

HERRAMIENTA PARA ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN EDIFICACIONES E INTEGRACIÓN ARQUITECTÓNICA

Ismael Eyras^{1,2}, Mariela E. Videla¹

¹Departamento Energía Solar, Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral Paz 1499, (1650) San Martín, Pcia. de Buenos Aires, Argentina, Tel: (+ 54 - 11) 6772 - 7938

²Instituto de la Espacialidad Humana IHE-UBA, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires
eyras@cnea.gov.ar , mvidela@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN: Se presenta en este trabajo una herramienta didáctica destinada a proyectistas e instaladores que disponen sus sistemas solares fotovoltaicos sobre azoteas de edificios, cubiertas inclinadas y sobre otras superficies edilicias o no. Dichas superficies no siempre posibilitan una perfecta inclinación y orientación de los arreglos de paneles para lograr la máxima generación que el equipo permite. A través de un poliedro de generación solar es posible estimar de manera rápida, sencilla y con un bajo grado de error, la energía disponible para instalar estos equipos en edificios ubicados en los principales centros urbanos de la República Argentina y en diferentes inclinaciones y orientaciones distintas de la ideal. Esta herramienta también puede resultar de utilidad para aquellos ciudadanos interesados en realizar estimaciones de generación fotovoltaica en instalaciones dentro de la normativa de generación distribuida actual.

Palabras clave: Herramienta didáctica. Difusión. Energía solar. Sistemas fotovoltaicos. Integración arquitectónica. Generación distribuida.

INTRODUCCIÓN

Los interesados en instalar equipos de energía solar en las cubiertas de sus edificios, los arquitectos y otros profesionales, así como aquellos que se forman en energía solar fotovoltaica, suelen presentar dudas acerca de la factibilidad de instalar sus equipos en orientaciones e inclinaciones diferentes a las óptimas recomendadas. Sabemos que las desviaciones respecto del Norte franco y su ángulo de máxima generación anual pueden producir caídas significativas en la generación del equipo, sin embargo, la estimación de estas pérdidas no es fácil de calcular rápidamente. Los métodos habituales de cálculo para dimensionar estas pérdidas son procesos matemáticos laboriosos, que se realizan comúnmente con la ayuda de programas específicos para estimación de la generación fotovoltaica como PVSYS[®], SAN[®] o softwares equivalentes. Muchos de ellos son programas de difusión limitada u onerosa y requieren para su manejo conocimientos específicos. Otro de los métodos tradicionales para realizar estas estimaciones que se suele utilizar en cursos y capacitaciones son los discos de radiación solar propios de cada emplazamiento.

Estos discos -si bien su manejo resulta más sencillo que la opción de las simulaciones- presentan la complejidad propia de un sistema de coordenadas polares. El sistema de coordenadas polares se utiliza para posicionar el panel solar o superficie de colección y determinar la irradiancia en dicho plano. La lectura de estos discos no es intuitiva (Figura 1). Para utilizar los discos correctamente los estudiantes precisan encontrar los datos de radiación correspondientes al caso elegido buscando la intersección entre los discos concéntricos (que corresponden a las diversas inclinaciones) y los radios

correspondientes a cada una de las posibles orientaciones del campo de paneles a estudiar.

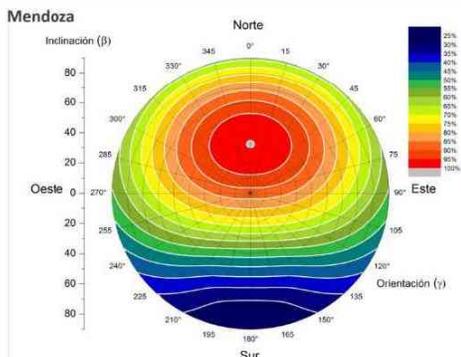


Figura 1: Disco de radiación solar correspondiente a la ciudad de Mendoza- Argentina.
 Fuente: https://www.buenosaires.gob.ar/sites/gcaba/files/recurso__colector_1.pdf

Los poliedros de generación hasta ahora no se han utilizado con fines didácticos, sino reglamentarios: Es común encontrar este tipo de gráficos en los códigos técnicos de la edificación de algunas ciudades europeas (los de Madrid y Barcelona, por ejemplo, en los apartados correspondientes a la energía solar fotovoltaica) en donde se indica cuales orientaciones e inclinaciones son las admitidas por la reglamentación o en su defecto recibirán subsidios para su instalación. Sin embargo, como puede verse en la Figura 2 presentan una oportunidad inmejorable para visibilizar rápida y directamente una representación de la tercera dimensión.

METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DE LOS POLIEDROS

Para el trazado de los poliedros se seleccionaron diferentes ubicaciones geográficas. Se tomaron todas las localidades compuestas de más de 500.000 habitantes incluidas dentro de los llamados “aglomerados argentinos” según la definición del INDEC (INDEC, 2020). Además, se agregaron a este listado, otras ciudades que se sitúan en áreas geográficas de interés en cuanto a irradiación solar y latitud (Tabla 1).

Aglomerados	Ciudad	Latitud
Gran Buenos Aires	CABA	-34.57
Gran Córdoba	Córdoba	-31.4193
-	Corrientes	-27.4678
-	Formosa	-26.1849
Gran La Plata	La Plata	-34.9215
-	Mar del Plata	-38.0004
Gran Mendoza	Mendoza	-32.8908
Gran Rosario	Rosario	-32.9468
Gran Salta	Salta	-24.7859
-	San Carlos de Bariloche	-41.1456
Gran San Juan	San Juan	-31.5375
Gran Santa Fe	Santa Fe	-31.6488
-	Trelew	-43.2489
-	Ushuaia	-54.8108
-	Viedma	-40.8135

Tabla 1: Lista de las ciudades argentinas seleccionadas. Las latitudes están comprendidas en el rango de los 26° y 54° Sur.

La geometría del poliedro propuesto está construida a partir de una sección rombicuboctaedro trazado en perspectiva paralela isométrica. Muestra cinco caras verticales, cinco caras inclinadas y una cara superior horizontal. Las caras verticales (numeradas de 1 a 5) están orientadas en los puntos cardinales E, NE, N, NO y O. Estas caras verticales están acompañadas de otras cinco caras cuyas pendientes son idénticas y corresponden al ángulo de inclinación de máxima generación fotovoltaica anual. Estos ángulos varían según las coordenadas geográficas de cada ciudad seleccionada. La cara superior del poliedro corresponde a un plano horizontal (Figura 2)

De esta manera el poliedro podrá mostrar claramente las posibilidades y limitaciones de disponer paneles solares fotovoltaicos en las orientaciones e inclinaciones más habituales de una supuesta edificación. Las caras verticales corresponden a sus muros o paramentos exteriores, las caras inclinadas corresponden a los distintos faldones o cubiertas inclinadas de la misma edificación. Por último, la cara horizontal nos permite estudiar la posibilidad de instalar paneles solares en forma horizontal sobre una azotea o cubierta. El poliedro no da cuenta de las caras SO S y SE, así como tampoco sus correspondientes planos inclinados, porque estas son justamente las caras no aconsejables para realizar una instalación FV debido a la escasa radiación directa y consiguiente falta de eficiencia que presentan

POLIEDRO DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

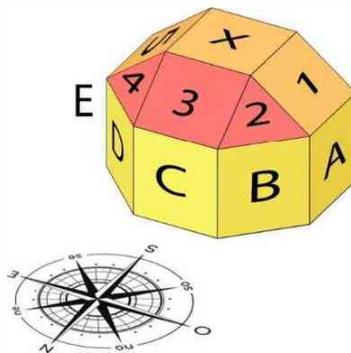


Figura 2: Geometría del poliedro utilizado para confeccionar la herramienta didáctica. Las caras A, B, C, D y E son caras verticales. Las caras 1, 2, 3, 4 y 5 poseen una inclinación dada por el ángulo de máxima generación fotovoltaica anual y orientación dada por las caras verticales. La cara X corresponde a un plano horizontal.

Para el cálculo de los ángulos de inclinación óptimos se usó la aproximación evaluada por Grossi Gallegos y Righini (Grossi Gallegos, Righini, 2013). Esta aproximación lineal depende de la latitud de cada punto geográfico analizado. En nuestro caso, de la latitud de la ciudad seleccionada. La expresión se detalla a continuación:

$$|\beta_{\text{óptimo}}| = 0,6576 \times |\text{latitud}| + 5,5905$$

En donde $\beta_{\text{óptimo}}$ corresponde al ángulo óptimo expresado en grados decimales.

En cada cara del poliedro se estimó la generación fotovoltaica anual utilizando el simulador PVSYST®. Los valores de generación anual de cada cara se referencian como un porcentaje del valor obtenido para la cara orientada al Norte franco cuya inclinación está dada con el ángulo óptimo de generación anual calculado previamente.

SIMULACIONES

Las simulaciones fueron realizadas con las series de irradiancia global típicas de Meteonorm 8.0. Para cada una de estas series se aplicó la generación sintética de PVSYST® basada en el modelo de Dirint (Perez, Ineichen, Maxwell, Seals, Zelenka, 1992). De esta manera se obtuvieron a partir de las series de irradiancia global típicas, las series de irradiancia directa y difusa. Para las simulaciones se utilizó un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red del tipo residencial. Esta instalación de referencia estaba compuesta por 6 paneles conectados en serie de silicio monocristalino con una potencia pico de 275 W. El inversor utilizado fue un modelo comercial de 1,5 kW (sin transformador). Para una mejor organización de los resultados se optó, para cada ciudad, realizar una simulación por cada cara del poliedro. De este modo se crearon 11 configuraciones para cada punto geográfico (Tabla 2) y se obtuvieron sus 11 resultados correspondientes.

En cada simulación se compararon los porcentajes de irradiancia en el plano del arreglo de paneles, la energía generada por los paneles y la energía inyectada a la red (ver Tabla 2). Al tratarse de valores relativos los porcentajes se mantienen constantes y las diferencias entre las energías generadas por los paneles solares y la energía inyectada a la red está dada por la eficiencia del inversor y las pérdidas en el cableado.

Inclinación	Orientación	Irradiancia en los paneles	% Irradiancia en los paneles	Energía FV generada por los paneles	% Energía FV generada por los paneles	Energía inyectada a la red anual	% Energía inyectada a la red anual
°		kWh/m ²	%	kWh	%	kWh	%
23	E	1799.6	90%	2498.2	90%	2362	90%
23	NE	1945.5	97%	2698.6	97%	2554.6	97%
23	N	2001.7	100%	2772.7	100%	2627.5	100%
23	NO	1937.5	97%	2672.8	96%	2530.4	96%
23	O	1786.3	89%	2459.2	89%	2324.9	88%
90	E	1071	54%	1523	55%	1424.6	54%
90	NE	1170.4	58%	1665	60%	1562.1	59%
90	N	1115	56%	1562.7	56%	1463.8	56%
90	NO	1164.4	58%	1638.4	59%	1536.3	58%
90	O	1055.6	53%	1483.3	53%	1386.3	53%
0	-	1866.8	93%	2579.6	93%	2441.6	93%

Tabla 2: Resultados de las simulaciones para la ciudad de Formosa. La cara con una inclinación de 23° cuya orientación es Norte, representa la máxima generación posible en esa zona. Todos los porcentajes se calculan en base a esa cifra.

ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Para cada una de las ciudades se obtuvieron los poliedros de generación fotovoltaica indicando la inclinación óptima del arreglo de paneles para maximizar la generación anual de energía. Además, se muestra la energía máxima de generación para un sistema de 1,5 kW_p como el simulado (Figura 2).

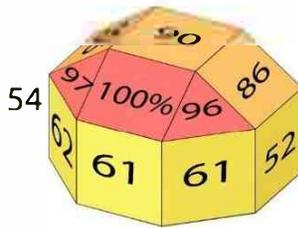


Figura 2: Poliedro de la ciudad de Salta, un sistema de 1,5 kWp con una generación anual máxima de 3148 kWh.

Posteriormente se tomaron los promedios correspondientes a cada cara y se confeccionó una tabla comparativa para todas las ciudades evaluadas (Tabla 5, Anexo 1). Con esta tabla se calcularon los valores medios y sus desviaciones estándar. Para un mejor análisis también se incluyeron los valores mínimos y máximos para cada cara del poliedro (Tabla 3).

Cara	Inclinación	Orientación	Media	Desv.	Mínimo	Máximo
	°		%	%	%	%
5	óptimo	E	85%	4%	76%	90%
4	óptimo	NE	96%	1%	94%	97%
3	óptimo	N	100%	0%	100%	100%
2	óptimo	NO	95%	1%	92%	96%
1	óptimo	O	84%	4%	74%	89%
E	90	E	54%	1%	53%	56%
D	90	NE	63%	3%	60%	72%
C	90	N	62%	5%	56%	76%
B	90	NO	62%	3%	59%	71%
A	90	O	53%	1%	52%	55%
X	0	-	89%	3%	80%	93%

Tabla 3: Valores medios, desviación estándar, máximos y mínimos de cada cara obtenidos a partir de las 15 ciudades analizadas.

Las desviaciones encontradas fueron menores o iguales al 5%. La mayor desviación del 5% se obtuvo en la cara vertical del poliedro cuya orientación coincide con el N. Se observa una leve disminución de los porcentajes en función de la latitud de la ciudad. Correspondiendo los mayores porcentajes de energía generada anual a las ciudades ubicadas en el sector izquierdo de la tabla. Esta tendencia se encuentra señalada mediante la escala de colores para una mejor lectura (Anexo 1, Tabla 5).

Los resultados obtenidos en las tablas precedentes pueden resumirse y expresarse con mayor claridad en la tabla 4, donde se pueden observar agrupados en los respectivos poliedros de generación anual correspondientes a cada aglomerado urbano seleccionado

Salta	
	Ángulo óptimo
	22°
	Máxima energía anual
	3148 kWh
Formosa	
	Ángulo óptimo
	23°
	Máxima energía anual
	2627.5 kWh
Corrientes	
	Ángulo óptimo
	24°
	Máxima energía anual
	2781.6 kWh
Córdoba	
	Ángulo óptimo
	26°
	Máxima energía anual
	2876.4 kWh
Santa Fe	
	Ángulo óptimo
	26°
	Máxima energía anual
	2729.3 kWh

San Juan	
	Ángulo óptimo
	23°
	Máxima energía anual
	3126.2 kWh
Rosario	
	Ángulo óptimo
	27°
	Máxima energía anual
	2769.3 kWh
Mendoza	
	Ángulo óptimo
	27°
	Máxima energía anual
	3015.4 kWh
CABA	
	Ángulo óptimo
	28°
	Máxima energía anual
	2760.1 kWh
La Plata	
	Ángulo óptimo
	29°
	Máxima energía anual
	2742.2 kWh

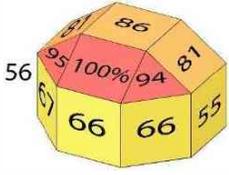
Mar del Plata	
	Ángulo óptimo
	31°
	Máxima energía anual 2734.1 kWh
Viedma	
	Ángulo óptimo
	32°
	Máxima energía anual 2681.6 kWh
San Carlos de Bariloche	
	Ángulo óptimo
	33°
	Máxima energía anual 2854.4 kWh
Trelew	
	Ángulo óptimo
	34°
	Máxima energía anual 2676 kWh
Ushuaia	
	Ángulo óptimo
	42°
	Máxima energía anual 1859.3 kWh

Tabla 4: Poliedros de las ciudades analizadas. Se incluye el ángulo óptimo y la energía anual máxima en cada ciudad seleccionada para un sistema fotovoltaico de 1,5 kW pico

CONCLUSIONES

Los poliedros de generación solar anual pueden construirse para cada ciudad del país. En este trabajo seleccionamos solo algunas de ellas en función de su clasificación como grandes aglomerados y su latitud.

De los resultados obtenidos pudimos observar que para las orientaciones y ángulos de las caras del poliedro las diferencias entre localidades no presentan una variación importante. Las máximas desviaciones no superaron el 5% y están relacionadas con un aumento de la latitud propia de la ciudad. La máxima desviación del 5% se encontró en la cara vertical orientada al norte, en concordancia con la sombra propia generada en función de la latitud del lugar.

Las pequeñas desviaciones nos indican que es posible utilizar los valores promedios para confeccionar un único poliedro para las latitudes sur entre los 26° y 54°. Este único poliedro podría utilizarse -junto a sus máximos, mínimos y desviaciones - como una herramienta de enseñanza.

Si bien es importante conocer todas las posibles opciones en cuanto a ángulos de inclinación y orientaciones para estimar la generación anual de una instalación fotovoltaica, el uso del poliedro resulta más práctico que los discos debido a que el proyectista o instalador generalmente trabaja sobre distintos paramentos que limitan las posibles orientaciones y ángulos del disco. Eliminar esta información de la herramienta no conlleva una degradación en la estimación. En particular debemos indicar que la incorporación de los paneles solares en edificaciones se realiza en forma coplanar a las cubiertas o paramentos de la construcción y su instalación en ese sentido es más restringida que la instalación de un equipo solar térmico compacto, que suele ubicarse con orientación y ángulo cercanos al óptimo independientemente de las características de las cubiertas donde se posa.

Estos poliedros, al constituirse como una herramienta que representa las tres dimensiones, ofrecen una mayor claridad y accesibilidad; solo se requiere orientarlos con los puntos cardinales del lugar. Su diseño permite incorporarlos como una herramienta digital en teléfonos móviles en donde el mismo dispositivo se encargaría de orientar el poliedro correspondiente a la localidad más cercana en función de la información del GPS.

Consideramos que la herramienta presentada resulta especialmente apropiada para la difusión del uso de la energía solar fotovoltaica en ámbitos educativos, desde niveles iniciales hasta terciarios. A su vez también resulta ideal para publicaciones destinadas a brindar instrucciones al instalador o al posible usuario.

REFERENCIAS

- INDEC (2020). Aglomerados de la Argentina de 500 000 habitantes y más. Informe del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos República Argentina, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- Grossi Gallegos, Righini (2013). Ángulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios. Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 31. pp. 45 – 50. Impreso en la Argentina. ISSN 0328-932X.
- Perez, Ineichen, Maxwell, Seals, Zelenka (1992). Dynamic Global to Direct Irradiance Conversion Models. ASHRAE Transactions, Vol 98, Part I, #3578, 1992

ABSTRACT: In residential photovoltaic systems, teachers, designers and installers, usually work with different tools to estimate the annual energy production. The objective of this article is to present a new simple tool which can be used not only for teaching but also by designers and installers. Photovoltaic systems lay over rooftops, sloping roofs and others building surfaces. These surfaces may not allow a perfect slope or orientation for the solar panels to obtain the maximum energy production. Using a polyhedron of solar energy production, it is possible to estimate the energy production of a system in a fast and easy way with low error ratio. This tool is intended to be used in the main urban

centers in Argentina. In addition, it could be useful in promotion and outreach addressed to citizens who are in the process of buying a photovoltaic system under the new law of distributed energy generation.

KEYWORDS: Teaching Tool. Promotion and Outreach. Solar Energy. Photovoltaic Systems. Building Integrated Photovoltaics, Distributed Generation.

ANEXO I:

Tabla 5: Porcentajes de las caras de cada uno de los poliedros analiza

	óptimo	22	23	24	26	26	26	27	27	28	29	31	32	33	34	42
Cara	Orientación	Salta	Formosa	Corrientes	Córdoba	Santa Fé	San Juan	Rosario	Mendoza	CABA	La Plata	Mar del Plata	Viedma	San Carlos de Bariloche	Trelew	Ushuaia
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
5	E	88%	90%	89%	85%	86%	86%	86%	85%	84%	84%	82%	81%	81%	79%	76%
4	NE	97%	97%	97%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	95%	95%	95%	95%	94%	94%
3	N	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	NO	96%	96%	96%	95%	96%	95%	95%	95%	95%	95%	94%	94%	94%	93%	92%
1	O	86%	89%	88%	85%	86%	84%	84%	83%	84%	84%	80%	79%	81%	78%	74%
E	E	54%	55%	55%	54%	54%	54%	54%	55%	54%	53%	54%	55%	56%	55%	56%
D	NE	62%	60%	60%	63%	62%	64%	63%	64%	63%	63%	66%	67%	67%	68%	72%
C	N	61%	56%	57%	63%	61%	62%	63%	63%	63%	63%	67%	68%	66%	70%	76%
B	NO	61%	59%	59%	63%	62%	62%	62%	63%	63%	64%	64%	66%	66%	67%	71%
A	O	52%	53%	53%	53%	53%	53%	53%	53%	53%	54%	52%	53%	55%	53%	55%
X	-	90%	93%	92%	89%	90%	89%	89%	88%	89%	89%	86%	85%	86%	84%	80%