



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



grupo de energética
universidad de Málaga

Informe sobre una ventana fotovoltaica FREENERGY

Peticionario: Libre Evolución de Energía S.L.

Autor: Francisco Serrano Casares
Investigador responsable del Grupo de
Energética de la Universidad de Málaga

Málaga, 30 de septiembre de 2016

Antecedentes

Este informe surge como consecuencia de la petición de la empresa LIBRE EVOLUCIÓN DE ENERGÍA S.L. a la OTRI de la Universidad de Málaga, dando lugar a la firma de un contrato entre Libre Evolución de Energía S.L. y Francisco Serrano Casares, profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos e Investigador responsable del Grupo de Energética de la Universidad de Málaga.

En ese contrato se establece que se llevará a cabo un trabajo consistente en la medición y análisis de la cantidad de energía eléctrica generada por una ventana de PVC que incluye un sistema solar fotovoltaico denominado FREENERGY suministrado por la empresa Libre Evolución de Energía S.L.

El análisis que se ha realizado en este informe cumple con los hitos establecidos en el contrato:

- Hito 1: Medición de la cantidad de energía eléctrica producida por una ventana de 1 metro cuadrado equipada con el sistema solar fotovoltaico FREENERGY.

- Hito 2: Medición del rendimiento energético generado por una ventana de PVC de 1 metro cuadrado equipada con el sistema solar fotovoltaico FREENERGY.- Estimación de la energía eléctrica que podrá proporcionar en un año una ventana de 1 metro cuadrado equipada con el sistema solar fotovoltaico FREENERGY, situada en una zona climática con una radiación equivalente a la de Málaga.

- Hito 3: Cálculo del ahorro mensual promedio en base a la cantidad de energía eléctrica producida por una ventana de 1 metro cuadrado equipada con el sistema solar fotovoltaico FREENERGY según los precios de electricidad en España para el año 2016, situada en una zona climática con una radiación equivalente a la de Málaga.

Descripción de la muestra

La ventana fotovoltaica está formada por un módulo fotovoltaico de silicio amorfo encapsulado entre dos láminas de vidrio transparente, una cámara de aire y una segunda hoja de cristal doble con cámara de aire. Todo está enmarcado en una estructura de PVC.

Las dimensiones efectivas del módulo fotovoltaico de Si-a son 0,57x1,17 m², equivalentes a una medida estándar de 0,60x1,20 m².

Caracterización de la ventana fotovoltaica en condiciones estándar de medida

Las propiedades eléctricas que caracterizan a los sistemas fotovoltaicos se deben dar en lo que se conocen como Condiciones Estándar de Medida (STC en las siglas en inglés) que representan el comportamiento del sistema cuando la radiación sobre el plano de los módulos es de 1000 W/m² AM1,5 y la temperatura del módulo es de 25°C.

Para conocer las características eléctricas de la ventana fotovoltaica en las condiciones estándar de medida, se ha realizado un ensayo de acuerdo con las normas IEC 61646: 2008 / EN 61646:2008 / UNE EN 61646:2009. Apartado 10.2 Determinación de la potencia máxima.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos y en la figura 1 la curva característica I-V y la curva de potencia obtenidas en el ensayo.

Tabla 1. Medida de los parámetros característicos del módulo.

Isc (A)	Voc (V)	Vmax (V)	Imax (A)	Potencia máxima (W)
0,71	113,19	87,18	0,58	50,74

La incertidumbre de la potencia es de $\pm 6,78 \%$.

Medida realizada a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1000 W/m^2 .

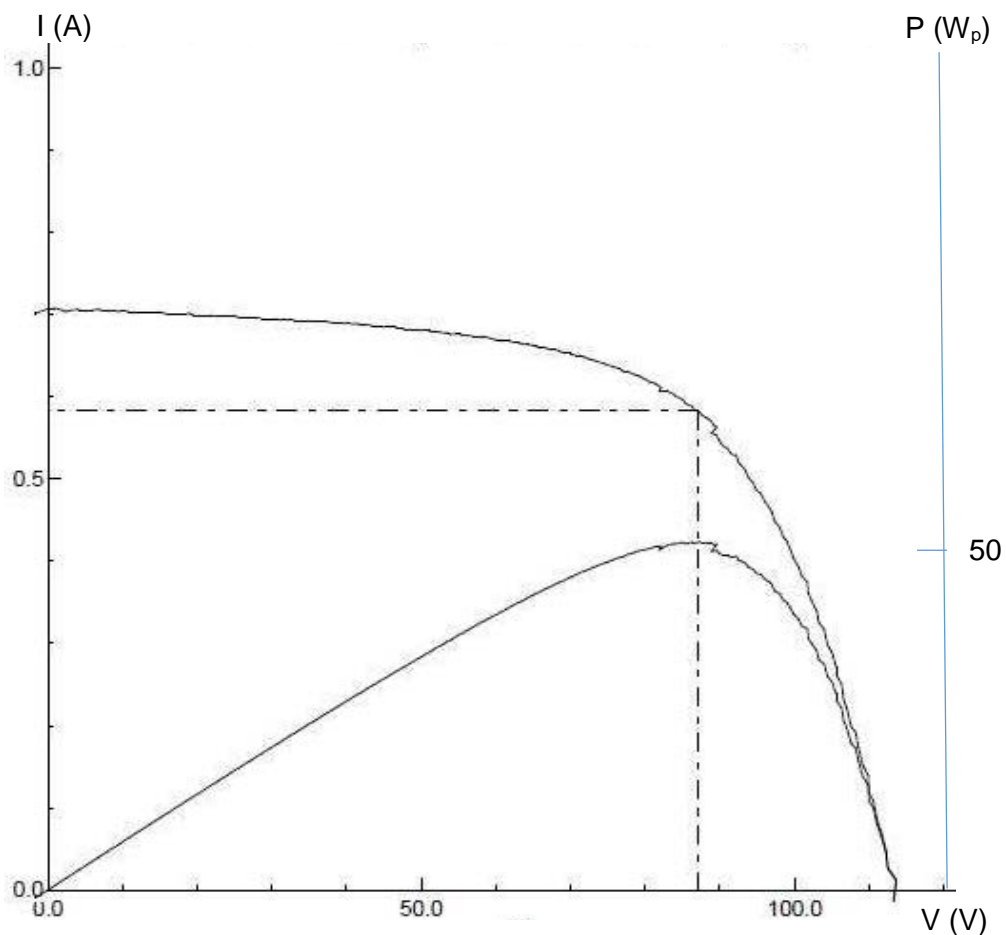


Figura 1. Curva característica del módulo fotovoltaico en condiciones estándar de medida.

De acuerdo con los resultados, la potencia de la ventana fotovoltaica medida en condiciones estándar es de $50,74 \text{ W}_p$.

Análisis del comportamiento de la ventana fotovoltaica a sol real

Para analizar el comportamiento de la ventana fotovoltaica en condiciones reales se ha colocado en el banco de ensayos fotovoltaicos del laboratorio, en la terraza del edificio de Institutos, en posición vertical, orientada al Sur. Las coordenadas GPS del lugar en el que se han realizado las medidas son W 4,5543 N 36,7358.

Se ha elaborado un protocolo para la toma de datos que permite conocer la potencia instantánea generada por la ventana fotovoltaica. La potencia instantánea generada por el módulo fotovoltaico en corriente continua (CC) es convertida en corriente alterna (CA) mediante los dispositivos suministrados por la empresa: un regulador y un inversor, a los que se ha añadido una batería fotovoltaica del laboratorio del grupo de energética. Las medidas se han realizado en días totalmente soleados.

Se han realizado medidas cada diez minutos de las siguientes magnitudes: la tensión y la corriente generadas por la ventana fotovoltaica, la tensión en bornes de la batería, la tensión y la corriente que llegan a la carga tras pasar por el regulador y el inversor, la irradiancia, la temperatura del módulo fotovoltaico y la temperatura ambiente. Las medidas de la energía suministrada por la ventana fotovoltaica se han contrastado con las obtenidas con un medidor de la característica de los sistemas fotovoltaicos.

Instrumentación utilizada

Para llevar a cabo las medidas se ha utilizado la instrumentación disponible en el laboratorio del grupo de energética.

- *Multímetro Fluke modelo 8842A*: uno para medir la tensión y otro para medir la corriente de la ventana fotovoltaica en cada instante.
- *Fluke Hydra modelo 2620A (Hydra Data Acquisition Unit)* para conocer la radiación, la temperatura ambiente y la temperatura del módulo fotovoltaico mediante:
 - *Piranómetro CM11 de Kipp-Zonen* situado en el mismo plano de la ventana fotovoltaica.
 - *Sonda de temperatura (termopar)* que se coloca en la parte trasera de la célula.
 - *Sonda de temperatura (termopar)* para la temperatura ambiente.
- *Analizador de redes Fluke-1735* para medir la tensión y la corriente alterna consumida por la carga de prueba.
- *Polímetro digital* para la medida de la tensión en bornes de la batería fotovoltaica.
- *Medidor característica I-V modelo I-V400* para verificar las medidas instantáneas de la potencia generada por la ventana fotovoltaica.

Resultados

Se han realizado medidas de la energía producida por la ventana fotovoltaica, siguiendo el protocolo descrito, en varios días de los meses de agosto y septiembre en los que el cielo ha estado completamente despejado, sin nubes, desde la salida del sol hasta el ocaso.

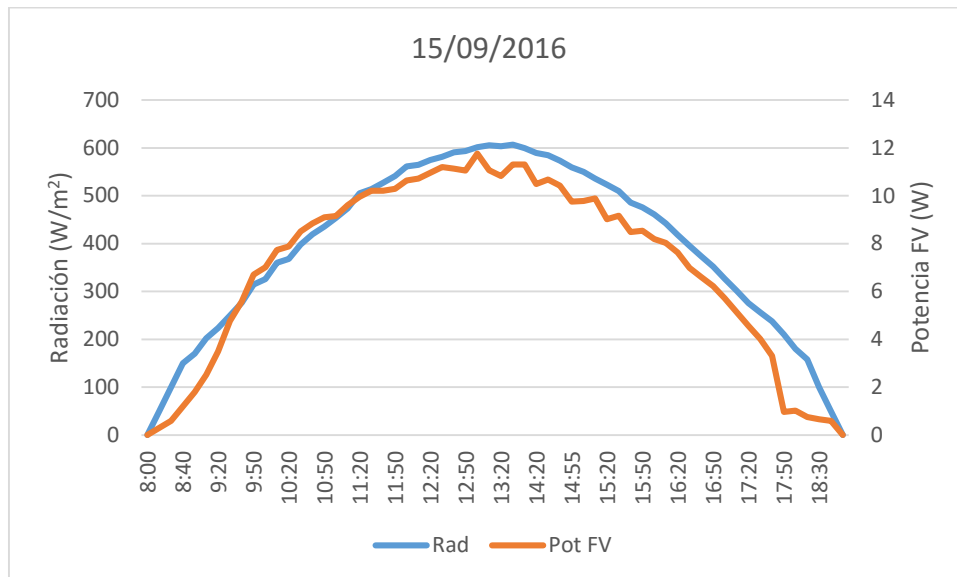


Figura 2. Radiación y potencia FV instantáneas medidas el 15/09/2016.

En la figura 2 se muestra el resultado obtenido en uno de esos días, el 15 de septiembre, representándose la radiación solar y la potencia generada en ese periodo de tiempo. Los valores son datos reales medidos en la localidad de Málaga (España).

Realizando los cálculos correspondientes, se obtiene que la irradiancia recibida sobre el plano de la ventana fotovoltaica en el día fue 4114 Wh/m^2 y la energía producida fue de $71,2 \text{ Wh}$. Estos valores son coherentes con los datos de radiación que se obtienen de las bases de datos de radiación y del valor de la energía que se obtiene de los valores medidos para la ventana fotovoltaica en condiciones estándar.

Una vez confirmados que los datos experimentales concuerdan con los datos de radiación conocidos y con los parámetros eléctricos de la ventana medidos, se va a estimar la producción anual de la ventana fotovoltaica en posición vertical. Además, se ha comprobado que la potencia instantánea producida por la ventana fotovoltaica coincide, dentro de los márgenes de error, con la obtenida con el medidor de la característica I-V 400 utilizado.

Producción energética anual de la ventana fotovoltaica

La producción energética de un sistema fotovoltaico depende de la potencia del sistema en condiciones estándar de medida (conocida como potencia pico), de la radiación solar normalizada recibida sobre el plano de la ventana fotovoltaica (conocida como Horas Sol Pico, HSP) y del término llamado Performance Ratio (PR) en los sistemas conectados a red o rendimiento global en los sistemas aislados, que tiene en cuenta las pérdidas totales que se producen en el sistema fotovoltaico, que depende de diversos factores como la dispersión de parámetros, la temperatura real de los módulos, el cableado, efecto del ángulo de incidencia del sol sobre el plano del módulo, el rendimiento de los dispositivos de acondicionamiento de potencia

(regulador e inversor) y el rendimiento batería. Su valor para los sistemas comerciales varía entre 0,75 y 0,85 habitualmente.

Ventana fotovoltaica en posición vertical y orientación Sur

Con los datos de radiación de la Agencia de la energía de la Junta de Andalucía para Málaga con una inclinación de 90° se han obtenido los valores de producción mensual para un año que se presentan en la tabla 2, considerando valores de PR de 0,75; 0,80 y 0,85. En la figura 3 se comparan gráficamente esos resultados.

Tabla 2. Energía anual producida por la ventana fotovoltaica en vertical en Wh.

Energía producida (Wh)													
PR	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0,75	4417	4564	5102	3825	3320	2860	3202	3890	4621	4879	5077	4178	49935
0,8	4712	4868	5442	4079	3541	3051	3415	4149	4929	5205	5416	4457	53264
0,85	5006	5173	5783	4334	3762	3242	3628	4408	5237	5530	5754	4735	56593

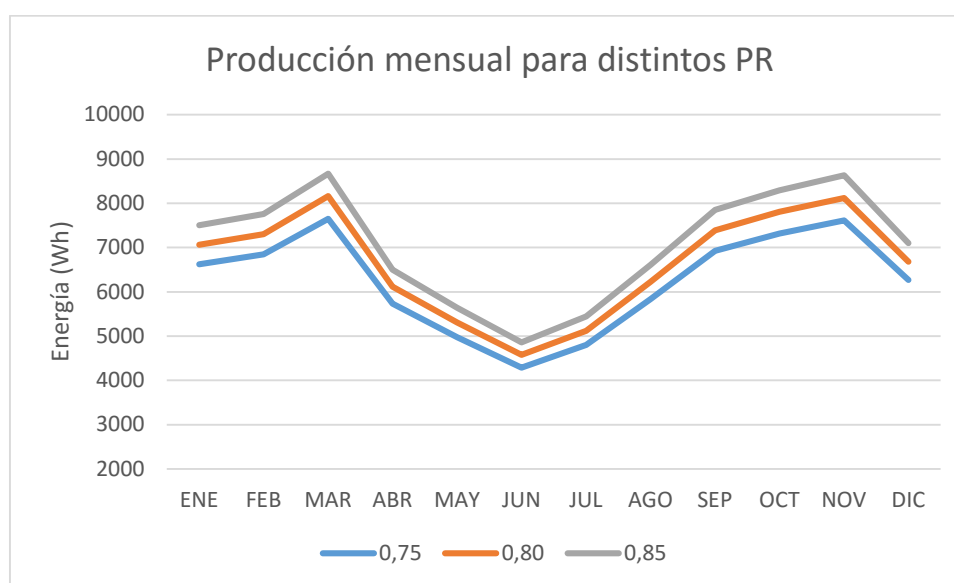


Figura 3. Energía anual producida por la ventana fotovoltaica en vertical para distintos PR.

Del análisis de los resultados se observa que cuando la ventana está en vertical (posición habitual) la producción se ve perjudicada en los meses de abril a septiembre.

Ventana fotovoltaica en posición vertical y orientación Sur: producción por metro cuadrado de ventana

Considerando que la potencia generada por la ventana fotovoltaica es proporcional a la superficie, la potencia fotovoltaica de una ventana de un metro cuadrado de superficie útil será de 76,1 W/m²ventana.

En estas condiciones, se obtienen los valores de producción anual para distintos PR que se presentan en la tabla 3 y en la figura 4, considerando los datos de radiación anteriores.

Tabla 3. Energía anual producida por m² de ventana fotovoltaica en vertical.

Energía producida (Wh/m ² ventana)													
PR	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0,75	6624	6844	7651	5735	4978	4289	4801	5833	6928	7317	7613	6265	74876
0,8	7065	7300	8161	6117	5309	4575	5121	6221	7390	7804	8121	6683	79868
0,85	7507	7756	8671	6499	5641	4861	5441	6610	7852	8292	8628	7100	84859

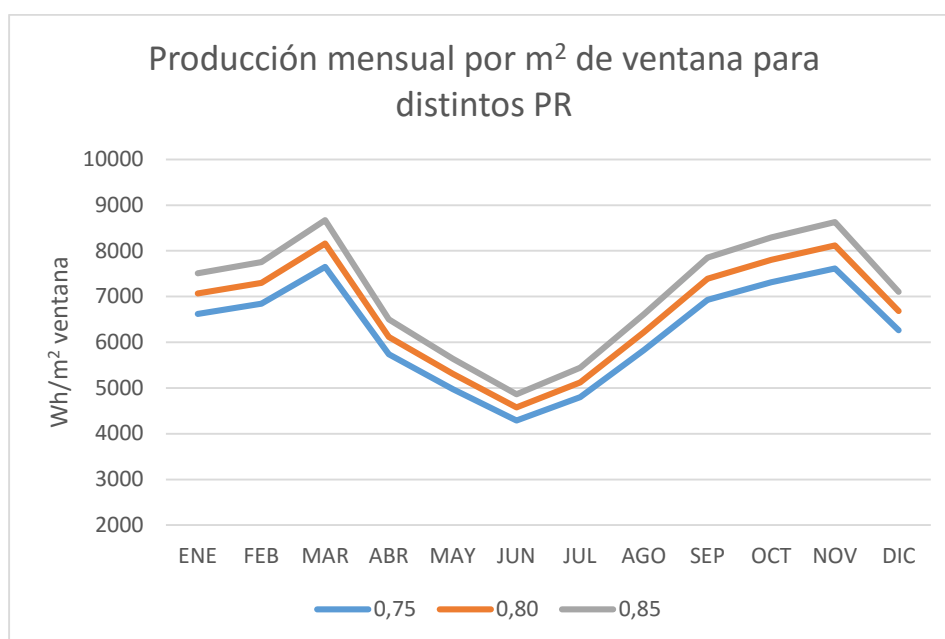


Figura 4. Energía anual producida por m² de ventana fotovoltaica en vertical para distintos PR.

Como era de esperar los resultados presentan un comportamiento semejante al de la ventana estudiada pero con un aumento de la producción debido a la mayor superficie.

La producción anual se puede mejorar si en lugar de utilizar el módulo fotovoltaico integrado en una ventana vertical, se utiliza el mismo módulo fotovoltaico transparente como elemento de cerramiento en una edificación, por ejemplo como lucernario para la cubrición de un pario de luces o un atrio. Esta aplicación aumentaría la energía radiante solar captada y, por tanto, la producción anual.

Tabla 4. Energía anual producida por m² de ventana fotovoltaica inclinada 60°.

Energía producida (Wh/m ² ventana). Inclinación 60°													
PR	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0,75	7400	8100	10206	8945	9110	8597	9331	9818	9829	9046	8612	6869	105863
0,80	7893	8640	10886	9541	9717	9171	9953	10472	10484	9649	9186	7327	112920
0,85	8387	9180	11567	10137	10325	9744	10575	11127	11140	10252	9760	7785	119978

Tabla 5. Energía anual producida por m² de ventana fotovoltaica inclinada 30°.

Energía producida (Wh/m ² _{ventana}). Inclinación 30°													
PR	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
0,75	6481	7509	10466	10347	11695	11641	12363	11872	10552	8742	7604	5896	115167
0,80	6913	8010	11164	11037	12474	12417	13187	12663	11255	9324	8110	6290	122845
0,85	7345	8511	11862	11727	13254	13193	14011	13454	11959	9907	8617	6683	130523

En las tablas 4 y 5 se presentan los valores mensuales y la energía total producida en un año por una ventana fotovoltaica de un metro cuadrado cuando la inclinación respecto de la horizontal es de 60° y 30°, respectivamente, situada en la localidad de Málaga, orientada al Sur. En la figura 5 se comparan los resultados mensuales de producción energética para un módulo fotovoltaico de un metro cuadrado obtenidos para las tres situaciones analizadas, 90°, 60° y 30°.

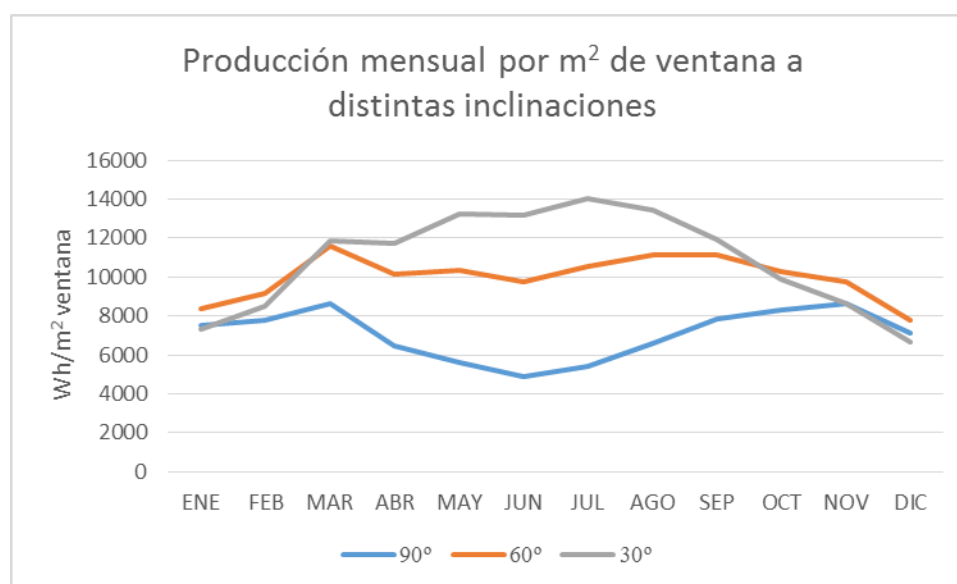


Figura 5. Energía anual producida por m² de ventana fotovoltaica para distintas inclinaciones. PR=0,85.

Como se puede observar en la figura 5, la inclinación de 60° presenta un comportamiento más homogéneo a lo largo del año, aunque la producción anual es mayor para la inclinación de 30° como se muestra en la figura 6. La inclinación de 30° es la que se recomienda cuando se quiere obtener la máxima producción en un sistema fotovoltaico conectado a red, cuando la instalación se realiza en una latitud como la de Málaga.

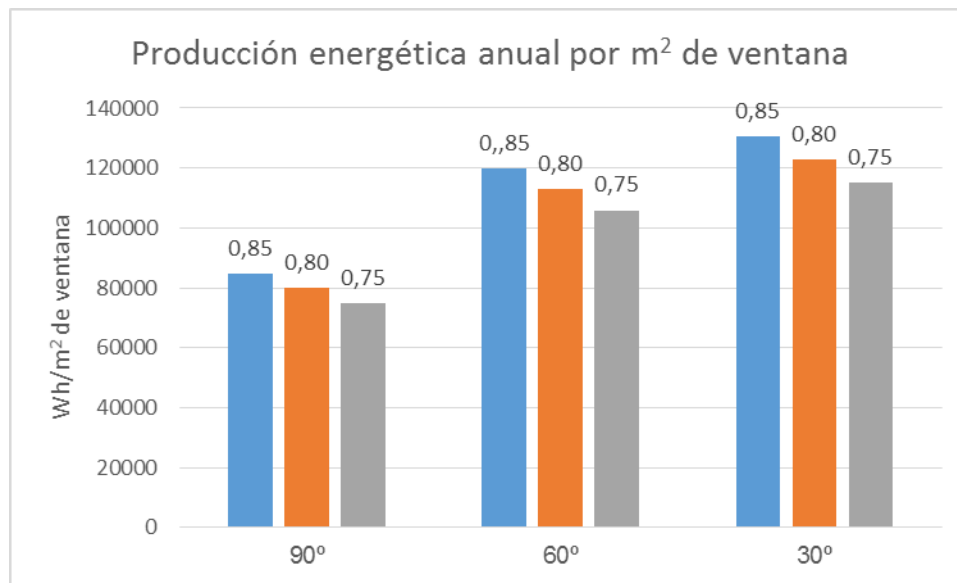


Figura 6. Energía anual producida por m² de ventana fotovoltaica para distintas inclinaciones y distintos PR.

Ahorro promedio anual

En Marzo de 2014 entró en vigor una nueva forma de calcular el precio de la energía eléctrica que deben pagar los consumidores basada en el concepto de Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC). El PVPC es el sistema de fijación del precio de la electricidad implantado por el gobierno para clientes de mercado regulado (clientes que tienen su contrato con una Comercializadora de Referencia), con una potencia contratada no superior a los 10 kW.

Actualmente, los consumidores disponen de contadores digitales por lo que la facturación se realiza en función del consumo de electricidad que se produzca cada hora, aplicando los precios que marque en ese momento el mercado de la energía. Es decir, en la actualidad el precio del consumo eléctrico cambia cada hora del día y cada día.

No obstante, el pequeño consumidor se puede acoger a tarifas con un precio de la electricidad fijo, revisable anualmente, que puede escoger de entre las comercializadoras existentes en el mercado.

Por otro lado, el recibo de la compañía eléctrica consta de tres conceptos: a) la potencia contratada, b) la energía facturada y c) los impuestos, tanto el impuesto sobre la electricidad como el IVA.

Se ha calculado el ahorro económico anual que supone el uso de una ventana fotovoltaica para un usuario medio que tenga su factura dentro del grupo de PVPC. Se va a considerar primero solo el ahorro producido por la energía consumida. Se van a considerar los precios extremos de una semana del mes de septiembre, del 3 al 9. El precio mínimo fue de 0,09645 €/kWh, correspondiente a un sábado a las 17 h y el máximo fue de 0,11693 €/kWh que corresponde a un miércoles a las 21 h. Valores semejantes se han encontrado en otras semanas del mismo mes, con una incertidumbre de 0,005 €/kWh.

Los resultados se muestran en la tabla 6, en la que se ha considerado un PR de 0,75; 0,80 y 0,85 y las tres posiciones de la ventana fotovoltaica, vertical, 60° y 30°.

Tabla 6. Ahorro anual producido por una ventana fotovoltaica de un metro cuadrado. Término de energía.

Precio	Mínimo 0,096 €/kWh		Máximo 0,117 €/kWh			
PR	Vertical		60°		30°	
0,75	7,222	8,755	10,210	12,379	11,108	13,467
0,80	7,703	9,339	10,891	13,204	11,848	14,364
0,85	8,185	9,923	11,572	14,029	12,589	15,262

Considerando un consumidor medio con 5 kW de potencia contratada y un consumo anual de 3300 kWh, el precio del kWh, considerando todos los conceptos de la factura eléctrica, es decir, término de potencia, término de energía e impuestos, se estima que es de 0,25 €/kWh.

En la tabla 7 se presenta el ahorro que se obtendría, en este caso, para una ventana fotovoltaica de un metro cuadrado, situada en las tres posiciones analizadas y para los tres valores de PR estudiados.

Tabla 7. Ahorro anual producido por una ventana fotovoltaica de un metro cuadrado. Precio total de energía (término de potencia, término de energía e impuestos).

Precio total estimado 0,25 €/kWh			
PR	Vertical	60°	30°
0,75	18,719	26,466	28,792
0,80	19,967	28,230	30,711
0,85	21,215	29,994	32,631

Si se quiere tener un beneficio de 1000 € en tres años, sería necesario tener una superficie de ventanas fotovoltaicas verticales de 33,5 m² considerando el ahorro en el término de energía, en el caso de mejor rendimiento. Si partimos del precio total de la compra de energía eléctrica, la superficie de ventanas fotovoltaicas sería de 15,7 m². Esas superficies se pueden encontrar en viviendas habituales de calidad. Otro beneficio adicional que se obtiene con este tipo de ventanas es en relación al consumo en climatización, de manera que se ahorra no solo por la energía generada sino por el menor consumo de energía que requiere la vivienda al utilizar ventanas que aumentan significativamente la estanqueidad, disminuyendo el consumo de los sistemas de climatización en hasta un 30% según las fuentes consultadas.

Emisiones de CO₂ evitadas

La ventana fotovoltaica FREENERGY no solo supone un ahorro monetario sino que también produce un ahorro en emisiones de gas nocivos para el medio ambiente al generar energía eléctrica de origen renovable y, por tanto, no contaminante.

Considerando un factor de conversión de 0,30 kg de CO₂ emitidos por cada kWh eléctrico consumido se consiguen los ahorros en emisiones de CO₂ para una ventana fotovoltaica de un metro cuadrado que se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Emisiones de CO₂ evitadas por la ventana fotovoltaica.

kg de CO ₂ evitados anualmente			
PR	Vertical	60°	30°
0,75	22,463	31,759	34,550
0,80	23,960	33,876	36,854
0,85	25,458	35,993	39,157

Conclusiones y sugerencias

- Se ha estudiado el comportamiento energético de una ventana fotovoltaica FREENERGY a petición de la empresa Libre Evolución de Energía S.L.
- Se ha medido la característica I-V de la ventana fotovoltaica en condiciones estándar de medida. La potencia obtenida ha sido de 50,74 W_p con una incertidumbre $\pm 6,87\%$.
- Se ha obtenido la radiación recibida y la energía eléctrica producida por la ventana fotovoltaica en posición vertical, a sol real, en un día completamente soleado en Málaga. La radiación recibida fue de 4114 Wh/m² y la energía producida de 71,2 Wh. Estos valores son comparables a los que se obtienen de las tablas de radiación y los cálculos eléctricos habituales para los sistemas fotovoltaicos.
- Se ha estimado la energía eléctrica producida por la ventana fotovoltaica en posición vertical, orientación Sur, en la localidad de Málaga. El valor obtenido para un rendimiento global (PR) de 0,85 es de 56593 Wh.
- Se ha estimado la potencia eléctrica de una ventana fotovoltaica de 1 m² de superficie, obteniéndose un valor de 76,08 W_p/m²_{ventana}.
- Se ha calculado la energía eléctrica anual producida por una ventana fotovoltaica de 1 m² de superficie situada en posición vertical, orientada al Sur, en Málaga, obteniéndose un valor de 84859 Wh para un PR de 0,85. Si la ventana se coloca con una inclinación de 60° sobre la horizontal la energía anual producida, con el mismo PR, es 119978 Wh. En las mismas condiciones, con una inclinación de 30° se producen 130523 Wh al año.
- Si consideramos el precio del término de energía del recibo eléctrico, el ahorro máximo que se puede obtener con la energía eléctrica producida por la ventana fotovoltaica de 1 m², en un año, con un PR de 0,85, resulta ser de 9,923 € para la ventana vertical; 14,029 € cuando está inclinada 60° y 15,262 € con 30° de inclinación.
- Si se incluyen todos los términos de la factura eléctrica, los ahorros, en las mismas condiciones del punto anterior, son de 21,215 € para la ventana vertical, de 29,994 € para la ventana con una inclinación de 60° y de 39,157 € cuando está inclinada 30°.
- La utilización de la ventana fotovoltaica de un metro cuadrado evita la emisión anual de 25,458 kg de CO₂ si se coloca verticalmente, de 35,993 kg de CO₂ si está inclinada 60° y de 39,157 kg de CO₂ si la inclinación es de 30°.



- La utilización de la ventana fotovoltaica estudiada también reduciría el consumo energético en calefacción al aumentar la estanqueidad y el aislamiento de la vivienda.
- Los dispositivos de acondicionamiento de potencia, regulador e inversor, para el uso de la ventana fotovoltaica como sistema aislado con acumulación en baterías, requerirían ser escogidos dependiendo del tamaño del sistema fotovoltaico que se vaya a instalar. El inversor aportado por la empresa no es el más adecuado para ser utilizado con una sola ventana, ya que por la potencia que ésta suministra va a estar funcionando siempre fuera de la región de máximo rendimiento, con el consiguiente perjuicio para el rendimiento global del sistema fotovoltaico.

Málaga, 30 de septiembre de 2016

Fdo.: Francisco Serrano Casares
Investigador responsable del GEUMA