



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

ANÁLISIS ECONOMICO DEL RECICLAJE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EN SINALOA

ECONOMIC ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC MODULE RECYCLING IN SINALOA

Geraldine Torrónategui Chávez

Investigación, Tecnológico Nacional de México

Rasikh Tariq

Tecnológico de Monterrey, México

Emigdio Alberto Burgueño Rendón

Investigación, Tecnológico Nacional de México

Nohemi Hidalgo Beltrán

Tecnológico de Monterrey, México

Yaneth A. Bustos Terrones

Tecnológico Nacional de México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21448

Análisis Económico del Reciclaje de Módulos Fotovoltaicos en Sinaloa

Geraldine Torrónategui Chávez ¹

geraldyne.tc@culiacan.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0008-2202-8334>

División de Estudios de Posgrado e
Investigación, Tecnológico Nacional de
México

Rasikh Tariq

rasikhtariq@tec.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3310-432X>

Instituto para el Futuro de la Educación,
Tecnológico de Monterrey, Monterrey, NL,
México

Emigdio Alberto Burgueño Rendón

Emigdio.br@culiacan.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8664-3282>

División de Estudios de Posgrado e
Investigación, Tecnológico Nacional de
México/Culiacán

Nohemi Hidalgo Beltrán

Nohemi.hb@culiacan.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0002-4551-5828>

Departamento de Financieros
Tecnológico Nacional de México

Yaneth A. Bustos Terrones

yaneth.bt@culiacan.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6445-2071>

División de Estudios de Posgrado e
Investigación, SECIHTI
Tecnológico Nacional de México

RESUMEN

La energía solar fotovoltaica (FV) en México, especialmente en Sinaloa, ha crecido de manera sostenida, impulsando empleo y desarrollo económico. Este estudio evalúa el impacto económico del reciclaje de módulos FV al final de su vida útil mediante el costo nivelado de la energía (LCOE), considerando todos los costos del ciclo de vida y escenarios con disposición en vertedero y con reciclaje. Los resultados muestran que el reciclaje puede reducir el LCOE de 1.6057 MXN/kWh a 1.5810 MXN/kWh si se implementan incentivos económicos mínimos, mientras que un subsidio del 15 % mejora la rentabilidad. La mayor parte de los costos del reciclaje se concentra en procesamiento (78.44 %) y transporte (21.39 %), y la recuperación de materiales críticos como silicio y plata aporta un beneficio económico significativo. En Sinaloa, los sistemas pequeños y medianos permiten desarrollar estrategias de reciclaje que fomenten la economía circular y el valor económico, mientras que la colaboración con universidades fortalece el capital humano y modelos de negocio sostenibles. Este estudio proporciona una base para políticas públicas e incentivos económicos que optimicen la gestión financiera y promuevan la sostenibilidad del reciclaje de módulos FV

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, costo nivelado de la energía (LCOE), análisis económico, economía circular

¹ Autor principal

Correspondencia: geraldyne.tc@culiacan.tecnm.mx

Economic Analysis of Photovoltaic Module Recycling in Sinaloa

ABSTRACT

Solar photovoltaic (PV) energy in Mexico, especially in Sinaloa, has experienced sustained growth, driving employment and economic development. This study evaluates the economic impact of recycling PV modules at the end of their useful life using the levelized cost of energy (LCOE), considering all lifecycle costs and scenarios with landfill disposal and recycling. The results show that recycling can reduce the LCOE from 1.6057 MXN/kWh to 1.5810 MXN/kWh with minimal economic incentives, while a 15% subsidy improves profitability. Most recycling costs are concentrated in processing (78.44%) and transportation (21.39%), and the recovery of critical materials such as silicon and silver provides a significant economic benefit. In Sinaloa, small and medium-sized systems allow for the development of recycling strategies that promote the circular economy and economic value, while collaboration with universities strengthens human capital and sustainable business models. This study provides a basis for public policies and economic incentives that optimize financial management and promote the sustainability of PV module recycling

Keywords: solar photovoltaic energy, levelized cost of energy (LCOE), economic analysis, circular economy

Artículo recibido 14 octubre 2025

Aceptado para publicación: 28 noviembre 2025



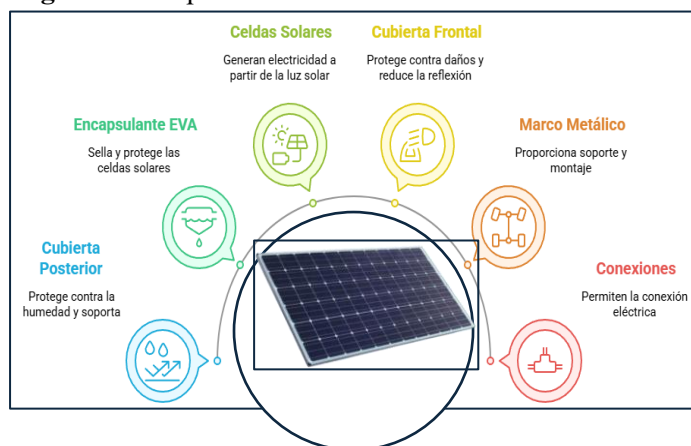
INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha consolidado como una de las alternativas más eficientes para la transición hacia fuentes de energía renovables y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En México, la capacidad instalada de energía solar FV aumentó en 530 MW durante 2022, representando el 20.83 % de la capacidad total de generación eléctrica del país (SENER, 2024). Este crecimiento ha impulsado la creación de empleos en el sector de energías renovables, destacando la demanda de especialistas en sistemas FV y profesionales en sostenibilidad, considerados entre los perfiles laborales de más rápido crecimiento (World Economic Forum, 2023). El desarrollo económico sostenible en este sector requiere no solo producir energía, sino también gestionar de manera eficiente los residuos que generarán los módulos FV al finalizar su vida útil, estimada en 25 a 30 años (Ahmad et al., 2023; Oteng et al., 2023). Desde la perspectiva económica, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite evaluar el costo nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés) incorporando los costos y beneficios asociados al reciclaje de los módulos FV (ISO, 2006; Dextre, 2020; Mao et al., 2024). Esta evaluación facilita la identificación de oportunidades de inversión, fomenta modelos de negocio sostenibles, impulsa la creación de empleo, fortalece la industria local y maximiza el aprovechamiento económico de materiales reciclables como silicio, aluminio, vidrio, cobre y plata (Hernández-López et al., 2022) presentes en los componentes de fabricación del módulo (**Figura 1**). En Sinaloa, donde la capacidad instalada de energía FV alcanza aproximadamente 130 MW gracias a la alta disponibilidad de recurso solar (CRE, 2024), el análisis económico del reciclaje de módulos FV resulta especialmente relevante. Este enfoque permite potenciar la industria energética regional, generar incentivos para prácticas empresariales responsables y garantizar la sostenibilidad económica en el sector. El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto económico de los módulos fotovoltaicos con y sin reciclaje en Sinaloa mediante el indicador de costo nivelado de la energía.

Esta evaluación permitirá determinar la factibilidad económica del reciclaje de módulos FV, identificar oportunidades de inversión y orientar estrategias que promuevan la adopción de prácticas sostenibles en la industria solar regional.



Figura 1. componentes de un módulo fv



Evaluación económica

La evaluación económica de los módulos FV ha sido ampliamente estudiada mediante metodologías como el Costo de Ciclo de Vida (LCC), el Análisis de Costo-Beneficio (CBA), el Análisis de Flujo de Efectivo Descontado (DCF) y el LCOE. En el caso del reciclaje de paneles solares, los costos de desmantelamiento, transporte y procesamiento, junto con el valor de materiales recuperables como silicio y cobre, son factores clave para determinar su viabilidad. Además, incentivos económicos como subsidios y políticas de responsabilidad extendida del productor son fundamentales para mejorar la rentabilidad de estas iniciativas (**Figura 2**).

Estudios recientes como los de Li et al. (2023) y Mahmoudi et al. (2020) han señalado que los tratamientos de reciclaje térmico son más rentables y sostenibles que los mecánicos y químicos, aunque los altos costos tecnológicos siguen siendo un desafío. Investigaciones como las de Liu et al. (2020) y Zhang et al. (2022) destacan la necesidad de subsidios gubernamentales, con esquemas escalonados que fomenten la sostenibilidad económica a largo plazo. Asimismo, integrar el reciclaje en el ciclo de vida de los módulos, como propone Hernández-López et al. (2022), puede reducir el LCOE, justificando la adopción de estrategias de gestión sostenible. Estos hallazgos subrayan la necesidad de optimizar costos, desarrollar infraestructura especializada y aplicar políticas de incentivo para superar los desafíos económicos y promover una economía circular en la industria FV.

Figura 2



METODOLOGIA

Evaluación de impacto económico

La evaluación de impacto económico se llevó a cabo a partir del indicador LCOE (**Ec.1**) que se evalúa al considerar el costo de ciclo de vida (CV) a lo largo de la vida del sistema y se obtiene de la razón del costo total descontado entre la generación total de energía descontada (Kabeyi & Olanrewaju, 2023).

$$\text{Costo nivelado de la energía (LCOE)} = \frac{\text{Costo total descontado}}{\text{Generación total de energía descontada}} \quad (1)$$

Donde costo total descontado representa el costo de CV (Factor de descuento) y la generación total de energía descontada representa la generación total de energía (Factor de descuento).

El factor de descuento es un término financiero utilizado para calcular el valor presente de una cantidad de dinero que se recibirá en el futuro (**Ec. 2**) y es calculado a partir de la tasa de descuento real (**Ec. 3**) la cual considera la tasa de descuento nominal y la inflación del país.

$$\text{Factor de descuento (FD)} = \frac{1}{(1+d_r)^n} \quad (2)$$

Donde:

d_r = tasa de descuento real

n = años de operación

$$\text{Tasa de descuento real} = \frac{d_n - i}{1 + i} \quad (3)$$

Donde:

d_n = tasa de descuento nominal

i = tasa de inflación

Para el análisis de este proyecto se contempla una tasa de descuento nominal de 10% de acuerdo con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (2022) y una tasa de inflación correspondiente a 4.21% de acuerdo con INEGI (2025).

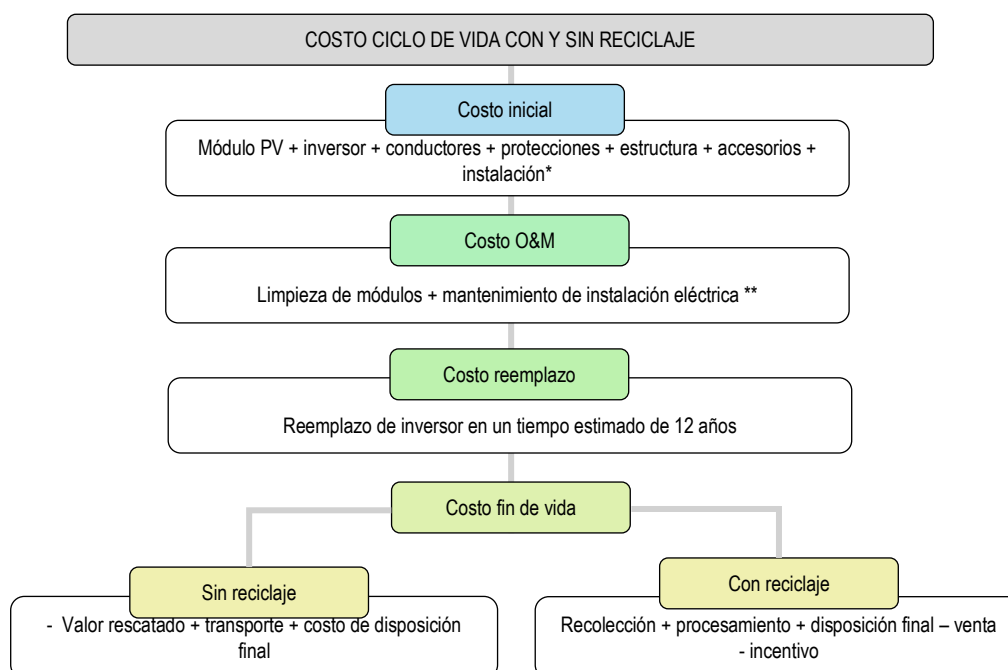
El numerador de la **Ec. 1** convierte el costo de CV en su costo anual. En los casos de CV con y sin reciclaje, el costo de CV corresponde a la suma del costo inicial (CI), costo de operación y mantenimiento (CO&M), costo reemplazo (CR) y costo fin de vida (CFV) (**Ec. 4**) (Hernández-López et al., 2022). Donde, los costos negativos corresponden a egresos (gastos) y los costos positivos a ingresos (recuperaciones o beneficios económicos).

$$\text{Costo de ciclo de vida} = -CI - CO\&M - CR \pm CFV \quad (4)$$

Costos individuales del ciclo de vida

A continuación, se detallan los costos individuales involucrados a lo largo del CV del sistema considerando un sistema de 1kWp con y sin reciclaje al final de su vida útil (**Figura 3**).

Figura 3. Costos individuales del ciclo de vida de módulos FV.



*Sin considerar costos de uso de terreno y la instalación ya cuenta con los trámites de gobierno.

**Sin eventos extraordinarios (golpes, accidentes o daños por fenómenos naturales) y usando productos de limpieza que no afectan el rendimiento de los módulos fotovoltaicos.

Costo inicial

El costo inicial del sistema involucra los conceptos de módulo fotovoltaico, inversor, conductores, protecciones sobrecorriente, estructura, accesorios, costo de instalación y transporte.

a) Costo Operación y Mantenimiento

El costo de mantenimiento del sistema fotovoltaico se da acorde a la capacidad instalada. De acuerdo con la realidad de Sinaloa, se estima un costo de \$60 por módulo fotovoltaico para sistemas de hasta 10 kWp al mes.

b) Costo reemplazo

A lo largo del CV del sistema fotovoltaico se estima un reemplazo de inversor al pasar de 12 a 15 años, que corresponde al periodo de garantía de la mayoría de los inversores actualmente presentes en el mercado (García et al., 2019).

c) Costo fin de vida

El costo de fin de vida se da en función de la ejecución o no ejecución de reciclaje. Para el costo de fin de vida sin reciclaje se consideran los conceptos de valor rescatado, transporte y costo de disposición final, mientras que para el CV con reciclaje se consideran los conceptos de costo de recolección, costo de procesamiento, costo de disposición final, venta de materiales e incentivo de reciclaje (Hernández, 2022).

En la **Figura 4** se describen cada uno de los costos individuales analizados para el estudio. El costo inicial fue calculado a partir de cotizaciones de con distribuidores e instaladores locales. El costo de operación y mantenimiento fue basado de acuerdo con información brindada por empresas FV locales. El costo de reemplazo se mantiene igual al del costo inicial (previo a considerar el factor de descuento). Mientras que los costos de fin de vida se basaron en literatura (Hernández-López et al., 2022) además de cotizaciones y precios locales de compra de material recuperado.

Figura 4. Costo de ciclo de vida con y sin reciclaje. Información obtenida de (Hernandez, 2021; Metaloop, 2025; Supraciclaje, 2022; eBay, 2025; Trading economics, 2025) y cotizaciones con distribuidor.

Figura 4. costo de ciclo de vida con y sin reciclaje. información obtenida de (hernandez, 2021; metaloop, 2025; supraciclaje, 2022; ebay, 2025; trading economics, 2025) y cotizaciones con distribuidor.

Estimación de costos individuales (MXN)								
COSTO INICIAL	Módulo PV \$3,145.77	Inversor \$3,164.58	Cables \$300.00	Protección \$400.00	Estructura \$2,425.16	Accesorios \$500.00	Instalación \$10,000.00	TOTAL \$19,935.51
+								
COSTO O&M	Limpieza de módulos y mantenimiento de instalación eléctrica \$1,440.00							TOTAL \$1,440.00
+								
COSTO REEMPLAZO	Reemplazo de inversor en un tiempo estimado de 12 años \$3,164.58							TOTAL \$3,164.58
+								
COSTO FIN DE VIDA VERTEDERO	Valor rescatado -\$22.80	Transporte \$300.00		Costo de disposición final \$100			TOTAL \$377.20	
OR								
COSTO FIN DE VIDA RECICLAJE	Recolección \$300.00	Procesamiento \$1,100.00	Disposición final \$2.34		Venta de materiales	Incentivo -\$2,990.33	TOTAL -\$2,184.71	

RESULTADOS

En las **Tablas 1 y 2** se muestran los resultados del LCOE para los escenarios con disposición en vertedero y reciclaje al final del CV del panel fotovoltaico. Cada tabla incluye, en primer lugar, los datos iniciales del proyecto y, posteriormente, una fila por cada año correspondiente a la vida útil esperada del módulo fotovoltaico.

Las primeras cuatro columnas de cada tabla contienen: (1) el año, (2) la producción anual de energía, (3) el costo anual de operación y mantenimiento, y (4) el costo de reemplazo del inversor. A continuación, se incluye el factor de descuento anual, calculado conforme a lo descrito en la sección de Metodología. Posteriormente, se presentan los valores ajustados por este factor, es decir: la producción de energía descontada, el costo descontado de operación y mantenimiento, el costo descontado del reemplazo del inversor y el costo descontado del fin de vida del sistema. Finalmente, se resumen los costos descontados anuales, así como los costos y la energía acumulados, también en valores descontados.

En el escenario de disposición en vertedero, el costo de fin de vida asciende a \$377.20, lo que resulta en un LCOE de 1.6057 MXN/kWh (**Tabla 1**). En contraste, en el escenario de reciclaje, el costo de fin de vida es negativo, con un valor de -\$2,184.71 MXN, reflejando un LCOE más bajo de 1.5810 MXN/kWh (**Tabla 2**). Esto indica que la implementación de un proceso de reciclaje puede reducir el costo nivelado de la energía.

No obstante, es importante señalar que el costo negativo asociado al reciclaje se debe principalmente al incentivo económico considerado para fomentar dicha práctica. En ausencia de este incentivo, el costo de fin de vida del reciclaje sería de \$705.62 MXN, lo que elevaría el LCOE a 1.6088 MXN/kWh, un valor superior al del escenario con disposición en vertedero. Por lo tanto, para que el LCOE del escenario con reciclaje sea, al menos, igual al del escenario con disposición en vertedero, se requeriría un incentivo mínimo equivalente al 2.15% del costo inicial del sistema.

Tabla 1(a). Información inicial análisis económico CV sin reciclaje

Información Inicial		
Costo inicial del sistema	\$19,935.51	MXN
Producción de energía anual	1,894	kWh
Costo anual de operación y mantenimiento (O&M)	\$1,440.00	MXN
Costo de reemplazo de inversor	\$3,164.58	MXN
Tasa de descuento	0.06	
Costo de fin de vida	\$377.20	MXN

Tabla 1(b). Resultados análisis económico CV sin reciclaje

Final del año	Producción de energía anual (kWh)	Costo anual de O&M (MXN)	Costo de reemplazo de inversor (MXN)	Factor de descuento	Producción de energía descontada (kWh)	Costo descontado de O&M (MXN)	Costo descontado de reemplazo de inversor (MXN)	Costo descontado de fin de vida (MXN)	Costos descontados anuales (MXN)
1	1,894	\$1,440.00	0	0.9434	1786.7925	\$1,358.49	\$0.00	\$0.00	\$20,165.58
2	1,894	\$1,440.00	0	0.8900	1685.6533	\$1,281.59	\$0.00	\$0.00	\$1,281.59
3	1,894	\$1,440.00	0	0.8396	1590.2389	\$1,209.05	\$0.00	\$0.00	\$1,209.05
4	1,894	\$1,440.00	0	0.7921	1500.2254	\$1,140.61	\$0.00	\$0.00	\$1,140.61
5	1,894	\$1,440.00	0	0.7473	1415.3070	\$1,076.05	\$0.00	\$0.00	\$1,076.05
6	1,894	\$1,440.00	0	0.7050	1335.1953	\$1,015.14	\$0.00	\$0.00	\$1,015.14
7	1,894	\$1,440.00	0	0.6651	1259.6182	\$957.68	\$0.00	\$0.00	\$957.68
8	1,894	\$1,440.00	0	0.6274	1188.3190	\$903.47	\$0.00	\$0.00	\$903.47
9	1,894	\$1,440.00	0	0.5919	1121.0557	\$852.33	\$0.00	\$0.00	\$852.33
10	1,894	\$1,440.00	0	0.5584	1057.5997	\$804.09	\$0.00	\$0.00	\$804.09
11	1,894	\$1,440.00	0	0.5268	997.7356	\$758.57	\$0.00	\$0.00	\$758.57
12	1,894	\$1,440.00	\$3,164.58	0.4970	941.2600	\$715.64	\$1,572.70	\$0.00	\$2,288.34
13	1,894	\$1,440.00	0	0.4688	887.9811	\$675.13	\$0.00	\$0.00	\$675.13
14	1,894	\$1,440.00	0	0.4423	837.7180	\$636.91	\$0.00	\$0.00	\$636.91
15	1,894	\$1,440.00	0	0.4173	790.3000	\$600.86	\$0.00	\$0.00	\$600.86
16	1,894	\$1,440.00	0	0.3936	745.5661	\$566.85	\$0.00	\$0.00	\$566.85
17	1,894	\$1,440.00	0	0.3714	703.3642	\$534.76	\$0.00	\$0.00	\$534.76
18	1,894	\$1,440.00	0	0.3503	663.5511	\$504.50	\$0.00	\$0.00	\$504.50
19	1,894	\$1,440.00	0	0.3305	625.9916	\$475.94	\$0.00	\$0.00	\$475.94
20	1,894	\$1,440.00	0	0.3118	590.5582	\$449.00	\$0.00	\$0.00	\$449.00
21	1,894	\$1,440.00	0	0.2942	557.1303	\$423.58	\$0.00	\$0.00	\$423.58
22	1,894	\$1,440.00	0	0.2775	525.5947	\$399.61	\$0.00	\$0.00	\$399.61
23	1,894	\$1,440.00	0	0.2618	495.8440	\$376.99	\$0.00	\$0.00	\$376.99
24	1,894	\$1,440.00	0	0.2470	467.7774	\$355.65	\$0.00	\$0.00	\$355.65
25	1,894	\$1,440.00	0	0.2330	441.2994	\$335.52	\$0.00	\$87.89	\$423.41
Costo nivelado de la energía									

Tabla 2(a). Información inicial análisis económico CV con reciclaje

Información Inicial

Costo inicial del sistema \$19,935.51 MXN

Producción de energía anual 1,894 kWh

Costo anual de operación y \$1,440.00 MXN

mantenimiento (O&M)

Costo de reemplazo de inversor \$3,164.58 MXN

Tasa de descuento 0.06

Costo de fin de vida \$-2,184.71 MXN



Tabla 2(b). Resultados análisis económico CV con reciclaje.

Final del año	Producción de energía anual (kWh)	Costo anual de O&M (MXN)	Costo de reemplazo de inversor (MXN)	Factor de descuento	Producción de energía descontada (kWh)	Costo descontado de O&M (MXN)	Costo descontado de reemplazo de inversor (MXN)	Costo descontado de fin de vida (MXN)	Costos descontados anuales (MXN)
1	1,894	\$1,440.00	0	0.9434	1786.7925	\$1,358.49	\$0.00	\$0.00	\$20,165.58
2	1,894	\$1,440.00	0	0.8900	1685.6533	\$1,281.59	\$0.00	\$0.00	\$1,281.59
3	1,894	\$1,440.00	0	0.8396	1590.2389	\$1,209.05	\$0.00	\$0.00	\$1,209.05
4	1,894	\$1,440.00	0	0.7921	1500.2254	\$1,140.61	\$0.00	\$0.00	\$1,140.61
5	1,894	\$1,440.00	0	0.7473	1415.3070	\$1,076.05	\$0.00	\$0.00	\$1,076.05
6	1,894	\$1,440.00	0	0.7050	1335.1953	\$1,015.14	\$0.00	\$0.00	\$1,015.14
7	1,894	\$1,440.00	0	0.6651	1259.6182	\$957.68	\$0.00	\$0.00	\$957.68
8	1,894	\$1,440.00	0	0.6274	1188.3190	\$903.47	\$0.00	\$0.00	\$903.47
9	1,894	\$1,440.00	0	0.5919	1121.0557	\$852.33	\$0.00	\$0.00	\$852.33
10	1,894	\$1,440.00	0	0.5584	1057.5997	\$804.09	\$0.00	\$0.00	\$804.09
11	1,894	\$1,440.00	0	0.5268	997.7356	\$758.57	\$0.00	\$0.00	\$758.57
12	1,894	\$1,440.00	\$3,164.58	0.4970	941.2600	\$715.64	\$1,572.70	\$0.00	\$2,288.34
13	1,894	\$1,440.00	0	0.4688	887.9811	\$675.13	\$0.00	\$0.00	\$675.13
14	1,894	\$1,440.00	0	0.4423	837.7180	\$636.91	\$0.00	\$0.00	\$636.91
15	1,894	\$1,440.00	0	0.4173	790.3000	\$600.86	\$0.00	\$0.00	\$600.86
16	1,894	\$1,440.00	0	0.3936	745.5661	\$566.85	\$0.00	\$0.00	\$566.85
17	1,894	\$1,440.00	0	0.3714	703.3642	\$534.76	\$0.00	\$0.00	\$534.76
18	1,894	\$1,440.00	0	0.3503	663.5511	\$504.50	\$0.00	\$0.00	\$504.50
19	1,894	\$1,440.00	0	0.3305	625.9916	\$475.94	\$0.00	\$0.00	\$475.94
20	1,894	\$1,440.00	0	0.3118	590.5582	\$449.00	\$0.00	\$0.00	\$449.00
21	1,894	\$1,440.00	0	0.2942	557.1303	\$423.58	\$0.00	\$0.00	\$423.58
22	1,894	\$1,440.00	0	0.2775	525.5947	\$399.61	\$0.00	\$0.00	\$399.61
23	1,894	\$1,440.00	0	0.2618	495.8440	\$376.99	\$0.00	\$0.00	\$376.99
24	1,894	\$1,440.00	0	0.2470	467.7774	\$355.65	\$0.00	\$0.00	\$355.65
25	1,894	\$1,440.00	0	0.2330	441.2994	\$335.52	\$0.00	-\$532.33	-\$196.82
Costo nivelado de la energía									

Los resultados de este estudio muestran que el reciclaje de módulos FV puede ser económicamente competitivo frente a la disposición en vertedero, siempre que se implementen incentivos adecuados. El análisis del LCOE indica que, con un subsidio del 15 % del costo inicial, el escenario con reciclaje presenta una mejora frente al vertido, y que con al menos un 2 % de incentivo es posible igualar ambos escenarios. Este resultado es coherente con lo encontrado por Hernández-López et al. (2022), quienes también concluyen que un subsidio del 15 % permite disminuir el costo de la electricidad. Asimismo, Dias et al. (2021) destacan que el reciclaje no es rentable sin subsidios, incluso en escenarios optimizados, y Zhang et al. (2022) sugieren que un esquema de subsidios decrecientes mejora la sostenibilidad financiera del sistema. Xu et al. (2024) complementan esta perspectiva, advirtiendo que una mala implementación de subsidios puede generar efectos negativos en la cadena de valor.

Respecto a la estructura de costos, este estudio identifica que el 78.44 % corresponde al procesamiento y el 21.39 % al transporte de residuos. Esta proporción se alinea con lo reportado por Markert et al. (2020), quienes encuentran en el transporte el mayor costo privado, y con Dias et al. (2022), quienes señalan que transportar solo la fracción valiosa del módulo puede reducir significativamente los costos, especialmente si no existe mercado para el vidrio recuperado. En este mismo sentido, Guo & Kluse (2020) proponen optimizar la localización de plantas de reciclaje para minimizar los costos logísticos. Por otro lado, Mahmoudi et al. (2020) destacan que la rentabilidad depende del volumen procesado, siendo viables plantas de 20,000 toneladas, pero no las de 10,000. Faircloth et al. (2019) refuerzan esta idea, indicando que se requiere un aumento en los flujos de residuos y una reducción de costos iniciales para alcanzar rentabilidad. Finalmente, Liu et al. (2020) muestran que políticas fiscales preferenciales pueden mejorar la viabilidad, al incrementar el índice beneficio-coste y reducir el tiempo de recuperación. En conjunto, los resultados obtenidos reafirman que la viabilidad económica del reciclaje depende de la aplicación estratégica de subsidios, la reducción de costos críticos y la adecuada planificación según el contexto local y el volumen de residuos disponible.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación evidencian que el reciclaje de módulos FV al final de su vida útil puede ser económicamente viable, especialmente cuando se implementan incentivos que compensen los costos asociados al transporte y procesamiento de residuos. La recuperación de materiales críticos



como el silicio y la plata representa un beneficio económico significativo frente a materiales más abundantes como aluminio y vidrio. En Sinaloa, el ecosistema fotovoltaico, compuesto principalmente por sistemas pequeños y medianos, presenta oportunidades para estructurar estrategias de reciclaje que generen valor económico y fomenten la economía circular. La disposición del sector a colaborar con universidades mediante capacitaciones y prácticas profesionales permite fortalecer la formación de capital humano y explorar modelos de negocio sostenibles. Este estudio piloto proporciona una base para el desarrollo de políticas públicas e instrumentos económicos que incentiven la inversión y optimicen la gestión financiera del reciclaje de módulos FV.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, M., Zeeshan, M., & Khan, J. A. (2023). Life cycle multi-objective (geospatial, techno-economic, and environmental) feasibility and potential assessment of utility scale photovoltaic power plants. *Energy Conversion and Management*, 291, 117260. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117260>
- CRE. (2024). *Solicitudes de Interconexión de Centrales Eléctricas con Capacidad Menor a 0.5 MW*.
- Dextre, R. (2020). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) por la empresa operadora de residuos COMIMTEL S.A.C., Lima, periodo 2017-2019*.
- Dias, P., Schmidt, L., Monteiro Lunardi, M., Chang, N. L., Spier, G., Corkish, R., & Veit, H. (2021). Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105241. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105241>
- Dias, P. R., Schmidt, L., Chang, N. L., Monteiro Lunardi, M., Deng, R., Trigger, B., Bonan Gomes, L., Egan, R., & Veit, H. (2022). High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: Technical, economic and environmental feasibility assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112900. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112900>
- eBay. (2025). *100g Pure Silicon Silicium Si High Purity 99.9% Metal Powder 100 gram* | eBay. https://www.ebay.com/itm/283407104603?chn=ps&mkevt=1&mkcid=28&google_free_listing_action=view_item



- Faircloth, C. C., Wagner, K. H., Woodward, K. E., Rakkwamsuk, P., & Gheewala, S. H. (2019). The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 260–272. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.01.008>
- García, A. M., Gallagher, J., McNabola, A., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., & Rodríguez Díaz, J. (2019). *Análisis del impacto ambiental y económico vinculado a la energía fotovoltaica frente al uso de energías convencionales en el regadío*. https://doi.org/10.26754/c_agroing.2019.com.3372
- Guo, Q., & Kluse, C. (2020). A framework of photovoltaics recycling facility location optimization. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 105–110. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.04.003>
- Hernández, D. (2021). Evaluación de sustentabilidad del reciclaje fotovoltaico en el contexto de Yucatán.
- Hernández-López, D.-A., Tariq, R., Mekaoui, A. El, Bassam, A., Vega De Lille, M., J Ricalde, L., & Riech, I. (2022). Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103539. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103539>
- INEGI. (2025, January 9). *INEGI, Sala de prensa*. <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/9563>
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). The levelized cost of energy and modifications for use in electricity generation planning. *Energy Reports*, 9, 495–534. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.06.036>
- Li, J., Shao, J., Yao, X., & Li, J. (2023). Life cycle analysis of the economic costs and environmental benefits of photovoltaic module waste recycling in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 196, 107027. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.107027>
- Liu, C., Zhang, Q., & Wang, H. (2020). Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China. *Waste Management*, 118, 491–500. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.08.052>
- Mahmoudi, S., Huda, N., & Behnia, M. (2020). Environmental impacts and economic feasibility of end of life photovoltaic panels in Australia: A comprehensive assessment. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120996. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120996>



- Mao, D., Yang, S., Ma, L., Ma, W., Yu, Z., Xi, F., Cleaner, J. Y.-J. of, & 2023, undefined. (2024). Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: A case study of crystalline silicon photovoltaic panels. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623044785>
- Markert, E., Celik, I., & Apul, D. (2020). Private and Externality Costs and Benefits of Recycling Crystalline Silicon (c-Si) Photovoltaic Panels. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 3650, 13(14), 3650. <https://doi.org/10.3390/EN13143650>
- Metaloop. (2025). *Índice de Precios de Chatarra Metálica - México - Metaloop*. <https://www.metaloop.com/es/scrap-metal-price/mexico/>
- Oteng, D., Zuo, J., Production, E. S.-J. of C., & 2023, undefined. (2023). An evaluation of the impact framework for product stewardship on end-of-life solar photovoltaic modules: An environmental lifecycle assessment. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623015159>
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2022). *Secretaría de Hacienda y Crédito Público*. Determinación de La Tasa Social de Descuento Aplicable a Programas y Proyectos de Inversión. <https://www.gob.mx/shcp/documentos/tasa-social-de-descuento-tsd>
- SENER. (2024). *Prospectivas del Sector Eléctrico 2023-2037*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/prospectivas-del-sector-energetico-356380>
- Supraciclaje. (2022). *Precio de chatarra, empresa de compra venta de chatarra en México*. <https://supraciclaje.com/precios-hoy/>
- Trading Economics. (2025). *Silver - Price - Chart - Historical Data - News*. <https://tradingeconomics.com/commodity/silver>
- World Economic Forum. (2023). *Future of Jobs Report*. www.weforum.org
- Xu, T., Liu, D., & Mo, L. (2024). Policy design of government subsidy for end-of-life solar panel recycling. *Applied Mathematical Modelling*, 129, 390–407. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2024.01.047>
- Zhang, L., Chang, S., Wang, Q., & Zhou, D. (2022). Is subsidy needed for waste PV modules recycling in China? A system dynamics simulation. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 152–164. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2022.02.005>

