

COSTE DEL CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DE UN PROYECTO DE ENERGÍA RENOVABLE: LA PÉRGOLA FOTOVOLTAICA.

Terrados Cepeda, J. ^{1p} y Almonacid Puche, G²

¹ *Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos*

Area de Proyectos de Ingeniería

² *Grupo IDEA. Departamento de Electrónica*

UNIVERSIDAD DE JAÉN

RESUMEN

La presente comunicación aborda el análisis del coste del ciclo de vida de un proyecto, en términos de retorno energético, aplicado al caso de la instalación realizada en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén, denominada “Pérgola Fotovoltaica”. En el estudio realizado se evalúan los costes energéticos que se incurren en todo el ciclo de vida del Proyecto. Este coste energético se compara con el retorno esperado a lo largo de la vida útil, estimada en veinte años, calculado a partir de los datos históricos de los años previos y las previsiones de rendimiento y de radiación solar de los próximos años.

Una de las conclusiones es que la instalación devuelve en un plazo razonable (6-8 años) el coste energético que se ha incurrido tanto en la fabricación de los componentes como en la instalación del proyecto, considerando de forma exhaustiva todos los agentes implicados en el proceso. Además se puede estimar para todo el ciclo de vida la producción energética neta que se presenta suficientemente positiva (27.021 kWh/kWp) como para que la opción por la generación de electricidad fotovoltaica deba ser una prioridad.

ABSTRACT

This paper analyses the energy life cycle cost applied to the SFV Project named “Photovoltaic pergola” installed in the Polytechnic School of Jaen University. The study assess energy cost incurred during the whole life cycle, and compares it with the energy production of the system, assuming an operational system life of twenty years.

A major conclusion is that the system is able to give back the energy incurred in a period of 6-8 years. On the other hand net energy production during system operation is so positive (27.021 kWh/kWp) that option to SFV should be a priority.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto “Pérgola Fotovoltaica” consiste en la integración de un SFVR (sistema fotovoltaico conectado a red) de 2 Kw en la terraza de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén. El sistema fue conectado a la red en Febrero de 1995 y ha estado plenamente operativo desde entonces salvo un período de 6 meses, en el que fue utilizado con fines experimentales [Nofuentes, G et al. 2000].



Fig. 1. Vista general del proyecto “Pérgola Fotovoltaica”

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “Pérgola Fotovoltaica” fue diseñado por el Departamento de Electrónica de la Universidad de Jaén e instalado por la empresa Solar Jiennense, S. L. Los gastos fueron sufragados por la Consejería de Industria y Comercio de la Junta de Andalucía, el Instituto de Estudios Giennenses y la propia Universidad de Jaén.

El campo fotovoltaico está integrado por 23 módulos Isotón I-88 de 88 Wp cada uno. Dicho campo se encuentra dividido en tres subgeneradores de 528 Wp cada uno (6 módulos) los cuales se hallan conectados en serie a otro subgenerador con una potencia pico de 440 W (5 módulos) en configuración flotante [Almonacid, G. et al 1995].

La integración arquitectónica del campo se consiguió mediante el emplazamiento de los subgeneradores con distintos ángulos de acimut (6°E, 21°E, 36°E y 51°E, respectivamente) y el mismo ángulo de inclinación (15°). En consecuencia, los subgeneradores se han dispuesto según las direcciones apuntadas por cuatro radios contenidos en el sector circular que conforma la terraza del edificio, de modo que el ángulo que forman dos radios adyacentes cualesquiera es de 15°.

En la tabla 1 se recogen las características eléctricas y mecánicas del módulo Isofotón I-88.

Tecnología empleada	Silicio monocristalino
Potencia nominal	88 W
Tensión de circuito abierto	7.26 V
Intensidad de corriente en cortocircuito	16.30 A
Tensión en el punto de máxima potencia	5.64 V
Intensidad de corriente en el punto de máxima potencia	15.45 A
Eficiencia de conversión eléctrica de célula	14.07%
Superficie de célula	0.0103 m ²
Número de células en serie	12
Número de células en paralelo	5
Longitud del módulo fotovoltaico	1.305 m
Anchura del módulo fotovoltaico	0.589 m
Peso del módulo fotovoltaico	9.5 Kg

Tabla 1. Características eléctricas y mecánicas del módulo Isofotón I-88.¹

El montaje e instalación fue llevado a cabo por la empresa Solar Jiennense, S.L. siendo la estructura metálica de perfiles tubulares, de sección rectangular y perfiles IPN-180, precortados en taller y soldados en obra. La fijación a la terraza del edificio es con pernos y placa de anclaje.

3. RADIACIÓN SOLAR Y CLIMATOLOGÍA DEL ENCLAVE

La ciudad de Jaén (37°46' latitud norte y 3° 47' latitud oeste) afectada por el clima mediterráneo continental, recogiendo unos valores medios anuales de irradiación diaria sobre superficie horizontal de 4.9 KWh·m⁻² y de 2775 horas de sol.² El valor

¹ Los parámetros eléctricos han sido especificados por el fabricante para condiciones estándares de medida (irradiancia global incidente igual a 1000 Wm⁻², temperatura de la unión de la célula igual a 25°C, y distribución espectral AM 1.5)

² I. Font, *Atlas de Radiación Solar de España*, Sección de publicaciones del Instituto de Meteorología de España, Madrid, 1984.

medio de la irradiación diaria del semestre correspondiente a la estación fría es de 3.6 KWh·m⁻² mientras que el valor correspondiente a la estación calurosa es de 6.2 KWh·m⁻².

Para estimar la producción del sistema a lo largo de su vida útil se han utilizados las series de radiación obtenidas de la Tesis Doctoral del Prof. L. Hontoria, que se presentan en la Tabla 2.

	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	<i>Marzo</i>	<i>Abril</i>	<i>Mayo</i>	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Septiem.</i>	<i>Octubre</i>	<i>Noviem.</i>	<i>Diciem.</i>
Año 1	64940	109512	148886	198083	216093	230212	227111	228380	152376	132150	82589	61802
Año 2	69269	113929	156216	193025	196643	214424	224549	233071	161939	132590	83924	69479
Año 3	65522	113041	135240	184314	214715	240339	237898	223984	146779	121213	79158	56711
Año 4	67485	112542	147136	175797	197597	224948	214174	228059	156661	119064	78229	66052
Año 5	63402	114837	140093	189783	213201	241371	230207	228824	147519	131966	86419	62607
Año 6	66133	110857	151187	184933	216238	225027	238720	234098	162831	131170	86075	59674
Año 7	71182	108401	140311	175860	201917	229894	227717	228169	153730	114822	92725	69844
Año 8	72859	108017	144156	178907	206705	229769	233442	236571	161783	135166	74322	60392
Año 9	68425	116890	147972	198376	217141	236074	217265	237919	166443	126791	85641	57053
Año 10	55428	109833	148630	194147	201565	232313	240551	224704	152533	127740	88276	55753
Año 11	68562	118828	159307	198246	213332	237502	232272	225597	169302	126648	89572	67576
Año 12	65212	111249	151951	184706	206294	239459	252046	216832	174108	131158	74022	69430
Año 13	61445	112721	154272	182908	208541	245209	228416	231367	158107	119226	82888	61281
Año 14	61936	112593	152281	171795	218206	213439	231358	235968	153312	121844	80461	60097
Año 15	73011	108604	156006	194264	214010	239388	231506	229558	144017	115968	81193	64559
Año 16	65073	110786	156011	188929	222404	247119	236866	228421	153585	125660	82978	65145
Año 17	66550	111711	152366	200951	213822	232675	219070	234474	159860	131267	86389	71529
Año 18	72081	113514	147613	191515	199625	226973	225670	228707	158133	128488	94003	70889
Año 19	70474	110173	156422	195655	222895	208567	246254	228371	169003	126207	85659	69853
Año 20	69012	108436	163590	196751	189145	208578	233351	222940	155647	124912	84336	60653

Tabla 2. Datos de radiación solar, en wh/m², para la localidad de Jaén generados sintéticamente. Tesis doctoral: "Generación de series sintéticas de radiación solar combinando herramientas estadísticas y redes neuronales" Leocadio Hontoria (2001)

4. BALANCE ENERGÉTICO DEL PROYECTO

Requerimientos energéticos en la producción de los módulos.

Se han hecho diversas estimaciones de la demanda energética en la producción de módulos fotovoltaicos. De los datos publicados por E.A. Alsema [Alsema, E. 2000] podemos deducir que para módulos de silicio monocristalino la demanda energética del proceso de fabricación es de 41 MJ/Wp para un módulo sin marco. Además se estima en 500 MJ/m² la aportación del marco del módulo a la demanda energética. En nuestro caso los 23 módulos de 88 Wp y 0,795 m² habrían demandado 91.823 MJ (Tabla 3).

	Potencia (Wp)	Demanda energética (MJ)
Módulo I-88	88	3608,0
Marco		384,3
Total Pérgola	2024	91823,4

Tabla 3. Demanda energética en la fabricación de los módulos

Requerimientos energéticos del montaje y la instalación

Se estima también el consumo energético requerido para el montaje de la estructura y la instalación del sistema. Estos consumos, basados en la práctica operativa de la empresa instaladora, comprenden las operaciones de corte y preparación, taladrado, transporte, montaje (soldadura) e instalación. Se han calculado teniendo en cuenta los consumos de los equipos utilizados, el número de operaciones unitarias y el tiempo medio por operación. Para la comparación energética se ha convertido la energía eléctrica en energía primaria asumiendo un rendimiento de conversión del 35%. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

	Energía (wh)	Energía (MJ)	E. Primaria (MJ)
Corte y preparación	15000	54,0	154,3
Taladrado	3060	11,0	31,5
Montaje	19200	69,1	197,5
Instalación del sistema	2700	9,7	27,8
Transporte			79,7
TOTAL			490,7

Tabla 4. Consumos energéticos en montaje e instalación

Producción energética

La producción energética teórica se estima a través de la radiación prevista y de los datos de los módulos I-88. Sin embargo la integración arquitectónica del sistema y su propia configuración provocan que la producción real haya sido en los primeros años de funcionamiento un 19% menor que lo previsto [Nofuentes G. et al, 2000]. Ello se tiene en cuenta para obtener la estimación de producción real del sistema (Tabla 5).

	<i>Rad. Diaria (kWh/m²)</i>	<i>Energía teor.(kWh)</i>	<i>Energía teor. (MJ)</i>	<i>Producción real (MJ)</i>
Año 1	5,07	4020,0	14472,1	11722,4
Año 2	5,07	4013,3	14448,0	11702,9
Año 3	4,98	3947,9	14212,5	11512,1
Año 4	4,90	3880,3	13968,9	11314,8
Año 5	5,07	4015,9	14457,2	11710,3
Año 6	5,11	4052,2	14587,8	11816,1
Año 7	4,97	3938,5	14178,6	11484,6
Año 8	5,05	3998,2	14393,6	11658,8
Año 9	5,14	4071,8	14658,5	11873,4
Año 10	5,02	3975,2	14310,6	11591,6
Año 11	5,22	4138,5	14898,8	12068,0
Año 12	5,14	4072,8	14662,2	11876,4
Año 13	5,06	4007,5	14427,1	11686,0
Año 14	4,97	3935,7	14168,5	11476,5
Año 15	5,07	4019,9	14471,7	11722,0
Año 16	5,16	4087,0	14713,1	11917,6
Año 17	5,15	4081,9	14695,0	11902,9
Año 18	5,09	4031,0	14511,7	11754,5
Año 19	5,18	4101,2	14764,3	11959,1
Año 20	4,98	3944,5	14200,3	11502,2
Media	5,07	4016,67	14460,0	11712,6
Total		80333,4	289200,2	234252,2

Tabla 5. *Producción energética estimada*

Balance energético

El periodo de retorno energético (Energy Pay Back Time, EPBT) se define como la relación entre la energía requerida durante todo el ciclo de vida de la instalación (fabricación, instalación, operación y retirada de servicio) y la producción anual generada por el sistema.

Algunos autores [Kato, 1997] han calculado intervalos entre 3,9 y 15,6 años para el EPBT de sistemas de silicio monocristalino para una irradiación de 1430 kWh/m²/año. Mas recientemente [Alsema, 2000] se ha calculado una horquilla de entre 3 y 4 años para el EPBT de sistemas de silicio policristalino y película delgada en condiciones de radiación de 1700 kWh/m²/año.

El Proyecto Pérgola Fotovoltaica presenta, a la luz de los datos de los apartados anteriores, un EPBT de 6,4 años para el caso de producir la energía teórica y un EPBT de 7,9 años considerando los factores de integración arquitectónica.

La producción energética neta para una vida útil de 20 años (estos sistemas pueden llegar a los treinta años de funcionamiento correcto) es de 196.886 MJ para la

primera opción y de 141.938 MJ para la segunda. Por tanto el sistema puede producir un máximo de 27.021 kWh/kWp.

5. CONCLUSIONES

A diferencia de la creencia extendida hace unos años de que las instalaciones de energía solar fotovoltaica consumían más energía durante su fabricación y montaje que la que devolvían a lo largo de su vida útil, el estudio realizado para un proyecto concreto nos demuestra que el periodo de retorno energético (EPBT) puede ser desde unos seis años para una instalación sin condicionamientos de orientación hasta unos ocho años para una instalación diseñada con criterios de integración arquitectónica.

Por otra parte dada la extensa vida útil de estos sistemas, podemos calcular la producción energética neta para un ciclo de vida de veinte años obteniendo valores que varían entre los 196.886 MJ (454.691 kWh) y los 141.938 MJ (39.427 Wh) según el grado de integración arquitectónica. Esto significa una producción neta máxima de 27.021 kWh/kWp.

6. REFERENCIAS

- Almonacid, G. De la Casa, J. Gómez Vidal, P. Eyra, R. Pérez Higuera, P. Rus, C. Martínez, M. y Borrego, F. (1995), 'Photovoltaic Pergola. An example of solar energy integration on buildings, Actas del XIII Congreso europeo de Energía solar fotovoltaica, Niza, pp. 2183-2186.
- Alsema E. (1997), Understanding Energy Pay-Back Time: Methods and Results, IEA Expert Workshop on "Environmental aspects of PV Systems", Utrecht.
- Alsema, E. A. (2000), Energy Pay-back Time and CO₂ emissions of PV Systems, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, 17-25p
- Font, I. (1984) *Atlas de Radiación Solar de España*, Sección de publicaciones del Instituto de Meteorología de España, Madrid.
- Kato, K. (1997), Energy Payback Time and Life Cycle CO₂ emissions of residential PV power system with silicon PV module, IEA Expert Workshop on "Environmental aspects of PV Systems", Utrecht.

Nofuentes, G y Almonacid, G. (2000), The “PV Pergola” project: lessons learned and results of two -year monitoring, Actas del XVI Congreso europeo de Energía solar fotovoltaica, Glasgow.

CORRESPONDENCIA

Prof.: Julio Terrados Cepeda

Universidad de Jaén

Avda. de Madrid, 35 23071 JAEN

TI.: 953002452 Fx. 953002420

e-mail: jcepeda@ujaen.es