

## TIEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN ARGENTINA

Laura Gonzalez Bisciglia<sup>1,2</sup>, Mariela E. Videla<sup>1</sup>, Roque Pedace<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Departamento Energía Solar. Centro Atómico Constituyentes. San Martín. Buenos Aires.

<sup>2</sup>Universidad San Martín (UNSAM). Escuela de Ciencia y Tecnología. San Martín. Buenos Aires

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Buenos Aires. (UBA)

e-mail: lgonzale@tandar.cnea.gov.ar

*Recibido 08/2023; Aceptado 10/2023*

**RESUMEN.-** En el marco de los compromisos internacionales para disminuir el impacto ambiental asociado a las matrices eléctricas de los países que integran el acuerdo de Paris este trabajo analiza el tiempo de retorno energético de un sistema fotovoltaico de generación distribuida. El sistema se ubica en el Centro Atómico Constituyentes y forma parte de un proyecto de inversión pública de la Comisión Nacional de Energía Atómica. A partir del análisis de cada uno de los aportes de los componentes del sistema se evalúa el tiempo de retorno energético y se proponen algunas alternativas para mejorarlo. Se obtuvo un tiempo de retorno de un año para paneles con celdas PERC, half cut y eficiencia de 20,3%. Esta cifra mejora a 0,92 años si se considera la degradación informada por el fabricante en lugar del promedio utilizado para la tecnología de celdas de los paneles. El mayor aporte dentro del balance del sistema lo provee el inversor. El uso de materiales de menor contenido energético en la integración edilicia y que además contribuyan a mejorar la envolvente disminuiría aún más la cifra. El tiempo de retorno podría reducirse considerablemente si parte de la producción de paneles se realizara en Argentina, aprovechando la eficiencia de la matriz eléctrica y disminuyendo el costo en transporte.

**Palabras clave:** Matriz eléctrica, energía solar, análisis de inventario, análisis de ciclo de vida, balance de sistema, celdas PERC.

## ENERGY PAYBACK TIME OF A DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM IN ARGENTINA

**ABSTRACT.-** This paper analyzes the energy recovery time of a photovoltaic system for distributed generation within the framework of the international commitments assumed to mitigate the environmental impact associated with the electrical mix. The system is located at the Constituyentes Atomic Center and is part of a public investment project of the National Atomic Energy Commission. Based on the analysis of each of the contributions of the system components, the energy payback time is evaluated and some alternatives are proposed to improve it. A payback time of one year was obtained for panels with PERC cells, half cut, and an efficiency of 20.3%. This figure improves to 0.92 years if the degradation reported by the manufacturer is considered instead of the average used for the cell technology of the panels. The greatest contribution within the system balance is provided by the inverter. The use of materials with lower energy content in building integration that also contribute to improving the envelope would further reduce the figure. The payback time could be significantly reduced if part of the panel production were carried out in Argentina, taking advantage of the efficiency of the electrical matrix and reducing transportation costs.

**Keywords:** electricity mix, solar energy, life cycle, inventory analysis, balance of the system, PERC cells.

### 1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad a nivel mundial debido a los efectos cada vez más evidentes que el cambio climático está generando en nuestro planeta. El camino requiere un cambio masivo en la forma en que las sociedades producen y consumen energía. La mayor parte de la energía que se consume mundialmente proviene de combustibles fósiles; además la matriz eléctrica mundial solo utiliza un 15,7 % de fuentes de energía bajas en carbón. (Figura 1).

El consumo energético mundial presenta una evidente desigualdad donde los países desarrollados son los responsables de más del 50 % del consumo total (Global Consumption, 2023). Una de las acciones más importantes para alcanzar las metas establecidas en los acuerdos internacionales es la disminución de las emisiones a partir de incorporar fuentes de energía renovables en la matriz eléctrica de cada país. La potencia instalada a partir de energías renovables alcanzó en el año 2022 una capacidad de 3.372 GW (IRENA, 2023) con un porcentaje del 37 % para la energía hidroeléctrica seguida en segundo lugar por la energía solar con un 31 % de participación.

La energía solar es la fuente que lidera la expansión de la matriz renovable cuyo aumento en el año 2022 fue del 22% con respecto al año anterior. La mayor parte de este crecimiento se debió a la energía solar fotovoltaica (IRENA, 2023), impulsada por las instalaciones de centrales fotovoltaicas en China. El incremento de los costos debido a los conflictos bélicos entre Ucrania y Rusia durante el 2022 no parecen haber disminuido el mercado fotovoltaico, aunque tuvieron efectos sobre la producción europea. La fabricación de paneles fotovoltaicos en el mundo está liderada también por China que abarca el 56% del mercado total (IEA, 2023). El mercado fotovoltaico creció tanto en el segmento de escala utilidad como el comercial o residencial. El segmento residencial y comercial ha mantenido un incremento sostenido a partir del año 2018 (IEA-PVPS, 2022). La mayor parte de este segmento se refiere a sistemas de generación distribuida conectados a la red.

En Argentina, desde la promulgación y reglamentación de la ley nacional de generación distribuida con fuentes renovables (Ley 27.424), se ha observado un incremento en la cantidad de instalaciones fotovoltaicas de escala comercial. Desde el año 2019, la Secretaría de Energía Eléctrica a través de sus informes mensuales y anuales realiza un seguimiento de este crecimiento. La potencia reportada en 2019 alcanzaba los 679 kW y en marzo de 2023 llegó a los 21.228 kW (Figura 2).

Evaluar el impacto de las instalaciones fotovoltaicas de generación

distribuida en Argentina es de relevancia en función de los compromisos adoptados por el país para poder cumplir con los objetivos acordados dentro del marco de las estrategias de transición energética. Los métodos utilizados para cuantificar el impacto ambiental producido por los materiales y el flujo de energía asociado a la fabricación de productos son el análisis de ciclo de vida o Life Cycle Assessments (LCA) y los inventarios. En especial, uno de los parámetros que se analiza en este trabajo es el tiempo de recuperación de energía o Energy Payback Time (EPBT).

El EPBT se refiere al tiempo que tarda un sistema de energía renovable en generar la misma cantidad de energía que se utilizó en su fabricación, instalación y mantenimiento. En otras palabras, es el período necesario para compensar la energía consumida durante la etapa inicial de desarrollo y producción, incluyendo, en algunos casos, su disposición final. De esta manera se puede evaluar el tiempo necesario de funcionamiento de un sistema fotovoltaico para que recupere toda la energía invertida en su fabricación, disposición final y mantenimiento.

Los materiales, la tecnología y los procesos de fabricación inciden en el EPBT. A medida que se mejoren las tecnologías y los procesos de fabricación consuman menor cantidad de materiales se necesitará menor cantidad de energía en su elaboración. Una elección adecuada de materiales y procesos de fabricación es un aspecto clave para mejorar el retorno energético de los productos finales de

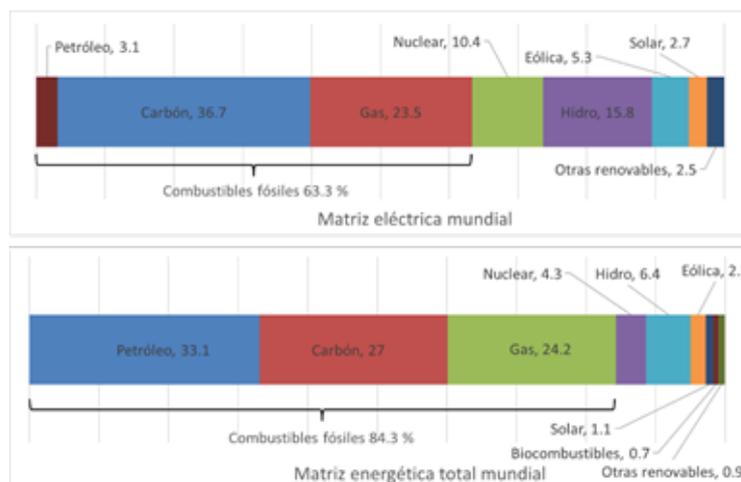


Fig. 1: Consumo de energía primaria global y mix eléctrica mundial en función del tipo de fuente utilizada. Elaboración propia a partir de (Ritchie, Roser, y Rosado, 2022).

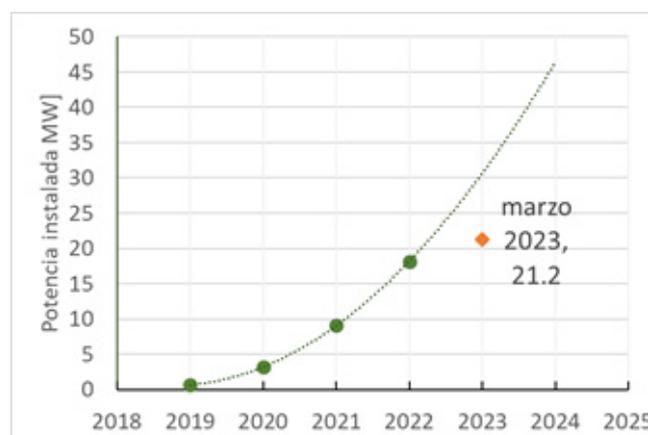


Fig. 2: Potencia fotovoltaica instalada en Argentina. Línea de tendencia y estimación a cinco años (tendencia polinómica de grado dos). Gráfico construido a partir de (Secretaría de Energía 2022)

una fábrica dedicada a la industria fotovoltaica. Además, el EPBT puede ser de gran ayuda para los potenciales compradores y usuarios de estos productos, ya que les permitirá reducir el tiempo de retorno energético en sus instalaciones. En consecuencia, un factor importante a analizar es el mix energético o participación de las fuentes de energías utilizadas en las diferentes etapas de fabricación de cada una de las partes componentes del sistema. Aquellas fábricas localizadas en lugares donde la generación de energía utilice sistemas poco eficientes desarrollarán productos con un mayor tiempo de retorno. Desde el punto de vista competitivo el origen de los productos podría evaluarse en función de este indicador a la hora de seleccionar equipos fotovoltaicos. Por las razones antes mencionadas, el EPBT es un indicador utilizado a nivel mundial para evaluar el impacto energético de los sistemas de generación con energías renovables. En este trabajo se evaluó el EPBT de un sistema fotovoltaico de generación distribuida funcionando en Argentina.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La instalación analizada se ubica en la provincia de Buenos Aires, Argentina (figura 3) cuya irradiación global horizontal en su promedio diario alcanza los 4,7 KWh/m<sup>2</sup> (Meteonorm Software, 2023) y consta de 128 módulos Amerisolar de 445 Wp de celdas solares de silicio monocristalino y tecnología PERC (Passivated Emitter Rear Cell) Half-cell (Amerisolar, 2020) fabricados en China. Los paneles solares se disponen sobre dos cubiertas planas utilizando estructuras triangulares de hormigón armado orientadas 20° NE y con una inclinación de 15° fabricadas en Argentina (Figura 4). El dimensionamiento, la inclinación y la separación entre paneles estuvieron condicionadas por las estructuras edilicias linderas y fue realizado previo a este estudio. El ángulo óptimo para maximizar el rendimiento anual corresponde a 32 grados. Las estructuras de hormigón cumplen con la función de soporte de fijación y contrapeso para los paneles. La configuración del arreglo

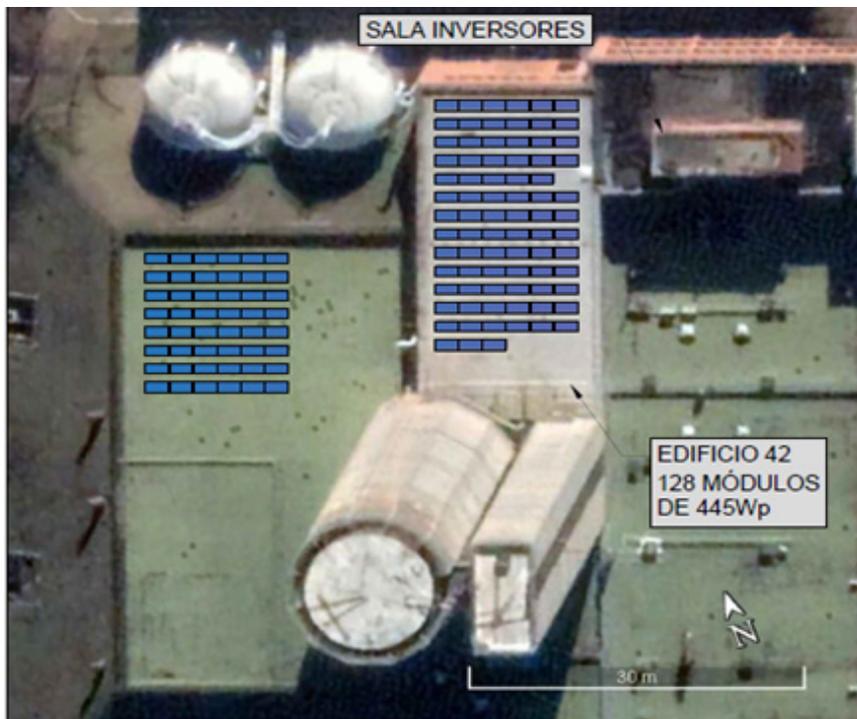


Fig. 3: Vista general de la instalación. (ALDAR, 2020)



Fig. 4: Arreglo de paneles de la instalación. Se observan las estructuras de soporte de hormigón cuya inclinación corresponde a 15°. En la esquina inferior izquierda se muestra el inversor.

Tabla 1 - Principales parámetros de la instalación analizada

Componente	Especificaciones
Ubicación	Centro Atómico Constituyentes -Buenos Aires
Irradiación global horizontal	4,7 KWh/m <sup>2</sup> promedio diario (Meteonorm Software, 2023)
Módulo Amerisolar AS-6M144-HC	128 paneles
Tecnología	PERC - <i>Half cell</i> Silicio monocristalino
Potencia	445 Wp
Área total (celdas)	253,95 m <sup>2</sup>
Área total de módulos	279,81 m <sup>2</sup>
Eficiencia del módulo	20,36 %
Potencia total fotovoltaica	56,96 kWp
Inversor SMA	50 KW potencia nominal
Estructuras de soporte de paneles	150 unidades de 60 kg cada una

de paneles solares comprende ocho cadenas cuya conexión a un inversor SMA (SMA Solar Technology AG, 2023) (Alemania) de 50 kW de potencia nominal aprovecha cada uno de los seguidores de máxima potencia (MPPT) disponibles. Los principales parámetros de la instalación se resumen en la tabla 1.

### 3. METODOLOGÍA

Para obtener el tiempo de retorno energético (EPBT) de un sistema se necesita calcular la energía que generará durante su periodo de vida útil y la energía necesaria para la fabricación de cada uno de sus componentes. En este trabajo se utilizó la definición de la International Energy Agency (IEA) (Frischknecht, Heath, Raugei, Sinha, y de Wild-Scholten, 2016) donde el EPBT se expresa en años, siendo este el periodo necesario para que un sistema de energía renovable genere la misma cantidad de energía primaria equivalente que fue utilizada para su fabricación.

$$EPBT = \frac{E_{in}}{E_{out}} \tag{1}$$

Donde  $E_{in}$  es la energía utilizada en todas las etapas de fabricación del sistema incluyendo el inversor, las estructuras de montaje, el transporte y la instalación y el término  $E_{out}$  indica la energía generada por el sistema en el periodo de un año.

Teniendo en cuenta una forma más detallada de la ecuación 1 se obtiene lo siguiente:

$$EPBT = \frac{E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst}}{E_{gen}} = \frac{[MJ_{prim}]}{[MJ_{prim} / año]} \tag{2}$$

$E_{manuf}$ : Energía primaria requerida para la fabricación de los paneles.

$E_{trans}$ : Energía primaria requerida para transportar los componentes del sistema desde su lugar de fabricación hasta el sitio de instalación.

$E_{inst}$ : Energía primaria requerida para la instalación del sistema. Esto incluye el inversor, estructuras y cableado eléctrico. A los componentes del sistema fotovoltaico, excluyendo los paneles solares, se los denomina balance del sistema (BOS).

$E_{gen}$ : Energía primaria equivalente generada por el sistema fotovoltaico en el periodo de un año teniendo en cuenta el promedio anual a lo largo de su vida útil.

#### 3.1. Energía generada por el sistema fotovoltaico ( $E_{gen}$ )

Para determinar la energía generada del sistema, se utilizó el modelo de generación asumiendo un periodo de vida útil de 25 años (Müller, Friedrich, Reichel, Herceg, y Mittag, 2021). El modelo (Ecuación 3) tiene en cuenta la degradación promedio anual de las celdas, el promedio anual de irradiación global en el plano de los paneles, su área, la eficiencia de los módulos y el rendimiento inicial del sistema. Para la degradación se consideró el valor

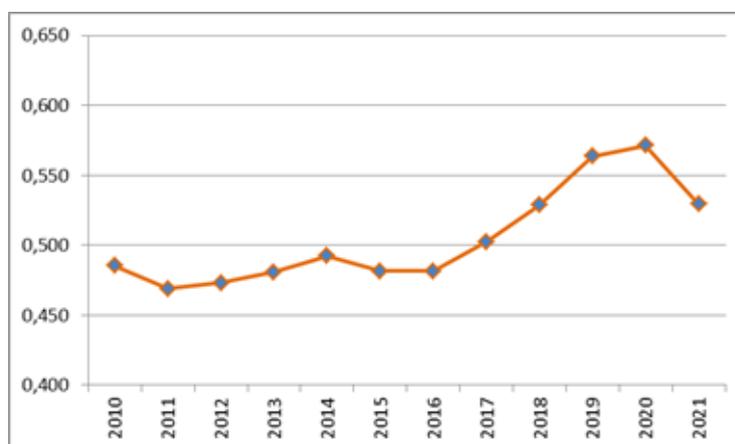


Fig. 5: Eficiencia del sistema eléctrico argentino en los últimos 10 años. El promedio es igual a 0,505 - Elaboración propia a partir de datos extraídos del Balance Energético Nacional. Serie histórica – Indicadores. (Secretaría de Energía, 2021)

disponible en el último reporte del Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022) con una degradación promedio anual de 0,7% y la degradación de 0,5% informada por la garantía del fabricante de los paneles del sistema. De esta manera, se trabajó con dos valores de degradación para poder evaluar el impacto de la elección de la degradación utilizada en el modelo.

$$E_{\text{total generada}} = \sum_{y=1}^T ((1 - Dr)^y \cdot I \cdot A \cdot \eta \cdot PR_i) \quad (3)$$

La generación calculada del sistema fotovoltaico está dada en términos de energía eléctrica por lo que es necesario llevar este resultado a términos de energía primaria equivalente. Para convertir la energía eléctrica de la instalación fotovoltaica (FV) en términos de energía primaria equivalente se utilizó el factor de eficiencia de la red eléctrica argentina calculado como promedio de los factores de eficiencia de los últimos 10 años (Figura 5) según el informe publicado por la Secretaría de Energía (Secretaría de Energía, 2021).

### 3.2. Energía primaria requerida para la fabricación de los paneles ( $E_{\text{manuf}}$ )

Los paneles solares del sistema FV fueron fabricados en China por la empresa Amerisolar. Si bien algunos fabricantes proveen de la declaración ambiental de sus productos, no fue el caso de Amerisolar. Por tal motivo se tomaron los valores promedio informados por el Fraunhofer Institute for Solar Energy (ISE) en el año 2022 para módulos fotovoltaicos con tecnología PERC de media celda (half cut) y Multi-Busbar fabricados en China (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022). En dicho reporte las celdas de silicio monocristalino alcanzaron una eficiencia promedio de 20,04% donde el 78% de ellas se fabricó en Asia. El proceso de fabricación de estos paneles se encuentra descrito junto con la electricidad necesaria para fabricar una celda de tecnología PERC cuyo valor se estima entre 0,4 y 0,5 kWh por celda sin incluir la etapa de fabricación del polisilicio, lingote y oblea. (Smith, et al., 2020)

### 3.3. Energía requerida para la instalación del sistema ( $E_{\text{inst}}$ )

En las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red uno de los componentes electrónicos más importantes es el inversor fotovoltaico, encargado no solo de convertir de manera eficiente la corriente continua, provista por los paneles solares, en corriente alterna e inyectar a la red, sino también de proveer todos los mecanismos de seguridad eléctrica. Al igual que los paneles solares, el fabricante no disponía de la documentación ambiental para el modelo que se encontraba funcionando en la instalación. Para evaluar la energía utilizada en la fabricación del inversor se revisaron publicaciones de los últimos 10 años, dado que la tecnología se ha mantenido estable en cuanto a hardware en este periodo de tiempo. Se usó el valor promedio entre las cifras de energía primaria citadas para inversores sin transformador teniendo en cuenta inversores de pequeña y mediana potencia.

Además del inversor fotovoltaico, se incluye en la instalación, la energía de fabricación de las estructuras de soporte del arreglo de paneles. Las estructuras utilizadas en el sistema bajo estudio se fabricaron en Argentina. Las características y el proceso de fabricación se encontraban documentadas pero sin su declaración ambiental. El hormigón de las estructuras es del tipo H21 que corresponde a una resistencia especificada de 210 kg/cm<sup>2</sup> (Centro Investigación de Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles (CIRSOC), 2005). El hormigón necesita una fuente importante de energía para su fabricación y la principal contribución se encuentra en la cantidad de cemento presente en la mezcla. Los valores de energía equivalente pueden variar desde unos 0,732 GJ/m<sup>3</sup> a 1,63 GJ/m<sup>3</sup> en función del contenido de cemento o tipo de mezcla (Marceau, Nisbet, y VanGeem, 2007). Para el caso del hormigón de las estructuras se puede asumir que el tipo de mezcla se encuentra entre el tipo 1 y 2 (Figura 6) cuyo valor estimado es de 1,5 GJ/m<sup>3</sup>.

También se estimó la energía que aportó el cableado del sistema. Para el cableado en DC se utilizaron en total 605 m de cable de 4

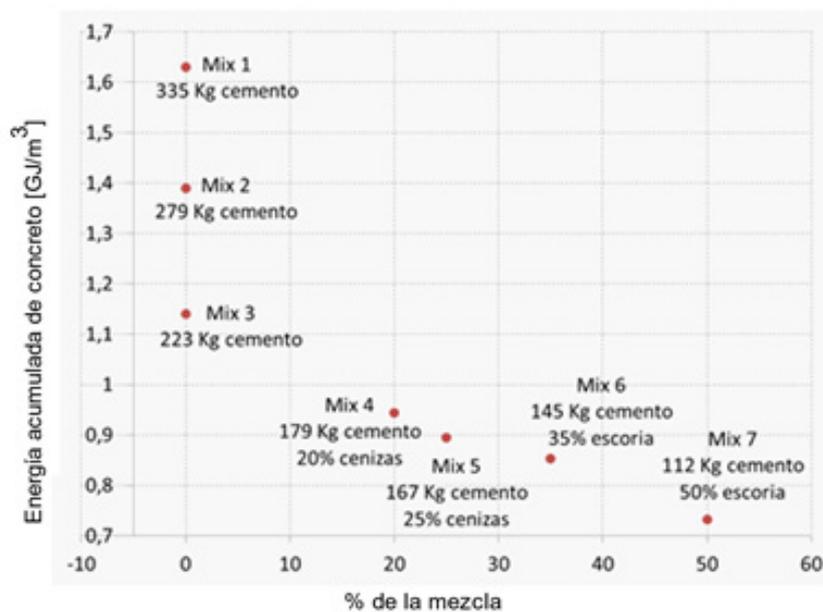


Fig. 6: Energía primaria de los diferentes tipos de mezcla de hormigón en función del material suplementario. Figura 2 de (Marceau, Nisbet, y VanGeem, 2007)

mm<sup>2</sup> de sección y para el cableado en AC, 6 m de 25 mm<sup>2</sup> de cuatro conductores. Resultando un aporte de 2,16 m/m<sup>2</sup> de módulo en DC y 0,11 m/m<sup>2</sup> en AC. Estos valores coincidieron con los parámetros utilizados en (de Wild-Scholten, 2013) donde se calcula la energía primaria de fabricación de los cables y conectores a partir de una demanda energética dada por 12,5 MJ/m<sup>2</sup> de módulos para 39,325 kg de cobre totales (Ineldec, 2023).

### 3.4. Energía primaria de transporte ( $E_{trans}$ )

Para el cálculo de la energía requerida en el transporte se analizó cada componente teniendo en cuenta su lugar de fabricación. Tanto el inversor como los paneles fueron fabricados fuera del país por lo que se estimó la energía requerida tanto para el transporte marítimo como el terrestre. El transporte terrestre de los módulos se consideró utilizando un vehículo de transporte pesado cuyo consumo de combustible diesel es de 138 g/tkKm según el informe de (Spielmann, Bauer, Dones, y Tuchschnid, 2007) y el poder calorífico de este combustible es de 42.695 MJ/kg (Ntziachristos y Samaras, 2019)

El peso total de los módulos es de 3072 kg y la distancia recorrida desde el lugar de fabricación hasta el puerto en China se consideró igual 68,8 km y la distancia desde el puerto argentino hasta el lugar de instalación fue de 17,2 km. Para el caso del inversor, el peso considerado, incluyendo el embalaje fue de 100 kg y la distancia terrestre recorrida total fue de 355,2 km.

En cuanto al transporte marítimo se utilizaron datos reportados en (Ntziachristos y Samaras, 2019) para embarcaciones de cargas generales. Se tomó un valor de consumo de combustible de 2,5 g/tkm. La distancia del transporte marítimo se calculó a través de la web de (SeaRates, 2023) que aporta datos adicionales como el tiempo del recorrido y velocidad promedio del mismo. Las distancias recorridas para los módulos y el inversor fueron de 21.072,5 Km y 12.163,81 Km respectivamente.

También se asumió que los valores del transporte terrestre de los demás componentes de la instalación no resultaban significativos en cuanto a su aporte energético.

## 4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los valores obtenidos para cada término de la expresión de EPBT y se realizan análisis paramétricos para determinar la sensibilidad de cada una de las aproximaciones utilizadas.

### 4.1. Producción fotovoltaica del sistema

Para calcular la producción del sistema se utilizó la Ecuación 3 aplicando los valores de la Tabla 2. El valor de irradiación incidente en los paneles se consideró igual a 1888 kWh/m<sup>2</sup> (Global

solar atlas, 2023). Los valores obtenidos resultan en las ecuaciones siguientes.

$$E_{IEA} = \sum_{y=1}^T ((1 - 0,007)^y \cdot 1888 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 253,95\text{m}^2 \cdot 0,2036 \cdot 0,80) = 1.7833 \text{ GWh} \quad (5)$$

$$E_{Fab} = \sum_{y=1}^T ((1 - 0,005)^y \cdot 1888 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 253,95\text{m}^2 \cdot 0,2036 \cdot 0,80) = 1.8304 \text{ GWh} \quad (6)$$

Donde  $E_{IEA}$  es la energía eléctrica producida por el sistema utilizando la expresión sugerida por la IEA y  $E_{fab}$  es la energía eléctrica producida por el sistema teniendo en cuenta la degradación sugerida por el fabricante. Los valores de generación promedio anual para  $E_{IEA}$  y  $E_{fab}$  corresponden a 71.37 MWh/año y 73.2115 MWh/año respectivamente cuyos valores de energía primaria equivalente para la matriz eléctrica argentina resultan 1818,24 MJ/m<sup>2</sup> y 1865,24 MJ/m<sup>2</sup> (para la conversión de unidades se consideró una equivalencia de 3.6 MJ/kWh).

### 4.2. Módulos fotovoltaicos

En el cálculo de la energía primaria consumida en los módulos fotovoltaicos se tuvo en cuenta la secuencia del proceso desde la purificación del silicio metalúrgico hasta la fabricación del módulo, incluyendo el ensamblado del marco y el laminado. Para calcular la energía primaria equivalente de los paneles Amerisolar cuya fábrica se encuentra en China se utilizaron los promedios publicados en (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022). En este reporte se presenta el EPBT de un sistema fotovoltaico de generación distribuida en tres locaciones distintas. Se tomó como referencia el promedio europeo correspondiente a 1,16 años con una irradiación promedio anual de 1700 kWh/m<sup>2</sup>, una degradación inicial del 0,70 %, un PR inicial de 80%, una eficiencia de módulos de 20,36% con una vida útil de 25 años y una eficiencia de la red eléctrica de 0,35. Aplicando la Ecuación 4 se obtuvo una producción eléctrica promedio anual de 247,32 kWh/m<sup>2</sup> para un sistema fotovoltaico ubicado en Europa y una energía primaria equivalente de 706.62 kWh/m<sup>2</sup> o 2543,83 MJ/m<sup>2</sup>, resultando la energía primaria de fabricación del sistema igual a 2950,84 MJ/m<sup>2</sup>. Con estos valores se calculó la energía primaria de fabricación utilizada solamente para los paneles solares del sistema en estudio, cuyo valor fue de 1628,07 MJprim/m<sup>2</sup>.

### 4.3. Balance del sistema

El balance del sistema (BOS) incluyó el inversor, las estructuras de soporte de los paneles solares y el cableado. Para evaluar la energía utilizada en la fabricación del inversor se revisaron publicaciones de los últimos 10 años. Este lapso de tiempo se consideró adecuado debido a que la tecnología utilizada en el hardware ha permanecido estable durante este periodo. Para inversores menores a 20 kW de potencia los valores de energía de fabricación superan los 1000 MJ/kWp, mientras que para potencias mayores la energía disminuye a la mitad (Todde, et al., 2018). Se calculó el valor promedio entre las cifras de energía primaria citadas para

Tabla 2 - Parámetros utilizados para el cálculo de la energía primaria generada por el sistema

Degradación anual promedio	DR IEA [%]	0,70
Degradación en el año uno	DR FAB [%]	0,5
Área del panel	A [m <sup>2</sup> ]	1,984
Promedio anual de la irradiación solar global en el plano de los paneles	I [kWh/m <sup>2</sup> ]	1888
Eficiencia del módulo en condiciones estándares (STC)	n [%]	20,36
Rendimiento inicial del sistema	PR [%]	80
Vida útil del sistema	T [años]	25

inversores sin transformador. Esto permitió estimar la energía de fabricación para el inversor de 50 KW de SMA ® de la instalación en 464 MJ/kWp (Tabla 3) (Deriche, Hafaifab, y Mohammedia, 2018) (Pacca, Sivaraman, y Keoleian, 2007) (Todde, et al., 2018).

Para la estructura de soporte de los paneles se evaluó la cantidad de hormigón utilizado y en función de la energía de fabricación del hormigón se calculó la energía primaria requerida. Durante la instalación se empleó un total de 150 estructuras de hormigón cuyo peso individual es de 60 kg. A partir de la densidad del hormigón de 2400 kg/m<sup>3</sup> (Marceau, Nisbet, y VanGeem, 2007) se obtuvo en total 3,75 m<sup>3</sup> utilizados.

$$\text{cantidad de hormigón} = \frac{60 \text{ Kg} \cdot 150 \text{ unidades}}{2400 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 3,75 \text{ m}^3$$

La energía primaria de fabricación resultante fue de 5625 MJ.

$$\text{Energía de fabricación del hormigón} = 3,75 \text{ m}^3 \cdot 1500 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 5625 \text{ MJ}$$

Mientras que la energía de fabricación del cableado del sistema resultó igual a 3498 MJ.

$$\text{Energía de fabricación del cableado} = 12,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \cdot 2,186 \text{ m}^2 \cdot 128 \text{ unidades} = 3498 \text{ MJ}$$

#### 4.4. Transporte

La distancia total recorrida por medios terrestres, considerando tanto el traslado del inversor como el de los paneles solares, alcanzó los 442,2 km. El consumo de combustible para el transporte terrestre según (Spielmann, Bauer, Dones, y Tuchschnid, 2007) equivale a 137 gtkm. Considerando un combustible diésel con un valor calórico de 42,695 MJ/kg (Ntziachristos y Samaras, 2019) se obtuvo una relación de energía equivalente por tonelada y kilómetros recorridos igual a 5,87 MJ/tkm por lo tanto la energía de transporte terrestre resultó igual a 1777,51 MJ (Tabla 4).

Para el transporte marítimo se evaluaron las rutas comerciales (SeaRates, 2023) y se obtuvo una distancia recorrida total de 33.236 km con un consumo de aproximadamente 164,87 kg de combustible diesel. Al considerar que el consumo de una embar-

cación cargo se estima en 2,5 g/tkm, se calculó un valor de energía primaria para el transporte marítimo de 6934,58 MJ (Tabla 5).

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El tiempo de retorno energético para el sistema fotovoltaico en estudio resultó igual a un año. El peso de cada componente del sistema se muestra en la Figura 7.

Para el análisis se comparó el EPBT del sistema estudiado (1 año) con un sistema de iguales características en cuanto a su dimensionamiento pero utilizando la orientación óptima del arreglo de paneles (máximo de generación). La energía eléctrica promedio anual para cada uno de los casos mencionados resultó igual a 71,37 MWh y 75,18 MWh respectivamente. El incremento de la producción eléctrica en un 5% impacta sobre el EPBT disminuyendo el periodo de recuperación de la energía a 0,97 años. Si se emplea tanto la orientación e inclinación óptima como la degradación garantizada por el fabricante en el cálculo de la producción eléctrica, el EPBT se reduce a 0,92 años (Figura 7).

Con el fin de analizar el aporte de energía en el proceso de fabricación de los paneles, se consideró una parte del proceso como nacional. La etapa que corresponde a la fabricación de celdas a partir de las obleas y el ensamblaje del módulo cuyo gasto en energía eléctrica corresponde a 0,5 kWh por celda corresponde a una energía primaria en China equivalente a 10,28 MJ/celda utilizando una eficiencia de la red de China aproximada de 0,175 (Wu, Ma, Ji, y Ma, 2017), mientras que en Argentina equivale a una energía primaria aproximada de 3,56 MJ/celda. Esto representa una mejora de un 65 %.

Debido a que los paneles solares utilizados no se fabricaron en Argentina, la optimización en cuanto a gasto energético del SFV en estudio solo puede realizarse en aquellos componentes del BOS fabricados en Argentina y el transporte terrestre local. Para el caso del transporte terrestre dentro del país el aporte es mínimo.

En cuanto al impacto del BOS, el elemento de mayor peso es el in-

Tabla 3: Valores de comparación de energía primaria para el inversor.

Autores	Energía primaria	Energía primaria estimada del inversor [MJ]
(Deriche, Hafaifab, y Mohammedia, 2018)	503	28.650
(Pacca, Sivaraman, y Keoleian, 2007)	457	26.960
Inversores de potencia media (Todde, et al., 2018)	432	24.600
Promedio	464	26736

Tabla 4: Resumen de la energía primaria aportada por el transporte terrestre calculada con una relación de 5,87 MJ/tkm

Componente	Peso [t]	Distancia [km]	Energía [MJ]
Módulos	3,072	87	1.568,99
Inversor	0,1	355,5	208,522
Total	3,172	442,2	1.777,512

Tabla 5: Energía primaria aportada por el transporte marítimo.

Traslado	Traslado	Distancia (km)	Duración (días)	Peso [t]	Energía [MJ]
Módulos	China-Argentina*	21.072,5	12	3	24,96
Inversor	Alemania- Argentina	12.163,81	21	3,072	6.909,62
Total		21.072,5	36	3,172	6.934,58

versor, cuya fabricación se realiza en Alemania (Figura 8). El resto de la energía invertida depende fundamentalmente del tipo de integración edilicia utilizado. Para el caso de la instalación analizada el elemento que más aporta al EPBT es la estructura de cemento utilizada como contrapeso de los paneles.

Para evaluar el aporte de los contrapesos se realizó una comparación utilizando diferentes mezclas para el cemento (Figura 6). En la Figura 8 se puede observar el aporte de la estructura sin tener en cuenta el inversor. Se puede apreciar cómo disminuye el aporte al utilizar la mezcla siete (Marceau, Nisbet, y VanGeem, 2007).

### 6. CONCLUSIONES

Los sistemas fotovoltaicos de generación distribuida en áreas urbanas difícilmente se pueden instalar con las orientaciones e inclinaciones óptimas para maximizar la generación anual. Por tal motivo la mayoría de ellos están limitados por las posibilidades edilicias disponibles. Este es el caso del sistema en estudio, cuya orientación NE e inclinación levemente menor a la óptima disminuye su generación anual. Aún con estas limitaciones el tiempo de retorno se mantiene en niveles bajos. Para comparar el resultado obtenido en este estudio con los informes anuales internacionales se debe utilizar el valor de 0,95 años que corresponde a la orientación óptima del arreglo de paneles.

La mejora en el tiempo de retorno con respecto a años anteriores está ligada fundamentalmente a la mejora de la eficiencia de las cel-

das. Por lo que se puede concluir que los sistemas fotovoltaicos de generación distribuida en la Provincia de Buenos Aires recuperan en menos de un año su energía de fabricación y posiblemente esta cifra pueda mejorarse con el uso de paneles solares con mayores eficiencias. Esto supone que la devolución energética es lo suficientemente rápida como para que la producción de este tipo de sistemas implique un aporte neto a la estabilidad de sistema energético si se tiene en cuenta las condiciones de integración al mismo.

El BOS de los SFVs conforma una parte importante del gasto energético y su mayor aporte se centra en el inversor (74%). Es posible que se haya sobreestimado el consumo energético del inversor al utilizar un valor promedio, ya que las cifras energéticas usadas corresponden a promedios entre inversores de distintas potencias. Los procesos de fabricación pueden haber evolucionado disminuyendo su aporte por lo que resulta necesario actualizar la información al respecto.

Es posible disminuir el aporte energético del BOS alterando la mezcla de cemento utilizado en las estructuras de soporte. Esta mejora puede disminuir el impacto energético aproximadamente en un 50%. Este tema podría ser abordado en el futuro mediante la comparación del uso de distintos materiales en la incorporación del sistema al edificio.

Una fracción importante del tiempo de retorno la aporta la fabricación de los paneles. En los últimos años, los procesos de purificación y obtención de las obleas han mejorado al igual que la dis-

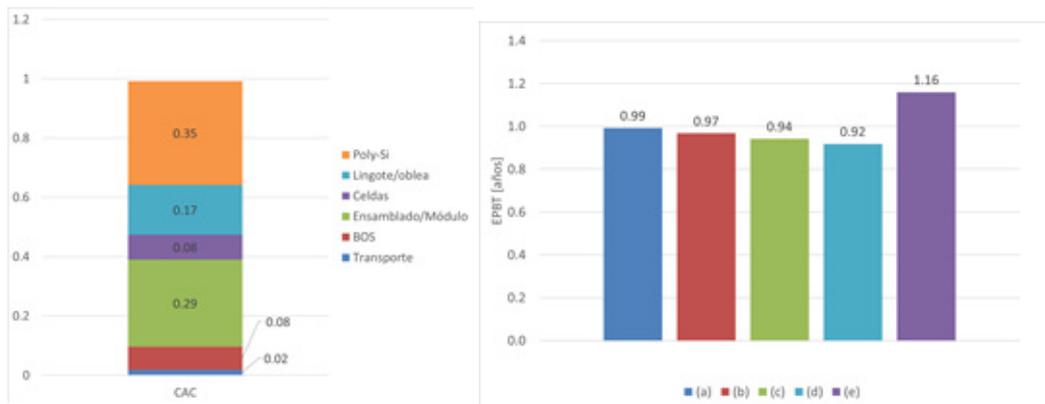


Fig. 7: Izquierda: Impacto de cada componente del sistema fotovoltaico del CAC en el EPBT. Derecha: Comparación del EPBT para el sistema FV instalado utilizando (a) DR=0,7%, orientación NE, inclinación 15° (b) DR=0,7%, orientado al Norte franco con una inclinación de 32° (c) DR=0,5%, orientación NE, inclinación 15° (d) DR=0,5% orientado al Norte franco con una inclinación de 32° (e) Sistema FV típico en EU.

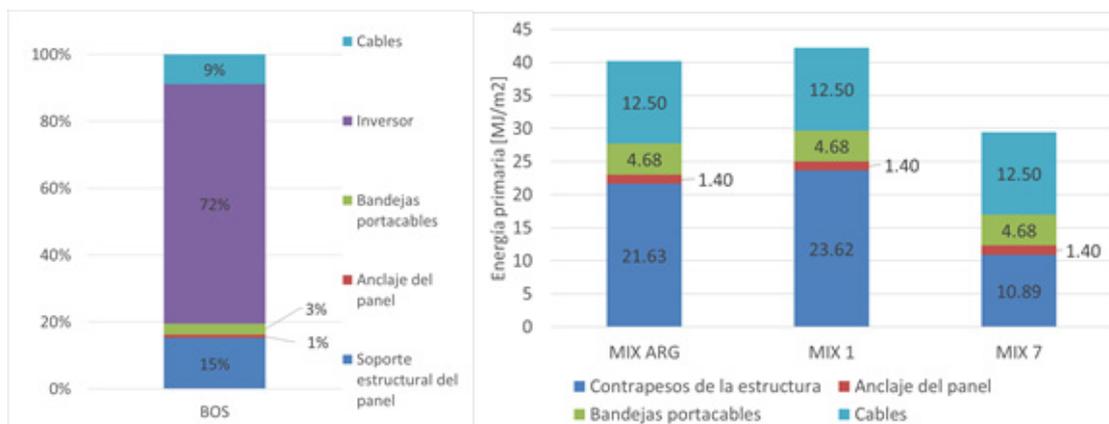


Fig. 8. Izquierda: Aporte de los componentes del BOS. Derecha: Aportes del BOS sin incluir el inversor. Se muestra el aporte energético de las estructuras de hormigón con diferentes composiciones de la mezcla.

minución del espesor de la celda y por consiguiente del polisilicio utilizado. La producción de paneles locales a partir de la etapa de fabricación de la celda podría disminuir el EPBT del panel en comparación con aquellos producidos en China debido a la eficiencia de la red eléctrica argentina.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dario Gomez, Laura Dawidowski, Ismael Eyras, Verónica Copello y Hernán Xargay por la colaboración y el aporte durante la realización de este trabajo.

### REFERENCIAS

- ALDAR . (2020). Dirección URL: <https://aldar.com.ar/>
- Amerisolar. (2020). AS-6M144-HC Module Specification 2102-1040-35mm. Dirección URL: <http://www.weamerisolar.com/>
- Centro Investigación de Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles (CIRSOC). (2005). Dirección URL: <https://hormigonelaborado.com/wp-content/uploads/2019/07/18-CIRSOC-201-Reglamento.pdf>
- de Wild-Scholten, M. (2013). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells.*, 119(ISSN 0927-0248), 296-305.
- Deriche, M. A., Hafaiab, A., y Mohammedia, K. (2018). EPBT and CO2 emission from solar PV monocrystalline silicon. *International Conference on Applied Smart Systems. ALGERIA: IEEE.*
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. (2022). Dirección URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>
- Frischknecht, R., Heath, G., Rauegi, M., Sinha, P., y de Wild-Scholten, M. (2016). *Methodology Guidelines on Life Cycle*, 3rd Edition.
- Global solar atlas. (2023). Dirección URL: <https://globalsolaratlas.info/map>
- IEA PVPS. (2022). *Trends in Photovoltaic Applications 2022 - Photovoltaic power systems Programme.*
- IEA PVPS. (2023). *Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach. Snapshot of Global PV Markets 2023.*
- Ineldec. (2023). *Catalogo - Ineldec Ingenieria electrica.* Dirección URL: [https://ineldec.com/wp-content/uploads/2021/01/FT-CABLE-PV-FOTOVOLTAICO\\_0.pdf](https://ineldec.com/wp-content/uploads/2021/01/FT-CABLE-PV-FOTOVOLTAICO_0.pdf)
- IRENA. (2023). *Renewable capacity highlights.*
- Marceau, M., Nisbet, M., y VanGeem, M. (2007). *Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete.* Portland Cement Association,.
- Meteonorm Software. (2023). *Worldwide irradiation data.* Dirección URL: <https://meteonorm.meteotest.ch/en/>
- Müller, A., Friedrich, L., Reichel, C., Herceg, S., y Mittag, M. (2021). A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230 111277.
- Ntziachristos, L., y Samaras, Z. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.*
- Pacca, S., Sivaraman, D., y Keoleian, G. A. (2007). Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. Elsevier, 3316–3326.
- Ritchie, H., Roser, M., y Rosado, P. (2022). *OurWorldInData.org.* Retrieved from <https://ourworldindata.org/energy>
- SeaRates. (2023). Dirección URL: <https://www.searates.com/es/>
- Secretaría de Energía. (2021). Dirección URL: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia>
- Secretaria de Energia. (2022). Dirección URL: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte\\_anual\\_202226012023.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reporte_anual_202226012023.pdf)
- SMA Solar Technology AG. (2023). Dirección URL: <https://www.sma.de/en/>
- Smith, B., Woodhouse, M., Horowitz, K., Silverman, T., Zuboy, J., y Margolis, R. (2020). *Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results.* Retrieved from National Renewable Energy Laboratory: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/78173.pdf>
- Spielmann, M., Bauer, C., Dones, R., y Tuchschnid, M. (2007). *Transport Services.* Ecoinvent Report N° 14.
- Todde, G., Murgia, L., Carrelo, I., Hogan, R., Pazzona, A., Ledda, L., y Narvarte, L. (2018). *Embodied Energy and Environmental Impact of Large-Power Stand-Alone Photovoltaic Irrigation Systems.* Energies.
- Wu, P., Ma, X., Ji, J., y Ma, Y. (2017). Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study. *Energy Procedia*, 68 – 74.