



TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL

Sistemas de ajuste manual de inclinación de paneles fotovoltaicos y de seguimiento automático horizontal de un eje

Adjustable tilt system (manually) and horizontal single axis tracker

Luis Gutiérrez Urdaneta¹ *; Lenyer Padrón Suárez¹; Héctor Luis Pentón Julián¹; Carlos de la Incera Núñez²

¹ Empresa de Hidroenergía, La Habana, Cuba.

² CUEX SA, Materiales para la Industria y la Construcción.

* Autor de correspondencia: lenyer@hidroe.une.cu

Recibido: 10 enero 2020

Aprobado: 24 abril 2020

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



RESUMEN/ABSTRACT

Todos los parques fotovoltaicos en explotación en Cuba han sido montados con orientación de los paneles hacia el Sur y con un ángulo de inclinación fijo, generalmente 15 grados. Existen otras alternativas, como el ajuste manual de la inclinación de paneles fotovoltaicos y el de seguimiento automático horizontal de un eje, que permitirían aumentar la generación eléctrica, con la misma capacidad instalada, para futuros proyectos. El ajuste de la inclinación de los paneles podría ser, además, una solución para aminorar los daños de los huracanes en los parques solares. Se comparan, desde el punto de vista energético y financiero, la tecnología de ángulo fijo permanente con estas dos alternativas de ángulos ajustables. Se revisó la literatura cubana e internacional sobre el tema y se realizaron simulaciones de un proyecto real en la provincia de Las Tunas. Se concluye que es factible evaluar la introducción de ambos sistemas para futuros proyectos en el país.

Palabras clave: ángulo de inclinación, optimización, seguimiento solar

All solar farms commissioned in Cuba have been mounted towards the South and with fixed tilt, generally 15 degrees. There are other technologies, as the adjustable tilt system (manually) and the automatic horizontal single axis tracker, that would increase the generation with the same installed capacity for future projects. Besides, the adjusting of angles could be a solution to reduce damages caused by hurricanes. The fixed tilt technology is compared, since an energetic and financial point of view, with those other two adjusting angles systems. Cuban and international academic literature were reviewed and simulations for a real project in the province of Las Tunas were realized. After these analyses, it is concluded that the introduction of both technologies is feasible for future projects in Cuba.

Keywords: tilt, optimization, solar tracking

INTRODUCCIÓN

Para el año 2030 se proyecta que la generación fotovoltaica alcance en Cuba el 12,5 % del total de la producción de electricidad a partir de fuentes renovables de energía. El recrudescimiento del bloqueo de los Estados Unidos a la importación de combustibles fósiles en meses recientes ha reforzado la necesidad de promover aún más el uso de fuentes renovables de energía y de lograr una mayor eficiencia en la generación fotovoltaica, por razones de seguridad nacional.

Cómo citar el artículo:

Luis Gutiérrez Urdaneta, et al. Sistemas de ajuste manual de inclinación de paneles fotovoltaicos y de seguimiento automático horizontal de un eje

2020, vol. 41, n. 2, mayo/agosto. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

Por otra parte, la tierra y otras superficies son recursos limitados, por lo cual se impone la utilización más intensiva posible. Todos los parques solares que actualmente generan electricidad en Cuba, y otros que se proyectan, utilizan como sistema el de ángulo fijo (SAF), generalmente 15 grados, y orientados al Sur.

Sin embargo, un parque con sistema de seguimiento automático horizontal de un eje (HSAT) está en construcción en la Zona Especial de Desarrollo Mariel, con inversión extranjera. El objetivo de este trabajo es evaluar en Cuba la viabilidad energética y financiera de los sistemas de ajuste manual de inclinación de paneles fotovoltaicos (SAM) y de HSAT.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los autores han revisado la literatura nacional e internacional sobre los sistemas SAM y HSTA, han utilizado las bases de datos meteorológicos del Centro de Física de la Atmósfera, han desarrollado aplicaciones informáticas para la evaluación de alternativas, han realizado simulaciones y han calculado la evaluación financiera mediante el descuento de flujos y el efecto en la sustitución de importaciones de combustibles fósiles.

Bases de datos meteorológicos del Centro de Física de la Atmósfera

Los datos mensuales promedio de radiación global horizontal y de la temperatura en el día, según la latitud y longitud de cada ubicación en Cuba, se obtuvieron del libro en Excel "Interp", con el formato que se muestra en la figura 1, uno de los resultados del proyecto "Determinación de la distribución de radiación solar sobre el territorio nacional partiendo de la información que brinda la red heliográfica", del Centro de Física de la Atmósfera, del Instituto de Meteorología [1].

Latitud:	21,30												
Longitud:	-80,20												
Valores de Radiación Solar sobre Superficies con varias inclinaciones (Kwh/m ²)													
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
Global Horiz.	4,11	5,06	5,56	6,56	6,39	6,36	6,54	6,37	5,85	5,13	4,16	3,88	5,49
Latitud	5,37	5,90	5,95	6,46	5,95	5,77	6,00	6,14	6,05	5,78	5,05	4,90	5,74
Global Norm.	6,77	7,29	7,30	8,09	7,64	7,44	7,74	7,69	7,36	7,03	6,24	6,16	7,19
Directa Norm.	5,70	6,03	5,86	6,44	5,88	5,63	5,95	6,00	5,84	5,71	5,13	5,14	5,73
45° Sur	5,81	6,03	5,67	5,63	4,87	4,59	4,82	5,22	5,56	5,76	5,36	5,37	5,34
15° Sur	5,00	5,66	5,90	6,57	6,16	6,03	6,24	6,28	6,05	5,62	4,82	4,63	5,72
Temperatura	26,7	27,3	28,2	29,2	30,8	30,8	31,6	31,7	31,1	30,0	28,9	28,0	29,4

Fig. 1. Hoja de salida del libro "Interp"

Aplicaciones informáticas desarrolladas para el cálculo de energía y la optimización de ángulos

Para comparar los resultados en varias coordenadas geográficas de Cuba, con ángulo de inclinación fijo de 15⁰, con las variantes de ajuste de ángulos mensual, estacional y semi anual, se preparó una aplicación informática ("Calculador de energía FV") con cinco variantes de aplicación (figura 2). Esta aplicación permite también determinar el ancho de las filas y la distancia mínima entre ellas para los parques con tecnologías SAF y SAM, y la distancia entre los ejes de las columnas para los parques con tecnología HSAT, y también está disponible en la Empresa de Hidroenergía para su uso por cualquier institución nacional.

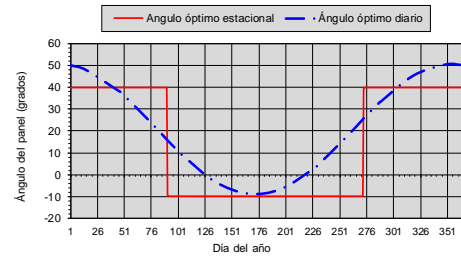
"Calculador de energía FV" se construyó, entre otros elementos, a partir de una hoja de cálculo "descargada" y modificada con las fórmulas convencionales para la determinación de la radiación sobre plano inclinado [2-3], a la cual se le agregó el cálculo de la energía eléctrica [4], y el libro "Interp". Los resultados obtenidos con esta aplicación para la determinación de la radiación sobre plano inclinado y la energía, fueron comparados con los cálculos realizados con el conocido software *RETS creen* [5] para siete diferentes sitios con latitudes entre 23,17 y 19,97, y ángulos de 15° y 45° para cada localidad, es decir, 14 comparaciones. La radiación anual sobre plano inclinado y la energía obtenidas por "Calculador de energía FV", fueron inferiores en 0,83% a las halladas por *RETS creen* con 15° de inclinación y 1,37% con 45°. Las desviaciones típicas fueron insignificantes: 0,02% y 0,03%, respectivamente. Así se validó "Calculador de energía FV" demostrando que tiene suficiente precisión para análisis preliminares.

"Calculador de energía FV" permite de manera rápida y confiable determinar la generación estimada máxima bajo diferentes variantes de ajuste manual de ángulos en cada sitio: para ajustes de inclinaciones óptimas cada mes, por estaciones (de mayo a agosto, de septiembre a octubre, de noviembre a febrero y de marzo a abril), y por dos periodos del año (de abril a septiembre y de octubre a marzo).

CALCULO DE ENERGIA PARA PANELES FIJOS AJUSTABLES SEMANUAL		Nombre del proyecto		Amancio Rodriguez	
Coordenadas					
Potencia (kWp)	1.242,0	Latitud	20,80	Longitud	-77,60
° azimut	180,0	Albedo		Vegetación	0,2
H = Irradiación promedio diaria y anual		6,00	kWh/m ² .d	2189,02	kWh/m ² .an
r = Rendimiento de diseño del módulo (%)	16,5%	r _e = Rendim. estim. módulo por temp. (%)		14,6%	
i = Rendimiento del Inversor	98,7%	p = Pérdidas por suciedad		2,5%	
q = Pérdidas por calidad módulos	1,5%	m = Pérdidas por "mismatching"		2,0%	
o = Otras pérdidas	4,0%	P = Perd. varias totales	10,0%	E = Energía (MWh/an)	2.141,5
FU = Factor de utilización		19,7%	Energía MWh / Potencia kWp		1,72
Ap = Área de paneles PSFV (m ²)	7.529	m ²	A = Área total aproximada (ha)		3.81294

* Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States, NREL, 2013.

OPTIMIZACION AJUSTE ESTACIONAL DE INCLINACION



	° Inclinación preliminar de los paneles	° Inclinación optima de los paneles	Radiación solar diaria horizontal kWh/m ² día **	Temperatura ambiente °C	Horas promedio de luz solar	Radiación solar diaria inclinada kWh/m ² día	Energía MWh
Enero	40,0	40,0	4,48	29,5	10,9	5,74	175,0
Febrero	40,0	40,0	5,15	30,0	11,3	6,01	165,1
Marzo	40,0	40,0	5,76	30,7	11,9	6,31	178,5
Abril	1,7	-10,0	6,54	31,4	12,5	6,32	185,7
Mayo	1,7	-10,0	6,37	31,6	13,0	6,31	191,3
Junio	1,7	-10,0	6,42	32,5	13,3	6,49	189,6
Julio	1,7	-10,0	6,61	33,0	13,1	6,64	199,5
Agosto	1,7	-10,0	6,55	33,0	12,7	6,41	192,9
Septiembre	1,7	-10,0	5,96	32,0	12,1	5,64	166,3
Octubre	40,0	40,0	5,25	31,7	11,5	5,82	175,9
Noviembre	40,0	40,0	4,56	30,6	11,0	5,64	165,7
Diciembre	40,0	40,0	3,87	29,6	10,7	5,08	156,0
Promedio anual	22,9	15,0	5,63	31,3	12,0	6,00	178,5

** Base de datos de proyecto "Determinación de la distribución de radiación solar sobre el territorio nacional partiendo de la información que brinda la red heliográfica", Centro de Física de la Atmósfera, Cuba, 2013

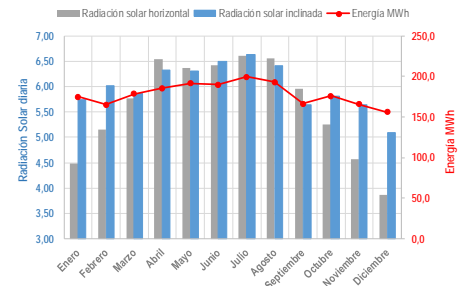


Fig. 2. Hoja de salida de la aplicación "Cálculo de energía FV"

El sistema de ajuste manual de inclinación de paneles fotovoltaicos

El ajuste del ángulo de inclinación dentro del año (para aumentar la energía) ha sido tratado por la literatura científica. Dixit T.V, Yadav A. y Gupta S. (2015) concluyeron, luego de analizar los datos meteorológicos de 23 ciudades de la India, que cambiando la inclinación de los paneles dos veces en el año aumentaba la generación en 2,91%, y si se realizaba 4 veces (por estaciones) un 5,5% [6]. Berishaa X., Zeqiria A. y Mehaa D. (2018), hallaron que la radiación promedio anual aumentaba un 6% para Pristina, la capital de Kosovo, con el ajuste mensual del ángulo de inclinación con relación al óptimo fijo anual, y un 4,6% con ajustes por estaciones [7]. Abdallah R., Juaidi A., Abdel-Fattah S. y Manzano-Agugliaro F. (2020), determinaron también que el ajuste mensual de los ángulos en las principales ciudades de Palestina posibilitaría generar más del 6% de energía anual, y los ajustes estacionales o semi anuales alrededor del 5% [8]. En Rumanía, Oprea R., Istratem M., Machidon D., et al. (2019) realizaron el cálculo de la radiación sobre plano inclinado en Iasi y concluyen, a partir de los cálculos de cuatro modelos diferentes, que con el ajuste mensual del ángulo de inclinación se obtendría, como promedio, una ganancia en radiación de 4,76%, con el ajuste estacional 3,69% y con el semi anual 3,18%, con respecto al ángulo fijo anual [3].

En Cuba, Díaz Santos R., Castro Fernández M., Santos Fuentefría A. et al. (2018) también abordan el tema y concluyen, luego de realizadas las simulaciones para un parque solar en La Habana, que con el ajuste del ángulo en dos estaciones (abril-septiembre y octubre-marzo) la generación se incrementaría 5,4 % con relación a un ángulo fijo de 15°, y 4,6% con respecto a una inclinación igual a la latitud [9]. Shiva Kumar B. y Sudhakar K. (2015) realizaron la evaluación de un parque fotovoltaico de 10 MW en funcionamiento, localizado a 18.75° de latitud Norte en la India, con ajuste manual del ángulo de inclinación de la siguiente manera: de noviembre a febrero el ángulo es 33.75°, de mayo a agosto 3.75°, y en los meses de septiembre, octubre, marzo y abril 18.75° [10].

Los autores del presente trabajo, a partir de la base de datos meteorológicos mencionada y mediante el software elaborado "Calculador de Energía FV" determinaron la generación potencial en 10 localidades de Cuba (tabla 1). Los ángulos mínimos se fijan en -10° y 10°, según sea el caso, para reducir el efecto de la acumulación de polvo sobre los paneles.

La fabricación de las estructuras para el montaje de los SAM, aunque más complejas que las de los SAF, pudieran ser encaradas por la industria nacional. El ajuste manual de los ángulos no incorpora costos significativos adicionales a la operación y mantenimiento de los parques, y según varios fabricantes chinos, toma dos minutos con un trabajador o alrededor 30 segundos con tres trabajadores por cada cadena (array), según el tipo de estructura. En la figura 3, se muestran dos tipos de estructuras metálicas para los SAM: con la primera se logra el ajuste mediante una manivela y con la otra con "pasadores".

Tabla 1. Incremento preliminar estimado de energía con variantes de ajuste de ángulo					
Datos de los sitios			Aumento % de energía de variantes de ajuste <i>intra</i> anual de ángulos versus Ángulo Fijo 15⁰*		
Localidades	Latitud	Longitud	Dos veces al año: →Abr-Sep±10⁰ →Oct-Mar 40⁰	Cuatro veces al año**: →May-Ago-10⁰ →Sep-Oct →Nov-Feb →Mar-Abril	Todos los meses**: (ángulos mínimos ±10⁰)
Matanzas	23,06	-81,56	3,7	4,7	5,0
Güines	22,84	-82,03	3,6	4,6	4,9
Guane	22,84	-80,21	3,7	4,7	5,1
Pinar del Río	22,42	-83,70	3,7	4,6	4,9
Cienfuegos	22,15	-80,45	3,7	4,7	5,0
Camagüey	21,38	-77,92	3,8	4,7	5,0
Puerto Padre	21,20	-77,60	3,8	4,7	5,0
Amancio Rodríguez	20,80	-77,60	3,6	4,5	4,8
Manzanillo	20,35	-77,12	3,5	4,4	4,7
Santiago de Cuba	20,02	-75,83	3,4	4,3	4,5
Promedio simple			3,6	4,6	4,9

*La energía fue calculada en todos los casos con los siguientes datos de entrada: azimut 180⁰, eficiencia de los paneles 14,8%, eficiencia del inversor 98,7%, pérdidas varias 5%.

**Los ángulos mensuales o por estaciones son los que optimizan la energía y varían por sitios.

Fuente: Cálculo de los autores utilizando la aplicación "Calculador de Energía FV".

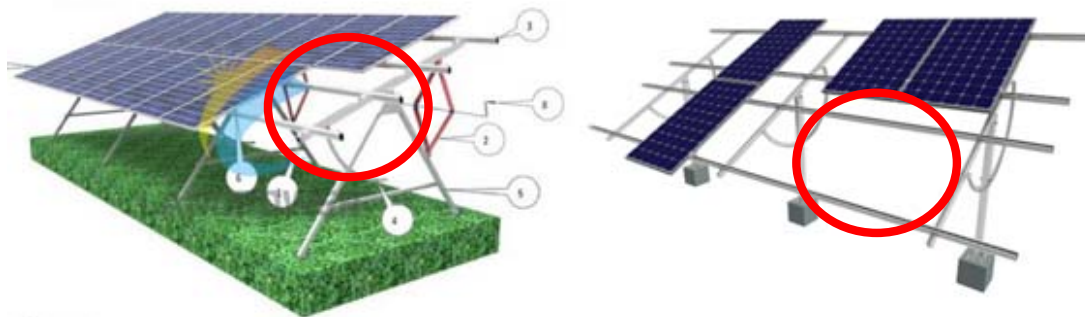


Fig. 3. Diferentes mecanismos mecánicos para el ajuste de ángulos

La posibilidad de fijar el ángulo en 0⁰, constituye una solución para aminorar los daños de los huracanes. Sin embargo, el sistema de ángulos ajustables requiere mayor superficie, pues la distancia entre el inicio de una fila y el inicio de la siguiente aumenta con la inclinación máxima que se proyecte, de manera que este sistema es aplicable cuando existe holgura en el área total del parque, pero no es posible aumentar el número de paneles por limitación de espacio físico (por ejemplo, techos de edificaciones) o por potencia de los inversores. También, en instalaciones de una sola fila a lo largo de carreteras. De existir holgura, y de ser posible incrementar el número de colectores, la decisión final de aumentar la potencia o aplicar el sistema de ángulos ajustables es un problema netamente económico a resolver y específico de cada proyecto.

El sistema de seguimiento automático horizontal de un eje

Con el abaratamiento de los sistemas de seguimiento, ya la mitad de los parques fotovoltaicos operando en los Estados Unidos en 2015 incluían sistemas de seguimiento en un eje (figura 4).

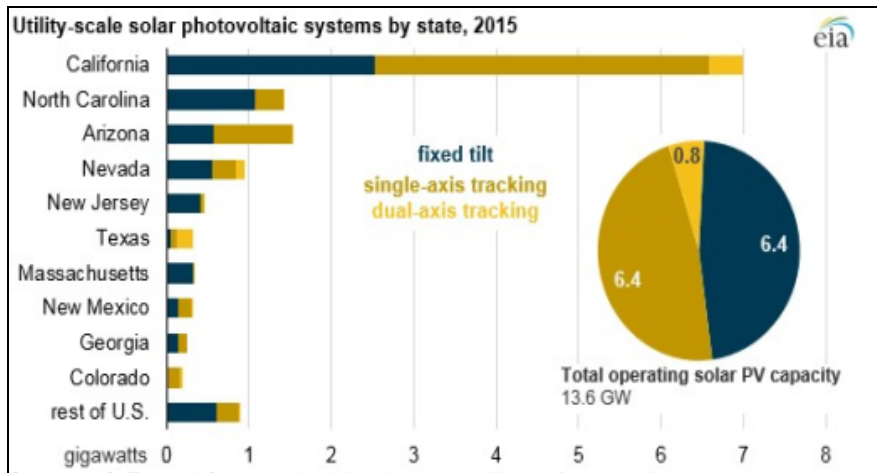


Fig. 4. Tipos de sistemas operando por estados en los Estados Unidos, 2015 [9].

En el sistema de seguimiento automático horizontal de un eje las cadenas de paneles se instalan paralelas al eje Norte-Sur y el seguimiento se realiza de Este a Oeste durante todo el día. Considerando la producción de energía, es el sistema idóneo para los sitios de baja latitud (Ver figura 5) [11]. Su limitación es que requiere una mayor superficie que el sistema de paneles fijos para una misma potencia.

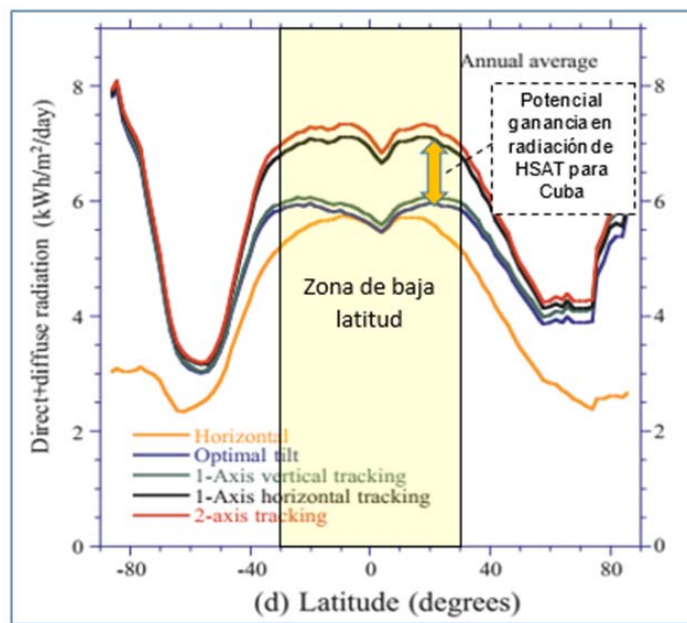


Fig. 5. Radiación directa y difusa por sistemas y latitudes. Figura tomada de Jacobson M. Z. y Jadhav V. (2018) [12], con señalizaciones de los autores.

Existe también una amplia literatura internacional sobre la viabilidad de los HSAT en el mundo. En la tabla 2, se muestran los resultados de varios de los estudios realizados en localidades de baja latitud (entre 30° y -30°).

Tabla 2. Aumento de energía o radiación HSAT vs. SAF. Varios países					
Localidad	País	Latitud	Método de medición	% Incremento de energía o radiación de HSAT vs. SAF	Fuente
Boca de Ratón*	EUA	26,21	Monitoreo de un año	15	[13]
Bellary**	India	15,14	Simulación PVSyst	18	[14]
Chitradurga**	India	14,22	Simulación PVSyst	18	[14]
Tiruchuli**	India	9,57	Simulación PVSyst	19	[14]
Parmakudi**	India	9,50	Simulación PVSyst	19	[14]
NP Kunta**	India	14,05	Simulación PVSyst	18	[14]
Gani**	India	15,60	Simulación PVSyst	18	[14]
Mahabubnagar**	India	16,14	Simulación PVSyst	16	[14]
Sangareddy**	India	17,63	Simulación PVSyst	17	[14]
Hoa Lac*	Viet Nam	21,02	Simulación PVSyst	18	[15]
Guangzhou*	China	23	Cálculos de autores	15	[16]
Nanning*	China	22,8	Cálculos de autores	15	[16]
Taipei*	China	25,03	Cálculos de autores	14	[16]
Dongfang*	China	19,83	Cálculos de autores	20	[16]

* Ángulo fijo: óptimo calculado **Ángulo fijo: latitud

Estudios en diversos países muestran que con la tecnología HSAT, la generación o la radiación captable aumentan notablemente con respecto a las obtenidas con tecnología SAF. En EEUU, en Boca de Ratón el resultado de un monitoreo arrojó un aumento del 15% en la generación [13]. En la India, en 8 sitios las simulaciones mostraban un incremento de generación entre el 16 % y el 19% [14]. En Hoa Lac, VietNam la simulación proyectó un aumento del 18 % [15]. En el caso de China, en varios sitios, los incrementos de radiación captable oscilaban entre el 14 y el 20 % [16]. En el caso de HSAT, con la fijación totalmente horizontal de las cadenas, también se podrían aminorar los daños de los fuertes vientos. Aunque la tecnología es mucho más compleja que la de los SAM, los encadenamientos entre universidades, centros de investigación e industria nacional podrían hacer factible la producción de sistemas de seguimiento solar en Cuba. De hecho, existen trabajos de diploma y artículos publicados por autores cubanos con proposiciones técnicas para sistemas de seguimiento [17].

El proyecto original del parque fotovoltaico de Amancio Rodríguez

Para realizar una evaluación más precisa hemos tomado un proyecto real de parque fotovoltaico. Este es un proyecto de 1 242 kWp, con 3 880 módulos inclinados de Norte a Sur a 15° organizados en 194 cadenas. Está enclavado en un área con holgura. La limitante para aumentar el número de paneles es la potencia del inversor (1 000 kW). La distancia entre el inicio de la fila anterior y el inicio de la posterior es de 8,70 metros, suficiente para evitar el sombreado en el solsticio de invierno a las 8:00 AM. Los resultados de las simulaciones permiten realizar una evaluación más precisa y diseñar espacialmente o realizar cambios en el diseño, así como evaluar el sombreado. Los datos de la primera variante se muestran en la figura 6. A continuación, se realizarán las simulaciones y modificaciones de diseño para dicho proyecto con tecnologías SAM y HSAT.

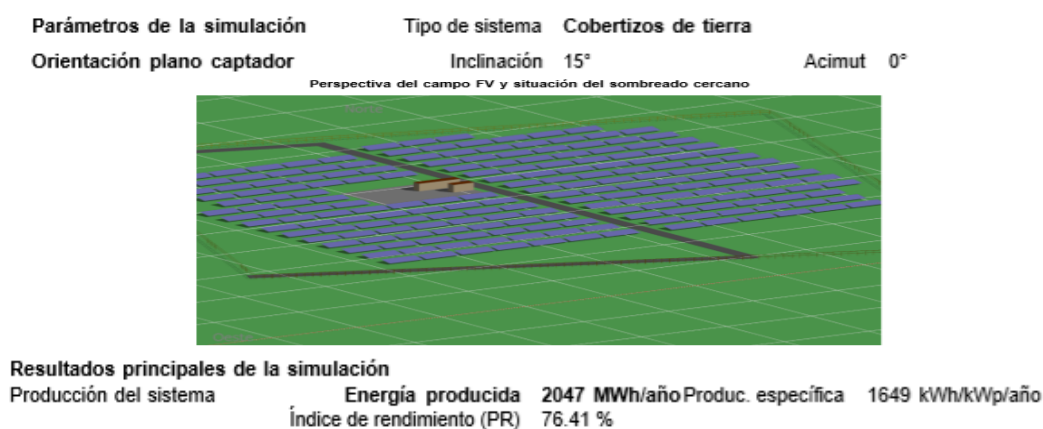


Fig. 6. Simulación del proyecto original.

El proyecto modificado con el sistema de ajuste manual de inclinación de paneles

Se verifica que la distancia entre el inicio de la fila anterior y el inicio de la posterior son suficientes para evitar el sombreado en el solsticio de invierno a las 8:00 AM. Mediante el software “Calculador de energía FV” se determinan preliminarmente la división por meses de las dos estaciones y los ángulos para cada una (la peor variante de ajuste manual). Se simula el ajuste de ángulos con el arreglo: de abril a septiembre -10° y de octubre a marzo 40° . Los resultados se muestran en la figura 7.

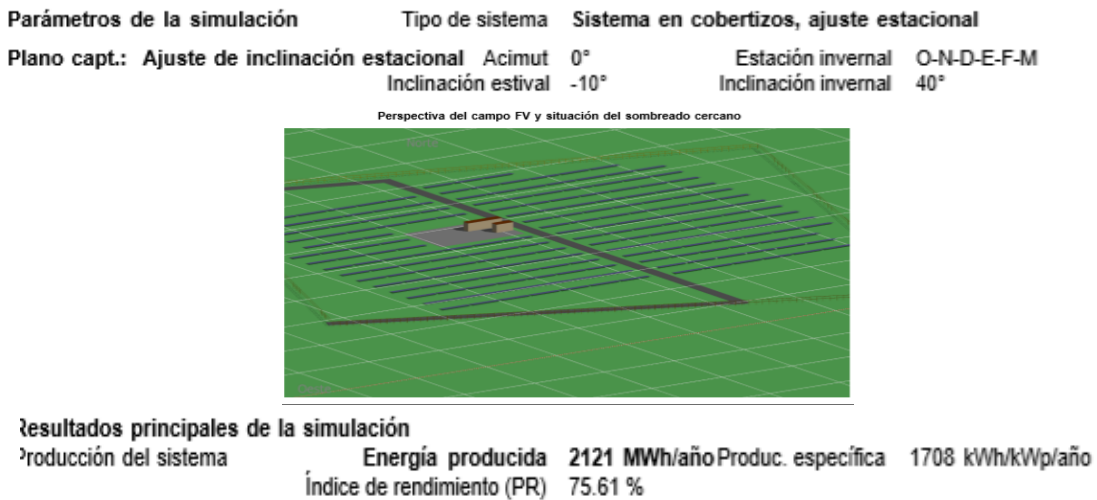


Fig. 7. Simulación con el sistema de ajuste manual de inclinación de paneles.

El proyecto modificado con el sistema de seguimiento automático horizontal de un eje

Las cadenas deben organizarse en columnas paralelas al eje Norte Sur. La distancia mínima entre los ejes de las columnas debe ser 10,5 metros para evitar sombreado a las 8:00 am en el solsticio de invierno, pero por las limitaciones de espacio se proyecta 9,79 metros como distancia promedio entre los ejes de las cadenas. Se utilizó un sistema que realiza el seguimiento entre los ángulos -45° y 45° en el eje Este-Oeste, sin inclinación en el eje Norte-Sur. Los resultados se muestran en la figura 8.

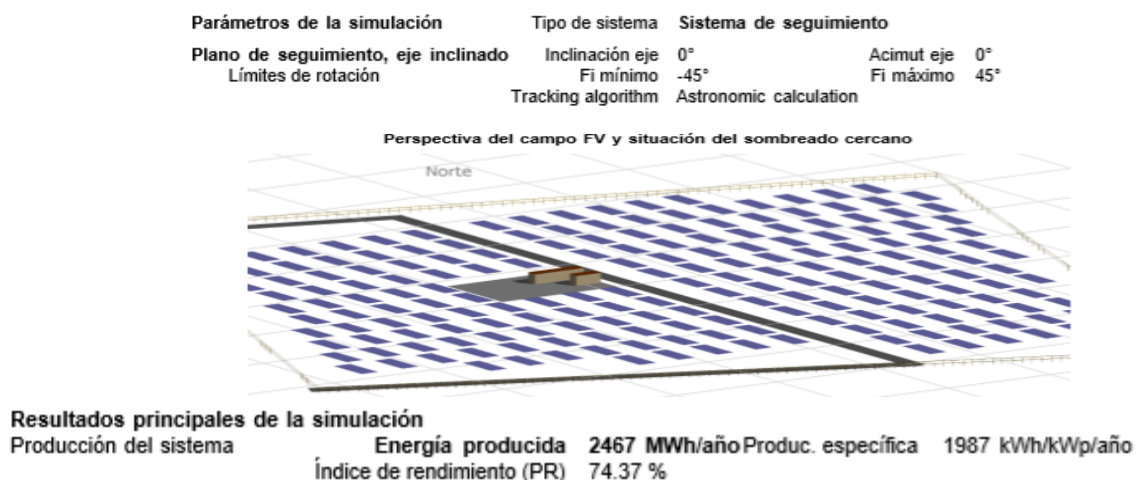


Fig. 8. Simulación con el sistema de seguimiento automático horizontal de un eje

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Comparación de las simulaciones del proyecto del parque de Amancio Rodríguez

Como se había previsto de manera preliminar, el sistema de ajuste manual de inclinación de paneles fotovoltaicos dos veces al año, aumenta la producción de energía en 3,6%. La simulación con el seguimiento automático horizontal de un eje, como se refleja en los estudios internacionales, aumenta notablemente la producción del parque. En este caso el incremento es de más de 20% (tabla 3).

Sistema		MWh	Δ vs. A (MWh)	% Δ vs. A
A	Ángulo fijo 15°	2 047	-	-
B	Ángulo ajustable semi anual (2 veces al año)	2 121	74	3,6
C	Seguimiento automático horizontal de un eje	2 467	420	20,5

Evaluación económico-financiera de las simulaciones con SAF, SAM y HSAT para el parque fotovoltaico de Amancio Rodríguez

Para evaluar la rentabilidad económico-financiera de las tecnologías de ajuste de inclinación de paneles de forma manual se asumieron premisas y se obtuvieron ofertas de un proveedor chino (tabla 4), para un parque de 2.5 MW. Solamente se tendrán en cuenta los ingresos y egresos de efectivo incrementales de SAM y HSAT *versus* SAF (incrementos energía y aumentos de valores de inversión por estructuras y equipamiento). El resto de los gastos, excepto los de mantenimiento del HSAT, no varían o lo hacen de manera no significativa en las tres alternativas (SAF, SAM y HSAT).

Los ingresos e inversión incrementales y los resultados económico-financieros de SAM y HSAT *versus* SAF se muestran en la tabla 5.

De haberse podido simular variantes con ajuste estacional y mensual de ángulos de inclinación, con toda seguridad, los resultados financieros incrementales del sistema de ajuste manual de inclinación de paneles fotovoltaicos *versus* el de ángulo fijo hubieran sido aún más favorables (Ver tabla 1). Igualmente, de haber sido posible aumentar la distancia entre cadenas en la simulación del HSAT el incremento de energía hubiera sido superior [18-19].

Precios CFR (China – La Habana) del proveedor para 2,5 MW (USD)	Estructura metálica SAF	201 550
	Estructura metálica SAM	389 700
	Estructura metálica y equipamiento HSAT	308 000
Extrapolación de precios CFR (China – La Habana) para 1,242 MW (USD)	Estructura metálica SAF	104 302
	Estructura metálica SAM	201 670
	Estructura metálica y equipamiento HSAT	159 390
Gasto anual de mantenimiento extra para HSAT (USD)*		1 000
Índice para aplicar al costo de importación (seguros, transportación y otros)		1,2
Tarifa de venta de electricidad para la evaluación de factibilidad (CUP/MWh)		270
Tasa de depreciación anual de las estructuras (a efectos de impuesto)		6%
Tasa de descuento		7%
Consumo neto (g/kWh) en generación con combustible fósil		300
Vida útil del proyecto (años)		25
Tasa de reducción anual de eficiencia de los paneles		0,89%
* Se ha asumido el doble de lo informado por el proveedor del sistema HSAT para un parque de 2,5 MW.		

Tabla 5. Resultados económico-financieros		
Conceptos	SAMvsSAF	HSATvsSAF
Incremento de la inversión inicial (USD)	97 368	55 088
Diferencia de producción durante la vida útil (MWh)	1 665	9 452
Aumento de ahorro de combustible fósil en vida útil (t)	500	2 835
Aumento de ahorro de combustible fósil en vida útil (CUC)*	357 351	2 028 208
Antes de impuestos		
Valor Actual Neto incremental (pesos)	99 077	1 159 380
Tasa Interna de Rentabilidad de la inversión incremental	15,9%	170,7%
Continuación tabla5		
Tiempo de recuperación de la inversión incremental (años)	6,0	0,6
Después de impuestos (35% de ingresos netos)		
Valor Actual Neto incremental (pesos)	47 203	743 867
Tasa Interna de Rentabilidad de la inversión incremental	11,5%	112,7%
Tiempo de recuperación de la inversión incremental (años)	7,8	0,9
* Cálculo anual según pronóstico de precios ponderados de combustible fósil del Sistema Eléctrico Nacional, utilizando como una de sus fuentes la proyección del precio del petróleo Brent hasta 2050, suministrada por la Dirección General de Economía del MINCEX en septiembre de 2017.		

CONCLUSIONES

La elección final en cada proyecto, sea la tecnología de paneles fijos, con ángulo ajustable manualmente o de seguimiento automático horizontal de un eje u otra, dependerá de las condiciones específicas de cada sitio, especialmente las topográficas, meteorológicas y de áreas disponibles: “un traje a la medida”. Los sistemas de ángulo ajustable manual, generalmente, y los de seguimiento horizontal de un eje requieren de mayores áreas por capacidad instalada. No obstante, la tecnología HSAT es probablemente la de mayor generación por unidad de superficie. Los resultados de los análisis de ahorro de combustibles fósiles y de viabilidad económico-financiera muestran resultados satisfactorios para las tecnologías SAM y HSAT en el proyecto del parque fotovoltaico de Amancio Rodríguez. Con la eventual producción nacional de las estructuras y otros componentes, el beneficio en la sustitución de importaciones puede ser mayor. Ambas tecnologías, además, mediante el abatimiento de los paneles, pueden aminorar el efecto de los huracanes y vientos fuertes, y así evitar el desmontaje de paneles. A partir de los resultados de este trabajo, en la empresa de Hidroenergía se aprobó la inclusión de 30 MW con tecnología HSAT en los próximos proyectos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del ingeniero Silvio León Águila en el acceso a la información del proyecto del parque fotovoltaico de Amancio Rodríguez y de otros proyectos, así como sus comentarios y atinadas observaciones. También al ingeniero Ricardo Mangana Pérez, Director General de la Empresa de Hidroenergía, por la promoción, análisis y acompañamiento de este proyecto, así como de las nuevas ideas, cuando van dirigidas a aumentar la eficiencia productiva y al desarrollo de las fuentes renovables de energía en Cuba.

REFERENCIAS

- [1]. Bárcenas Castro M., Borrajero Montejó I., Peláez Chávez J., y otros. “Informe de Resultado: Determinación de la distribución de radiación solar sobre el territorio nacional partiendo de la información que brinda la red heliográfica”, Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, 2013. Disponible en <ftp://pegasus/Upload/>

- [2]. ITACA, “Part 4. Irradiation calculations” y Hoja de cálculo “The Advanced Solar Power Sizing Spreadsheet”. Consultados el 13 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.itacanet.org>.
- [3]. Oprea R., Istrate M., Machidon D., *et al.* “Determination of Optimum Tilt Angle for Fixed Photovoltaic Modules in Iasi, Romania”, 2019 8th International Conference on Modern Power Systems. IEEE 2019. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8759661>
- [4]. Michigan State University, College of Engineering, “ME 417 Design of Alternative Energy Systems”. Consultado el 20 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.egr.msu.edu/classes/me417/somerton/Syllabus.pdf>.
- [5]. RETScreen. Software de gestión de Energías Limpias. Disponible en: <https://www.nrcan.gc.ca>.
- [6]. Dixit T.V, Yadav A. y Gupta S. “Optimization of PV array inclination in India using ANN estimator: Method comparison study.” *Sadhana* Vol. 40, Part 5, August 2015, p. 1457–1472. Indian Academy of Sciences. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12046-015-0386-2>
- [7]. Berishaa X., Zeqiria A. Y Mehaa D. “Determining the Optimum Tilt Angles to Maximize the Incident Solar Radiation - Case of Study Pristina”. *International Journal of Renewable Energy Development* 7(2), p. 123-130, ISSN:2252-4940, Kosovo, 2018. Disponible en: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijred/article/view/16192>
- [8]. Abdallah R., Juaidi A., Abdel-Fattah S. y Manzano-Agugliaro F. “Estimating the Optimum Tilt Angles for South-Facing Surfaces in Palestine”. *Energies*, 13, 623, Basel, Suiza, 2020. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/623>
- [9]. Díaz Santos R., Castro Fernández M., Santos Fuentefría A. y otros “Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica”. *Energética* 2018, vol.39 no.3, ISSN 1815-5901, Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/539>
- [10]. Shiva Kumar B. and Sudhakar K. “Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India”. *Energy Reports* 1, ISSN 2352-4847, Elsevier, Amsterdam, vol. 1, p. 184-192, 2015. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484715000311>
- [11]. U.S. Energy Information Administration, “More than half of utility-scale solar photovoltaic systems track the sun through”. *Today in energy*, abril 2017. Consultado el 5 de abril de 2020. Disponible en: <https://www.eia.gov/todayinenergy/>.
- [12]. Jacobson M. Z. y Jadhav V. “World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident up on tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels”. *Solar Energy* 169, p.55-66, 2018. Consultado el 8 de abril de 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.030>.
- [13]. Moradi H., Abtahi A. y Messenger R. “Annual performance comparison between tracking and fixed photovoltaic arrays”. Florida Atlantic University. IEEE, 2016. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/310650887>.
- [14]. Aslam Basha P. “Performance analysis of horizontal single axis tracker vs. fixed tilt solar PV plants in Southern States of India.” *Solar Power. Energética India*, marzo-abril 2016. Disponible en: www.energetica-india.net
- [15]. Xuan -Truong N., Viet-Dung N., DinhQuang N., *et al.* “Performance comparison between tracking and fixed photovoltaic system: a case study of Hoa Lac Hi-tech Park, Hanoi.” 2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application. IEEE 2017. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-comparison-between-tracking-and-fixed-A-Nguyen-Nguyen/3875f2d2d568462071b161d31600c51580e661ff>
- [16]. Li G., Tang R., Zhong H. “Optical performance of horizontal single-axis tracked solar panels”. *Energy Procedia* 16. International Conference on Future Energy, Environment, and Materials. 2012. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com>.
- [17]. Machado Toranzo N., Lussón Cervantes A., Oro Carralero L., y otros. “Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar”. *Ingeniería Energética* 2015, vol.36 no.2. ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/434>
- [18]. Simón-Martín M., Alonso-Tristán C. y Díez-Mediavilla M. “Sun-trackers profitability analysis in Spain”. *Progress in photovoltaics: research and applications*. 22:1010–1022 © 2013 John Wiley & Sons, Ltd, 2013. Disponible en: <https://publons.com/publon/1755391>
- [19]. Ong S., Campbell C., Denholm P., *et al.* “Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States”, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Estados Unidos, 2013. Disponible en <http://www.osti.gov/bridge>.

CONFLICTOS DE INTERESES.

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES.

MS Luis Gutiérrez Urdaneta: <https://orcid.org/0000-0002-4502-5944>

Conformación de la idea de la Investigación. Recopilación de los datos necesarios, modelación matemática, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Ing. Lenyer Padrón Suárez: <https://orcid.org/0000-0000-5127-3971>

Conformación de la idea de la Investigación. Recopilación de los datos necesarios, modelación matemática, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Ing. Hector Luis Pentón Julián: <https://orcid.org/0000-0002-1411-8734>

Conformación de la idea de la Investigación. Recopilación de los datos necesarios. Participación de los análisis de los resultados, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Ing. Carlos de la Incera Núñez: <https://orcid.org/0000-0001-8853-1639>

Recopilación de los datos necesarios. Participación de los análisis de los resultados, revisión crítica de su contenido y aprobación final.