

ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE RECUPERACIÓN DE MÓDULOS SOLARES FV DAÑADOS EN PARQUES SOLARES

Jeremías Rojo ¹
Alejandro Speroni²

¹Ingeniero Civil, docente investigador Universidad Siglo 21, Córdoba, Argentina.
rojojeremias@gmail.com

²Licenciado en Ambiente y Energías Renovables, investigador Universidad Siglo 21, Córdoba, Argentina.
alejandrosperoni1994@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33871/26747170.2023.5.3.8197>

RESUMEN: El presente análisis tiene como objetivo describir la metodología utilizada para evaluar la reutilización de módulos solares fotovoltaicos dañados durante la fase de construcción de un parque solar. En esta etapa los módulos solares pueden presentar diversos daños físicos (rotura de vidrio superior, marcos, cables, conectores, etc.) o daños eléctricos internos (puntos calientes, celdas dañadas, corto circuito, entre otros). Generalmente estos módulos son descartados debido a que los niveles de exigencia respecto a la generación de energía son muy elevados, siendo inviable su utilización y fomentando el recambio de los mismos. En la mayoría de las construcciones de parques solares antes de comenzar con el montaje de los módulos se realizan ensayos de electroluminiscencia, en donde se descartan los módulos que cuentan con celdas dañadas. Luego, una vez instalados los módulos aprobados se realiza un trazado de curvas I-V, y en caso de que alguno de los módulos presente algún tipo de falla, también es descartado. Este tipo de práctica de control de calidad en la mayoría de los casos genera que una parte importante de módulos queden separados o fuera de uso. Sumado a esto, también se contabilizan los dispositivos que son dañados físicamente durante el montaje en sus respectivas estructuras de soporte, ya sea por errores en la manipulación o por efecto de algún evento climático/meteorológico (rafagas de viento de alta velocidad durante el momento del montaje o posibles tormentas).

Palabras clave: Energía renovable. Energía solar. Reutilización. Energía solar fotovoltaica. Vida útil.

ANÁLISE DA METODOLOGIA PARA A RECUPERAÇÃO DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS DANIFICADOS EM PLANTAS SOLARES

RESUMO: Esta análise tem como objetivo descrever a metodologia utilizada para avaliar a reutilização de módulos solares fotovoltaicos danificados durante a fase de construção de um parque solar. Nessa fase, os módulos solares podem apresentar diversos danos físicos (vidros superiores quebrados, molduras, cabos, conectores etc.) ou danos elétricos internos (pontos quentes, células danificadas, curtos-circuitos etc.). Em geral, esses

módulos são descartados porque os requisitos de geração de energia são muito altos, inviabilizando seu uso e incentivando sua substituição. Na maioria das construções de parques solares, antes de iniciar a montagem dos módulos, são realizados testes de eletroluminescência, nos quais os módulos com células danificadas são descartados. Depois que os módulos aprovados são instalados, as curvas IV são traçadas e, se algum dos módulos apresentar alguma falha, ele também é descartado. Esse tipo de prática de controle de qualidade, na maioria dos casos, resulta em um número significativo de módulos separados ou fora de uso. Além disso, também são contabilizados os dispositivos fisicamente danificados durante a montagem em suas respectivas estruturas de suporte, seja devido a erros de manuseio ou ao efeito de um evento climático/meteorológico (rajadas de vento de alta velocidade durante a montagem ou possíveis tempestades).

Palavras chaves: Energia renovável. Energia solar. Reutilização. Energia solar fotovoltaica. Vida útil

ANALYSIS OF METHODOLOGY FOR THE RECUPERATION OF SOLAR FV MODULES DAMAGED IN SOLAR POWER PLANTS

ABSTRACT: The purpose of this analysis is to describe the methodology used to evaluate the reuse of damaged solar photovoltaic modules during the construction phase of a solar farm. At this stage, solar modules may present various physical damages (broken upper glass, frames, cables, connectors, etc.) or internal electrical damages (hot spots, damaged cells, short circuit, among others). Generally, these modules are discarded because the energy generation requirements are very high, making their use unfeasible and encouraging their replacement. In most solar park constructions, before starting the assembly of the modules, electroluminescence tests are carried out, where the modules with damaged cells are discarded. Then, once the approved modules have been installed, an I-V curve is plotted, and if any of the modules show any type of failure, they are also discarded. In most cases, this type of quality control practice results in a significant number of modules being separated or out of use. In addition to this, the devices that are physically damaged during assembly in their respective support structures are also accounted for, either due to handling errors or due to the effect of some climatic/meteorological event (high speed wind gusts during assembly or possible storms).

Keywords: Renewable energy. Solar energy. Reuse. Photovoltaic solar energy. Useful life

INTRODUCCIÓN

Según la AIE (Agencia Internacional de Energía), en 2040, las energías renovables representarán alrededor del 47% del mercado de la electricidad frente al 29% actual. Dentro de ellas, en 2020 la energía solar fotovoltaica atrajo por sí sola el 43% del total de las inversiones mundiales.

En el caso de la Argentina la cantidad de energía total generada por los parques solares pasó de 1.8GWh en 2011 a 2928.2GWh en 2023, por lo que significa un gran aumento de proyectos solares que se

encuentran en operación en el país.

Este aumento significativo del uso de la energía solar fotovoltaica como fuente de generación de energía del sistema energético, trae aparejado un recambio de paneles solares fotovoltaicos (PSFV), tanto en la construcción de los proyectos como en la operación. Si bien las energías renovables son una forma de generar energía con un menor impacto ambiental, actualmente no existe una solución precisa sobre qué hacer con los módulos solares descartados por las empresas desarrolladoras de parques solares o instalaciones solares de baja potencia.

De acuerdo con Gonzalez Cano et al. (2020) en su Estudio económico de la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas, refiere que la reutilización de paneles es una forma de dar una segunda vida a los paneles desechados y de conseguir ventajas económicas en las instalaciones fotovoltaicas (en comparación con la instalación de paneles nuevos), como la reducción de la inversión y la obtención de beneficios.

Estudios realizados por la Universidad de Chile (Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos) mencionan que pese a que el uso de estas energías renovables tiene el fin de generar menos desechos y emisiones, estas no están libres de la generación de desechos, siendo una de las problemáticas tanto a nivel nacional como mundial, el manejo de los desechos que producen las plantas solares una vez que han alcanzado su vida útil de aproximadamente 30 años. En particular, los paneles solares fotovoltaicos poseen una obsolescencia de no más de 15 años en la práctica, y hasta el momento no existen en Chile plantas tan longevas. Pero se pronostica que en un par de años más, este sea un problema para la industria, pues para consolidarse definitivamente como una alternativa de largo plazo, esta tecnología debe ser sustentable.

Ranero Mata Ana (2021) en su artículo Estudio de viabilidad de un sello de calidad para paneles fotovoltaicos de segundo uso, menciona que las energías renovables nos permiten obtener energía de recursos limpios e inagotables, y su funcionamiento no afecta negativamente al medioambiente. No obstante, el desecho de estos materiales si tiene un gran impacto, las estadísticas muestran que la reserva mundial de módulos fotovoltaicos al final de su vida útil que deben procesarse alcanzará de 1,7 a 8 millones de toneladas en 2030 y de 60 a 78 millones de toneladas en 2050.

A continuación se pretende resolver un problema ambiental, social y económico que afecta a las empresas desarrollistas de parques solares actuales, debido a que los módulos fotovoltaicos dañados durante las fases de construcción, operación y mantenimiento no tienen un destino final ambientalmente correcto. En la mayoría de los casos estos dispositivos se encuentran en almacenes sin poder ser utilizados y sin finalidad alguna. Por lo tanto, se espera extender la vida útil de los módulos dañados y generar energía eléctrica renovable a partir de un elemento que no está cumpliendo con su función principal.

El objetivo primario del proyecto, consiste en “rectificar” los dispositivos desestimados para ser utilizados en otro tipo de instalaciones, con menos exigencias, sin elevados niveles de generación de potencia y energía eléctrica (instalaciones aisladas, bebederos, cargadores de celular, etc).

Se intenta así, dar respuesta al problema evaluando la reutilización de los dispositivos y aplicando un proceso de reconstitución que permita a los mismos ser reutilizados en instalaciones con menores niveles de exigencia en cuanto a generación eléctrica se refiere. En el documento se exponen los resultados de ensayos realizados a módulos dañados durante el proceso de construcción de un parque solar, y que fueron sometidos a un tratamiento físico permitiendo su reutilización, creando una solución circular mediante la reutilización de los dispositivos mencionados, que por cuestiones de exigencias de calidad son desechados antes de cumplir su vida útil y que no cuentan con un destino final amigable con el ambiente.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se trata de un estudio descriptivo transversal, mediante un relevamiento y registro general de paneles dañados de un parque solar de la República Argentina de 30 MW de potencia pico, se confeccionó una clasificación general de tipo y causas de sus daños.

En primer lugar, se tomó una muestra de los módulos desechados, otorgados por una empresa desarrolladora de parques solares.

En base a criterios de inclusión y exclusión debidamente registrados, se realizan ensayos eléctricos (Ensayos de curvas I-V), para determinar la potencia máxima y la curva de rendimiento de paneles dañados. Luego se aplicó el tratamiento experimental con productos sintéticos y se realizaron

nuevamente los ensayos para un análisis comparativo.

Los valores de energía generada por los módulos fueron obtenidos del software específico del inversor utilizado (Plug and Play o PnP) para el análisis y procesamiento de datos, comparaciones de rendimiento con PSFV sin desperfectos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revelación de los principales hallazgos que se obtuvieron en la investigación muestran los siguientes resultados para su posterior análisis:

1.1.1 Acondicionamiento de los módulos FV

Antes de comenzar con el tratamiento físico de recuperación a los dispositivos seleccionados se les retiró la tierra y suciedad usando medios físicos (aire comprimido y franelas), como también químicos, empleando una solución concentrada agua - detergente al 0.56% (V/V) y secándolos posteriormente con una franela absorbente. Procurando no generar mayores daños sobre los módulos se evitó el uso excesivo de agua. Para finalizar el proceso de limpieza se utilizó producto limpia cristal eliminando cualquier película de grasa o micro polvo que pudiera haber quedado en etapas anteriores, garantizando óptimos resultados en el trazado de curvas I-V, y una buena adherencia de la pintura que se aplicó posteriormente a los módulos. El proceso de limpieza no requirió de enjuagues, ya que no dejó rastros, secándose rápidamente a temperatura ambiente. Previo al inicio del proceso físico de recuperación se identificó a cada módulo con una numeración binaria, acompañada del n° de serie del dispositivo e identificando el tipo de pintura que se le aplicaría tal como se detalla en la **tabla 1**.

Tabla 1: identificación del tipo de pintura aplicada a cada módulo.

Tipo de pintura	Identificación del módulo	
CB 3020 (Acrílica)	75 (PAg68420D01C19)	
PO 555 (Poliuretánica)	74 (PAg12010D02A19)	76 (PAg45400D01C19)
IP 335 (Epóxica)	73 (PAg39891M02A19)	

1.1.2 Primer trazado de curvas I-V:

Una vez limpios los módulos, y antes de recibir la capa de pintura protectora se hizo el trazado de curvas I-V con un equipo marca HT, modelo I-V 500W, con el objetivo de hacer futuras comparaciones entre los valores de potencia arrojados por los módulos antes y después de ser pintados. Las mediciones preliminares de este primer trazado se realizaron a las 13:00 hs, contando con óptimas condiciones meteorológicas y un nivel de irradiancia mayor a 800 W/m². Los primeros resultados de curvas I-V arrojaron que los módulos con fallas físicas contaban con una pérdida de potencia eléctrica de entre -40% a -60% respecto a los valores (STC) definidos por el fabricante del módulo. Los resultados obtenidos se detallan en las **tablas 2, 3 y 4**. En la **tabla 2** se presentan los parámetros característicos de los módulos solares FV extrapolados a condiciones nominales de operación (1000W/m² y 25°C), de esta manera es posible comparar la potencia máxima entregada por cada módulo vs. la potencia máxima teórica indicada por el fabricante como se indica en la columna $\Delta P_{max}[\%]$. En este punto la potencia de los cuatro módulos medidos durante esta fase varía de -60.69% a -43.40%, dependiendo dicha variación y en mayor medida del tipo y gravedad de las fallas presentadas. En la **tabla 3** se visualizan los parámetros característicos de los módulos FV en condiciones estándar (STC) y definidas por el fabricante en cada data sheet. Por último, en la **tabla 4** se presentan los parámetros bajo condiciones de operación (OPC), es decir niveles de irradiancia y temperatura al momento en que se realizó la medición.

Tabla 2: resultados del trazado de curvas I-V con extrapolación a condiciones estándar (STC).

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Imp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m ²]	FF [%]	ΔPmax [%]
73 STC	172.98	43.82	36.44	4.75	6.3	1000	63	-47.50
74 STC	186.48	44.88	35.69	5.23	8.43	1000	49	-43.40
75 STC	177.69	42.84	33.93	5.24	7.16	1000	58	-46.07
76 STC	129.53	43.35	36.12	3.59	5.62	1000	53	-60.69

Tabla 3: parámetros nominales (STC) para un módulo JETION 330Wp.

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Imp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m ²]	FF [%]
Nominal (STC)	330	45.70	37.30	8.89	9.35	1000	78

Tabla 4: resultado del trazado de curvas I-V en condiciones de operación (OPC).

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Imp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m ²]	FF [%]
73 OPC	156.63	43.87	36.75	4.26	5.71	898	62
74 OPC	156.85	44.70	36.04	4.35	7.22	833	49
75 OPC	156.11	42.80	34.28	4.55	6.35	870	57
76 OPC	111.10	43.31	36.34	3.06	4.98	853	51

1.1.3 Preparación de pinturas y cristales testigo:

Durante esta etapa se prepararon las distintas pinturas que se aplicaron a la superficie del vidrio superior de los módulos solares seleccionados. Se trabajó con tres tipos de pinturas químicamente diferentes para estudiar su comportamiento, buscando la impermeabilización y protección de los módulos bajo efectos de la intemperie y permitiendo una buena absorción lumínica en el espectro de luz visible. Las pinturas utilizadas fueron: poliuretánica transparente con catalizador (código: PO 555), epóxica transparente con catalizador (código: IP 335) y acrílica semi transparente (código: CB 3020). Con la ayuda de un sensor de irradiancia y con el objeto de medir la pérdida de irradiancia que generaría el uso de las pinturas sobre la superficie de los módulos, primero se seleccionaron cuatro cristales testigo de iguales dimensiones (25 x 25 cm) y características fisicoquímicas, y se preparó 1 cristal sin pintar y 3 cristales pintados (con una pintura diferente cada uno). Acto seguido, se posicionó el cristal no pintado sobre el sensor de irradiancia comparando el resultado de irradiancia obtenido vs. los resultados obtenidos al colocar sobre el sensor de irradiancia los demás cristales, incluyendo la medición de irradiancia sin posicionar ningún cristal sobre el sensor. En la **tabla 5** se muestran los resultados finales y se concluye que, si bien todos los cristales testigo disminuyen los valores de irradiancia (inclusive el cristal testigo sin pintar), los cristales pintados con pinturas (IP 3020) y (PO 555) no presentaron pérdidas en la absorción de luz vs. el cristal sin pintar, por lo tanto en este caso se observó que la pintura no afecta a los valores de irradiancia.

Tabla 5: valores de irradiancia medidos en cristales testigo pintados y no pintados.

Tipo de pintura	Cristal sin pintar [W/m ²]	Cristal pintado [W/m ²]	Sin cristal [W/m ²]
IP 3020 (Epóxica)	600	600	700
CB 3020 (Acrílica)	600	530	700
PO 555 (Poliuretánica)	640	640	740

1.1.4 Pintado y secado de los módulos solares fotovoltaicos:

En primer lugar y antes de comenzar, los módulos se apoyaron en una base fija manteniéndose en una posición horizontal a 0°. La metodología de pintado fue relativamente sencilla y consistió en verter pequeñas porciones de pintura en la cara frontal (vidrio superior) de los dispositivos, que luego eran esparcidas con la ayuda de espátulas de plástico buscando generar fuerzas de sobrepresión sobre las fisuras del panel y obteniendo una mayor adherencia del producto. Cabe aclarar que para esta ocasión todo el proceso se realizó en una sola capa de pintura. Una vez tratado cada módulo con su respectiva pintura, los mismos fueron llevados a la cámara de secado, que consistió en un contenedor limpio y seco a temperatura ambiente, y donde no existían corrientes de viento que podían llegar a contaminar la pintura fresca. En ese lugar los módulos se mantuvieron durante aproximadamente 15 horas mientras se curaban.

1.1.5 Segundo trazado bajo curvas I-V final:

Una vez secos los módulos, se realizó un nuevo trazado de curvas I-V con el fin de conocer de que manera la aplicación de las diferentes pinturas utilizadas en los módulos modificaba la capacidad de generación eléctrica. Para ello se analizaron las curvas I-V de los cuatro módulos estudiados y se determinó la potencia entregada por cada uno. Los valores obtenidos se observan en la **tabla 6**, y en la **figura 1** se detalla el trazado correspondiente al módulo n° 76 (PAg45400D01C19) luego de realizarse el tratamiento.

Tabla 6: resultados del trazado curvas I-V post-tratamiento.

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Impp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m ²]	FF [%]	ΔPmax [%]
73 STC	176.63	45.58	39.06	4.52	6.25	1000	62	-46.39
74 STC	177.60	45.61	37.69	4.71	7.78	1000	50	-46.10
75 STC	180.94	41.85	33.91	5.34	7.05	1000	61	-45.08
76 STC	152.96	44.80	37.75	4.05	5.79	1000	59	-53.57

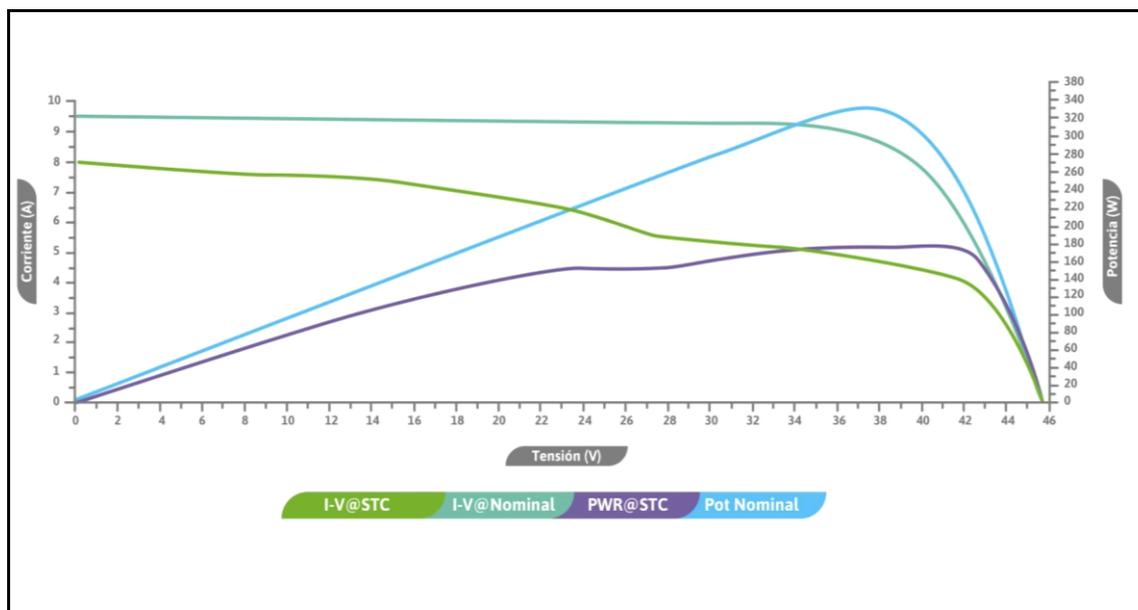


Figura 1: trazado de curvas I-V finalizado el tratamiento del módulo n° 76 (PAg45400D01C19).

CONCLUSIÓN

Las pruebas demostraron que tanto la pintura epoxi como la poliuretánica no limitan los niveles de irradiancia como sí sucede con la pintura de tipo acrílica, y que durante las mediciones presentó una disminución en los niveles de irradiancia sobre el cristal testigo. Con respecto a los resultados obtenidos en las mediciones de curvas I-V, y comparando los valores obtenidos antes y después de tratar los módulos, se concluye que las diferencias de ΔP_{max} (variación de potencia máxima) en las mediciones no presentaron grandes modificaciones. Salvo en el caso del módulo n° 76 que pasó de tener una variación de potencia máxima de -60.69% a -53.57%. Es importante mencionar que el instrumento trazador de curvas I-V lo que hace es comparar la potencia máxima medida en (OPC) vs. la potencia máxima que indica el fabricante (STC). Si bien en todos los módulos medidos la caída de potencia nominal (STC) es mayor al 40%, también hay que destacar que en mediciones realizadas a módulos sin ningún daño se detectó una pérdida de potencia de alrededor del 13%, y que se debe considerar dentro de la caída total de potencia ΔP_{max} . Teniendo en cuenta los valores obtenidos se concluye que tanto la pintura del tipo epoxi como la poliuretánica pueden aplicarse en los módulos con vidrio superior dañado, ya que no afecta de ninguna manera los valores de irradiancia, y como consecuencia los de potencia eléctrica. A su vez el tratamiento con este tipo de pinturas permite generar una capa impermeable que sella de forma definitiva las roturas y fisuras del vidrio superior, permitiendo que los módulos fotovoltaicos puedan ser reutilizados en instalaciones que requieran menores valores de potencia, por ejemplo: instalaciones de baja potencia y de esta forma contribuir a la economía circular, resolver un problema ambiental de las empresas desarrolladoras de parques solares.

REFERENCIAS

Carneiro, Fabiana P. Diagnóstico e Ações da Atual Situação dos Resíduos de Construção e Demolição na Cidade do Recife. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Brasil, 2005.

Da Cunha Lima Viana, K. Metodología simplificada de gerenciamento de residuos sólidos em canteiro de obras. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Brasil, 2009.

González Cano, M; Moretón, A. (2020).” Estudio económico de la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas”. XVII Congreso Ibérico y XIII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. España.

Jeongeun Shin, Jongsung Park, and Nochang Park. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. Solar Energy Materials and Solar Cells, 162:1–6, 2017.

Jiawei Fan. Life cycle assessment and life cycle cost of photovoltaic panels on Lake Street Parking Garage. PhD thesis, Colorado State University. Libraries, 2014.

Joshua Kneifel, David Webb, And Eric O'rear. Energy and economic implications of solar photovoltaic performance degradation. Technical report, 2016.
Lund, Herbert F. Manual McGraw-Hill de Reciclaje. España: Interamericana de España, S.A., 1996.

Medeiros Souza, Paula. . Gestao de residuos da Construcao civil em canteiros de obras de edificios multipiso na cidade do Recife./ PE. Dissertacao (Mestrado) – Universidade Federal da Paraiba. João Pessoa, Brasil, 2009.

Reguera Gil, Francisco Jesús. (2015). “Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos”. Edición electrónica. 978-84-7993-682-2. Editorial. Universidad Internacional de Andalucía.

Romero Campos. Juan Pablo (2019). “Análisis ciclo de vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos”. Santiago de Chile

Submetido em: 08/2023

Aprovado em: 09/2023