

LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COLOCADOS SOBRE ESTRUCTURAS O TECHOS A DOS AGUAS

Por Dr. C. Luis Hilario Bériz Pérez*

*Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental,
Cubasolar
E-mail: berriz@cubasolar.cu

Resumen

En el trabajo se estudian los sistemas fotovoltaicos sobre estructuras a dos aguas desde el punto de vista de la producción de energía eléctrica, y se comparan con la producción de un campo estándar orientado al sur con 67 % de aprovechamiento del área del terreno.

En el trabajo se demuestra que la producción de electricidad en un campo a dos aguas es significativamente superior al campo estándar orientado al sur. También se demuestra que el ángulo de azimut no influye en la producción anual total del campo a dos aguas, aunque el valor óptimo lo da la orientación este-oeste, o sea, con azimut de 90 y 270 respectivamente, aunque la superioridad no es significativa. Se recomienda el uso de estructuras a dos aguas debido a la gran resistencia al viento de las mismas. Se recomienda al final determinar el costo del kilowatt-hora producido antes de tomar una decisión.

Palabras clave: Radiación solar, energía fotovoltaica, fuentes renovables de energía.

THE PRODUCTION OF ELECTRICITY IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS PLACED ON STRUCTURES OR GABLE ROOFS

Abstract

In the work, photovoltaic systems are studied on gable structures from the point of view of the production of electrical energy, and are compared with the production of a standard south-facing field with 67 % of use of the land area. The work shows that the production of electricity in a gabled field is significantly higher than the standard south-facing field. It is also shown that the azimuth angle does not influence the total annual production of the gabled field, although the optimum value is given by the east-west orientation, that is, with azimuth of 90 and 270 respectively, although the superiority is not significant. The use of gable structures is recommended due to their high wind resistance.

It is recommended at the end to determine the cost of the kilowatt-hour produced before making a decision.

Key words: Solar radiation, photovoltaic energy, renewable energy sources.

Introducción

En el artículo «Influencia de la Orientación de los Paneles Solares en la Producción de Energía Eléctrica de Sistemas Fotovoltaicos en Espacios Limitados» del propio autor publicado en el número 67 de esta revista *Eco Solar*, se avi-

saba que en este número siguiente se analizarían diferentes variantes de colocación de los módulos fotovoltaicos, entre ellas los colocados sobre naves a dos aguas.

El interés que tienen las naves con techos a dos aguas es que la mayoría de ellas que tienen techos ligeros usan

estructuras de este tipo, principalmente por su bajo costo y gran resistencia a los vientos.

En el mismo artículo se vio que el ángulo óptimo de inclinación para los sistemas acoplados a la red debería ser de 15 grados, pues uno inferior no garantizaría la autolimpieza de los módulos fotovoltaicos, y en uno mayor la cresta de las dos alas daría sombra indeseable sobre las alas contiguas a las horas tempranas y tardes.

También se vio en el artículo mencionado que se acepta mundialmente contar los efectos de la radiación solar desde el punto de vista energético a partir de los 15 grados de altitud. Por esto, un techo a dos aguas con un ángulo de 15 grados de altitud de cada ala cumple con las dos condiciones establecidas y además, garantiza la resistencia al viento.

Pero es importante conocer el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos sobre estructuras a dos aguas y principalmente, el ángulo de azimut óptimo que deben tener dichas estructuras o naves.

La producción de electricidad en los campos fotovoltaicos por unidad de área

El rendimiento de los campos con sistemas fotovoltaicos es un dato muy importante principalmente cuando el costo del terreno es alto o su extensión está limitada por alguna causa tal como los techos de los edificios.

Ya en el artículo anterior se definió que la energía eléctrica producida por el sistema solar en un mes determinado estaba dado por la fórmula:

$$EP_m = \eta_s \eta_m d k_a A_s H_T \quad (1)$$

Donde: EP_m es la energía eléctrica producida por el sistema en un mes determinado

η_s es la eficiencia del sistema que depende fundamentalmente del equipamiento utilizado tales como los inversores. Una eficiencia del sistema de 80 % es aceptable

η_m es la eficiencia del módulo fotovoltaico en potencia pico (valor de fábrica)

d es la cantidad de días del mes determinado

k_a es el coeficiente de aprovechamiento del área

A_s es el área disponible para la instalación del sistema

H_T es la radiación solar incidente en el plano del módulo

En esta fórmula, las eficiencias del sistema η_s y de los módulos η_m dependen de los componentes y de la fábrica, el valor de d depende del mes, el área A_s depende del lugar y los valores de k_a y H_T dependen tanto de la colocación como de la orientación de los módulos. Son precisamente estos dos factores, los que interesan a los efectos de este estudio sobre la producción de electricidad en los sistemas solares.

En el caso de un campo orientado al sur, se deben dejar espacios para que la fila de adelante no dé sombras a la de atrás. De ahí que no pueda aprovecharse a 100 % el espacio. Cuando no se tiene en cuenta el valor del terreno y el mismo no está limitado, se recomienda dejar un espacio tal para que no se produzcan sombras durante el año de ocho de la mañana a cuatro de la tarde hora solar. De ahí se deriva que en Cuba se utilice un aprovechamiento del área de aproximadamente 70 %. Pero si se tiene en cuenta

el costo del terreno o si el mismo está limitado, se prefiere aumentar el número de módulos y aprovechar más el área disponible, aunque el costo inicial de la instalación sea mayor, pero con un rendimiento también mayor. En esos casos, el aprovechamiento puede llegar a 90 %.

En los casos donde las instalaciones se coloquen sobre estructuras a dos aguas con un ángulo de inclinación de 15 grados, el aprovechamiento del terreno es total, o sea, 100 %. Ese es precisamente el caso analizado aquí.

Para tener determinada referencia, los valores de la producción de electricidad de los diferentes campos sobre estructuras a dos aguas, pero con diferentes ángulos de azimut, se comparan con la producción de un campo orientado al sur con un aprovechamiento del área de 67 %, típico para la ciudad de La Habana. Los datos son similares al resto del país, pues la diferencia es muy poca.

En la tabla 1 y Fig. 1 se da la producción eléctrica mensual P_{total} de un campo de una hectárea (10 mil metros cuadrados) orientado al sur para las condiciones de La Habana, con un aprovechamiento del área de 67 %. La producción de electricidad de cada mes se da en megawatts-hora (MWh) por hectárea.



Tabla 1. Producción de un campo orientado al sur con $\beta=15^\circ$

ϕ	Mes	β	γ_1	H_{T1}	γ_2	H_{T2}	H_{TC}	P_o	P_o	P_{total}
23	Enero	15	0	4,399	0	4,399	4,399	55	55	109
23	Febrero	15	0	4,714	0	4,714	4,714	53	53	106
23	Marzo	15	0	5,833	0	5,833	5,833	72	72	145
23	Abril	15	0	6,215	0	6,215	6,215	75	75	149
23	Mayo	15	0	6,099	0	6,099	6,099	76	76	151
23	Junio	15	0	5,111	0	5,111	5,111	61	61	123
23	Julio	15	0	5,321	0	5,321	5,321	66	66	132
23	Agosto	15	0	5,760	0	5,760	5,760	71	71	143
23	Setiembre	15	0	5,131	0	5,131	5,131	62	62	123
23	Octubre	15	0	4,802	0	4,802	4,802	60	60	119
23	Diciembre	15	0	4,506	0	4,506	4,506	56	56	112
	Total			5,180		5,180	5,180	757	757	1514

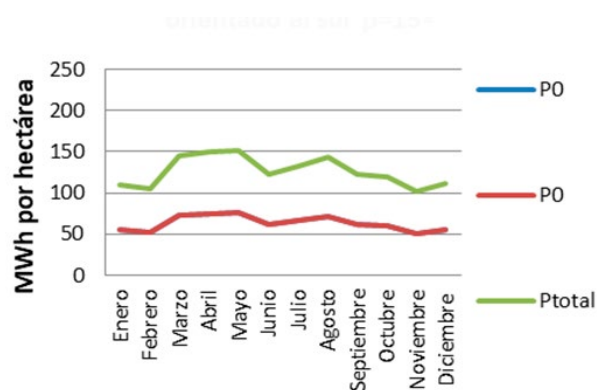


Fig. 1. Producción de un campo orientado al sur con $\beta=15^\circ$

En la tabla 2 se dan los valores de la producción de electricidad en un campo también de una hectárea con los módulos colocados sobre estructuras a dos aguas con 15 grados de inclinación y con ángulos de azimut de 0 y de 180 grados. En la misma tabla y también en la Fig. 2, se ve la producción de cada ala de la estructura, la situada a 0 grados de azimut y la situada a 180 grados. Si se compara el valor total anual de esta colocación con la de referencia al sur dada en la tabla 1, se ve la gran diferencia entre las mismas. Una hectárea orientada al sur convencionalmente produce al año 1514 MWh, mientras que la situada sobre estructuras a dos aguas con orientación en azimut 0-180 produce 2110 MWh.

Tabla 2. Producción de un campo a dos aguas

ϕ	Mes	β	γ_1	H_{T_1}	γ_2	H_{T_2}	H_{TC}	P_0	P_{180}	P_{total}
23	Enero	15	0	4,40	180	2,63	3,51	82	49	131
23	Febrero	15	0	4,71	180	3,30	4,01	79	55	135
23	Marzo	15	0	5,83	180	4,79	5,31	108	89	198
23	Abril	15	0	6,22	180	5,90	6,06	112	106	218
23	Mayo	15	0	6,10	180	6,41	6,26	113	119	233
23	Junio	15	0	5,11	180	5,62	5,37	92	101	193
23	Julio	15	0	5,32	180	5,74	5,53	99	107	206
23	Agosto	15	0	5,76	180	5,72	5,74	107	106	213
23	Septiembre	15	0	5,13	180	4,47	4,80	92	81	173
23	Octubre	15	0	4,80	180	3,55	4,18	89	66	155
23	Noviembre	15	0	4,27	180	2,66	3,46	77	48	125
23	Diciembre	15	0	4,51	180	2,56	3,53	84	48	131
	Total			5,18		4,45	4,81	1135	975	2110

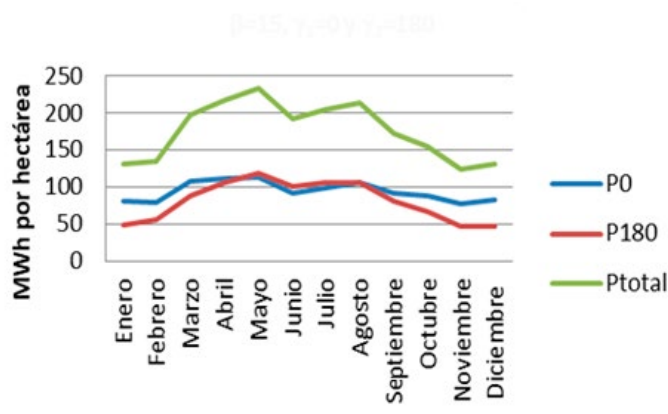


Fig. 2. Producción de un campo a dos aguas con $\beta=15$, $\gamma_1=0$ y $\gamma_2=180$

En la tabla 3 se dan los valores de la producción de electricidad de un sistema fotovoltaico de una hectárea con módulos colocados en estructuras o naves a dos aguas, las cuales tienen un ángulo de azimut de 30 y 210 grados, respectivamente. En la misma tabla, así como en la Fig. 3, se puede observar que el valor total de la

energía eléctrica producida no cambia con relación al anterior, o sea, que un ángulo de azimut de 30 grados no es significativo. Además que el cambio en la producción mensual comparado con el anterior tampoco es significativo. Se nota sin embargo una diferencia significativa en los meses de invierno entre el campo orientado a 30 grados con el orientado 210 grados, lo mismo que pasaba en el caso anterior.

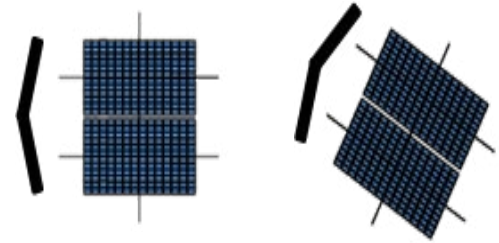


Tabla 3. Producción de un campo a dos aguas

ϕ	Mes	β	γ_1	H_T	γ_2	H_T	H_{TC}	P_{30}	P_{210}	P_{total}
23	Enero	15	30	4,275	210	2,782	3,529	80	52	131
23	Febrero	15	30	4,618	210	3,417	4,018	78	57	135
23	Marzo	15	30	5,762	210	4,867	5,315	107	91	198
23	Abril	15	30	6,187	210	5,906	6,047	111	106	218
23	Mayo	15	30	6,106	210	6,363	6,235	114	118	232
23	Junio	15	30	5,127	210	5,562	5,345	92	100	192
23	Julio	15	30	5,334	210	5,681	5,508	99	106	205
23	Agosto	15	30	5,745	210	5,704	5,725	107	106	213
23	Septiembre	15	30	5,079	210	4,521	4,800	91	81	173
23	Octubre	15	30	4,712	210	3,658	4,185	88	68	156
23	Noviembre	15	30	4,160	210	2,799	3,479	75	50	125
23	Diciembre	15	30	4,374	210	2,726	3,550	81	51	132
	Total			5,123		4,499	4,811	1123	987	2110

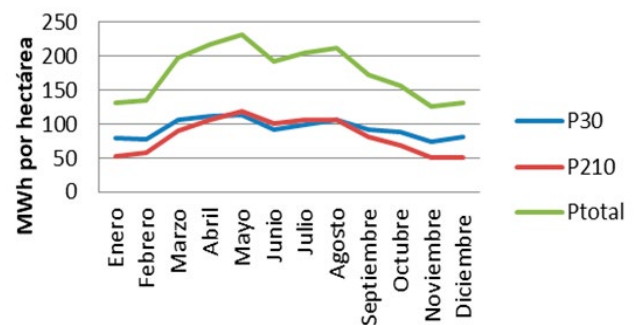


Fig. 3. Producción de un campo a dos aguas con $\gamma_1=30$ y $\gamma_2=210$

En la tabla 4 y Fig. 4 se dan los valores de la electricidad producida en un campo fotovoltaico a dos aguas con

ángulos de azimut igual a 60 y 240 grados. Igualmente que en los casos anteriores, la electricidad producida durante el año es casi lo mismo, con un valor insignificamente superior de 2125 MWh contra 2110 en los casos anteriores. La diferencia entre las dos alas va siendo menos en los meses de invierno.

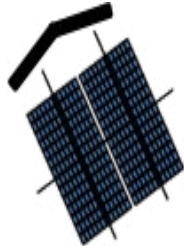


Tabla 4. Producción de un campo a dos aguas

f	Mes	b	g_1	H_1	g_2	H_2	H_{TC}	P_{60}	P_{240}	P_{total}
23	Enero	15	60	3,959	240	3,142	3,551	74	58	132
23	Febrero	15	60	4,381	240	3,716	4,048	74	62	136
23	Marzo	15	60	5,611	240	5,107	5,359	104	95	199
23	Abril	15	60	6,177	240	6,014	6,096	111	108	219
23	Mayo	15	60	6,209	240	6,353	6,281	115	118	234
23	Junio	15	60	5,256	240	5,509	5,382	95	99	194
23	Julio	15	60	5,450	240	5,645	5,547	101	105	206
23	Agosto	15	60	5,780	240	5,760	5,770	108	107	215
23	Septiembre	15	60	4,992	240	4,688	4,840	90	84	174
23	Octubre	15	60	4,507	240	3,930	4,218	84	73	157
23	Noviembre	15	60	3,880	240	3,125	3,502	70	56	126
23	Diciembre	15	60	4,025	240	3,115	3,570	75	58	133
Total				5,019		4,675	4,847	1100	1025	2125

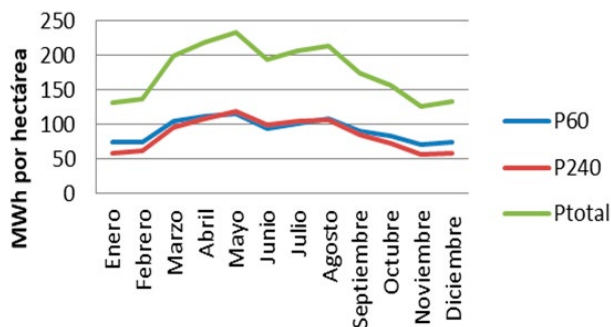


Fig. 4. Producción de un campo a dos aguas con $\beta=\gamma_1=60$ y $\gamma_2=240$

En esta tabla 5 se expresan los datos de producción de electricidad de un campo a dos aguas orientado en el eje este-oeste, o sea, con un ala hacia el este y otra hacia el oeste, o lo que es lo mismo, con ángulos de azimut iguales a 90 y 270 grados. En este caso,

Ambas curvas son iguales según se pueden apreciar en la Fig. 5, y los valores de la energía eléctrica producida tienen un valor un poco superior al resto pero el aumento no es significativo. El valor de la producción anual es de 2139. En la práctica, no hace presentar más variantes de ángulos

de azimut diferentes, pues todos serían simétricos o semejantes a los señalados anteriormente.

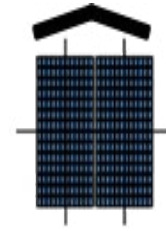


Tabla 5. Producción de un campo a dos aguas

ϕ	Mes	β	γ_1	H_1	γ_2	H_2	H_{TC}	P_{90}	P_{270}	P_{total}
23	Enero	15	90	3,558	270	3,581	3,570	66	67	133
23	Febrero	15	90	4,067	270	4,080	4,073	68	69	137
23	Marzo	15	90	5,390	270	5,398	5,394	100	100	201
23	Abril	15	90	6,129	270	6,144	6,136	110	111	221
23	Mayo	15	90	6,306	270	6,337	6,322	117	118	235
23	Junio	15	90	5,393	270	5,438	5,415	97	98	195
23	Julio	15	90	5,567	270	5,597	5,582	104	104	208
23	Agosto	15	90	5,793	270	5,823	5,808	108	108	216
23	Septiembre	15	90	4,858	270	4,887	4,872	87	88	175
23	Octubre	15	90	4,232	270	4,259	4,245	79	79	158
23	Noviembre	15	90	3,518	270	3,525	3,522	63	63	127
23	Diciembre	15	90	3,582	270	3,593	3,587	67	67	133
Total				4,866		4,888	4,877	1067	1072	2139

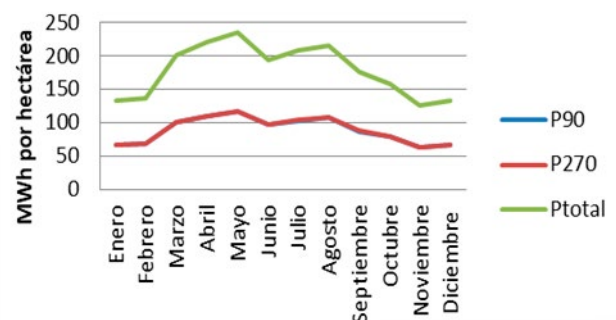


Fig. 5. Producción de un campo a dos aguas con $\gamma_1=90$ y $\gamma_2=270$

En la tabla 6 y la figura 6 se comparan los valores de la producción de electricidad en campos a dos aguas en dependencia de los ángulos de azimut entre sí y con el campo de referencia orientado al sur. El valor mínimo de la producción de electricidad en campos a dos aguas está dado por la orientación en el eje norte-sur, o sea, con un plano con azimut igual a 0 grados y otro con azimut igual a 180 grados y llega a un valor de 2110 MWh anuales por hectárea.

A su vez, el valor máximo de la producción de electricidad en este tipo de campos es cuando se orientan en el eje este-oeste, o sea, con ángulos de azimut iguales a 90 y 270 grados. Sin embargo, la diferencia entre ambos es insignificante. El valor máximo es de 2139 MWh anuales por hectárea.

Tabla 6. Valores comparativos de la producción de electricidad

La Habana	Sur	0° 180°	90° 270°
Mes	P _{total}	P _{total}	P _{total}
Enero	109	131	133
Febrero	106	135	137
Marzo	145	198	201
Abril	149	218	221
Mayo	151	233	235
Junio	123	193	195
Julio	132	206	208
Agosto	143	213	216
Septiembre	123	173	175
Octubre	119	155	158
Noviembre	102	125	127
Diciembre	112	131	133
TOTAL	1514	2110	2139

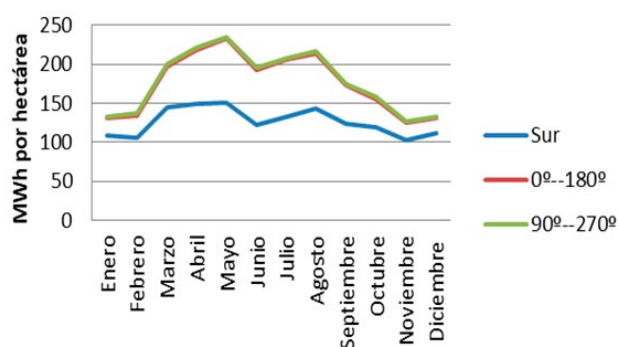


Fig. 6. Comparación de la producción de La Habana

Sin embargo, se hace evidente la gran diferencia en la producción de electricidad de los campos a dos aguas con el campo orientado al sur con un aprovechamiento de 67 % del área. El campo orientado al sur produce solamente 1514 MWh al año por hectárea.

Ya en trabajos anteriores se vio que en Cuba, debido a que es alargada y estrecha y la latitud varía solamente 3 grados, la producción de un parque fotovoltaico en cualquier lugar del país producía aproximadamente lo mismo. Con el objetivo de poder comparar, se da en la tabla y figura 7 los valores de la producción de campos similares a los anteriores, pero situados en Santiago de Cuba.

Cuando se compara esta tabla 7 con la 6 se hace evidente que las diferencias entre las mismas no son significativas y lo que vale para un lugar vale para el otro. Así, la producción de electricidad en Santiago de Cuba en un campo orientado al sur sube 6 % con relación a La Habana, mientras que la producción de electricidad en un campo a dos aguas con orientación norte-sur es mayor 2 % y en un campo con orientación este-oeste es también de solo 2 % mayor.

Tabla 7. Valores comparativos de la producción de electricidad

Santiago de Cuba	Sur	0° 180°	90° 270°
Mes	P _{total}	P _{total}	P _{total}
Enero	120	139	141
Febrero	114	141	143
Marzo	154	203	206
Abril	156	219	222
Mayo	156	231	233
Junio	126	191	192
Julio	136	203	205
Agosto	149	213	216
Septiembre	130	176	178
Octubre	128	161	164
Noviembre	112	132	134
Diciembre	123	141	143
TOTAL	1604	2151	2179

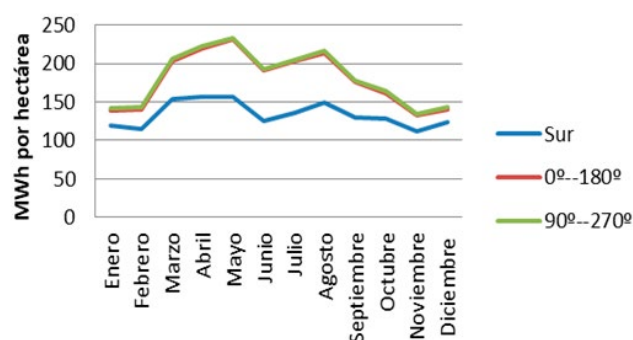


Fig. 6. Comparación de la producción de Santiago de Cuba

Conclusiones

El rendimiento de un campo fotovoltaico sobre estructura a dos aguas es en todos los meses considerablemente superior al de un campo orientado al sur con un aprovechamiento de 67 % de su área.

El valor anual de la energía eléctrica producida en un campo a dos aguas es 40% superior al producido en un campo estándar orientado al sur.

La influencia del ángulo de azimut sobre la producción de un campo fotovoltaico a dos aguas no es significativa. El valor mínimo lo tiene un campo orientado en el eje norte-sur con una ala con azimut de 0° y la otra con azimut de 180° y el máximo lo tiene un campo orientado en el eje este-oeste con una ala con azimut de 90° y la otra con azimut de 270° , pero la diferencia es de solo 1,3 %.

Las estructuras a dos aguas, ya sean formando naves o directamente sobre pisos han demostrado tener una gran resistencia al viento, lo que las hacen prometedoras para la producción fotovoltaica en Cuba.

Antes de tomar una decisión es importante tomar en cuenta otras variantes, principalmente la de aumentar el aprovechamiento del terreno en campos orientados al sur aunque haya sombras en algunos días de invierno y conocer el costo del kilowatt-hora producido.

Bibliografía

- BÉRRIZ PÉREZ, LUIS (2019). «Influencia de la Orientación de los Paneles Solares en la Producción de Energía Eléctrica de Sistemas Fotovoltaicos en Espacios Limitados». En revista *Eco Solar* No 67. La Habana: Ed. Cubasolar.
- BÉRRIZ PÉREZ, LUIS Y MANUEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ (2018). *Cálculo de la distancia entre filas de paneles solares fotovoltaicos*. *Eco Solar* No 64: abr.-jun. La Habana: Ed. Cubasolar.
- BÉRRIZ PÉREZ, LUIS; MANUEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ; WILFREDO PÉREZ BERMÚDEZ Y JESÚS MIGUEL IGLESIAS FERRER (2016). *Manual de calentadores solares*. 2da ed. La Habana: Ed. Cubasolar.
- BÉRRIZ PÉREZ, LUIS Y ÁLVAREZ GONZÁLEZ, MANUEL (2004). «Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente». En revista *Eco Solar* No 8: abr.-jun La Habana: Ed. Cubasolar.
- DUFFIE J. A. AND W. A. BECKMAN (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. New York: Wiley Interscience.
- STOLIK NOVYGRAD DANIEL (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba*. La Habana: Ed. Cubasolar.

Recibido: Enero 2019

Aceptado: Febrero 2019