

ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES DE PEROVSKITAS EN ARGENTINA MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA E INDICADORES ENERGÉTICOS

N. B. Correa Guerrero ^{1,2}; W. O. Herrera Martínez ^{1,2} y M. D. Pérez ^{1,2}

¹ Departamento Energía Solar, GIYA, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, CONICET, Avda. Gral. Paz 1499, San Martín 1650, Buenos Aires, Argentina

² Instituto de Nanociencia y Nanotecnología, CNEA-CONICET, Centro Atómico Constituyentes, Av Gral Paz 1499, San Martín 1650, Buenos Aires, Argentina
Email: correag.nb@gmail.com

Recibido: 11-03-19; Aceptado: 03-06-19.

RESUMEN.- Las celdas solares de perovskita (PSC por sus siglas en inglés) son objeto de estudio en el campo de las energías renovables gracias a sus elevadas eficiencias de fotoconversión. En este trabajo se presenta el análisis de ciclo de vida (ACV) de la cuna a la puerta de PSC fabricadas en C.A.B.A. para evaluar su impacto adoptando como unidad funcional 1m² de PSC fabricada considerando la configuración de una celda típica construida en los laboratorios de CNEA mediante *spin coating*. Se realizó un estudio de indicadores energéticos EPBT y EROI (*Energy PayBack Time* y *Energy Return of Investment*) de donde se obtuvo el tiempo de vida requerido para que la fabricación de los dispositivos pueda ser viable energéticamente. Además se estudió cómo varían estos según la localidad donde se implementen los dispositivos y cómo sería la variación de energía en todo el proceso si se aplican técnicas de encapsulado. Las PSC con eficiencias de 15% alcanzaron valores de EPBT de 10 meses en C.A.B.A., y valores de EROI comparables a otras tecnologías fotovoltaicas si se extrapola el tiempo de vida a 5 años como mínimo. Además del ACV se pudo observar que el mayor aporte energético está dado por el tipo de proceso elegido en la fabricación.

Palabras claves: Celdas solares de perovskita, Análisis de ciclo de vida, Indicadores energéticos.

FACTIBILITY STUDY OF PEROVSKITE SOLAR CELLS FABRICATION IN ARGENTINA BY LIFE CYCLE ASSESSMENT AND ENERGY INDICATORS

ABSTRACT.- Perovskite solar cells (PSC) are a relevant subject of study in the field on renewable energies due to their exceptional photoconversion efficiency. Even though the laboratory reports are very promising, it is necessary to perform a scale-up factibility analysis in order to determine if PSCs can become a useful technology. In this report we performed a life cycle assessment (LCA) from-cradle-to-door of PSCs fabricated in the Buenos Aires city area in order to evaluate the impact of each fabrication process. The functional unit consist of cells of 1m² prepared at the CNEA laboratories via spin coating. The energy payback time (EPBT) and the energy return of investment (EROI) were analysed in order to examine the energy generation of the PSCs. Additionally, we studied those indicators under different conditions like solar irradiation and incorporating an extra encapsulation step in the PSC fabrication device. EPBT values for PSC with 15% photo conversion efficiency (PCE) result in 10 months for Buenos Aires. Moreover, the EROI values were similar to those reported in literature. From the LCA we could determine that the major energy intake is due to the kind of technology of choice for the device fabrication.

Keywords: Life cycle assessment, Perovskite solar cells, Energy payback time, Energy return of investment

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas fuentes energéticas de bajo impacto ambiental es de fundamental importancia para satisfacer la continua demanda energética reduciendo asimismo la emisión de contaminantes causante del calentamiento global. La superficie terrestre recibe en una hora más energía lumínica proveniente del sol que la consumida anualmente en el planeta. Dado este gran flujo energético, la energía solar

constituye la principal fuente alternativa renovable de bajo impacto ambiental. La nueva generación de celdas híbridas orgánicas-inorgánicas basadas en perovskitas presenta perspectivas muy alentadoras en lo que respecta al aumento de las eficiencias de fotoconversión así como en la reducción de los costos de procesamiento e impacto ambiental. En muy poco tiempo se ha mostrado un incremento de las eficiencias desde cerca del 10% para las primeras fabricadas en el 2012, llegando al 23.7% en el 2018 (NREL, 2019) en lo que

constituye una escalada sin precedentes para otras tecnologías fotovoltaicas (Green, 2014; Grätzel, 2014).

Para poder considerar esta tecnología en el mercado energético se tiene que analizar la factibilidad del proceso de fabricación de manera eficiente (Jaume-Adrià, 2018). El análisis de ciclo de vida (ACV) es la herramienta que permite estudiar y valorar los diferentes aspectos medioambientales en el proceso de fabricación de un producto permitiendo desarrollar métodos adecuados para reducir posibles impactos negativos al ambiente (ISO 14040, Guinée, 2011).

En Argentina actualmente los dispositivos fotovoltaicos basados en perovskitas son fabricados a escala laboratorio por la técnica de *spin coating* (Taretto, 2017) que presenta limitaciones frente a otras técnicas escalables como *spray pirólisis* o *slot die* (Galagan, 2018; Fabini, 2015).

Los análisis de ciclo de vida reportados en la bibliografía internacional analizan las diferentes técnicas reportadas (Celik, 2017) extrapolando las técnicas a procesos escalables a nivel industrial, o se realizan con los procesos de fabricación en los laboratorios propios del país de origen (Jaume-Adrià, 2018). El estudio de ACV de la fabricación de celdas solares de perovskitas (PSC) para el caso local permitirá tener una noción sobre la conveniencia de realizar la investigación y desarrollo de este tipo de dispositivos en el país.

El objetivo del ACV presentado en este trabajo será valorar los impactos en cada etapa considerando la fabricación de PSC en Argentina con unidad funcional 1m² de PSC fabricada. La configuración de la celda es FTO/TiO₂/CH₃NH₃PBI₃ (MAPI)/Spiro-Ometad/Au, cuyas capas, exceptuando los contactos, son fabricadas mediante *spin coating*. El análisis de ciclo de vida será ejecutado de la cuna a la puerta ya que aún no se cuenta con datos suficientes referentes a la disposición final de los dispositivos para el caso local. Se evaluarán los valores de EPBT (*energy payback time*) y EROI (*energy return of investment*).

2. MÉTODOS

2.1. Análisis de inventario.

Para el análisis de inventario se consideró la fabricación de celdas realizada en nuestro laboratorio (Departamento Energía Solar, CNEA) desde la adquisición de materias primas hasta la finalización del producto listo para su uso.

Para determinar las entradas provenientes de la fabricación se tiene en cuenta el proceso productivo a escala laboratorio para celdas de 6.25 cm². Las mismas pueden ser escaladas a áreas de 100 cm² considerando los mismos métodos de fabricación. El tamaño final del módulo es de 1m² considerando un arreglo de 10 celdas en paralelo y en serie con un área total activa del 90%, como se muestra en la figura 1 (García Valverde, 2010).

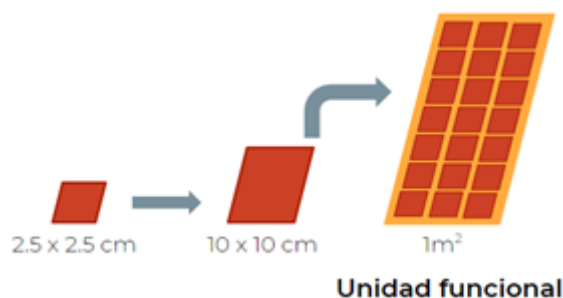


Fig.1: Esquema ilustrativo para la determinación de unidad funcional

2.2. Proceso productivo.

El proceso de fabricación de celdas en el laboratorio consta de las siguientes etapas:

- 1- lavado de sustratos de FTO (SnO₂ dopado con F)
- 2- fabricación de TiO₂ densa
- 3- fabricación de TiO₂ porosa
- 4- fabricación de perovskita MAPI
- 5- fabricación Spiro-OMeTAD (C₈₁H₆₈N₄O₈, CAS: 207739-72-8)
- 6- depósito de contacto superior, Au

El primer paso involucra el uso secuencial de agua y varios solventes. Las etapas 2-5 se realizan por *spin coating* a partir de las soluciones precursoras correspondientes y posterior tratamiento térmico y tratamiento con plasma luego de la etapa 3. El último paso se realiza mediante evaporación del Au en vacío por efecto Joule.

Una vez fabricado el dispositivo se procede a caracterizarlo para evaluar las eficiencias de conversión fotovoltaica.

2.3. Emisiones.

Las emisiones son calculadas mediante el inventario de salida, contemplando la eficiencia de las etapas de fabricación. Durante la síntesis se asume un valor de eficiencia del proceso de *spin coating* del 30% ya que una gran parte de los materiales se pierden como residuos (García-Valverde, 2010; Gong, 2015). Durante la primera etapa de limpieza también se generan importantes emisiones, dado que el agua no se reutiliza y es considerada residuo líquido. Durante la fabricación de la película de perovskita también se debe considerar la remoción de los solventes de las soluciones hacia la atmósfera. La totalidad de solventes se considera como pérdida.

3. PARÁMETROS ENERGÉTICOS

3.1. Indicadores energéticos.

Los parámetros característicos de análisis para dispositivos fotovoltaicos son el EPBT y el EROI. El primero es la relación entre la energía utilizada y la energía de salida que se representa con la siguiente ecuación (Celik, 2018):

$$EPBT = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (1)$$

Donde E_{in} es la energía demandada durante el proceso en unidades de [MJ/m²] mientras E_{out} [MJ/ m²año] es la energía que puede generar la celda solar en un año definida mediante la siguiente ecuación:

$$E_{out} = I \times PCE \times RP \times \varepsilon \quad (2)$$

Dependerá de la irradiancia solar de la región (I), la eficiencia de fotoconversión de la celda (PCE), una relación de *performance* (RP) que indica el cociente entre la energía de salida real y la teórica de un módulo fotovoltaico, que en general adopta un valor de 0.8 y por último un coeficiente conversión de energía a electricidad (ε), que es la conversión kWh a MJ. (Celik, 2017).

El EROI permite tener una noción del rango de devolución energético durante el tiempo de vida del dispositivo, es por esto que se relaciona con EPBT de la siguiente forma (Hall, 2009):

$$EROI = \frac{\text{Tiempo de vida}}{EPBT} \quad (3)$$

Para obtener la demanda energética de entrada se diferencian dos grandes aportes: el primero se debe a la entrada energética durante el proceso productivo y el segundo por la energía acumulada proveniente de la síntesis requerida para obtener cada reactivo químico utilizado (Celik, 2018; Hall, 2009).

4. RESULTADOS

4.1. Inventario de ciclo de vida.

En la Tabla 1 se presenta el inventario para la fabricación de dispositivos a escala laboratorio y montado a un módulo de 1m². Cabe destacar que los valores de energía en el inventario se describirán más adelante en las tablas 3 y 4.

4.2. Emisiones.

Teniendo en cuenta las consideraciones previas se realizó el inventario para las emisiones generadas en la fabricación de 1m² de PSC (Tabla 2).

El mayor aporte de emisiones se debe principalmente a los residuos sólidos debido a la ineficiencia de la técnica de spin coating que produce una alta cantidad de material no aprovechado. Por otro lado, los residuos líquidos se originan esencialmente en la etapa de limpieza y lo único que se emite al aire son los solventes utilizados para la deposición de la perovskita.

4.3. Parámetros energéticos.

4.3.1. Energía de entrada y salida.

A modo de facilitar los cálculos de energía de entrada, sólo se considera la energía acumulada de los insumos químicos sólidos y no de los solventes debido a que la energía de estos es despreciables frente a la energía de los primeros (García-Valverde, 2010). En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de actividad, es decir la energía embebida por unidad de masa que presenta cada elemento, y la energía acumulada según el análisis de inventario.

Tabla 1: Análisis de inventario para PSC

Capa	Compuesto	u.	Celdas 100cm ²	Módulo 1m ²
Contacto transparente	FTO	m ²	0.1	1.000
	TiCl	g	0.0001	0.0012
ETL	Pasta TiO ₂	g	1.3440	12.096
	PbI ₂	g	4.5325	40.793
Perovskita/capa activa	MAI	g	1.5623	14.061
	Spiro-OMeTAD	g	0.5784	5.2056
HTL	Sal de Litio	g	0.0728	0.6552
	Oro	g	0.27	2.7000
Contacto posterior	Agua de red	l	1.0000	1.0000
	Agua miliQ	l	0.1040	0.1040
	Isopropanol	l	0.0260	0.2600
	Etanol (96%)	l	0.0260	0.2600
	Etanol Absoluto	l	0.0970	0.8730
Solventes	Clorobenceno	l	0.0085	0.1300
	DMF	l	0.0073	0.0654
	DMSO	l	0.0007	0.0063
	Acetonitrilo	l	0.0001	0.0013
	Tert-butil piridina	l	0.0002	0.0021
Gases	Nitrógeno	m ³		
Energía	Equipos	kWh	14.246	156.70
	Insumos	kWh	0.1310	1.1830

Tabla 1: Emisiones generadas durante el proceso productivo

Medio	Compuesto	u.	Módulo 1m ²
Sólido	ETL	g	0.482
	MAPI	g	48.07
	HTL	g	5.300
	Oro	g	0.174
Líquido	Agua jabonosa	l	1.000
	Agua miliQ	l	0.104
	Etanol (96%)	l	0.260
Aire	Clorobenceno	m ³	0.093
	DMF	m ³	6.543x10 ⁻⁵
	DMSO	m ³	0.628x10 ⁻⁵

En la Tabla 4 se presenta el consumo energético durante todo el proceso productivo de una celda fotovoltaica, contemplando la potencia de cada equipo y el tiempo de uso que requiere cada uno.

Cabe destacar que para considerar la energía de la unidad funcional se tiene que considerar el ensamblaje de todas las celdas necesarias para montar el módulo fotovoltaico, por lo que la energía se incrementa 10 veces y considerando un

coeficiente por gastos energéticos adicionales originados en el ensamblado del módulo

Tabla 3: Energía acumulada en cada reactivo

Compuesto	Actividad [kWh/kg]	Energía acumulada [kWh]
FTO	2.97 [20]	9.21×10^{-1}
Pasta TiO ₂	0.003 [14-19]	3.13×10^{-5}
PbI ₂	0.133 [7]	5.43×10^{-3}
MAI	9.24 [7]	1.30×10^{-1}
Spiro-OMeTAD	24.3 [7]	1.26×10^{-1}
Total energía acumulada :		1.183

La energía total requerida para todo el sistema considerando ambos aportes es de 157.9 kWh para la unidad funcional. En la Tabla 5 se observa el aporte de cada una de las componentes energéticas.

Se puede observar que la energía de los reactivos resulta despreciable frente a la energía que requiere el proceso productivo. Si se desglosan ambos términos se observa el grado de aporte que posee cada reactivo en la fabricación de 1m² de módulo fotovoltaico (Figura 2), y la proporción de equipos con más gasto energético durante el proceso (Figura 3).

La Figura 2 muestra que el mayor aporte energético por reactivos está dado por el FTO, mientras que en la Figura 3 se observa que la evaporación y los tratamientos térmicos son los más demandantes energéticamente como es de esperar.

Por otro lado, la energía que se genera por el funcionamiento del módulo depende del recurso solar en la región donde se instale. Para el caso local, se utiliza el correspondiente a la irradiancia solar de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires de 1.53MW/m².año (Grossi Gallego, 2012). Considerando que la eficiencia de las celdas solares de laboratorio ronda el 14%, a los efectos de considerar en los cálculos la unidad funcional (módulo) se evaluará un caso optimista del 15% y una situación desfavorable del 10% para la eficiencia de conversión fotovoltaica del módulo

Tabla 4: Energía requerida para un dispositivo de 10cm² durante el proceso productivo

	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Tiempo de uso [h]	Energía [kWh]
Evaporadora Leybold UNIVEX 300	230	16.00	3680	1	3.680
Fuente Leybold	70	4.000	280	0.0833	0.023
Microondas (Plasma) Samsung	220	2.273	500	0.0039	0.002
Plancha calefactora Wisd MSH - 20D	230	2.609	600	0.3667	0.220
Balanza RADWAG A5 220/R2	220	0.014	3	0.2500	0.001
Mufla INDEF 273	220	15.00	3300	3.0000	9.900
Simulador solar LCS 100 AM1.5	230	0.435	100	0.2500	0.025
Lock-in	200	6.500	1300	0.2500	0.325
Bomba vacío 1/2 HP	220	1.695	372.85	0.0039	0.001
Lavador ultrasónico	220	0.250	55	1.0000	0.055
Spin coater SCS 6800	220	1.300	286	0.0486	0.014
TOTAL [kWh]					14.246

Tabla 5: Energía de las entradas para PSC

	kWh/m ²	%
Energía de reactivos	1.183	0.75
Energía del proceso	156.7	99.25
Total	157.9	

4.4. EPBT y EROI.

Con los valores de energía de entrada y de salida establecidos anteriormente se calculó el EPBT y el EROI. Los valores de EPBT para ambas eficiencias de conversión son anuales y se presentan en la Tabla 5.

De esta forma el EPBT anual ronda entre 0.86 años (10 meses) o 1.29 (15 meses). En consecuencia, se podría

recuperar toda la energía consumida por el proceso productivo mediante generación fotovoltaica entre los 10 a 15 meses. Como se mencionó previamente, el EROI no solo depende de la eficiencia de la celda sino también de la irradiancia anual local en cada región. Se puede estudiar la variación del EPBT en función del lugar geográfico como se observa en la Figura 4.

El mapa se realizó con los datos de irradiancia global promedio anual de Argentina obtenidos de Global Solar Atlas, una aplicación de uso libre desarrollada y operada por Solargis S.R.O. (Solargis, 2016). Utilizando como eficiencia del módulo un 15% de PCE se observa que el EPBT en Argentina se encuentra en el rango de los 0.72 y 0.36 años, lo cual se traduce en una recuperación energética del proceso de fabricación de 11 y 4 meses respectivamente, como se observa en el mapa para la zona informada.

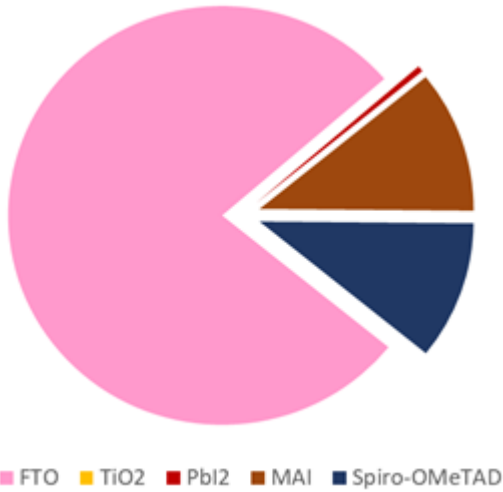


Fig. 1: Aporte energético de cada reactivo durante la fabricación de PSC

Tabla 6: Valores de EPBT anuales considerando diferentes eficiencias de fotoconversión (irradiación media anual 1.53 MW/m².año - Bs.As.)

	PCE 15%	PCE 10%
Energía de entrada [kWh/m²]	157.884	
Energía de salida [kWh/m².año]	660.96	440.64
EPBT anual [año]	0.86	1.29

Se observa que el EPBT adopta los valores más altos en la región de litoral y provincia de Buenos Aires, es decir que en estas zonas se requiere mayor tiempo requerido para poder generar la energía consumida en la fabricación. En el noroeste Argentino se pueden apreciar los valores más bajos de EPBT donde la recuperación energética se produce en un plazo de tiempo menor debido a la elevada irradiación promedio (Righini, 2011). Cabe destacar que las condiciones climáticas del NOA la sitúan entre las regiones más favorables a nivel mundial para los proyectos de energía fotovoltaica en el país.

La Figura 5 muestra que los valores más favorables de EPBT para PSCs se ubican en aquellas regiones donde se encuentran ya instalados los principales parques solares fotovoltaicos.

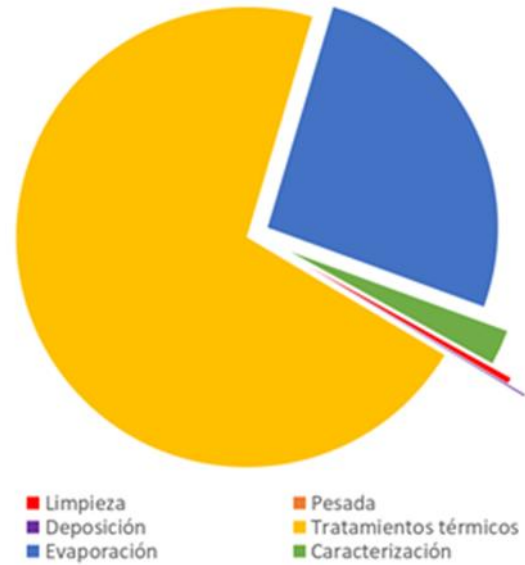


Fig.3: Energía aportada por la fabricación. Se especifica la participación de cada etapa del proceso.

Cabe destacar que no se contempla el sur de Argentina porque no existen datos para las zonas al sur de la provincia de Río Negro en Global Solar Atlas. De todas maneras, esta información no sería destacable en nuestro estudio debido a que el recurso solar no es tan significativo como en el norte del país, y las fuentes renovables elegidas para la región sur son por ello las eólicas.

Conociendo el EPBT, el EROI se calculó con el tiempo de vida actual de un dispositivo (3 meses) (Del Negro, 2018) y también a diferentes tiempos de vida para estudiar el grado de recuperación energética con cada tiempo de vida. Estos valores fueron comparados con diferentes tecnologías fotovoltaicas según valores reportados en la literatura (Tabla 7).

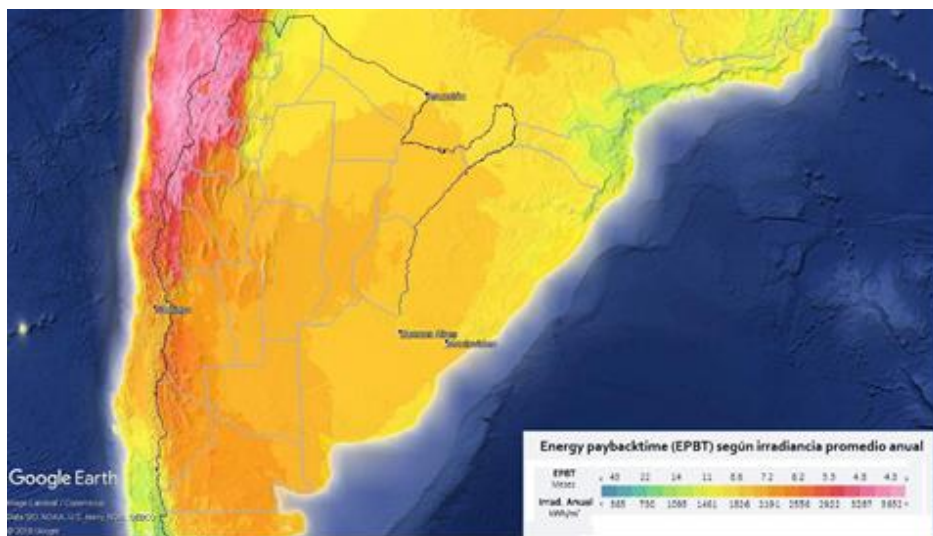


Fig.4: Variación de EPBT según la irradiación promedio anual en Argentina (PCE 15%) (Solargis, 2016)

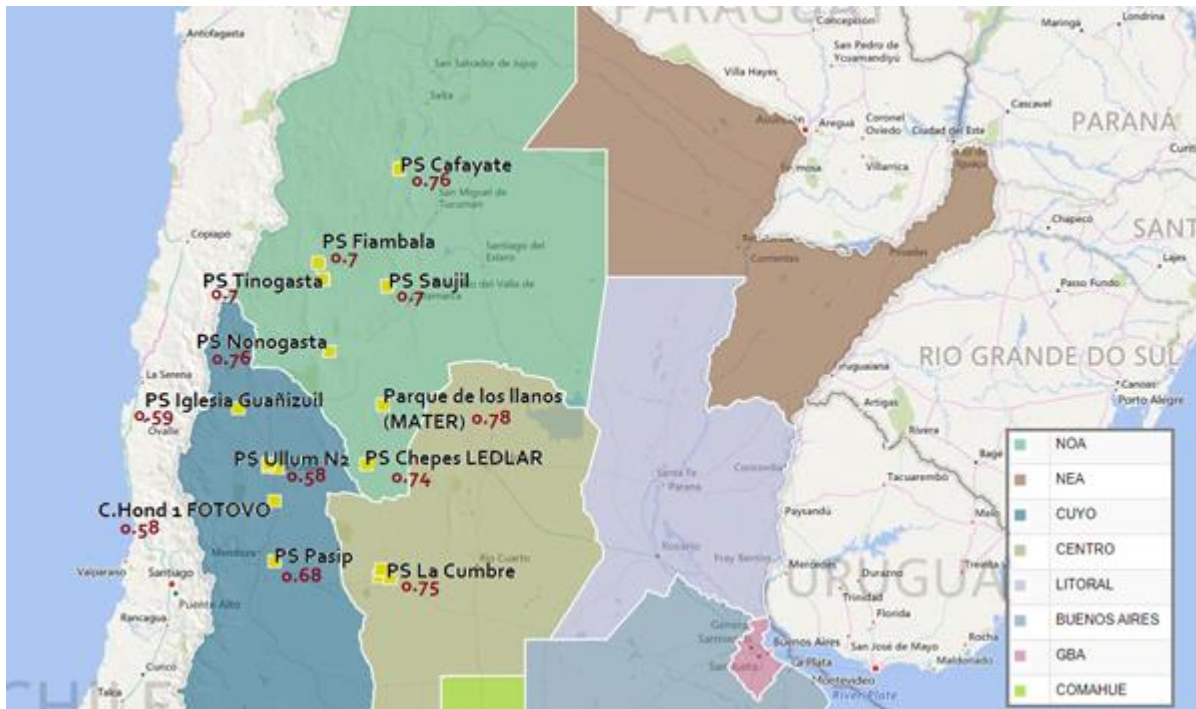


Fig. 5: EPBT (PCE 15%) calculado en las zonas donde se localizan parques fotovoltaicos instalados en el país. Además se encuentran marcadas las diferentes regiones energéticas del País (CAMMESA, 2019).

Se observa que las PSC generadas en Argentina tienen un retorno energético similar al valor reportado para otras tecnologías que también usan perovskitas como las celdas Tandem. EROI mayores a 1 son deseables ya que se durante el tiempo de vida del módulo se produce más energía que la consumida para su fabricación. Por lo tanto para estos módulos se requerirían tiempos de vida mayores a 10 meses para asegurar el balance positivo en Capital Federal. Por otro lado, si los tiempos de vida fueran comparables con las tecnologías en el mercado (30 años) se obtendrían valores EROI similares a los reportados para dichas tecnologías.

Tabla 7: EROI de PSC y diferentes tipos de tecnologías fotovoltaicas

Tecnología	Tiempo de vida [año]	EROI	Ref.
PSC Arg	0.25	0.3	-
	0.86	1.0	-
	1	1.2	-
	2	2.3	-
	5	5.8	-
	30	34.90	-
Tandem Si-MAPI	5	5.2	[22]
Si-mono	30	38.3	[22]
Si-poli	30	37.9	[22]
CIGS	30	67.3	[22]
CdTe	30	76.1	[22]
Carbón		12.2-	
	40	24.6	[18]

Entre las diferentes estrategias para incrementar el tiempo de vida en celdas solares se encuentran aquellas que se basan en la utilización de nuevos materiales que impidan la degradación de la capa activa, es decir la perovskita, o mediante técnicas de encapsulado. De esta manera se puede prolongar el tiempo de vida de la celda permitiendo llegar a una vida útil en donde sea redituable energéticamente la fabricación de este tipo de dispositivos.

Para poder estimar el aporte que supone la incorporación de un encapsulado en el proceso productivo se puede tomar como modelo la deposición de polimetilmetacrilato (PMMA) como encapsulante en PSC (Boustead, 2005). El mismo se realiza mediante *spin coating* a partir de una solución de PMMA y clorobenceno. El principal aporte energético estará en el proceso de deposición del encapsulante y también al considerar la energía acumulada que presenta el polímero. En las Tablas 8 y 9 se puede ver la variación del aporte energético de ambas variables:

Tabla 2: Variación del aporte energético de la energía acumulada por reactivos considerando el encapsulado.

Compuesto	Energía acumulada sin PPMA		Energía acumulada con PMMA	
	[kWh]	%	[kWh]	%
FTO	9.21×10^{-1}	77.856	9.21×10^{-1}	76.194
Pasta TiO ₂	3.13×10^{-5}	0.003	3.13×10^{-5}	0.003
PbI ₂	5.43×10^{-3}	0.459	5.43×10^{-3}	0.449
MAI	1.30×10^{-1}	10.986	1.30×10^{-1}	10.752
Spiro-OMeTAD	1.26×10^{-1}	10.697	1.26×10^{-1}	10.468
PMMA	-	-	2.58×10^{-2}	2.134
Total		1.18		1.21

Tabla 9: Variación del aporte energético en la energía del proceso productivo considerando el encapsulado

Etapa	% sin PMMA	% con PMMA
Limpieza	0.41	0.41
Pesada	0.01	0.01
Deposición	0.10	0.15
Tratamientos térmicos	71.04	71.00
Evaporación	25.99	25.98
Caracterización	2.46	2.46
Total kWh/m²	156.71	156.79

En ambos casos el aporte energético en exceso que generaría realizar un encapsulado a la PSC sería despreciable, obteniendo un aumento menor al 2.5% por reactivos y menor al 1% por proceso productivo, siendo este último el aporte más relevante en la energía consumida total. De esta forma el agregado de un encapsulado no generaría un impacto apreciable al rendimiento energético, sin embargo debe considerarse si la probable ventaja de implementar el PMMA teniendo en cuenta la prolongación del tiempo de vida para los dispositivos encapsulados.

5. CONCLUSIONES

Se pudo realizar un análisis de ciclo de vida desde la obtención de materias primas hasta la elaboración de un módulo solar, considerando las facilidades que se pueden encontrar en un laboratorio de Argentina y teniendo en cuenta el recurso solar de la región. Se utilizó el ACV como una herramienta para poder identificar qué factores pueden influir en escala macro a la mejora de este tipo de tecnologías y si puede ser una tecnología conveniente para su fabricación en el país.

Mediante el estudio de emisiones se observa que el principal aporte de residuos está asociado a la técnica de fabricación elegida.

En contraste con las tecnologías fotovoltaicas ya instaladas, las PSC poseen pocos requerimientos energéticos, y el principal consumo se origina en el proceso productivo (Kadro, 2016). El gasto energético se podría reducir aún más modificando el tipo de tratamientos térmicos o la técnica de deposición de contactos. En cuanto a la energía acumulada en reactivos el mayor aporte es por el sustrato conductor (Celik, 2018). Entonces un parámetro a considerar a futuro sería el tipo de disposición del FTO, y en el mejor de los casos una reutilización del material para así disminuir el impacto energético del proceso.

Gracias al estudio de indicadores energéticos como EPBT y EROI se corroboró la alta capacidad de recuperación energética que presenta este tipo de celdas. Actualmente, considerando un tiempo de vida de 3 meses, la pérdida energética ocasionada por la fabricación no es compensada por la generación. Sin embargo, si se extiende el tiempo de vida del módulo por técnicas de encapsulado clásicas y utilizadas ampliamente por todas las tecnologías en tan solo 10 meses en la C.A.B.A., se logra la recuperación energética necesaria sin tener un impacto significativo en los aportes energéticos del proceso productivo.

6. REFERENCIAS

- Boustead, I. for Plastics Europe (2005). *Eco-profiles of the European Plastics Industry. Polymethyl methacrylate (PMMA)*. Plastics Europe, Brussels.
- Cammesa (2019). GeoSADI. Argentina. Recuperado de <https://aplic.cammesa.com/geosadi/>
- Celik et al. (2018). "Energy Payback Time (EPBT) and Energy Return on Energy Invested (EROI) of Perovskite Tandem Photovoltaic Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. **8**, 1, 305-309
- Celik, I.; ; Phillips A. B.; Song, Z.; Yan, Y.; Ellingson, R. J.; Heber J. H.; Apul, D. (2017). Environmental analysis of perovskites and other relevant solar cell technologies in a tandem configuration. *Energy Environ. Sci.* **10**, 1874-1884
- Del Negro, N. (2018). *Daño por radiación en celdas solares de perovskita*. Universidad Nacional de San Martín, Instituto Sábado. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- Fabini, D. (2015). Quantifying the Potential for Lead Pollution from Halide Perovskite Photovoltaics. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. **6**, 18, 3546-3548.
- Galagan, Y.; Di Giacomo, F.; Gorter, H.; Kirchner, G.; de Vries, I.; Andriessen, R., & Groen, P. (2018). Roll to-Roll Slot Die Coated Perovskite for Efficient Flexible Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **8**, 1801935.
- García-Valverde, R.; R., Cherni, J. A. and Urbina, A. (2010). Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **18**, 535-558.
- Gong, J.; Darling, S. B.; You, F. (2015). Perovskite photovoltaics: life-cycle assessment of energy and environmental impacts. *Energy Environ. Sci.* **8**, 1953-1968
- Grätzel, M. (2014). The light and shade of perovskite solar cells. *Nature Mat.* **13**, 838-842
- Green, M. A.; Ho-Baillie, A.; Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*. **8**, 506-514.
- Grossi Gallegos, H.; Righini, R. (2012). *Angulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios*. ASADES, Buenos Aires, Argentina.
- Guinée, J. B., R. Heijungs, G. Huppes, A. Zamagni, P. Masoni, R. Buonamici, T. Ekvall and T. Rydberg (2011). Life cycle assessment: past, present and future. *Environ. Sci. Technol.* **45**, 1, 90-96.
- Hall, C.A.S.; Balogh, S.; Murphy, D.J. (2009). What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies*. **2**, 25-47.
- ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment
- J. Zhang, X; Gao, Y.; Deng, B.; Li, C. Yuan. (2015) Life cycle assessment of titania perovskite solar cell technology for sustainable design and manufacturing. *ChemSusChem*. **8**, 3882.
- Jaume-Adrià, A.; et al. (2018). Photovoltaic Modules: Life Cycle Assessment of Pre-industrial Production Process. *iScience*. **9**, 542-551.
- Kadro, J. M.; Pellet, N.; Giordano, F.; Ulianov, A.; Müntener, O., Maier; J. Hagfeldt, A. (2016). Proof-of-concept for facile perovskite solar cell recycling. *Energy & Environmental Science*. **9**, 10, 3172-3179.
- NREL (2018). Best research – Cell efficiencies
- Raugei, M.; et al. (2017). Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response. *Energy Policy*. **102**, 377-384.
- Righini, R.; Grossi Gallegos, H. (2011). Mapa de energía solar colectada anualmente por un plano inclinado, un ángulo

óptimo en la república Argentina. Cuarto Congreso Nacional – Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011, Mar del Plata, Argentina.

Serrano-Lujan, L.; L., Espinosa, N., Larsen-Olsen, T. T., Abad, J., Urbina, A., Krebs, F. C. (2015). Tin- and Lead-Based Perovskite Solar Cells under Scrutiny: An Environmental Perspective. *Adv. Energy Mater.* **5**, 1501119.

Solargis (2016). *World Global horizontal irradiation Google Earth Data*. Obtained from the Global Solar Atlas, a free, web-based application is developed, owned and operated by the Solargis s.r.o. (Solargis) in partnership with the World Bank Group, utilizing Solargis data, with funding provided by the Energy Sector Management Assistance

Program (ESMAP). For additional information: <https://globalsolaratlas.info>

Syrrakou, E; Papaefthimiou, S.; Yianoulis, P. (2005). Environmental assessment of electrochromic glazing production. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* **85**. 205-240.

Taretto, K.; Soldera M; Koffman- Frischknecht, A. (2017) Material Parameters and Perspectives for Efficiency Improvements in Perovskite Solar Cells Obtained by Analytical Modeling. *IEEE Journal of Photovoltaics.* **7**, 1, 206-213.

Wernet, G.; et al. (2016). The ecoinvent database version 3 (part 1): Overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assessment.* **21**, 9, 1218–1230.