. (Valencia, 2022).
- **Dopaje Tipo-p:** Cuando se introduce boro (que tiene tres electrones de valencia) en el silicio, solo se forman tres enlaces covalentes, dejando un hueco o espacio vacío que actúa como una carga positiva. Este hueco puede moverse dentro del cristal de silicio, también mejorando su conductividad. (Valencia, 2022).

### 3.4.2 TECNOLOGÍAS DOMINANTES EN PV ACTUALES.

- a) Paneles monocristalinos:** Los paneles monocristalinos son actualmente la opción preferida debido a su alta eficiencia y durabilidad. Están hechos de células solares de silicio puro, que tienen un color azul homogéneo.

Su eficiencia real varía entre el 16% y el 19%, lo que los hace muy eficientes para generar energía solar. Aunque su costo inicial es más alto en comparación con otras tecnologías, destacan por su larga vida útil y su capacidad para mantener un rendimiento constante con el tiempo (Cordero, 2024). A continuación, en la Figura 3, se presenta la apariencia de un panel solar monocristalino:

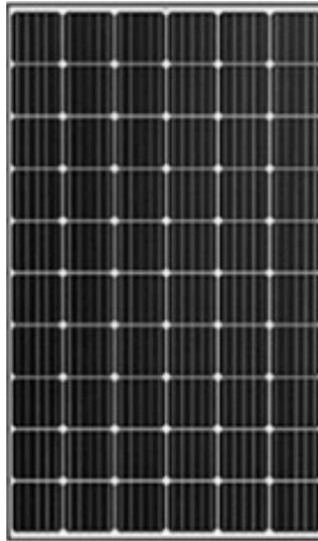


Figura 3. Panel fotovoltaico monocristalino.

Fuente adaptada: (SunSolar, 2023)

**b) Paneles policristalinos:** Este tipo de panel solar muestra una celda rectangular de color verde azulado, dispuesta en una microestructura semi-ordenada. En términos de eficiencia energética, tiene un rendimiento que varía entre el 13% y el 16%. El silicio utilizado en su fabricación es impuro y está dopado con boro, pero con menos fases de cristalización. Comparado con las células solares de silicio monocristalino, este tipo de tecnología policristalina es aproximadamente un 6% más económica (Cordero, 2024). A continuación, en la Figura 4, se presenta la apariencia de un panel solar policristalino:



Figura 4. Panel fotovoltaico policristalino.

Fuente: (SunSolar, 2023)

- c) Paneles PERC:** Los paneles PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) son una tecnología avanzada en paneles solares que integra una lámina aislante en la parte posterior de las celdas solares. Esta lámina permite aprovechar mejor los fotones incidentes, aumentando la eficiencia de los paneles, especialmente en condiciones de baja irradiación, como fuera de las horas pico de sol o en días nublados. La mejora en el rendimiento se debe a la capacidad de la tecnología PERC para reflejar los fotones no convertidos de vuelta a la célula, permitiendo una segunda oportunidad para su absorción y conversión en electricidad (Sandoval-Ruiz, 2020). Posteriormente en la Figura 5, se observa cómo la luz se refleja y genera corriente adicional en una célula PERC en comparación con una célula convencional. Los paneles PERC pueden alcanzar hasta un 20,7% de eficiencia, lo que significa que pueden generar más energía con la misma cantidad de luz solar (Cordero, 2024).

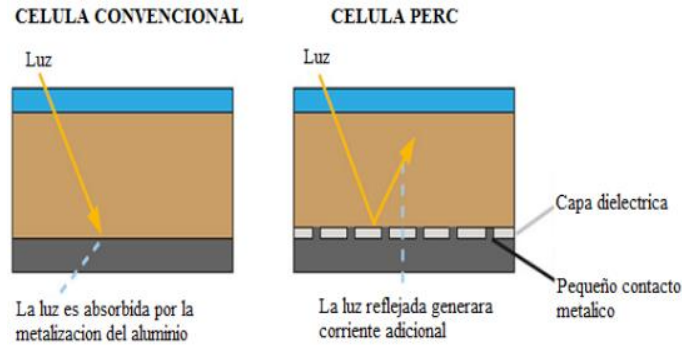


Figura 5. Comparación entre Célula Convencional y Célula PERC

Fuente adaptada: (Monsolar, 2018)

**d) Paneles PERC BIFACIALES:** Los paneles PERC bifaciales son una variación de los paneles PERC que pueden capturar luz solar en ambas caras del panel. Esto les permite recolectar la radiación reflejada desde el suelo u otras superficies detrás del panel, aumentando la cantidad de energía generada. Esta tecnología es especialmente útil en instalaciones donde la superficie reflectante puede ser optimizada para reflejar más luz hacia la parte posterior del panel, maximizando así la producción de energía (Sandoval-Ruiz, 2020).

capacidad de captar luz solar por ambas caras permite a los paneles PERC bifaciales alcanzar una eficiencia de hasta un 21% (Cordero, 2024).

En la Figura 6 se observa cómo los paneles PERC bifaciales, al tener dos caras, logran absorber más luz en comparación con los paneles monofaciales convencionales

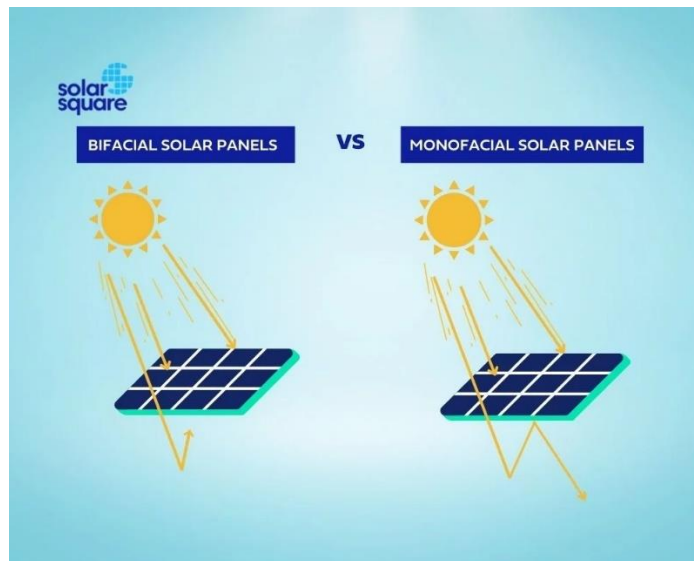


Figura 6. Modulo fotovoltaico bifacial

Fuente: (Solarsquare,2023)

Diferencias Clave de paneles PERC y PERC bifaciales:

- **Captura de Luz:** Los paneles PERC tradicionales solo capturan luz desde una cara, mientras que los paneles PERC bifaciales capturan luz desde ambas caras (Sandoval-Ruiz, 2020).
- **Eficiencia Energética:** Los paneles PERC bifaciales tienen potencial para generar más energía total debido a la doble cara de captura de luz, especialmente en ambientes con alta reflectividad del suelo (Sandoval-Ruiz, 2020).
- **Condiciones de Operación:** Los paneles PERC mejoran el rendimiento en condiciones de baja irradiación, mientras que los paneles bifaciales son más efectivos en maximizar la energía recolectada en entornos donde hay luz reflejada significativa (Sandoval-Ruiz, 2020).

### 3.5 FALLAS EN PANELES FOTOVOLTAICOS

Los equipos solares fotovoltaicos están diseñados para un funcionamiento seguro durante toda la vida útil del producto. A pesar de ello, se producen defectos de

fabricación y defectos prematuros que pueden afectar el rendimiento de manera considerable. A continuación, se describen las fallas más comunes con información encontrada en la revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías (Ramos-Sánchez et al., 2022):

- a) Delaminación:** La delaminación es un defecto donde el encapsulante se separa del vidrio y la célula. Esto puede ser causado por una mala adherencia del Etileno Vinil Acetato (EVA), procedimientos deficientes de limpieza del vidrio durante la fabricación, o exposición prolongada a la humedad y fluctuaciones de temperatura que degradan el adhesivo del encapsulante (Ramos-Sánchez et al., 2022).

En la Figura 7 se observan distintos paneles que sufrieron delaminación:



Figura 7. Evidencia visual de la delaminación celular en paneles fotovoltaicos.

Fuente: (Monosolar, 2018)

- b) Agrietamiento celular:** Los daños en los módulos pueden ocurrir en varias etapas de su vida útil. Durante la fabricación, la soldadura puede generar tensiones en las células solares. El transporte también puede causar grietas debido al manejo y vibraciones. En el campo, las fluctuaciones de temperatura diarias y estacionales pueden causar la expansión y contracción

de los materiales del módulo, generando tensiones térmicas que conducen al agrietamiento (Ramos-Sánchez et al., 2022).

En la Figura 8, podemos ver que el daño por agrietamiento celular es más evidente en las imágenes electroluminiscentes en comparación con las imágenes de campo:



Figura 8. Imágenes de un panel con grietas y microgrietas

Fuente adaptada: (Monosolar, 2018)

- c) Puntos calientes:** Los puntos calientes son áreas localizadas del módulo fotovoltaico que alcanzan temperaturas más altas que el resto del panel. Pueden surgir por sombras parciales, defectos en las celdas, desalineación, módulos dañados o acumulación de suciedad. Estas áreas pueden dejar de producir electricidad e incluso llegar a consumirla, afectando la eficiencia y vida útil del sistema (Ramos-Sánchez et al., 2022).

A continuación, en la Figura 9, se muestran las diferentes formas en que puede aparecer un punto caliente en un panel solar fotovoltaico



Figura 9. Módulos fotovoltaicos dañados por puntos calientes

Fuente: (Monosolar, 2018)

- d) Decoloración del encapsulante:** El encapsulante, debido a la irradiación constante, puede cambiar de color, de blanco a amarillo y, a veces, a marrón. Esto provoca una disminución en la potencia generada y una baja en la eficiencia debido a la alteración en la transmitancia de la luz hacia las células solares. También se ve afectado todo el encapsulante cuando se produce un fallo en la interconexión entre la celda, la celda de silicio puede entrar en contacto con el aire el oxígeno del aire dará lugar a la formación de dióxidos de silicio, produciéndose el efecto de la oxidación esto supone una decoloración, es decir, ese color marrón que aparece en las células (Ramos-Sánchez et al., 2022).

En la Figura 10, se pueden observar los distintos colores que los paneles solares pueden adquirir debido a la decoloración del encapsulante.

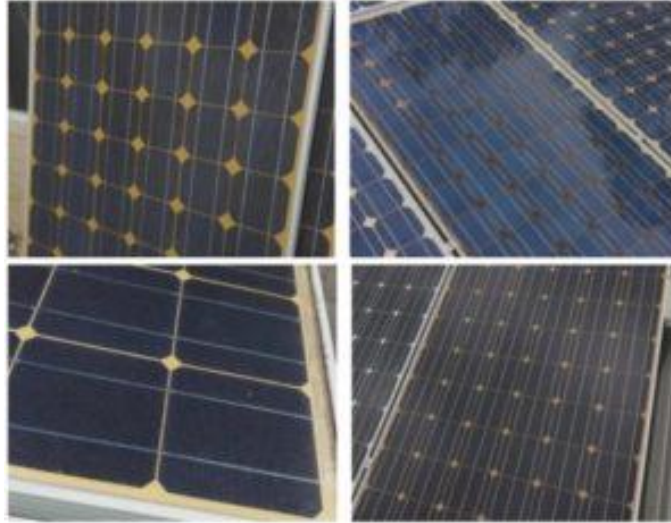


Figura 10. Paneles dañados por la corrosión en el encapsulante.

Fuente: (Monosolar, 2018)

- e) **Degradación inducida por potencial (PID):** Su efecto potencial puede hacer caer la potencia del equipo hasta en un 30%. La causa de estas corrientes es la presencia de diferencias de potencial entre el PV y la tierra. Esto hace que se generen unas corrientes de fuga entre las células del panel y el resto de los componentes (Ramos-Sánchez et al., 2022).
- f) **Defectos en la hoja posterior del PV:** Sirve tanto para proteger los componentes electrónicos de la exposición directa al medio ambiente, como para proporcionar un funcionamiento seguro en presencia de altos voltajes de corriente continua. Lo más común es encontrarse con una lámina posterior compuesta de una estructura laminada con un polímero altamente estable y resistente a los rayos ultravioleta UV. Este tipo de láminas ofrecen un buen comportamiento frente al calor, la humedad, el estrés mecánico. El problema es cuando se detecta una delaminación, ya que aumentará la temperatura al no disiparse el calor (Ramos-Sánchez et al., 2022).
- g) **Caja de conexiones:** La caja de conexiones se define como un contenedor fijado en la parte posterior del PV. Generalmente contiene los diodos de derivación para proteger las celdas de una cadena en caso de que aparezcan

puntos calientes o sombras. Las fallas más comunes son: mala fijación de la caja, cajas abiertas o mal cerradas, cableado deficiente que puede causar arcos de voltaje y problemas en los contactos de las interconexiones (Ramos-Sánchez et al., 2022).

- h) Fallo en la interconexión entre la cadena y la celda:** Las celdas solares se interconectan en serie con cintas de interconexión para obtener un voltaje más alto. Estas cintas son muy propensas a romperse por: una soldadura deficiente en el proceso de producción, una formación demasiado intensa durante la fabricación, el estrés físico durante el transporte del PV, cielo térmico y puntos calientes por sombreado parcial. Cuando las láminas EVA reaccionan con la humedad, forman ácido acético que acelera el proceso de corrosión de los componentes del módulo fotovoltaico. Esto puede atacar a todos los contactos de plata y afectar la producción de la celda (Ramos-Sánchez et al., 2022).

### 3.6 ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

La termografía infrarroja (IRT) es una técnica utilizada para detectar la distribución del calor en una superficie, como un panel fotovoltaico, mientras está en operación. Esta técnica es útil para identificar áreas con mayor o menor emisividad térmica, lo que puede indicar la presencia de fallas en los módulos solares. La IRT es especialmente atractiva porque requiere una instrumentación mínima y no es necesario tener contacto directo con los paneles, lo que permite realizar inspecciones de manera eficiente y rápida, incluso utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV). Esto puede aumentar significativamente la eficiencia de la inspección en comparación con métodos manuales. Además, la IRT puede detectar problemas como degradación, grietas y sombras en los módulos fotovoltaicos, proporcionando información vital para su mantenimiento y reparación (Gallardo-Saavedra, 2020)

En la Figura 11 los puntos calientes aparecen como manchas de colores brillantes, generalmente en tonos de rojo, amarillo o blanco, dependiendo de la paleta de

colores utilizada. Estos puntos contrastan con las zonas más frías, que se representan en colores más oscuros, como azul o verde.

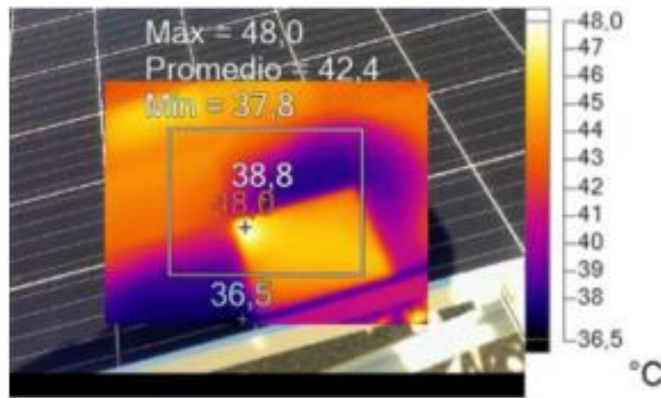


Figura 11. Termografía de un panel solar que muestra puntos calientes.

Fuente: (Ramos-Sánchez et al., 2022).

### 3.7 CURVA I-V

El trazador de curvas I-V es un equipo fundamental para la evaluación precisa del rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Permite obtener una amplia gama de parámetros esenciales para el diseño, la instalación y el mantenimiento de sistemas fotovoltaicos eficientes.

#### 3.7.1 PARÁMETROS FOTOVOLTAICOS CLAVES:

A continuación se describen algunos de los parámetros que son necesarios para el estudio del rendimiento eléctrico de un módulo solar fotovoltaico, a través de la curva de corriente-voltaje. Por eso, es importante definirla antes del ensayo (Bernal, 2020).

- a) **Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ):** aquella que se produce a tensión cero y puede ser medida directamente con amperímetro conectado a la salida del módulo solar. Su valor varía en función de la superficie y de la radiación. Se obtiene al cortocircuitar los terminales del panel ( $V=0$ ) que, al recibir la radiación solar, la intensidad que circularía por el panel es de corriente máxima (Bernal, 2020).

- b) Voltaje de circuito abierto (Voc):** aquella que se produce cuando no se conecta carga, Voc, máximo voltaje, a corriente cero. Voc aumenta logarítmicamente con la irradiancia incidente (Bernal, 2020).
- c) Potencia máxima (Pm):** La potencia entregada por el panel es  $P = I \times V$ . La potencia será cero si la medimos en el punto de Isc ( $V = 0$ ) o en el de Voc ( $I = 0$ ). La potencia es máxima cuando los valores de intensidad y tensión son máximos ( $P_{m\acute{a}x} = I_{m\acute{a}x} \times V_{m\acute{a}x}$ ) (Bernal, 2020).
- d) Corriente de máxima potencia (Im):** Intensidad correspondiente al punto de máxima potencia (Bernal, 2020).
- e) Voltaje de máxima potencia (Vm):** Tensión correspondiente al punto  
a. de máxima potencia (Bernal, 2020).
- f) Factor de forma (FF):** Parámetro utilizado para definir la calidad de una celda (Bernal, 2020).
- g) Irradiancia incidente (G):** la radiación solar que es emitida desde el núcleo del sol y llega a la superficie terrestre para llevar a cabo el efecto fotovoltaico (Bernal, 2020).

### 3.7.2 CONDICIONES ÓPTIMAS DE MEDICIÓN PARA UNA CURVA I-V

- a) Normativa IEC 61829:** La norma IEC 61829 establece las condiciones óptimas para la medición de curvas I-V en módulos fotovoltaicos, conocidas como Condiciones Estándar de Prueba (STC). Estas condiciones son:
- Irradiancia: 1000 W/m<sup>2</sup>
  - Temperatura de la célula: 25 °C
- b) Medición de Curvas I-V con Entec Solar E-1000:** Entec Solar E-1000 es un trazador de curvas I-V que puede medir curvas I-V en módulos fotovoltaicos bajo diferentes condiciones de irradiación y temperatura. Para obtener resultados precisos y comparables con las condiciones STC, se recomienda una irradiación mínima de 700 W/m<sup>2</sup>.

Esto es porque el modelo matemático del E-1000 para extrapolar los resultados a condiciones STC se basa en la relación entre la corriente y el voltaje de un módulo fotovoltaico con la irradiación y la temperatura. Este modelo es preciso solo si la irradiación es suficientemente alta. Si la irradiación es demasiado baja, los resultados extrapolados pueden ser inexactos (Entec Solar, n.d.).

### 3.7.3 BENEFICIOS DEL USO DEL TRAZADOR DE CURVAS I-V

- a) **Evaluación precisa del rendimiento del módulo:** Permite determinar la capacidad real de generación de energía del módulo en diferentes condiciones.
- b) **Identificación de fallos y defectos:** Ayuda a detectar problemas como células solares dañadas, cortocircuitos o fugas de corriente.
- c) **Optimización del diseño del sistema:** Facilita la selección de los módulos adecuados para un sistema fotovoltaico específico.
- d) **Monitoreo del rendimiento del sistema:** Permite realizar un seguimiento del rendimiento del sistema a lo largo del tiempo y detectar posibles problemas.
- e) **Análisis de Degradación:** Ayuda a analizar la degradación a largo plazo de los paneles fotovoltaicos, permitiendo estimar su vida útil y rendimiento futuro.

A continuación, en la Figura 12, se observa cómo se comporta normalmente una curva I-V a diferentes temperaturas.

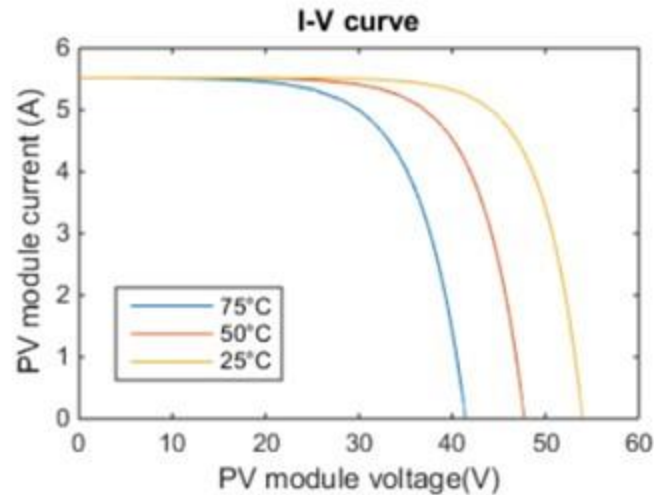


Figura 12. Efecto de la temperatura en el voltaje de circuito abierto (Voc)

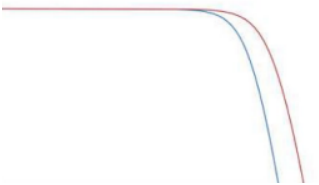
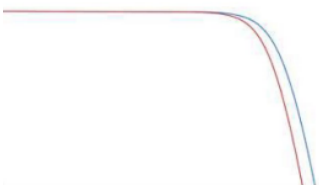
Fuente: (Conference Energy Conversion, 2015).

### 3.7.4 TIPOS DE CURVAS I-V DESPUÉS DE AÑOS DE USO

Existen diferentes tipos de curvas I-V que pueden presentarse luego de años de uso, dependiendo de las condiciones a las que se expongan los paneles fotovoltaicos. En la Tabla 2 se muestran distintas anomalías relacionadas con curvas IV de módulos fotovoltaicos:

Tabla 2. Anomalías en Curvas IV - Pendiente y Voltaje.

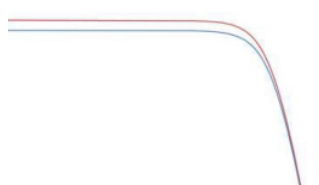
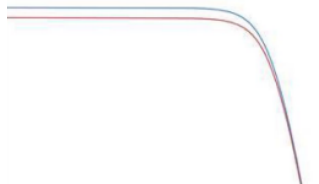
Tipo de escalón	Causas y consecuencias	Figura
Pendiente pronunciada en el tramo horizontal	<b>Causas:</b> Suciedad en la superficie del módulo, sombras parciales. <b>Consecuencias:</b> Pérdida de potencia debido a una menor generación de corriente.	
Reducción de la pendiente en el tramo descendente	<b>Causas:</b> Degradación de las células solares, conexión deficiente. <b>Consecuencias:</b> Pérdida de eficiencia en la conversión de energía.	

Voltaje de circuito abierto bajo	<p><b>Causas:</b> Módulos con baja irradiancia, fallos internos.</p> <p><b>Consecuencias:</b> Reducción de la capacidad de generación de energía.</p>	
Voltaje de circuito abierto alto	<p><b>Causas:</b> Alta irradiancia, alta temperatura de operación.</p> <p><b>Consecuencias:</b> Posible sobrecarga de componentes del sistema.</p>	

Fuente adaptada de: (González-Sánchez et al., 2023).

En la Tabla 3 se puede visualizar cómo se presenta una curva I-V con corriente alta vs corriente baja:

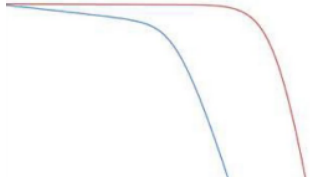
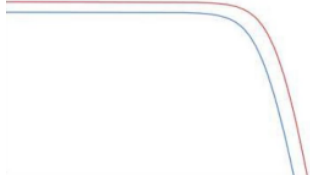
Tabla 3. Anomalías en Curvas IV – Corriente.

Tipo de escalón	Causas	Figura
Corriente de cortocircuito baja	<p><b>Causas:</b> Baja irradiancia, suciedad en la superficie del módulo, sombras parciales, fallos internos en el módulo.</p> <p><b>Consecuencias:</b> Reducción de la capacidad de generación de energía y pérdida de potencia.</p>	
Corriente de cortocircuito alta	<p><b>Causas:</b> Alta irradiancia, error en la calibración del equipo de medición, temperaturas bajas.</p> <p><b>Consecuencias:</b> Posible sobrecarga de componentes del sistema y posibles riesgos de seguridad.</p>	

Fuente adaptada de: (González-Sánchez et al., 2023).

En la Tabla 4 se pueden observar diferentes tipos de anomalías combinadas en las curvas I-V de los paneles fotovoltaicos:

Tabla 4. Anomalías en Curvas IV – Combinadas.

Tipo de escalón	Causas	Figura
<p>Pendiente pronunciada en el tramo horizontal y voltaje de circuito abierto bajo</p>	<p><b>Causas:</b> Suciedad en la superficie del módulo, sombras parciales, módulos con baja irradiancia, fallos internos.</p> <p><b>Consecuencias:</b> Pérdida de potencia debido a una menor generación de corriente, reducción de la capacidad de generación de energía.</p>	
<p>Corriente de cortocircuito baja y voltaje de circuito abierto bajo</p>	<p><b>Causas:</b> Degradación de las células solares, conexión deficiente, módulos con baja irradiancia, fallos internos.</p> <p><b>Consecuencias:</b> Pérdida de eficiencia en la conversión de energía, reducción significativa de la capacidad de generación de energía.</p>	

Fuente adaptada de: (González-Sánchez et al., 2023).

### 3.8 LA PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS DE PANELES SOLARES

En las próximas décadas se estima que en Chile se generen grandes cantidades de residuos provenientes de la industria solar fotovoltaica (FV). Las cifras que se proyectan al respecto son inquietantes: al 2030 habría entre 10 y 30 mil toneladas de paneles desechados, mientras que al 2040 se contabilizarían entre 120 y 140 mil

toneladas de estos residuos, y al 2050 se superarían las 300 mil toneladas (Hidronor, 2024).

Los paneles solares contienen metales como plomo y cadmio, que pueden ser peligrosos en altas concentraciones (EPA 1, 2022). Según las regulaciones federales, algunos paneles se consideran residuos peligrosos si contienen niveles elevados de estos metales. Esto varía debido a los diferentes procesos de fabricación y diseño, por lo que incluso paneles idénticos pueden clasificarse de manera diferente. A nivel federal, muchos paneles no se consideran residuos peligrosos (NCSL, 2018), pero algunos sí, basándose en la lixiviabilidad de productos químicos tóxicos según la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (EPA 2, 2022).

Esta problemática destaca la necesidad de regulaciones claras y eficientes para gestionar adecuadamente los residuos de paneles solares, minimizando su impacto ambiental y protegiendo la salud humana.

### **3.8.1 MANEJO DE PANELES FOTOVOLTAICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL EN CHILE**

En Chile, la gestión de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil se encuentra dentro de un marco regulatorio emergente. Según la "Guía Informativo para Chile 2019", los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) se dividen en seis categorías, donde los paneles fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm) están incluidos en la categoría 3 (Cool power, 2023).

A pesar de esta clasificación, la normativa específica para el reciclaje de estos paneles aún no está completamente desarrollada. Rubén Avendaño de EMAT Chile señala que, aunque la Ley REP (Ley de Responsabilidad Extendida del Productor) establece que los productores deben hacerse cargo de los materiales al final de su vida útil, no se proporciona una guía clara sobre el reciclaje o la disposición final adecuada de los paneles solares. Según Avendaño, la ley se centra más en el registro de las empresas productoras y la obligación de informar sobre el destino y vida útil de los elementos, dejando a discreción de cada empresa la gestión específica de los desechos (Cool power, 2023).

Cuando los paneles solares alcanzan el final de su vida útil, las opciones más adecuadas son el reciclaje o la reutilización. A continuación, se describen ambos términos en el contexto de los paneles fotovoltaicos:

- a) Reciclaje de paneles solares:** El reciclaje de paneles solares implica procesar los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil para recuperar y reutilizar sus materiales. Esto puede incluir tratamientos físicos y químicos para separar componentes como el silicio, el vidrio y el metal. Por ejemplo, la eliminación de la capa de encapsulación de etileno-vinil-acetato (EVA) es uno de los pasos más desafiantes en el reciclaje de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino (Latunussa et al., 2016). A través de estos procesos, se busca reducir el impacto ambiental y reutilizar los materiales en la fabricación de nuevos paneles solares o en otras aplicaciones industriales.
- b) Reutilización de paneles solares:** La reutilización de paneles solares se refiere a darles una segunda vida en su forma original o con modificaciones mínimas. Un enfoque innovador incluye incorporar material triturado de celdas solares usadas en la matriz de cemento de aluminato de calcio, lo que permite reutilizar hasta el 5% del material (Latunussa et al., 2016). La reutilización puede implicar también la reparación y reconfiguración de módulos solares para ser usados nuevamente en la generación de energía, reduciendo así la necesidad de fabricar nuevos paneles y disminuyendo los residuos.

### **3.8.2 MÉTODOS DE RECICLAJE DE PANELES SOLARES:**

Los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino (c-Si) contienen varios componentes clave, como vidrio, aluminio y cobre, que se pueden recuperar en un 85% de la masa total del panel mediante un proceso de separación mecánica. Sin embargo, para reducir las impurezas en los materiales recuperados y mejorar su valor de reventa, es necesario complementar el proceso con métodos térmicos, químicos o metalúrgicos (Weckend, Wade, & Heath, 2016).

- a) Trituración mecánica:** Dentro del proceso de reciclaje de placas solares, el primer paso es la trituración mecánica, que consiste en desintegrar los

paneles en fragmentos pequeños utilizando equipos mecánicos. Luego las piezas se clasifican según si están formadas de vidrio, metal o plástico. Lo bueno de este procedimiento es que es rápido y su coste es relativamente bajo. El inconveniente es que puede generar residuos secundarios (Naturgy, 2024).

- b) Separación térmica:** Los fragmentos triturados son sometidos a altas temperaturas en un horno o reactor. El calor provoca la evaporación de los componentes orgánicos como los plásticos y los adhesivos, y deja los inorgánicos como el vidrio y el metal. Lo más positivo de este sistema es que consigue una separación eficaz de los materiales. A cambio, requiere una alta cantidad de energía y es un procedimiento que puede llegar a emitir gases contaminantes si no se controla adecuadamente (Naturgy, 2024).
- c) Lixiviación química:** Se aplica selectivamente sobre ciertas partes de los paneles solares. Lo que se hace es sumergir fragmentos de panel en soluciones químicas que, con capaces de disolver materiales como la plata, el silicio o el aluminio. Las soluciones químicas se procesan después para precipitar y recuperar los materiales disueltos. Mientras que los no disueltos se lavan y se someten a tratamientos adicionales para buscar su recuperación o, en su defecto, se desechan de forma segura. Este procedimiento es muy efectivo para recuperar metales valiosos que se encuentran en los paneles solares en concentraciones muy bajas. Pero es un proceso costoso y que debe hacerse con extrema precaución, porque requiere el uso de productos químicos peligrosos (Naturgy, 2024).

Aquí hay una descripción general de cómo se puede reciclar un panel solar según la empresa Cool Power en su artículo "Reciclaje de los Paneles Solares" escrito por Carolin Wullner y publicado en 2023:

- a) Recopilación y transporte:** Los paneles solares desechados son recopilados y transportados a instalaciones de reciclaje especializadas.

- b) Desmontaje:** En la instalación de reciclaje, los paneles solares se desmontan, lo que implica retirar la capa externa de vidrio y otros componentes, como marcos de aluminio y conectores eléctricos.
- c) Separación de componentes:** Los componentes separados se someten a procesos de clasificación y separación. Los materiales como el vidrio, el aluminio y otros metales son segregados para su posterior reciclaje.
- d) Eliminación de capas y materiales:** Algunos paneles solares tienen capas de materiales semiconductores y otras sustancias que son tóxicas o peligrosas para el medio ambiente. Estos materiales se eliminan y tratan siguiendo las regulaciones ambientales.
- e) Recuperación de materiales:** Los materiales recuperados, como vidrio, aluminio y otros metales, se envían a instalaciones especializadas para su reciclaje. Por ejemplo, el vidrio puede ser reciclado para su reutilización en la fabricación de nuevos paneles solares o productos de vidrio.
- f) Recuperación de materiales semiconductores:** En el caso de paneles solares de capa delgada, como los de película delgada de silicio amorfo, se pueden recuperar materiales semiconductores valiosos mediante técnicas específicas de reciclaje.
- g) Gestión de desechos tóxicos:** Cualquier material peligroso o tóxico, como el cadmio en paneles de capa delgada de telururo de cadmio (CdTe), se maneja y se dispone de manera segura según las regulaciones ambientales.
- h) Reutilización y reciclaje de componentes electrónicos:** Los componentes electrónicos y cables pueden ser reciclados o reutilizados en otras aplicaciones.
- i) Reutilización de componentes funcionales:** Si algunos componentes del panel solar todavía están en buenas condiciones, como inversores o cables, pueden ser reutilizados en otros sistemas solares.
- j) Disposición final segura:** Cualquier residuo que no pueda ser reciclado o reutilizado se gestiona y se dispone de manera segura para minimizar el impacto ambiental.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Los paneles solares que han estado en funcionamiento durante 20 años tienen un alto riesgo de deterioro y daño, lo cual afecta su eficiencia energética. La principal causa de este problema es la degradación lineal, que se refiere a la disminución continua y gradual de la capacidad de un panel solar para generar electricidad a medida que envejece. Esta degradación se expresa generalmente como un porcentaje de pérdida de eficiencia por año. Por eso es crucial determinar el estado de los paneles solares regularmente para asegurar su óptimo rendimiento y planificar su mantenimiento o reemplazo cuando sea necesario.

### **4.2 ESTUDIO**

El estudio está constituido por cuatro paneles fotovoltaicos del modelo I-94/24V de la marca ISOFOTON, instalados en el año 2004. Estos paneles son de tipo monocristalino, fabricados a partir de un único cristal de silicio, lo que les proporciona una mayor eficiencia en la conversión de energía solar en electricidad.

Los paneles están ubicados en la estación de mediciones ambientales de la Universidad de Concepción (UdeC), en la ciudad de Chillán, Chile, la cual se encuentra en las coordenadas  $36.6063^{\circ}$  S de latitud y  $72.1034^{\circ}$  O de longitud. Esta estación proporciona un entorno controlado y adecuado para la realización de mediciones precisas.

Chillán se encuentra en una zona con clima mediterráneo, caracterizado por veranos secos y cálidos, e inviernos húmedos y templados. Estas condiciones climáticas específicas permiten estudiar de manera efectiva el desempeño de los paneles fotovoltaicos en un entorno variado.

### **4.3 ESTADO ACTUAL Y DETECCIÓN DE DAÑOS DE LOS PANELES**

El estado actual y la detección de daños en los paneles fotovoltaicos involucra varias técnicas clave. Las que se realizaron incluyen la inspección visual y pruebas termográficas, pero primero se efectúa una prueba de aislamiento, ya que esta permite verificar la integridad eléctrica del panel, detectando posibles problemas como fugas de corriente que podrían comprometer su funcionamiento seguro y

eficiente a largo plazo. A continuación, se describe en detalle cada una de estas técnicas:

#### 4.3.1 PRUEBA DE AISLAMIENTO

La prueba de aislamiento es fundamental para asegurar el correcto aislamiento eléctrico del panel solar. Para realizarla, se utiliza un megóhmetro o probador de aislamiento, el cual mide la resistencia de aislamiento entre dos puntos. Según estudios de IEEE, esta prueba resulta crucial para detectar fallos en la instalación eléctrica de los sistemas fotovoltaicos y prevenir accidentes, prolongando la vida útil del sistema. Para realizar la prueba de aislamiento de manera correcta y segura, se deben seguir los siguientes pasos:

- a) **Revisión previa:** Asegúrese de que el circuito esté sin energía y revise el estado del fusible.
- b) **Preparación del medidor:** Inserte las sondas de prueba en los terminales de entrada y configure el selector en la posición de "AISLAMIENTO". El medidor verificará el estado de las baterías; si es necesario, reemplácelas antes de continuar.
- c) **Selección de tensión:** Presione "RANGE" y seleccione una tensión de prueba de 500 V, adecuada para los paneles de 24 V.
- d) **Conexión y medición:** Conecte las sondas al circuito entre el marco del panel y el circuito eléctrico. Si se detecta una tensión mayor de 30 V, la prueba se bloqueará automáticamente. Mantenga el voltaje de 500 V constante durante un minuto.
- e) **Iniciar la prueba:** Mantenga presionado el botón "Insulation test" para aplicar la tensión de prueba. El medidor mostrará la resistencia, la cual debe ser igual o superior a 50 M $\Omega$  para asegurar la integridad del sistema.
- f) **Finalización:** Libere el botón " Insulation test" y el medidor descargará el circuito automáticamente, manteniendo la lectura de resistencia en pantalla hasta que se realice una nueva prueba.

#### 4.3.2 INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual es el método más rápido y eficaz para detectar defectos en un módulo FV. Según la norma IEC 61215 para módulos de silicio cristalino, la iluminación debe ser de al menos 1000 lux y el tiempo de inspección por módulo debe ser de al menos 10 minutos. Para garantizar esta iluminación, se utilizará un luxómetro. Si no se alcanza el nivel requerido, se pueden usar lámparas fluorescentes, LED o paneles de luz (IEC, 2005).

La inspección seguirá las pautas de la sección 7 de las normas IEC 61215 e IEC 61646, y se clasificarán en tres categorías distintas:

**a) Defectos críticos**

- **Roturas o grietas en la encapsulación:** Permiten la entrada de humedad, dañando las células solares y causando cortocircuitos.
- **Delaminación de la encapsulación:** Separación de la encapsulación de las células solares, exponiéndolas a la humedad y reduciendo la eficiencia.
- **Células solares rotas o agrietadas:** Ineficaces para generar electricidad de manera eficiente y propensas a puntos calientes.
- **Manchas de óxido o corrosión en los contactos metálicos:** Aumentan la resistencia en los contactos, disminuyendo la eficiencia del panel.

**a) Defectos importantes**

- **Decoloración o manchas en la encapsulación:** Indican daño por exposición solar o humedad, afectando la eficiencia del panel.
- **Burbujas de aire en la encapsulación:** Reducen la transparencia y afectan la cantidad de luz solar que llega a las células solares.
- **Daños en los bordes del marco:** Permiten la entrada de humedad y polvo, dañando las células solares.
- **Defectos en la serigrafía:** Afectan la estética del panel, pero no su rendimiento.

**b) Defectos menores**

- **Marcas superficiales en la encapsulación:** No afectan el rendimiento del panel, pero pueden afectar su apariencia.
- **Pegatinas o etiquetas despegadas:** No afectan el rendimiento del panel, pero pueden afectar su apariencia.
- **Defectos menores en el marco:** No afectan el rendimiento del panel, pero pueden afectar su apariencia estética.




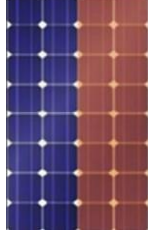
#### 4.3.3 ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

Para el análisis termográfico, se utilizó una cámara termográfica **Teledyne FLIR Tau 2**, que toma imágenes térmicas para evaluar el estado de los paneles solares. Esta cámara capta imágenes en el rango de 8-14  $\mu\text{m}$ , lo que la hace adecuada para este tipo de inspección. El análisis se lleva a cabo siguiendo las pautas de la norma **IEC TS 62446-3 (2017)**, que recomienda usar cámaras termográficas de onda media o larga para inspeccionar paneles solares. Las condiciones ideales para realizar esta inspección incluyen:

- **Irradiación solar:** Mínima de 600  $\text{W}/\text{m}^2$ . Una irradiación solar más alta genera mayor contraste térmico en las imágenes, lo que facilita la detección de anomalías.
- **Temperatura ambiente:** Entre 10 °C y 30 °C. Temperaturas extremas pueden afectar la precisión de las mediciones y la calidad de las imágenes.
- **Velocidad del viento:** Inferior a 10 m/s. El viento puede generar turbulencias que afectan la estabilidad de la cámara y la calidad de las imágenes.

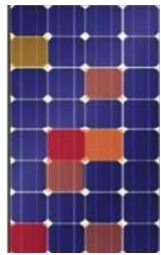
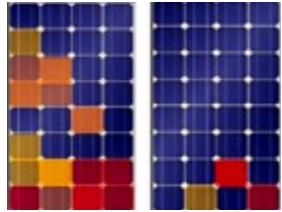
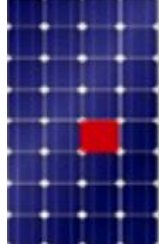
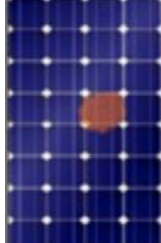

Para el análisis de las imágenes termográficas, se consideró los siguientes patrones de fallas especificados en Tabla 5 y Tabla 6:

Tabla 5. Patrones de fallas fotovoltaicas mediante termografía parte 1.

Posibles daños	Descripción	Patrón
Saludable	Sin fallas	
Circuito abierto	El PV parece tener una temperatura más elevada que los demás. Se necesita realizar una medición eléctrica adicional para demostrar su capacidad de funcionamiento	
Circuito abierto	En el PV se detecta una región con una temperatura más elevada.	
Corto circuito o diodo de derivación	Se observa que una o varias filas presentan temperaturas más elevadas que las demás.	

Adaptada de: (Ramos-Sánchez et al., 2022).

Tabla 6. Patrones de fallas fotovoltaicas mediante termografía parte 2.

Posibles daños	Descripción	Patrón
Cortocircuito o diodo de derivación	En ocasiones, las celdas separadas exhiben variaciones en la temperatura, fenómeno que también es identificado como un patrón de mosaico.	
Derivaciones Masivas.	Algunas células separadas y aquellas cercanas al marco son más cálidas que otras partes del mismo PV. Esta disparidad térmica puede atribuirse a la polarización o la degradación inducida por el potencial.	
Celda defectuosa, celda delaminada o completamente sombreada.	La temperatura de una celda solar es superior a la del panel en su totalidad.	
Sombra parcial.	Calentamiento poco puntiagudo.	
Celda rota.	Una porción de la celda exhibe una temperatura más elevada.	

Adaptada de: (Ramos-Sánchez et al., 2022).

Para identificar un "hotspot" en un panel solar, se define como criterio un área localizada con una temperatura significativamente más alta que el resto del módulo. No se establece una temperatura específica que defina un hotspot de manera universal, ya que esta varía según el tipo de panel solar, las condiciones ambientales y la tecnología específica del módulo.

Como referencia, se utiliza el criterio comúnmente aceptado en la literatura científica, el cual considera la existencia de un hotspot cuando la temperatura en una zona específica del panel excede entre 10 y 20°C la temperatura normal de operación del panel bajo condiciones estándar. Por ejemplo, si la temperatura normal de operación de un panel es de 40°C, se considera un hotspot si se detecta un área con una temperatura entre 50 y 60°C.

#### **4.4 EVALUACIÓN PARA DETERMINAR EFICIENCIA, DEGRADACIÓN Y VIDA ÚTIL RESTANTE**

Para determinar la eficiencia, degradación y vida útil restante de los paneles fotovoltaicos, se realiza una curva I-V (voltaje-corriente). Esta curva proporciona los valores de  $P_m$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$  y FF. Las mediciones se llevan a cabo en condiciones de campo, por lo que no son en condiciones STC. Sin embargo, el Entec Solar E-1000 realiza una extrapolación utilizando un modelo matemático para obtener valores en condiciones STC, lo que permite compararlos con los valores nominales en esas condiciones. A continuación, se especifican las condiciones para la medición.

##### **4.4.1 CURVA I-V**

Para garantizar una extrapolación adecuada a condiciones estándar (STC), se recomienda realizar las mediciones con una irradiancia superior a 700 W/m<sup>2</sup>, según las indicaciones del manual del Entec Solar E-1000. Se evitan días muy ventosos para minimizar las variaciones en la temperatura. Además, se utiliza el dispositivo E-Temp para monitorizar la temperatura en varios puntos del circuito bajo prueba, siguiendo la norma IEC 61853-1. Las características eléctricas del módulo se configuran según sus datos nominales, tales como  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  y NS.

En primer lugar, se registran los parámetros iniciales de los paneles bajo condiciones estándar (STC), incluyendo  $P_m$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$  y  $FF$ . Posteriormente, se miden las condiciones ambientales, como la irradiancia ( $W/m^2$ ) y la temperatura de las celdas ( $^{\circ}C$ ). Con el trazador de curvas Entec Solar E-1000, se obtienen los parámetros de rendimiento de los paneles en terreno, ajustando los datos a condiciones STC mediante el modelo matemático del equipo.

Finalmente, se comparan los valores iniciales y actuales bajo condiciones STC para analizar la degradación de los paneles, revisando las curvas I-V y P-V para identificar anomalías y tendencias de pérdida de rendimiento.

#### 4.4.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ACTUAL

Para evaluar la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos (PV), es fundamental tener en consideración la siguiente información:

- Marca y modelo de los paneles solares.
- Fecha de instalación / años de uso.
- Tipo de célula.
- Área de los paneles PV.

También necesitaremos haber medido la curva I-V primero, ya que necesitaremos la potencia máxima de cada panel y la irradiancia con la que fue medida.

Entre más se acerquen los valores máximos a los valores de  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$ , la curva I-V tendrá una forma más cuadrada y mejor calidad tendrá la celda solar. Entonces, con todos los parámetros anteriores calculados se puede determinar la eficiencia de conversión ( $\eta$ ) con la siguiente ecuación (González-Sánchez et al., 2023):

$$\eta_n(\%) = \left( \frac{FF * V_{oc} * I_{sc}}{(G * A)} \right) * 100$$

Donde:

- $\eta_n(\%)$ : Eficiencia después de n Años.

- **FF**: Parámetro para definir la calidad de la celda.
- **$I_{sc}$** : Corriente eléctrica generada en una celda solar cuando el voltaje es cero
- **$V_{oc}$** : Voltaje que se produce cuando no hay corriente
- **G**: Irradiancia solar incidente en el panel, medida en W/m<sup>2</sup>.
- **A**: Área del panel solar, medida en m<sup>2</sup>.

Estudios de campo indican que, en promedio, los paneles solares cristalinos conservan entre el 80% y el 90% de su capacidad de generación inicial después de dos décadas de operación, por tanto, luego de tener los datos podemos realizar un análisis con ello

#### 4.4.3 ANÁLISIS DE DEGRADACIÓN:

El análisis de la degradación de un panel solar se realiza comparando su potencia máxima actual con la potencia máxima nominal especificada por el fabricante. Este resultado indica cuánto ha disminuido el rendimiento del panel con el tiempo:

$$D(\%) = \left( \frac{P_{m,i} - P_{m,a}}{P_{m,i}} \right) \times 100$$

**D(%)**: Degradación actual del panel en porcentaje

**$P_{m,i}$** : Potencia máxima inicial, especificada por el fabricante o medida al inicio de la operación del panel (Vatios).

**$P_{m,a}$** : \* Potencia máxima actual del panel medida tras un periodo de uso (Vatios).

Para este análisis tendremos en consideración que por literatura estos paneles pueden degradarse entre un 0,5% y un 1% cada año (Jordan & Kurtz, 2013).

#### 4.4.4 ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL RESTANTE

Un panel solar se considera al final de su vida útil cuando su eficiencia cae por debajo del 80% de su valor inicial, conforme al estándar IEC 61215. Si la eficiencia

inicial del panel es del 11.94%, se considera que ha alcanzado el final de su vida útil cuando su eficiencia baja a menos del 9.55%.

La vida útil restante (VUR) se calcula con la siguiente fórmula:

$$VUR \approx \frac{(\eta_n (\%) - 9,55 (\%))}{\Delta DA (\%)}$$

Donde:

- **VUR:** Vida Útil Restante (años), el tiempo estimado que el panel solar seguirá funcionando eficientemente.
- **$\Delta DA$ :** Tasa de Degradación Anual (%), el porcentaje promedio de degradación del rendimiento del panel por año.
- **$\eta_n$ (%):** Eficiencia después de n Años.

#### 4.4.5 GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS PANELES

Para calcular la generación de energía de los paneles solares se utilizó la página oficial de Chile Explorador Solar y se seguirán los siguientes pasos:

- a) **Ingresar coordenadas del lugar:** Donde se ingresa la latitud y longitud del lugar donde están instalados los paneles solares. Esto se hace ya que la cantidad de luz solar que recibe una ubicación específica depende de su posición geográfica.
- b) **Capacidad instalada:** Se especifica la capacidad total de los paneles solares en kilovatios (kW). Esto es la potencia máxima que los paneles pueden generar bajo condiciones óptimas.
- c) **Coefficiente de temperatura del panel:** Ingresar el coeficiente de temperatura del panel, que indica cómo cambia la eficiencia del panel con la temperatura. Se expresa en porcentaje por grado Celsius (%/°C).
- d) **Características de la instalación:** Incluye detalles como la inclinación del panel (en grados) y la orientación. La inclinación y orientación influyen en la cantidad de energía que los paneles pueden captar del sol.

- e) **Capacidad del inversor:** Proporciona la capacidad del inversor en kW. El inversor convierte la corriente continua (CC) generada por los paneles en corriente alterna (CA) utilizada por los electrodomésticos y la red eléctrica.
- f) **Eficiencia del inversor:** Indica la eficiencia del inversor, que es el porcentaje de la energía que entra al inversor que se convierte en energía utilizable.
- g) **Factor de pérdida del sistema fotovoltaico:** Este factor tiene en cuenta diversas pérdidas en el sistema, como la suciedad en los paneles, sombras parciales, pérdidas en el cableado, etc. Se expresa como un porcentaje.

El sistema utilizará modelos matemáticos y datos climáticos para calcular la estimación de la energía diaria y anual generada por el sistema fotovoltaico en kilovatios-hora (kWh). Esto nos ayudara a tener una estimación de cuánta energía podemos esperar producir con la instalación solar.

#### **4.5. VIABILIDAD DEL RECICLAJE O DESECHO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL**

Se plantea investigar el estado actual del reciclaje de paneles solares en Chile, centrándose en las iniciativas que están surgiendo tanto en el ámbito académico como en el privado. El objetivo de esta sección es describir los pasos a seguir para identificar las prácticas y estrategias que se están implementando en relación con el reciclaje de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil.

##### **4.5.1 COMPARACIÓN DE FORMAS DE RECICLAJE**

Las empresas son clasificadas según si su reciclaje es de alto o bajo valor, teniendo en cuenta los materiales que recuperan. Una vez separados en reciclaje de alto o bajo valor, se usaron los criterios de comparación indicados en el punto b) para evaluar su eficiencia en el proceso de reciclaje.

##### **a) Clasificación de reciclajes**

Se realizo una comparación entre diversas empresas chilenas de reciclaje, considerando las siguientes dos categorías:

- **Reciclaje de alto valor:** Empresas que se especializan en la recuperación de materiales valiosos de los paneles solares, como el silicio, la plata y el cobre.
- **Reciclaje de bajo valor:** Empresas que se enfocan en el reciclaje de materiales con menor valor comercial, como el vidrio y el aluminio.

A continuación, se presentan los criterios que se utilizarán para comparar las distintas empresas chilenas.

**b) Criterios de Comparación:**

- **Tecnología de reciclaje utilizada:** Evaluación de las tecnologías aplicadas para el reciclaje (mecánica, térmica, química, híbridas)
- **Eficiencia del proceso:** Cantidad de materiales recuperados y reutilizados.
- **Costo del proceso:** Comparación de costos de reciclaje.
- **Experiencia y trayectoria:** Tiempo y experiencia en el mercado de reciclaje de paneles solares.

#### **4.5.2 VIABILIDAD DE DESHECHAR LOS PV EN VERTEDERO**

- a) Se analizará la legislación vigente y la revisión de normas y regulaciones ambientales a nivel local y nacional.
- b) Se identificarán los requisitos específicos para el manejo de paneles fotovoltaicos (FV).
- c) Se evaluará si la composición química de los paneles contiene algún compuesto corrosivo que no esté permitido en un vertedero.
- d) Basado en lo anterior, se tomará una decisión evaluando los riesgos ambientales y el costo de disposición.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1 EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL Y DETECCIÓN DE DAÑOS DE LOS PANELES**

#### **5.1.1 PRUEBA DE AISLAMIENTO**

Se utilizó el comprobador de aislamiento digital Fluke 1587 FC para verificar la integridad del aislamiento de los paneles solares ISOFOTON I-94 de la Universidad de Concepción, que tenían 20 años de antigüedad. Esta herramienta fue clave para medir la resistencia de aislamiento, un indicador de la calidad del aislamiento eléctrico.

Primero, se configuró el Fluke 1587 FC para aplicar una tensión de prueba de 500 V. El valor medido resultó ser significativamente superior al mínimo requerido (50 M $\Omega$ ), lo que indicó que el aislamiento de los paneles aún era de muy alta calidad, con una mínima corriente de fuga, algo ideal en sistemas eléctricos.

Luego, se aplicó una tensión de 1.000 V para una prueba más exigente del aislamiento. Según las normas internacionales, como la IEC 61215, la resistencia mínima requerida en esta prueba debía ser de 1 G $\Omega$ . Los resultados mostraron que los paneles cumplían con este requisito, confirmando un aislamiento de buena calidad, incluso después de 20 años de uso. Estos resultados se presentaron en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultado de la prueba de aislamiento en paneles solares.

Panel	Tensión aplicada (V)	Resistencia de aislamiento
Panel 1	500	550 MΩ
	1.000	2,2 GΩ
Panel 2	500	550 MΩ
	1.000	2,2 GΩ
Panel 3	500	550 MΩ
	1.000	2,2 GΩ
Panel 4	500	550 MΩ
	1.000	2,2 GΩ

En la Figura 13 se verifica el resultado de la prueba a 500 V para los 4 paneles fotovoltaicos.



Figura 13. Prueba de aislamiento aplicando una tensión de 500 V.

En la Figura 14, se presentan los resultados obtenidos al aplicar una tensión de prueba de 1.000 V, logrando una lectura 2,2 GΩ.



Figura 14. Prueba de aislamiento con tensión de prueba de 1.000 V.

El valor de 2,2 GΩ a una tensión de 1.000 V mostró que el aislamiento no solo era bueno, sino que mejoraba al aumentar la tensión de prueba. Esto sugirió que el material del aislamiento y la construcción del circuito eran muy efectivos para impedir la fuga de corriente, incluso a tensiones más altas.

### 5.1.2 INSPECCIÓN VISUAL

Se llevó a cabo una inspección visual exhaustiva de cuatro paneles fotovoltaicos ISOFOTON, tras 20 años de vida útil. Para este propósito, se utilizó una cámara profesional en modo macro para identificar posibles defectos con mayor precisión, así como en modo normal para obtener una visualización general de los paneles.

En la Figura 15 se presentó una imagen general del panel fotovoltaico número 3. Cabe destacar que, a excepción del panel 3, los otros tres paneles mostraron un estado similar, como se detallaría más adelante.



Figura 15. Imagen panel fotovoltaico 3.

En la Figura 16 se observaron células agrietadas y decoloración en el encapsulante, señales comunes de envejecimiento y exposición a condiciones ambientales adversas. La exposición prolongada a la luz UV, junto con factores como fluctuaciones térmicas, humedad y viento, pudo haber degradado el material encapsulante, causando oscurecimiento y pérdida de transparencia. Estos defectos, presentes en los cuatro paneles examinados, podrían comprometer la eficiencia y seguridad del sistema, incluso si los paneles habían permanecido en una posición fija durante muchos años.



Figura 16. Células agrietadas y decoloración del encapsulante.

La delaminación podía provocar la separación de las capas del panel, generando bolsas de aire y una apariencia inflada. Este fenómeno podría haber sido causado por factores como la entrada de humedad debido a sellos defectuosos o la degradación del encapsulante. Asimismo, la desgasificación de materiales pudo llevar a la inflación al atrapar los gases liberados dentro del panel. En la Figura 17 se mostró que este problema se presentaba únicamente en el panel 3.



Figura 17. Delaminación en la parte trasera del panel 3.

En la Figura 18 se apreció un golpe que causó un daño en la superficie del panel. El impacto fue lo suficientemente fuerte como para provocar una rotura visible en la cubierta trasera del panel solar, mientras que en la Figura 19 se mostró cómo el golpe que causó el daño en la parte trasera del panel afectó también la parte delantera.



Figura 18. Parte trasera del panel 3 con rotura en la cubierta e inflamación.



Figura 19. Falla en la celda del panel 3.

La Figura 20 ilustró la apariencia de los paneles 1, 2 y 4, ofreciendo una referencia para la comparación con el panel 3.

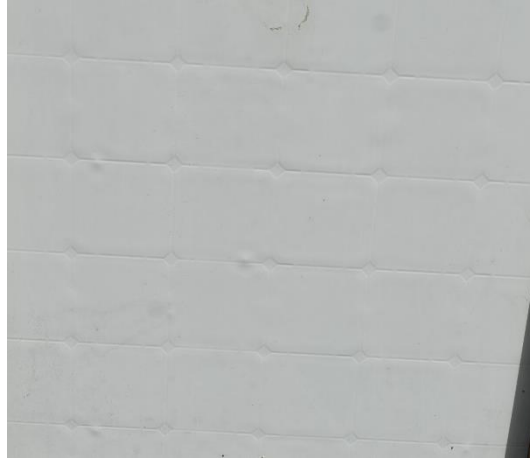


Figura 20. Láminas traseras iguales en paneles 1, 2 y 4.

El cambio de color hacia un tono más azul en algunas celdas podía ser un indicio de envejecimiento y exposición a condiciones ambientales adversas. La delaminación en las interconexiones de las celdas fue otro defecto crítico que pudo comprometer la integridad estructural del panel. En la Figura 21 se observaron estos cambios, los cuales estaban presentes en los cuatro paneles examinados.



Figura 21. Cambio de color y delaminación en las interconexiones.

La estructura de la caja de los paneles se encontró algo deteriorada, y los tornillos hundidos podían dificultar las interconexiones y el mantenimiento de los mismos. En la Figura 22 se mostró una de las cajas de los paneles, aunque todas las cajas se encontraban en estado muy similar.



Figura 22. Deterioro de la caja y tornillos Hundidos.

La acumulación de musgo, causada por la humedad y condiciones ambientales favorables, podía interferir con la eficiencia del panel y aumentar el riesgo de daños adicionales. En la Figura 23 se observó la presencia de musgo en los bordes del panel.



Figura 23. Musgo en la orilla de los paneles solares.

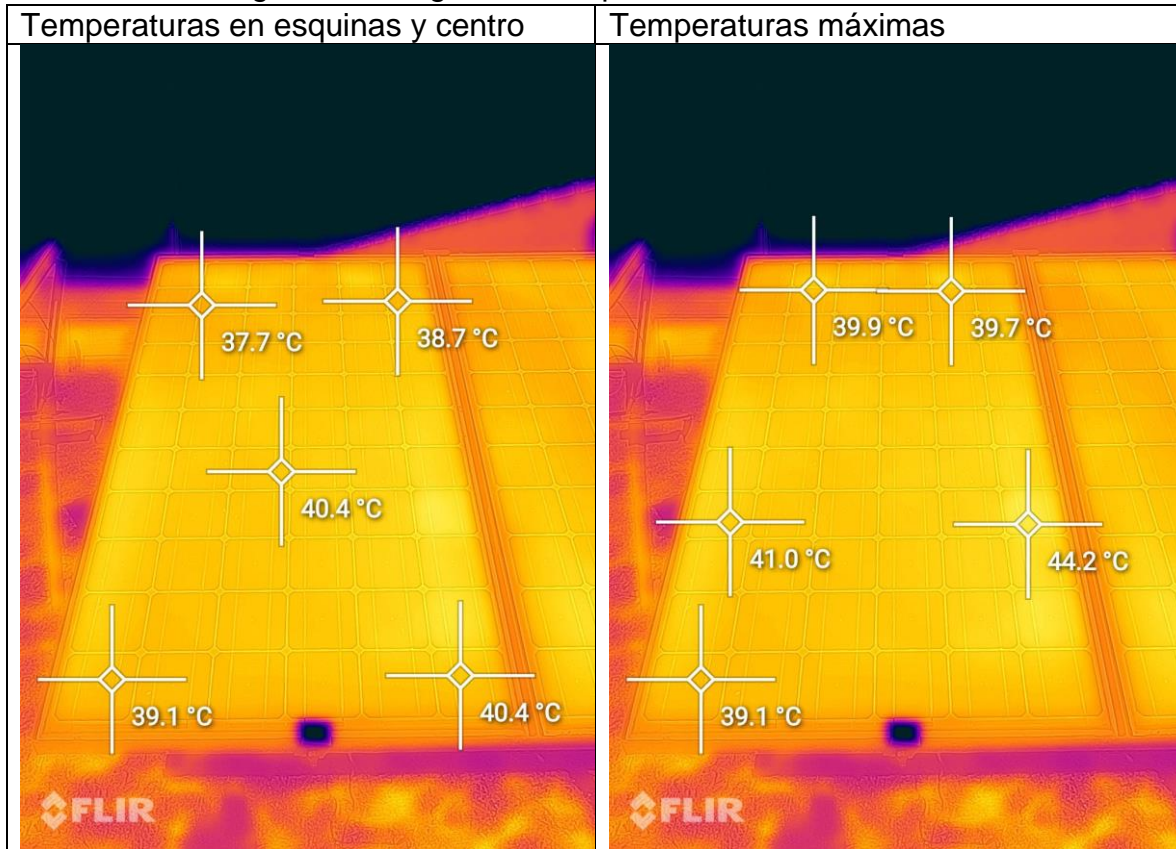
Después de 20 años, los paneles fotovoltaicos ISOFOTON mostraron varios signos de deterioro que afectaban su eficiencia. Las células agrietadas, la decoloración del encapsulante y la delaminación, fueron los defectos más críticos observados.

### 5.1.3 ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

En la Tabla 8 se presentan las imágenes termográficas del Panel 1. La temperatura más alta registrada ( $44.2^{\circ}\text{C}$ ) fue aproximadamente  $6.5^{\circ}\text{C}$  mayor que la temperatura más baja observada en la primera imagen ( $37.7^{\circ}\text{C}$ ). Aunque se observaron variaciones en la temperatura, esta diferencia no alcanzó los  $10^{\circ}\text{C}$ , por lo que técnicamente no se consideró un hotspot grave. Sin embargo, la temperatura más

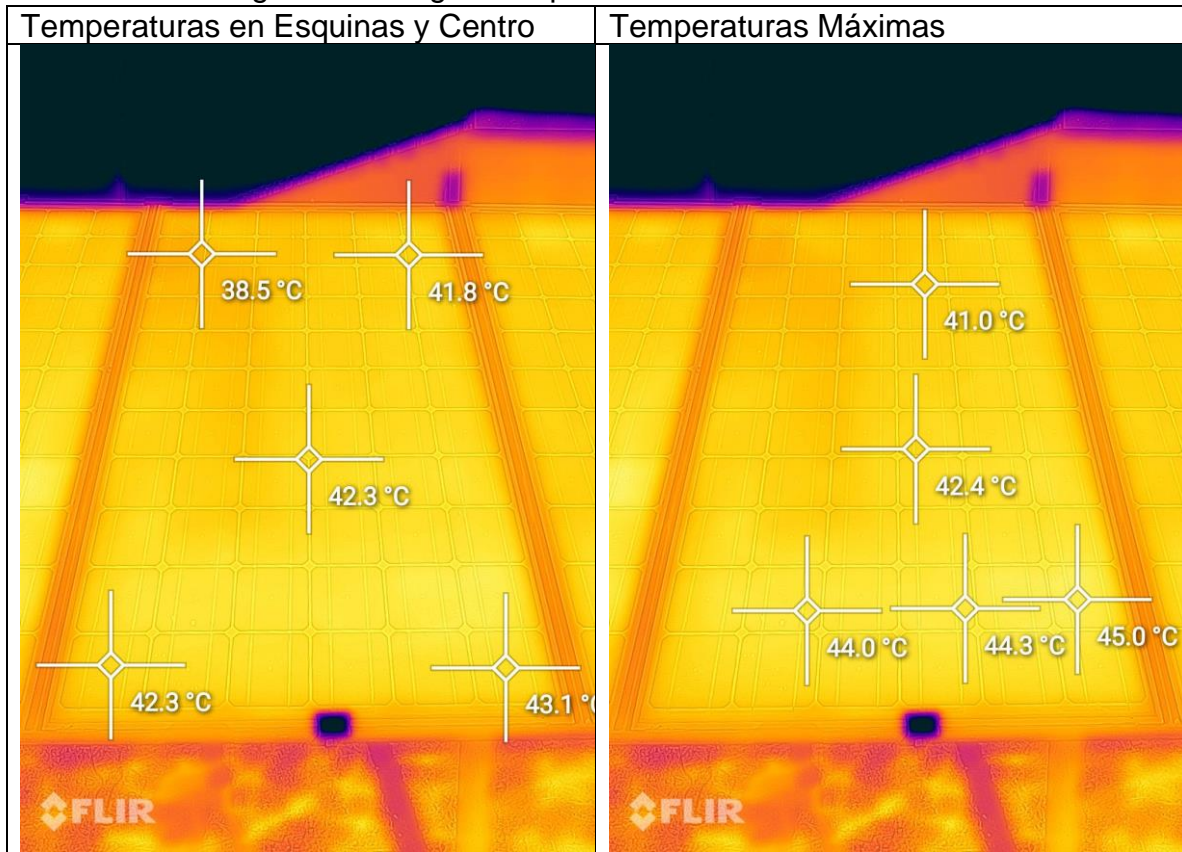
alta estaba ligeramente elevada en comparación con el resto del panel, lo que podría indicar una posible área de degradación que necesitaba ser monitoreada.

Tabla 8. Imágenes termográficas del panel 1.



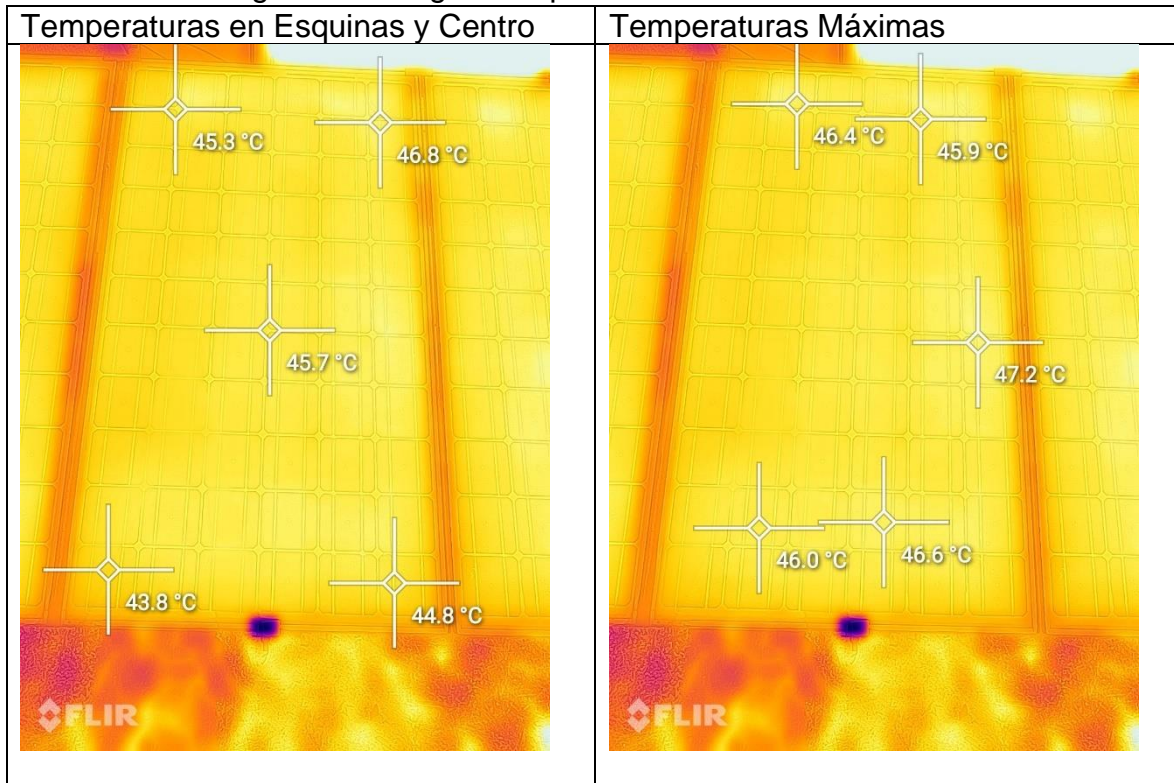
En la Tabla 9 se muestran las imágenes termográficas del Panel 2. La temperatura más alta registrada (45°C) fue de 6.3°C superior a la temperatura más baja en la primera imagen (38.7°C). Similar al Panel 1, esta variabilidad no alcanzó el umbral para un hotspot, pero la diferencia fue significativa, lo que sugirió que algunas áreas del panel podrían haber estado comenzando a degradarse o a acumular más calor de lo esperado.

Tabla 9. Imágenes termográficas panel 2.



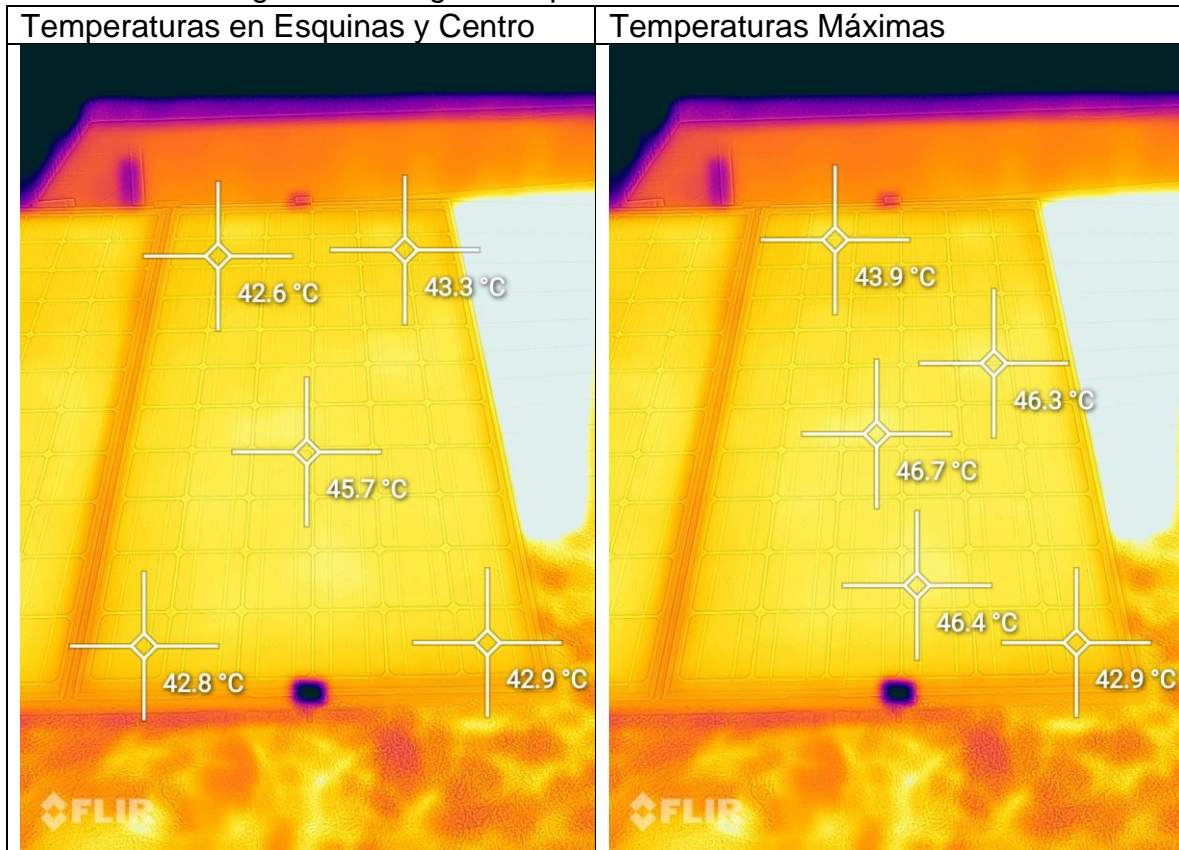
En la Tabla 10 se presentan las imágenes termográficas del Panel 3. La temperatura más alta registrada (47.2°C) fue solo 3.4°C mayor que la temperatura más baja en la primera imagen (43.8°C). Aunque las temperaturas fueron relativamente uniformes y elevadas, no se cumplió el criterio para un hotspot. Sin embargo, la temperatura general del panel fue más alta en comparación con los otros paneles, lo que indica un envejecimiento general del módulo.

Tabla 10. Imágenes termográficas panel 3.



En la Tabla 11 se muestran las imágenes termográficas del Panel 4. La temperatura más alta registrada (46.7°C) fue 4.1°C mayor que la temperatura más baja observada en la primera imagen (42.6°C). Como en los casos anteriores, la variabilidad de temperatura no cumplió el criterio estricto de un hotspot, pero el centro del panel fue notablemente más cálido que las esquinas, lo que sugirió un área de posible degradación o fallo.

Tabla 11. Imágenes termográficas panel 4.



En la Figura 24 se observaron las temperaturas de la parte trasera del panel 1, donde la caja mostró una menor temperatura, entre 27,1 y 27,7 °C, probablemente porque estaba mejor aislada térmicamente o tenía una menor generación de calor interna. Esto sugirió que la disipación de calor era eficiente, o que el ambiente circundante tenía una temperatura similar, ayudando a mantener la caja a una temperatura relativamente baja.

Por otro lado, se observó una temperatura de 50,5 °C en otra parte trasera del panel porque esa zona contenía componentes electrónicos que generaban una cantidad significativa de calor. Esta área pudo haber estado expuesta a una menor ventilación o flujo de aire, lo que resultó en una acumulación de calor.



Figura 24. Imagen termográfica parte trasera del panel 1.

En la Figura 25, se observó que en los soportes del panel la temperatura era de 26,9 °C, mientras que en la parte trasera del panel las temperaturas variaban entre 51,4 °C y 46,7 °C. Esto sugirió que los soportes del panel estaban mejor aislados térmicamente o no generaban tanto calor, en comparación con la parte trasera del panel, que tenía componentes o áreas con mayor generación y acumulación de calor.

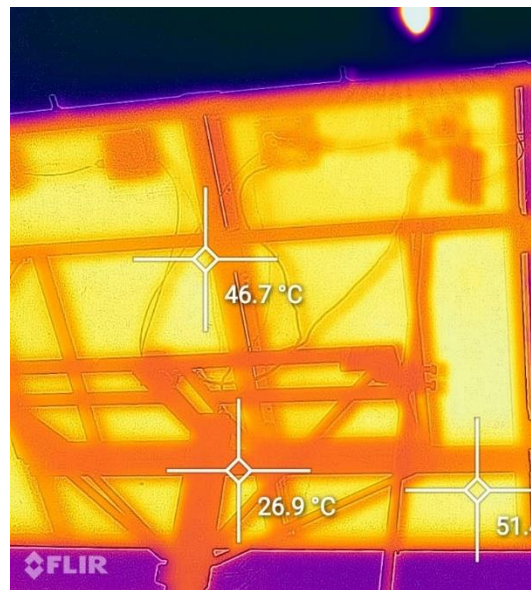


Figura 25. Imagen termográfica parte trasera panel 1 y 2

## 5.2 EVALUACIÓN PARA DETERMINAR EFICIENCIA, DEGRADACIÓN Y VIDA ÚTIL RESTANTE

Para determinar la eficiencia, la degradación y la vida útil restante de los paneles ISO FOTON, se utilizó el trazador E-1000 para obtener la curva I-V actual de los módulos fotovoltaicos. Se midieron los siguientes parámetros:  $P_m$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$  y FF.

Las condiciones del terreno se especificaron en cada tabla, detallando la irradiancia y la temperatura de la célula. Además, se indicó la diferencia entre las condiciones iniciales y las actuales, tanto según las condiciones de medición como extrapoladas a condiciones estándar de prueba (STC).

### 5.2.1 CURVA I-V

En la Tabla 12 se presentaron los parámetros iniciales de los cuatro paneles en estudio bajo condiciones STC, los cuales se compararon con los valores actuales y se evaluó la diferencia entre ellos.

Tabla 12. Parámetros iniciales (STC) para los paneles.

Parámetro	Inicial (STC)
$P_m$ (W)	94,08
$V_{oc}$ (V)	39,60
$I_{sc}$ (A)	3,27
$V_m$ (V)	32,00
$I_m$ (A)	2,94
FF	0,73

En la Tabla 13 se presentaron las condiciones en las que se midieron los parámetros en terreno para los cuatro paneles. Se registraron dos factores importantes: la irradiancia, que indica la cantidad de radiación solar recibida por cada panel en

W/m<sup>2</sup>, y la temperatura de la célula en °C, que refleja el calor en la superficie de las células solares de cada panel.

Tabla 13. Condiciones bajo las cuales se midieron los parámetros en terreno para los cuatro paneles.

<b>Condiciones</b>	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Panel 3</b>	<b>Panel 4</b>
Irradiancia W/m <sup>2</sup>	841,34	820,99	801,18	809,99
Temperatura de célula °C	35,77	33,03	44,40	39,07

La Tabla 14 presenta los resultados obtenidos para los parámetros actuales de los cuatro paneles en condiciones de terreno, medidos con el dispositivo Entec Solar E-1000.

Tabla 14. Parámetros actuales de los paneles en condiciones de terreno.

<b>Parámetro</b>	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Panel 3</b>	<b>Panel 4</b>
Pm (W)	57,74	49,99	52,65	50,60
Voc (V)	35,57	35,54	36,06	35,62
Isc (A)	2,45	2,32	2,24	2,27
Vm (V)	27,86	28,18	28,76	28,42
Im (A)	2,07	1,77	1,83	1,78
FF	0,66	0,61	0,65	0,63

La Tabla 15 muestra los datos ajustados utilizando el modelo matemático de Entec Solar E-1000 para llevarlos a condiciones STC.

Tabla 15. Parámetros actuales de los paneles en condiciones STC.

<b>Parámetro</b>	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Panel 3</b>	<b>Panel 4</b>
Pm (W)	73,41	64,18	73,86	68,08
Voc (V)	37,64	37,16	39,85	38,35
Isc (A)	2,93	2,86	2,82	2,81
Vm (V)	29,96	29,83	32,15	31,19
Im (A)	2,45	2,15	2,30	2,18
FF	0,67	0,61	0,66	0,63

En la Tabla 16 se analizaron las diferencias entre los valores iniciales de los parámetros y los valores actuales medidos en los cuatro paneles bajo condiciones STC. Estas diferencias reflejan la degradación o cambio en el rendimiento de los paneles a lo largo del tiempo.

Tabla 16. Diferencia de valores iniciales y actuales en condiciones STC.

<b>Parámetro</b>	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Panel 3</b>	<b>Panel 4</b>
Pm (W)	20,67	29,90	20,22	26,00
Voc (V)	1,96	2,44	-0,25	1,25
Isc (A)	0,34	0,41	0,45	0,46
Vm (V)	2,04	2,17	-0,15	0,81
Im (A)	0,49	0,79	0,64	0,76
FF	0,06	0,12	0,07	0,10

- Potencia máxima (Pm): Todos los paneles mostraron una disminución en la potencia máxima, siendo el Panel 2 el que presentó la mayor diferencia con 29,90 W, mientras que el Panel 3 tuvo la menor disminución con 20,22 W. Esto indicó que, aunque todos los paneles experimentaron una pérdida significativa de rendimiento, el Panel 2 fue el más afectado.
- Voltaje de circuito abierto (Voc): Se observó una disminución en los valores de Voc para la mayoría de los paneles, con diferencias entre 1,25 V y 2,44 V. Sin embargo, el Panel 3 presentó una pequeña mejora de 0,25 V. Es importante señalar que el Panel 3 fue medido bajo una temperatura de célula significativamente más alta (44,4 °C), lo que podría haber alterado los resultados. Si la medición en condiciones STC (normalizadas a 25°C) no fue corregida adecuadamente, los valores de mejora podrían no reflejar el rendimiento real.
- Corriente de cortocircuito (Isc): Todos los paneles experimentaron una disminución en la corriente de cortocircuito, con diferencias que oscilaron entre 0,34 A y 0,46 A. Aunque estas diferencias fueron pequeñas, indicaron

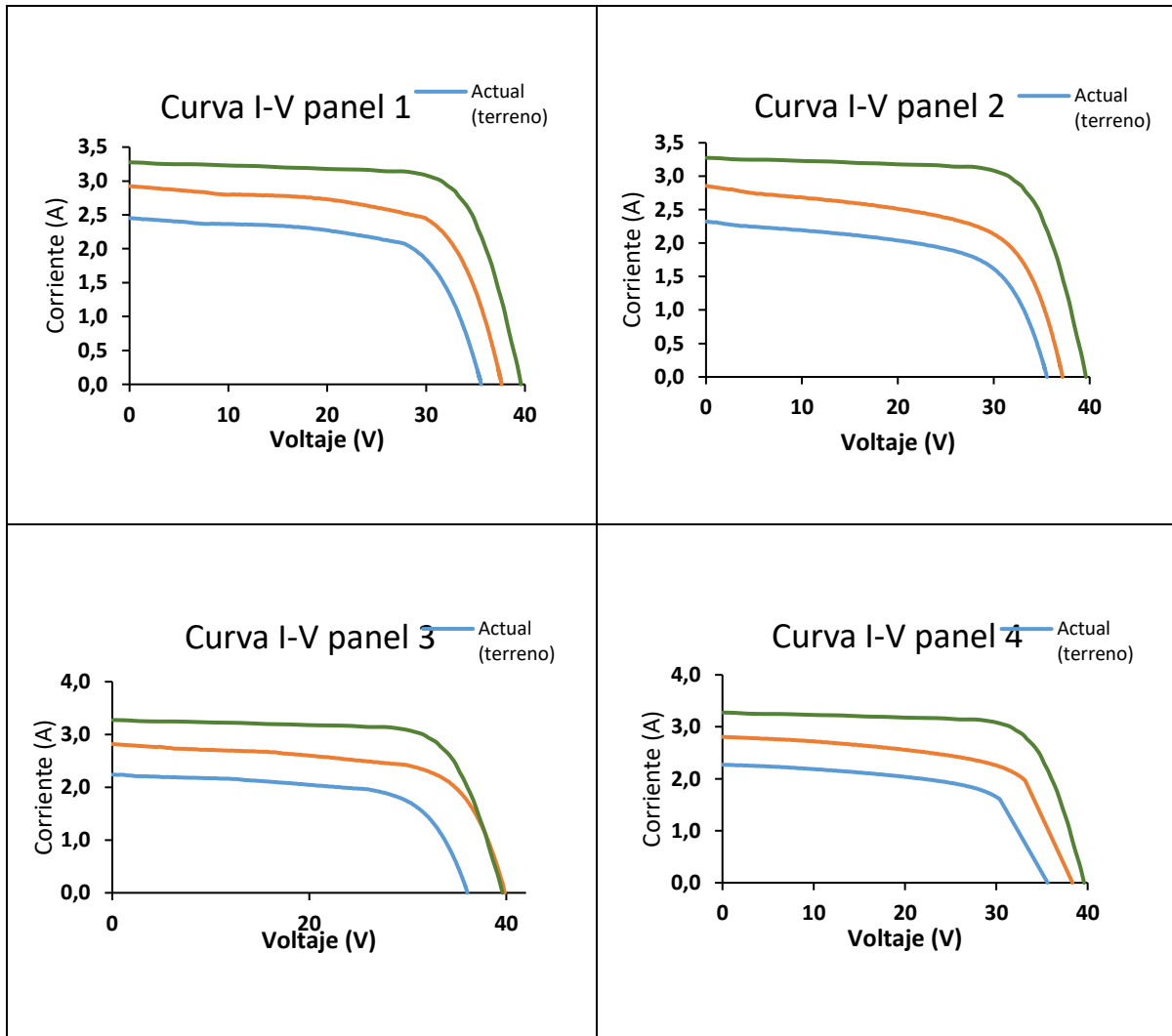
una reducción en la capacidad de los paneles para generar corriente bajo condiciones STC.

- Voltaje de máxima potencia ( $V_m$ ): Se reportó una disminución en el voltaje de máxima potencia para la mayoría de los paneles, siendo el Panel 2 el más afectado con una diferencia de 2,17 V. Sin embargo, el Panel 3 presentó una leve mejora de 0,15 V, lo que podría estar influenciado por la elevada temperatura registrada.
- Corriente de máxima potencia ( $I_m$ ): Todos los paneles mostraron una reducción en la corriente de máxima potencia, con diferencias que variaron entre 0,49 A y 0,79 A, siendo el Panel 2 el más afectado.
- Factor de llenado (FF): Finalmente, el factor de llenado disminuyó para todos los paneles, aunque las diferencias fueron pequeñas, con el Panel 2 mostrando la mayor diferencia con 0,12 y el Panel 1 la menor con 0,06.

### **5.2.2 ANÁLISIS DE CURVA I-V Y CURVA P-V**

En la Tabla 17, se presenta la curva de corriente-voltaje para cada panel. Esta curva es útil para entender la capacidad del panel bajo diferentes cargas y condiciones ambientales:

Tabla 17. Curva I-V de condiciones iniciales y actuales de los paneles.



- En todos los paneles se observó una reducción significativa de rendimiento al comparar las condiciones actuales STC (naranja) con las iniciales STC (verde). Esta disminución reflejó la degradación de los paneles con el tiempo.
- La mayor pérdida de rendimiento ocurrió bajo condiciones reales de terreno (curva azul), lo cual es esperado debido a factores como la irradiancia y la temperatura de operación.
- El panel 3 mostró una menor diferencia entre la curva inicial y la curva actual STC, lo que puede estar relacionado con la medición bajo una temperatura celular más alta, afectando la precisión de los datos actuales STC.

En la Tabla 18 se analizaron las pendientes superiores e inferiores de la curva I-V de cada panel solar que se muestran anteriormente en la Tabla 17 para detectar posibles anomalías. Esto muestra cómo varía la corriente en función del voltaje tanto en la zona de cortocircuito como cerca del voltaje de circuito abierto para cada panel individualmente:

Tabla 18. Análisis de pendientes de la curva I-V de los paneles solares

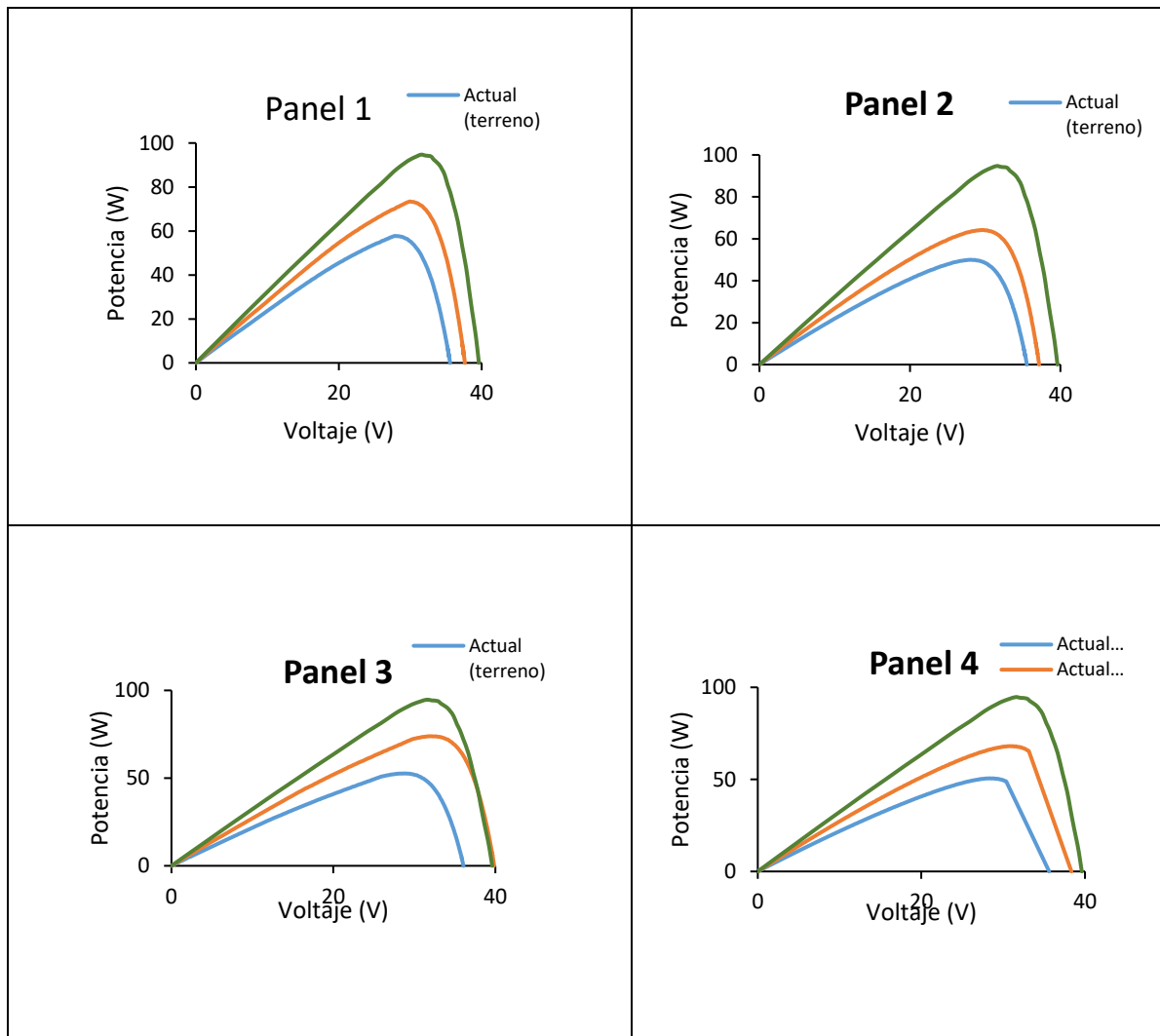
Panel	Parte de la curva	Ecuación	Significado
1	Superior	$y = -0,0151x + 2,9247$	Corriente disminuye lentamente con el voltaje, <b>alta estabilidad.</b>
	Inferior	$y = -0,3585x + 13,493$	Corriente disminuye rápidamente con el voltaje, transición rápida.
2	Superior	$y = -0,0213x + 2,8557$	Corriente disminuye un poco más rápido, <b>moderada estabilidad.</b>
	Inferior	$y = -0,3264x + 12,132$	Corriente disminuye rápidamente, transición rápida.
3	Superior	$y = -0,0136x + 2,8185$	Corriente disminuye muy lentamente, <b>alta estabilidad.</b>

	Inferior	$y = -0,3524x + 14,044$	Corriente disminuye rápidamente, transición rápida.
4	Superior	$y = -0,0184x + 2,8068$	Corriente disminuye moderadamente, <b>buena estabilidad.</b>
	Inferior	$y = -0,3407x + 13,066$	Corriente disminuye rápidamente, transición rápida.

- La disminución lenta de la corriente en la parte superior de la curva indicó que el panel presenta mayor estabilidad y pudo operar de manera eficiente en una gama más amplia de voltajes. En contraste, una disminución rápida en la parte inferior de la curva fue esperada, ya que representó la transición rápida hacia el apagado del panel cuando el voltaje aumentó y el panel ya no pudo generar corriente de manera significativa.
- Los paneles que mostraron una disminución más lenta en la parte superior, como el Panel 3, presentaron mejor estabilidad en su operación. Por otro lado, aquellos con pendientes más pronunciadas, como el Panel 2, perdieron corriente más rápidamente.

En la Tabla 19, se muestra la curva de potencia-voltaje para cada panel. Aquí se puede observar el punto de máxima potencia, que es donde el panel solar genera la mayor cantidad de potencia posible. Además, se ilustra cómo varía la potencia generada por el panel solar a diferentes niveles de voltaje.

Tabla 19. Curva P-V de condición iniciales y actuales de los paneles.



- En todos los paneles, las curvas muestran una tendencia clara de disminución de la potencia en las condiciones actuales, tanto en terreno como en STC, en comparación con las condiciones iniciales. La diferencia entre las líneas verde (inicial), naranja (STC actual) y azul (terreno) confirma la degradación en el rendimiento de los paneles con el tiempo. Los paneles que muestran la mayor diferencia entre las condiciones actuales y las iniciales (como el Panel 2) han experimentado una pérdida más rápida de eficiencia

En la Tabla 20 se analizaron las pendientes del lado derecho e izquierdo de la curva P-V de cada panel solar que se muestran anteriormente en la Tabla 19 para detectar posibles anomalías.

Tabla 20. Análisis de pendientes de la curva P-V de los paneles solares

Panel	Parte de la curva	Ecuación	Significado
1	Izquierda	$y = 2,487x - 9e-15$	La pendiente moderada muestra un buen aumento de potencia a bajos voltajes.
	Derecha	$y = -11,173x + 420,57$	La caída pronunciada indica una pérdida rápida de potencia después de alcanzar el punto máximo.
2	Izquierda	$y = 2,2595x + 9e-15$	La pendiente más baja sugiere que la potencia aumenta de forma más lenta, pero estable.
	Derecha	$y = -10,076x + 374,46$	Aunque sigue siendo rápida, la pendiente es menos pronunciada, lo que significa una pérdida más gradual.
3	Izquierda	$y = 2,4068x$	Similar al Panel 1, con un buen aumento de potencia a bajos voltajes.
	Derecha	$y = -11,892x + 473,96$	La pendiente más pronunciada indica la mayor pérdida de potencia, una caída abrupta a altos voltajes.
4	Izquierda	$y = 2,2562x + 8e-15$	Similar al Panel 2, la potencia aumenta más lentamente, pero de forma estable.
	Derecha	$y = -10,973x + 420,76$	Pendiente pronunciada, pero menos severa que el Panel 3, lo que indica una caída rápida, aunque no extrema.

- Panel con mejor rendimiento: El Panel 2 muestra un comportamiento más equilibrado. Aunque tiene una pendiente menor en el lado izquierdo (aumento de potencia más lento), también tiene la caída menos pronunciada en el lado derecho. Esto significa que es menos eficiente en la generación inicial de potencia, pero mantiene su rendimiento de manera más estable, lo que podría ser una ventaja en condiciones de operación real, donde el rendimiento sostenido es importante.
- Panel con peor rendimiento: El Panel 3 es el que presenta el peor rendimiento debido a su pendiente extremadamente pronunciada en el lado derecho. Aunque su aumento de potencia es razonable en la parte inicial de la curva, la caída después del punto de máxima potencia es la más abrupta entre todos los paneles, lo que significa que pierde potencia rápidamente en cuanto el voltaje aumenta, lo que lo hace menos eficiente en condiciones de alta demanda.
- Comparación intermedia: Los Paneles 1 y 4 muestran un rendimiento intermedio. Ambos tienen un comportamiento decente en la subida (lado izquierdo) y una caída pronunciada en la bajada (lado derecho), pero no tan extrema como en el Panel 3. El Panel 1 se acerca más al Panel 3 en términos de caída de potencia, mientras que el Panel 4 está más cerca del Panel 2 en cuanto a estabilidad.

### **5.2.3 ANÁLISIS DE EFICIENCIA, DEGRADACIÓN Y VIDA UTIL RESTANTE DE LOS PANELES**

Para medir la eficiencia, se recopilaron varias características fundamentales de los paneles en estudio. Entre ellas, fue necesario determinar el ancho y la altura de los paneles ya que al multiplicar estos en metros obtuvimos el área de un panel que es  $0,786 m^2$ .

Los datos presentados en la Tabla 21 se obtuvieron del manual del usuario de módulos fotovoltaicos ISOFOTON.

Tabla 21. Características módulos fotovoltaicos ISOFOTON (24V).

<b>Modelo</b>	I-94
<b>Tipo de célula</b>	Monocristalina
<b>Fecha de instalación</b>	2004
<b>Vida útil paneles solares</b>	25 años aproximadamente
<b>Altura</b>	1.206 mm
<b>Ancho</b>	652 mm

Adaptado de: (ISOFOTON, 1999)

En la Tabla 22 se presenta la eficiencia inicial ( $\eta_{\text{inicial}}$ ) la eficiencia actual ( $\eta_n$ ), degradación (**D**), degradación anual ( $\Delta DA$ ) y vida útil restante (**VUR**) de los 4 paneles ISOFOTON en estudio, calculadas con las fórmulas previamente especificadas en metodología:

Tabla 22. Análisis de la eficiencia y degradación de los paneles solares tras 20 años de operación

<b>Panel</b>	$\eta_{\text{inicial}}$ (%)	$\eta_n$ (%)	<b>D</b> (%)	$\Delta DA$ (%)	<b>VUR</b> (años)
1	11,94	9,40	21,27	1,06	-0,14
2	11,94	8,25	30,90	1,55	-0,84
3	11,94	9,44	20,94	1,05	-0,11
4	11,94	8,64	27,64	1,38	-0,66

En términos generales, todos los paneles han experimentado una pérdida de eficiencia con el tiempo, lo cual es esperable debido al desgaste y la exposición a condiciones ambientales. El Panel 2 ha mostrado el peor comportamiento, con una degradación más acelerada en comparación con los otros paneles. Los Paneles 1 y 4 se encuentran en un rango intermedio de desempeño, aunque igualmente han sufrido una degradación considerable. En el caso del Panel 3, aunque tuvo una degradación similar al Panel 1, no se le pudo dar una valoración objetiva precisa debido a posibles variaciones de temperatura.

La vida útil restante (VUR) es negativa para todos los paneles, lo que significa que ya han superado el límite del 80% de su eficiencia inicial. Estos paneles se consideran al final de su vida útil porque su eficiencia actual ha caído por debajo del

umbral del 9,55% de eficiencia, establecido como el fin de la vida útil para un panel con una eficiencia inicial de 11,94%.

#### 5.2.4 GENERACIÓN DE ENERGÍA

Para el cálculo de la generación de energía de los paneles se utilizó el Explorador Solar, aplicando algunos parámetros de manera uniforme para cada panel. Estos parámetros son los siguientes:

- Latitud: -36.5961
- Longitud: -72.0802
- Altura: 138 msnm
- Tipo de Panel: Fijo Inclinado
- Inclinación: 28°
- Azimut: -14°

La Tabla 18 resumen los datos de generación de energía de los paneles solares en su condición inicial y luego de 20 años obtenidos del explorador solar que solicita los parámetros de voltaje y corriente para realizar la estimación:

Tabla 23. Generación de energía para diferentes condiciones.

<b>Panel</b>	<b>Total, diario (kWh)</b>	<b>Total, anual (kWh)</b>	<b>Factor de planta (%)</b>
Condición inicial	0,40	147	18
Panel 1 (20 años)	0,24	89	14
Panel 2 (20 años)	0,18	67	12
Panel 3 (20 años)	0,25	90	14
Panel 4 (20 años)	0,21	76	13

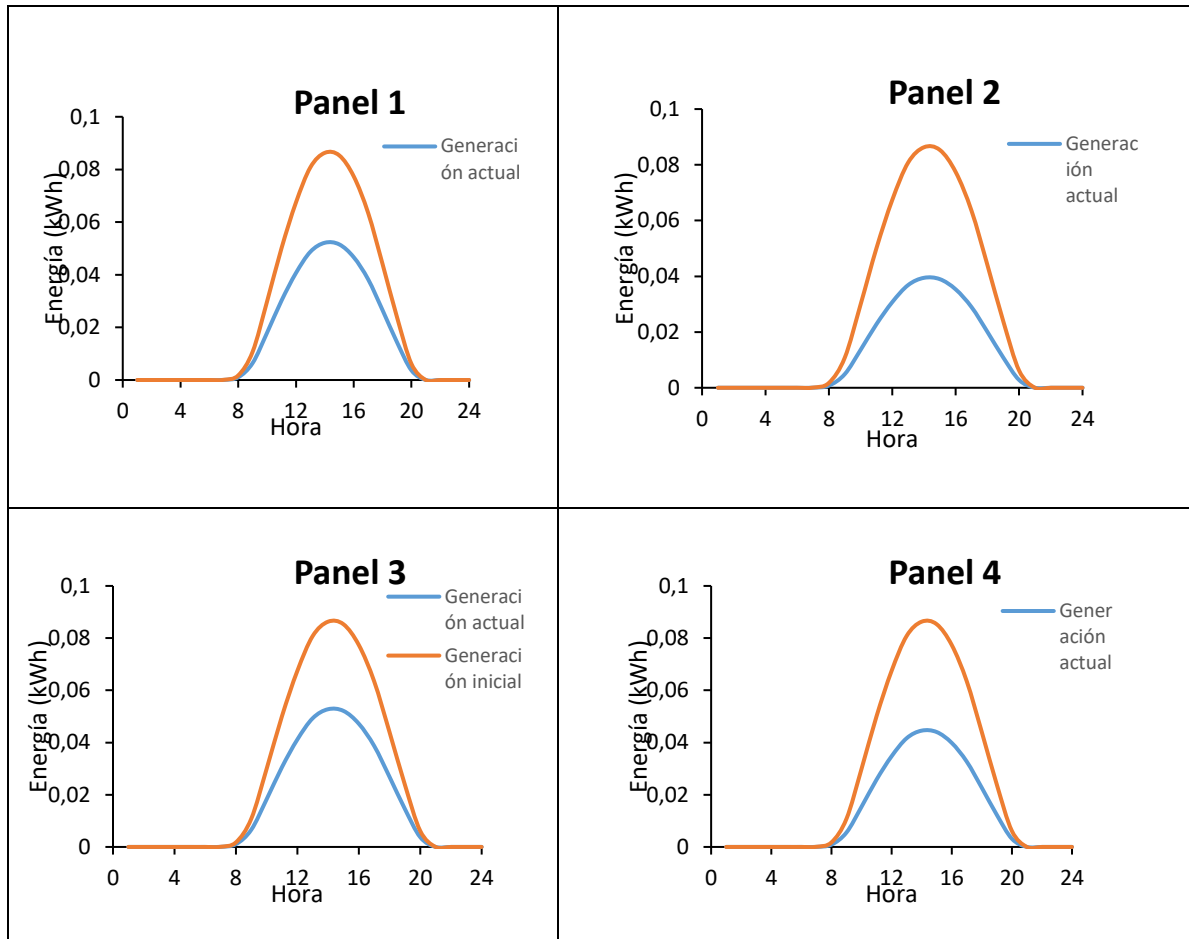
En términos generales, todos los paneles solares mostraron una disminución en su rendimiento tras 20 años de operación. Al comparar los resultados, se observó que algunos paneles conservaron una mejor capacidad de generación de energía, mientras que otros sufrieron una mayor degradación. A continuación, se presenta el

análisis general considerando los rendimientos y las observaciones relacionadas con posibles alteraciones de datos:

- **Panel 3:** Aunque este panel mostró el mejor rendimiento en términos de generación de energía, con 0,25 kWh diarios y 90 kWh anuales, existieron indicios de que los datos de este panel estaban alterados debido a variaciones en la temperatura. Por lo tanto, aunque aparentemente mantuvo la mayor capacidad de generación, este resultado no pudo considerarse completamente confiable.
- **Paneles 1 y 4:** Ambos paneles tuvieron un rendimiento intermedio. El Panel 1 generó 0,24 kWh diarios y 89 kWh anuales, mientras que el Panel 4 produjo 0,21 kWh diarios y 76 kWh anuales. Aunque ambos sufrieron degradación, su capacidad de generación de energía se mantuvo en niveles aceptables en comparación con el Panel 2, con factores de planta de 14% y 13%, respectivamente.
- **Panel 2:** Este panel fue el que tuvo el peor rendimiento. Generó solo 0,18 kWh diarios y 67 kWh anuales, con un factor de planta del 12%. Esto reflejó la mayor degradación en comparación con los demás paneles, posicionándolo como el de peor desempeño tras 20 años de operación.

En la Tabla 19 se muestra gráficos que compararon la generación de energía de los cuatro paneles fotovoltaicos en dos momentos clave: hace 20 años (línea naranja) y en la actualidad (línea azul). La comparación se realizó tomando como referencia el promedio de generación de energía durante el mes de enero.

Tabla 24. Comparación de la generación de energía promedio del mes de enero actual vs inicial para cada panel



El Panel 3 mostró la mejor forma de curva actual en comparación con su generación inicial, aunque sus resultados podrían estar alterados por la temperatura. El Panel 2 fue claramente el de peor rendimiento, con la mayor diferencia entre las dos curvas. Los Paneles 1 y 4 se situaron en un rango intermedio, con una disminución significativa pero menos dramática en la generación de energía.

### 5.3 EMPRESAS DE RECICLAJE EN CHILE

A gran escala, aún no existen plantas de reciclaje para paneles solares en Chile. Sin embargo, diversas universidades están comenzando a abordar este tema, desarrollando soluciones que transformen este desafío en una oportunidad para el país.

Es importante destacar que, según la Agencia Internacional de Energías Renovables, los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil no se consideran residuos peligrosos. Esto facilita su manejo y reciclaje, promoviendo prácticas sostenibles y responsables en la gestión de estos materiales.

A continuación, se presentan los esfuerzos de algunas de las principales entidades involucradas en este ámbito:

### **5.3.1 Reciclaje de Alto Valor**

Recuperación de la mayoría de los materiales usados en los paneles, incluyendo los elementos que se encuentran en proporciones menores.

- a) Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV):** La Escuela de Ingeniería Eléctrica de la PUCV está trabajando en una estrategia de reciclaje de paneles solares con un fuerte enfoque en la economía circular regional. Este proyecto incluye la creación de una máquina capaz de desarmar aproximadamente 500 paneles al día. Werner Jara, responsable del proyecto, destaca que esta iniciativa puede transformar el problema emergente de los residuos fotovoltaicos en una oportunidad de negocio para empresas locales, especialmente aquellas involucradas en el reciclaje de materiales como aluminio, vidrio, plástico y silicio (CoolPower, 2023).
  
- b) Antofagasta: Universidad de Antofagasta:** El Centro de Desarrollo Energético de la Universidad de Antofagasta ha iniciado un proyecto en Taltal para capacitar a profesores y estudiantes en la recuperación de módulos solares en desuso. Este proyecto también fomenta la creación de pequeñas y medianas empresas (pymes) dedicadas al reciclaje y la instalación de un laboratorio de pruebas. Se están estableciendo protocolos y estándares técnicos y económicos para habilitar un mercado de segunda vida tanto para módulos funcionales como no funcionales, en colaboración con entidades públicas encargadas de las regulaciones pertinentes (CoolPower, 2023).

- c) Región Metropolitana: Solek y Degraf:** Solek, una empresa pionera en energías renovables de origen checo, y Degraf, con amplia trayectoria en el manejo y reciclaje de residuos electrónicos, se han aliado para el reciclaje de paneles solares. Han logrado reciclar 8.6 toneladas de paneles solares en 2024 utilizando métodos mecánicos, térmicos y químicos para la recuperación de materiales como aluminio, vidrio, metales, plástico y silicio. Esta alianza permite a los hogares reciclar sus paneles solares de manera conveniente y busca expandirse para enfrentar la creciente cantidad de residuos fotovoltaicos esperados para los próximos años (Cool Power, 2023)
- d) Recobatt:** Recobatt se dedica a la gestión y reciclaje de residuos eléctricos y electrónicos, incluyendo paneles solares. Utiliza tecnologías avanzadas para dismantelar y separar los diferentes componentes de los paneles solares, como silicio, vidrio, aluminio, plata, cobre y otros metales esenciales. Con varios años de experiencia en el sector, Recobatt se ha consolidado como un actor clave en la industria del reciclaje de paneles solares en Chile, trabajando en colaboración con diversas instituciones para fomentar prácticas sostenibles y promover el reciclaje a gran escala (Recobatt, 2023).
- e) Hidronor:** Hidronor, especializada en la gestión integral de residuos industriales, ha ampliado sus servicios para incluir el reciclaje de paneles solares. En su planta de Antofagasta, Hidronor recibe paneles fotovoltaicos provenientes de la industria energética, detectando una interesante oportunidad de valorización. La empresa trabaja en la recuperación de hasta el 100% de los materiales, destinando a confinamiento menos del 30% de un panel (Diario Sostenible, 2024).

### **5.3.2 Reciclaje de Bajo Valor**

Recuperación de los materiales de mayor volumen y peso más fáciles de separar como vidrio y aluminio, dejando algunos materiales de menor volumen de difícil separación como descarte no aprovechable.

No se encontraron empresas activas de reciclaje de bajo valor en Chile.

#### **5.4 OPCIÓN MÁS VIABLE PARA EL DESTINO FINAL DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.**

En Chile, la infraestructura para el reciclaje de paneles fotovoltaicos es limitada. Aunque a nivel mundial existe tecnología para reciclar hasta el 90% de los materiales de los paneles, como vidrio, aluminio y silicio, la implementación de esta tecnología en Chile está en sus primeras etapas.

El reciclaje de paneles fotovoltaicos puede ser más costoso que simplemente enviarlos a un vertedero, especialmente en un país donde la infraestructura y el mercado de reciclaje no están plenamente desarrollados. Sin incentivos o regulaciones estrictas, el vertedero puede parecer una opción más barata para muchos.

Dado que aún no existen regulaciones estrictas que obliguen al reciclaje de paneles solares, muchos de ellos podrían terminar en vertederos al finalizar su vida útil.

La disposición en vertederos puede presentar riesgos ambientales si no se manejan adecuadamente los materiales peligrosos contenidos en los paneles, como el plomo y el cadmio en ciertos tipos de paneles.

## CONCLUSIONES

La evaluación de los paneles fotovoltaicos ISOFOTON, tras 20 años de funcionamiento, reveló un estado de conservación general que combina aspectos positivos y negativos. Las pruebas de aislamiento evidenciaron que los paneles mantienen una alta resistencia, con valores que superan los requisitos normativos. Sin embargo, la inspección visual identificó defectos físicos significativos como células agrietadas, decoloración del encapsulante y delaminación, siendo el panel 3 el más afectado con golpes y roturas adicionales.

El análisis termográfico no detectó hotspots críticos, pero sí señaló variaciones de temperatura que sugieren áreas con posible degradación. Además, la temperatura promedio de los paneles es superior a las condiciones ideales, reflejando el impacto del envejecimiento. Los análisis eléctricos de las curvas I-V y P-V demostraron una disminución sustancial en la eficiencia, con caídas en la potencia máxima ( $P_m$ ) del 38.63% al 46.86% en condiciones de terreno, y del 21.49% al 31.78% en condiciones STC, además de reducciones en otros parámetros clave como  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$  e  $I_m$ .

En conclusión, aunque los paneles aún operan, su rendimiento ha disminuido considerablemente debido a defectos físicos, térmicos y eléctricos acumulados por el envejecimiento y la exposición ambiental. Estos resultados subrayan la importancia de un monitoreo continuo y posibles acciones de mantenimiento o reemplazo para optimizar la vida útil restante y garantizar un desempeño adecuado.

## 6. REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Electricidad (AIE). 2022. *Distribución de la Energía Acumulada por Tecnología en el Periodo 2010-2027*. AIE.  
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/executive-summary?language=es>
- Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA 1). (5 de agosto de 2022). *Paneles solares al final de su vida útil: normativa y gestión*. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.  
<https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management>
- Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA 2). (25 de octubre de 2022). *Preguntas frecuentes sobre paneles solares*. EPA.  
<https://www.epa.gov/hw/solar-panel-frequent-questions>
- Bernal Molina, S. (2020). *Caracterización y evaluación de comportamientos en módulos solares fotovoltaicos: comparativa y análisis de tecnologías*, 5-8.  
<https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/ee65c37c-c748-4f1d-bda8-1494f7f6b7e7/content>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2008). *Ley 20.257: Artículo 225 letra aa) Medios de generación renovables no convencionales*.  
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=270212&idParte=&idVersion=2008-04-01>
- Boletín Generadoras de Chile (2023). *“Resumen cifras del mes de noviembre 2023”*  
[https://generadoras.cl/media/page-files/2658/BoletinGeneradorasdeChile\\_noviembre2023\\_vf\\_compressed.pdf](https://generadoras.cl/media/page-files/2658/BoletinGeneradorasdeChile_noviembre2023_vf_compressed.pdf)
- Cordero, R. G. (2024). *¿Cuáles son los principales tipos de paneles fotovoltaicos que existen?*. SUNFIELDS  
<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-de-placas-solares/>

Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Alonso-García, M. del C., Muñoz-Cruzado-Alba, J., & Ballestín-Fuertes, J. (2020). Termografía infrarroja para la detección y caracterización de defectos fotovoltaicos: Comparación entre condiciones de iluminación y oscuridad. *Sensores (Basilea, Suiza)*, 20(16), 4395.

<https://doi.org/10.3390/s20164395>

González-Sánchez, T., Cerdán-Pasarán, A., & Rose-Mathews, N. (2023) Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica.

[https://riiit.com.mx/apps/site/files\\_v2450/celdas\\_solares\\_mor.3\\_riiit\\_div\\_no\\_v-dic\\_2023.pdf](https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/celdas_solares_mor.3_riiit_div_no_v-dic_2023.pdf)

Hidronor. (2024, Marzo 7). *Aportamos a la sostenibilidad ambiental con nuevo servicio de reciclaje de paneles fotovoltaicos*. Hidronor.

<https://www.hidronor.cl/aportamos-a-la-sostenibilidad-ambiental-con-nuevo-servicio-de-reciclaje-de-paneles-fotovoltaicos/>

International Electrotechnical Commission (IEC). (2005). Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules—design qualification and type approval. International Standard IEC, 61215(04).

International Energy Agency (IEA). (2021). Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027 (pp. 10-17).

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf>

Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12-29.

<https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>

Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancini, L. (2016). Análisis del ciclo de vida de un innovador proceso de reciclaje de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino. *Materiales de energía solar y células solares: una*

*revista internacional dedicada a la conversión de energía solar fotovoltaica, fototérmica y fotoquímica*, 156, 101–111.

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>

Ministerio de Energía. (2015). *Energía 2050: Política Energética de Chile: Construyendo el Futuro Energético de Chile* (pp. 14-75).

[https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/energia\\_2050\\_-\\_politica\\_energetica\\_de\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf)

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2020, junio 16). *Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil* (Informe 1).

<https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/1-Informe-1.pdf>

Ibrahim, O., Yahaya, N. Z., Saad, N., & Umar, M. W. (2015). Modelo de Matlab/Simulink de un panel solar fotovoltaico con MPPT de perturbación y observación para maximizar la eficiencia del conjunto fotovoltaico. *Conferencia IEEE 2015 sobre Conversión de Energía (CENCON)*.

<http://dx.doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409549>

Insa, J. (27 de febrero de 2018). *8 fallos críticos de placas solares*. Monosolar.

<https://www.monsolar.com/blog/placas-solares-baratas-8-fallos-criticos/>

Naturgy. (26 de junio de 2024). *Reciclaje Placas Solares - Cómo funciona*. Naturgy.

[https://www.naturgy.es/hogar/blog/reciclaje\\_placas\\_solares\\_-\\_como\\_funciona](https://www.naturgy.es/hogar/blog/reciclaje_placas_solares_-_como_funciona)

National Conference of State Legislatures (NCSL). (2018, 30 de septiembre). Kit de herramientas de paneles solares: reciclaje y desmantelamiento de paneles. Conferencia Nacional de Legislaturas Estatales.

<https://www.ncsl.org/research/energy/solar-policy-toolbox.aspx>

Ramos-Sánchez, D., Baylon, J. S., Tintos-Gómez, A., & Díaz-Gómez, J. A. (2022). Detección de fallas en paneles fotovoltaicos de una granja solar. *Difu100ci@*, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías, 16(3), 154-162.

Recobatt. (2022). *GESTIÓN Y RECICLAJE DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS*. Recobatt.  
<https://www.recobatt.cl/#servicios>

Rodríguez Valencia, S. A. (2022). Caracterización nanomecánica, morfológica y estructural de películas semiconductoras orgánicas base uranilo (VI) (Tesis de maestría). Tecnológico de Monterrey.  
<https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/650932/Tesis%20Sergio%20Arturo%20Rodr%C3%ADguez%20Valencia.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

Salamanca, J. (2024, enero 3). [Entrevista realizada por L. Pizarro]. Reporte Sostenible.  
<https://reportesostenible.cl/edicion-especial-economia-circular-ene-2024/>

Sánchez Arroyo, P. (2021). Inspección de paneles solares en plantas fotovoltaicas mediante curvas corriente-voltaje (IV).  
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/51654/TFG-I-2125.pdf?sequence=1>

Sandoval-Ruiz, C. E. (2020). Arreglos Fotovoltaicos Inteligentes con Modelo LFSR-Reconfigurable. *Revista Ingeniería*, 30(2), 32–61.  
<https://doi.org/10.15517/ri.v30i2.39484>

SunSolar. (2023, 15 de julio). *Diferentes tipos de paneles solares: cuál debes elegir*. SunSolar.  
<https://sunsolarcompany.com/different-types-of-solar-panels/>

Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. A. (2016). *End of life management: solar photovoltaic panels* (No. NREL/TP-6A20-73852; T12-06: 2016). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States).

<https://www.osti.gov/servlets/purl/1561525>

Wüllner, C. (2023, agosto 31). Reciclaje de paneles solares en Chile. *Potencia de enfriamiento*. Cool Power.

<https://www.coolpower.cl/post/reciclaje-de-paneles-solares-chile>