

Original

Recibido: 08/03/2022 | Aceptado: 22/06/2022

Este-Oeste o Norte-Sur. Elección de sistemas fotovoltaicos de doble orientación en terrenos con pendientes.

East-West or North-South. Choice of Dual Orientation Photovoltaic Systems on Sloping Ground.

Luis Gutiérrez Urdaneta. [urdaneta@emfre.une.cu] .

MSc. Especialista de Desarrollo. Empresa de Fuentes Renovables de Energía. La Habana, Cuba.

Lenyer Padrón Suárez. [lenyer@emfre.une.cu] .

MSc. Especialista de Protecciones. Empresa de Fuentes Renovables de Energía, La Habana, Cuba.

Resumen

La doble orientación Este-Oeste de los módulos fotovoltaicos tiene varios objetivos: obtener mayor potencia y energía por área, mayor generación en horas tempranas y tardías del día y durante el verano, menor vulnerabilidad de las estructuras al viento, y mejores resultados económicos. En la literatura no se menciona la doble orientación Norte-Sur como otra alternativa. Sin embargo, los autores concluyen que en el rango de latitudes de Cuba y en terrenos con ciertas combinaciones de pendientes, a partir de simulaciones, que sistemas con orientación Norte-Sur podrían superar energéticamente a los de orientación Este-Oeste. Esto confirma que cada sitio requiere un análisis específico: un traje a la medida.

Palabras clave: doble orientación; orientación este-oeste; terrenos con pendientes

Abstract

The double East-West orientation of the photovoltaic modules has several objectives: to obtain greater power and energy per area, greater generation in the early and late hours of the day and during the summer, less vulnerability of the structures to wind, and better economic results. In the literature, the North-South orientation is not mentioned as another alternative. However,



the authors conclude that in the latitude range of Cuba and in terrains with certain combinations of slopes, based on simulations, systems with a North-South orientation could energetically surpass those with an East-West orientation. This confirms that each site requires a specific analysis: a tailored suit.

Keywords: two-sided orientation; east-west orientation; sloping ground

Introducción

Los parques fotovoltaicos más grandes de Europa continental, de Gran Bretaña y del mundo se han construido con doble orientación Este-Oeste. Una de sus principales ventajas es que permite la maximización de la generación por área y, en muchos casos, de los resultados económicos esperados (Cossu, Baccoli y Ghiani, 2021). Esta tecnología también se ha utilizado sobre techos y embalses en muchos sitios y en países con poca disponibilidad de tierra como Holanda y los Emiratos Árabes Unidos (Figura 1).

Figura 1.



Parques con orientación Este-Oeste sobre terreno en Kaiserslauter, Alemania (Ossenbrink, 2013) y sobre techo en Vestby, Noruega (PVEurope, 2016).

La doble orientación Este-Oeste coexiste con otras tecnologías fotovoltaicas como los sistemas de ángulo fijo y los de seguimiento solar. Sin embargo, en extensa revisión de la literatura internacional no se menciona la doble orientación Norte-Sur como otra alternativa.



Los autores concluyeron en un trabajo anterior, a partir de simulaciones con los datos de un sitio en una latitud media de Cuba que, en terrenos llanos, los resultados energéticos por área obtenidos en parques con orientación Norte-Sur eran casi iguales a los de aquellos con orientación Este-Oeste (Padrón Suárez, Gutiérrez Urdaneta y Valladares Aguilera, 2021).

Los terrenos no llanos son, en la práctica, la situación más frecuente. Muchas veces, para reducir los costos de inversión es aconsejable construir parques fotovoltaicos en terrenos con pendientes dentro de ciertos rangos de desniveles (EPA-NREL, 2013) (Lewis, 2013). Los autores realizaron simulaciones en tres sitios de Cuba (en latitudes extrema superior, media y extrema inferior), con el propósito de evaluar la idoneidad de la orientación Este-Oeste o Norte-Sur en terrenos con diferentes combinaciones de pendientes. Los resultados a los que llegaron fueron sorprendentes, y confirmaron una vez más que en el desarrollo de las fuentes renovables de energía, el concepto de traje a la medida es el apropiado.

Materiales y métodos

Si bien en cuanto a los sistemas de doble orientación Este-Oeste en terrenos llanos existen estudios y evidencias a nivel internacional y nacional (Padrón Suárez et al., 2021) (Cossu et al., 2021), en cuanto a la orientación Norte-Sur no pudo hallarse referencia alguna, y el presente trabajo podría estar abordando este asunto de manera temprana.

Fueron seleccionados tres sitios en Cuba. Los datos mensuales promedio de radiación global horizontal y de la temperatura en el día, según la latitud y longitud de cada ubicación, se obtuvieron del libro en Excel “Interp” (Tabla 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 (Bárceñas Castro et al., 2013)



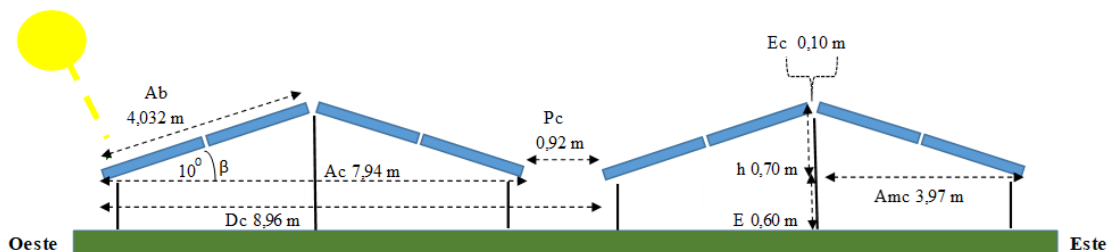
Tabla 1.

	La Habana		Sancti Spíritus		Guantánamo	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
	23.1	-82.34	21.57	-79.21	19.94	-75.1
	Radiación solar diaria horizontal kWh/m ² .día	Temperatura ambiente °C	Radiación solar diaria horizontal kWh/m ² .día	Temperatura ambiente °C	Radiación solar diaria horizontal kWh/m ² .día	Temperatura ambiente °C
Enero	4,24	26,9	4,20	27,6	4,18	28,8
Febrero	4,93	27,6	5,02	28,2	5,03	29,1
Marzo	5,55	28,7	5,66	29,0	5,58	29,9
Abril	6,56	30,5	6,53	30,3	5,84	30,8
Mayo	6,29	31,4	6,28	31,1	5,89	31,3
Junio	5,94	31,6	6,37	31,6	6,01	31,9
Julio	6,27	32,6	6,61	32,4	6,37	32,7
Agosto	6,08	32,6	6,43	32,3	6,49	32,9
Sept.	5,51	32,0	5,76	31,5	5,85	32,1
Octubre	4,70	30,6	5,01	30,8	4,73	31,3
Nov.	4,04	28,8	4,28	29,5	4,31	30,0
Dic.	3,57	27,4	3,83	28,8	3,75	29,2
Promedio	5,25	30,1	5,52	30,3	5,39	30,9

Radiación y temperatura de los tres sitios

Las estructuras y dimensiones de los sistemas de orientación Este-Oeste y Norte-Sur, con las cuales se realizaron las simulaciones se muestran en las figuras 2 y 3, y en la tabla 2.

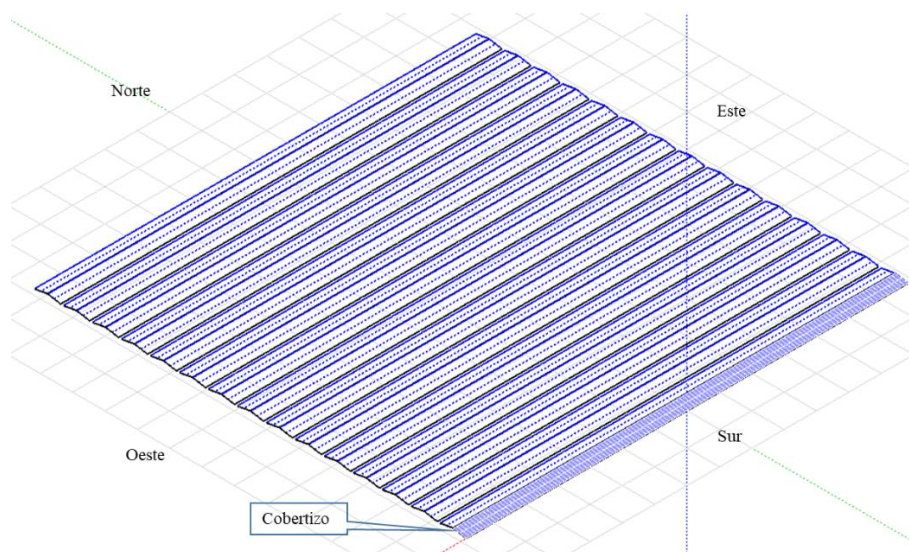
Figura 2.



Vista lateral de dos cobertizos con doble orientación Este-Oeste



Figura 3.



Vista de parque con doble orientación Norte-Sur.

Tabla 2.

Conceptos	Unidad medida	Doble orientación	
		E-O	N-S
Inclinación de los paneles (β)	$^{\circ}$	10,0	
Potencia	kW	3.119	
# paneles	-	8.100	
# módulos en retrato por cúpula	-	4	
Espacio entre cada media cúpula (E_c)	m	0,10	
Largo panel	m	1,996	
Bordes del panel (largo)	m	0,02	
Ancho del panel	m	0,991	
Bordes del panel (ancho)	m	0,02	
Ancho banda receptora ($2 \cdot A_b$)	m	8,064	
Distancia e/ inicios filas de cúpulas (D_c)	m	8,96	
Ancho de la cúpula ($2 \cdot A_{mc} + E_c$)	m	8,02	
Pasillo mínimo entre cúpulas para O&M (P_c)	m	0,92	
Número de cobertizos	-	15	
Número de paneles en fila o columna	-	135	
Largo N-S	m	136,5	133,5
Largo E-O	m	133,5	136,5
Área neta de paneles y espacios entre filas y cúpulas	ha	1,822	
Índice de ocupación del terreno (GCR)	%	90,0%	

Dimensiones de las estructuras



Las simulaciones, con las informaciones anteriores, se realizaron mediante el internacionalmente reconocido *software* PVsyst (Group of Energy, Institute of the Sciences of the Environment, 2019). Este es la herramienta informática profesional más utilizado en Cuba como herramienta de simulación.

Para conformar las cúpulas se usaron 4 módulos de 385 Watts monofaciales de Longi Solar, acoplados en forma de “retrato”. Los inversores son de SMA, Sunny Tripower 25000TL-30. En todas las variantes, la razón de potencia de los módulos en relación con la de los inversores será 1,11 (figura 4). Se utilizó la opción “según cadenas de módulos” en las simulaciones para una determinación de las pérdidas eléctricas por sombreado. Así, cuando una cadena de módulos sufre de sombreado, la misma reduce la generación. La fracción para el efecto eléctrico utilizada fue 70%, la cual está dentro del 60%-80%, rango más realista para una configuración de varias cadenas de módulos (Mermoud y Lejeune, 2010).



Figura 4.

Definición de un sistema red, Variante "Este Oeste"

Configuración global sistema

Núm. de tipos de sub-conjuntos: **1**

Esquema Simplificado

Resumen sistema global

Núm. de módulos	8100	Potencia nominal FV	3119 kWp
Superficie módulos	8011 m ²	Potencia máxima FV	kWdc
Núm. de inversores	112	Potencia nominal CA	2800 kWac

Conjunto FV

Nombre y orientación del sub-conjunto

Nombre: Conjunto FV

Orientación: Mixed #1 and #2

Inclinación: 13° / 13°

Acimut: 38° / 142°

Ayuda al dimensionamiento

Sin pre-dim. Entrar Pnom deseada: 3119.0 kWp

Redimens. superficie disponible(módulos): 16024 m²

Selección del módulo FV

Disponibles: Longi Solar | 385 Wp 34V Si-mono LR6-72 HPB 385 M | Since 2019 | Manufacturer 2018

Módulos necesarios aprox. **8101**

Dimensionamiento de voltajes: 33.2 V | Voc (0°C): 53.0 V

Use Optimizer

Selección del inversor

Disponibles: SMA | 25 kW 390 - 800 V TL 50/60 Hz Sunny Tripower 25000TL-30 | Since 2014

Output voltage 400 V Tri 50Hz

Núm. de inversores: 112 | Voltaje de funcionam.: 390-800 V | Potencia global inv.: 2800 kWac

Utilice característica mu | Voltaje máx. de entrada: 1000 V | **inversor con 2 MPPT**

Dimensionamiento del conjunto

Núm. de módulos y cadenas

Mód. en serie: 18 (entre 12 y 18)

Núm. de cadena: 450 (entre 404 y 450)

Perdida sobrecarga: 0.0 %

Relación Pnom: 1.11

Orientación: #1 225cad | #2 225cad

Cond. de funcionamiento

Vmpp (70°C): 598 V

Vmpp (20°C): 741 V

Voc (0°C): 953 V

Irradiancia plano: 1000 W/m²

Imp (STC): 4313 A

Isc (STC): 4514 A

Isc (en STC): 4514 A

La potencia máxima del conjunto es más grande que la potencia máxima especificada del inversor. (Info, no significativa)

Máx. en bases | STC

Pmáx en funcionamiento en 1000 W/m² y 50°C: **2828 kW**

Potencia nom. Conjunto (ST)3119 kWp

Parámetros tecnológicos.

Se asumieron las siguientes pérdidas porcentuales para todas las variantes.

- Suciedad del conjunto: 3%
- Pérdida óhmica en el cableado: 1,5% en STC
- Degradación inducida de la luz: 1,5%
- Pérdida de calidad del módulo: -0,5%
- Pérdida por desajuste de módulos; 1,0%
- Pérdida por desajuste de cadenas: 0,1%



- Modificador del ángulo de incidencia: el propio del módulo utilizado

Se realizaron 294 simulaciones con la información de los sitios en Cuba, 49 para cada sitio cúpula con orientación Este-Oeste y otras 49 con orientación Norte-Sur, con diferentes pendientes (tabla 3). Cuando la parte Este es más alta que la Oeste, la pendiente Este-Oeste es positiva. Asimismo, cuando el Norte es más alto, la pendiente Norte-Sur mayor que cero.

Tabla 3.

		Pendiente Este-Oeste °						
Pendiente	Grados	-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente Norte-Sur°	-8							
	-5							
	-3							
	0							
	3							
	5							
	8							

Combinaciones de pendientes

Además, se realizaron otras doce simulaciones, dos (una, con orientación Este-Oeste y otra, con orientación Norte-Sur) para 6 sitios llanos (sin pendiente) en otros países, con los datos meteorológicos contenidos en el *software* PVsystem (tabla 4), con las mismas dimensiones de la tabla 3 e igual esquema tecnológico según figura 4.

Tabla 4.

Sitio	Aberporth, Reino Unido	Munich, Alemania	París, Francia	Termoli, Italia	Alcantarilla, España	Isparta, Turquía
Latitud°	52.13	45.35	47.73	42.0	37.95	37.75

Sitios en otras latitudes

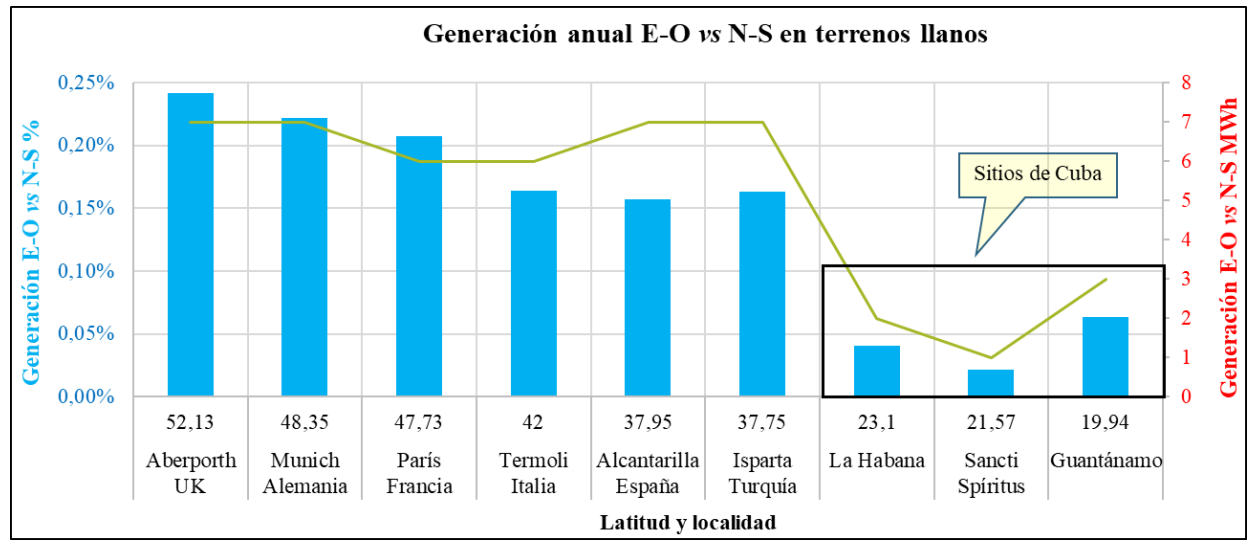
Análisis y discusión de resultados

Para analizar la orientación Este-Oeste versus Norte-Sur en otras latitudes en terrenos llanos, se parte de significar que la ausencia de referencia sobre estructuras de doble orientación



Norte-Sur y su comparación con la Este-Oeste, fue extraño a los autores, los cuales decidieron realizar simulaciones en sitios de latitudes medias y en los tres sitios en Cuba, en terrenos sin pendientes (figura 5).

Figura 5



Generación anual E-O vs. N-S en diferentes latitudes

Como se observa, en los sitios de latitudes medias (entre 30° y 60°), en donde se han construido la mayoría de los parques con doble orientación, la generación anual Este-Oeste es ligeramente superior a la obtenida con la orientación Norte-Sur, de manera que esa podría ser la razón de la ausencia de menciones sobre esta última doble orientación. En los tres sitios cubanos, esa diferencia es prácticamente insignificante y la orientación Norte-Sur, aún en superficies llanas, podría ser de utilidad en determinados casos, fundamentalmente en techos, cuando la forma del mismo haga aconsejable la orientación Norte-Sur, e incluso, con azimuts entre 0° y 90° para aprovechar mejor el espacio (Padrón Suárez et al., 2021).

En cuanto a la orientación Este-Oeste con pendientes en los tres sitios en Cuba, si bien no hay diferencias significativas entre ambas orientaciones en terrenos llanos, cuando existen



pendientes, esto cambia notablemente. En los tres sitios en Cuba, la mayor generación se obtiene en la zona central inferior de las matrices, y la menor, en las esquinas superiores. Los gráficos en 3D son similares, en cuanto a su forma, para los tres sitios (figuras 6 y 7). El resultado de la dispersión de la generación en relación con el promedio se muestra en la tabla 5.

Figura 6

		Este-Oeste, Sancti Spiritus, Generación MWh						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente N-S	-8	4.517	4.602	4.677	4.707	4.674	4.599	4.507
	-5	4.597	4.685	4.760	4.794	4.757	4.684	4.587
	-3	4.649	4.742	4.811	4.843	4.807	4.740	4.649
	0	4.719	4.818	4.880	4.912	4.876	4.811	4.709
	3	4.778	4.882	4.944	4.975	4.939	4.879	4.768
	5	4.812	4.915	4.982	5.014	4.976	4.912	4.802
	8	4.859	4.963	5.030	5.062	5.026	4.959	4.851
		10 valores superiores						
	10 valores inferiores							

		Este-Oeste, La Habana, Generación MWh						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente N-S	-8	4.334	4.416	4.490	4.523	4.490	4.415	4.328
	-5	4.418	4.507	4.576	4.613	4.577	4.505	4.412
	-3	4.471	4.568	4.629	4.664	4.630	4.565	4.471
	0	4.546	4.645	4.703	4.736	4.703	4.643	4.541
	3	4.610	4.715	4.769	4.802	4.769	4.713	4.603
	5	4.646	4.750	4.808	4.843	4.808	4.750	4.640
	8	4.698	4.800	4.859	4.893	4.860	4.798	4.695
		10 valores superiores						
	10 valores inferiores							

		Este-Oeste, Guantánamo, Generación MWh						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente N-S	-8	4.391	4.479	4.550	4.581	4.549	4.479	4.388
	-5	4.460	4.551	4.623	4.658	4.621	4.548	4.458
	-3	4.505	4.597	4.666	4.700	4.665	4.595	4.505
	0	4.565	4.658	4.725	4.759	4.724	4.658	4.563
	3	4.615	4.714	4.779	4.813	4.779	4.714	4.614
	5	4.645	4.741	4.811	4.846	4.810	4.740	4.643
	8	4.686	4.780	4.853	4.885	4.853	4.780	4.685
		10 valores superiores						
	10 valores inferiores							

Matrices con la generación con orientación Este-Oeste y pendientes.



Figura 7

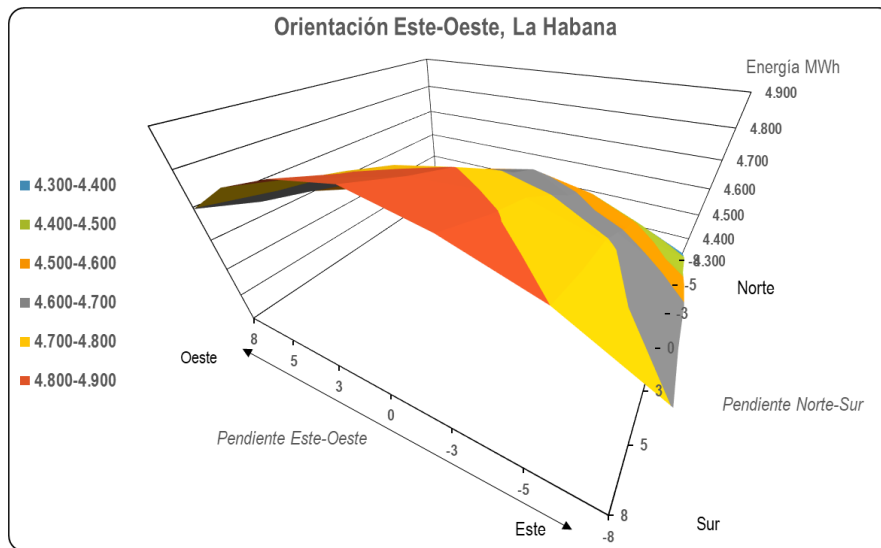


Gráfico en 3D con los resultados de las simulaciones en Sancti Spíritus

Tabla 5.

Conceptos	La Habana	Sancti	Guantánamo
Promedio	4 666	4 837	4 681
Desviación típica	125	122	110
Desviación típica/Promedio (%)	2,7%	2,5%	2,3%
Generación máxima/mínima	1,13	1,12	1,11

Dispersión de resultados. Orientación Este-Oeste

Con respecto a la orientación Norte-Sur con pendientes en los tres sitios en Cuba, la mayor generación se obtiene en la zona central de las matrices, y la menor en la fila superior y en las esquinas inferiores. (figuras 8 y 9). Por otra parte, el resultado de la dispersión de la generación con relación al promedio se muestra en la tabla 6. Existe menor dispersión en la generación en relación con la orientación Este-Oeste, por lo cual el gráfico en 3D es “achatado” en la parte superior.



Figura 8

		Norte-Sur, La Habana, Generación MWh						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente N-S	-8	4.506	4.517	4.520	4.527	4.515	4.509	4.492
	-5	4.652	4.663	4.668	4.673	4.663	4.655	4.639
	-3	4.703	4.720	4.724	4.724	4.719	4.712	4.690
	0	4.717	4.731	4.733	4.734	4.728	4.722	4.703
	3	4.712	4.724	4.728	4.728	4.723	4.716	4.698
	5	4.696	4.709	4.715	4.715	4.709	4.709	4.682
	8	4.661	4.672	4.682	4.684	4.676	4.663	4.647
		10 valores superiores						
		10 valores inferiores						

		Norte-Sur, Sancti Spíritus, Generación MWh						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente N-S	-8	4.691	4.703	4.706	4.714	4.700	4.692	4.674
	-5	4.841	4.855	4.859	4.858	4.851	4.842	4.822
	-3	4.882	4.899	4.903	4.901	4.895	4.887	4.864
	0	4.895	4.909	4.912	4.911	4.904	4.896	4.876
	3	4.889	4.904	4.907	4.906	4.899	4.890	4.871
	5	4.873	4.887	4.892	4.893	4.884	4.884	4.855
	8	4.838	4.850	4.858	4.860	4.851	4.840	4.821
		10 valores superiores						
		10 valores inferiores						

		Norte-Sur, Guantánamo, Generación MWh						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente N-S	-8	4.550	4.561	4.565	4.575	4.562	4.557	4.542
	-5	4.693	4.706	4.710	4.711	4.707	4.700	4.685
	-3	4.725	4.742	4.746	4.747	4.743	4.737	4.717
	0	4.737	4.751	4.755	4.756	4.752	4.746	4.728
	3	4.731	4.745	4.750	4.751	4.747	4.739	4.722
	5	4.714	4.729	4.734	4.738	4.731	4.731	4.706
	8	4.679	4.690	4.698	4.702	4.695	4.685	4.671
		10 valores superiores						
		10 valores inferiores						

Matrices con la generación con orientación Norte-Sur y pendientes



Figura 9

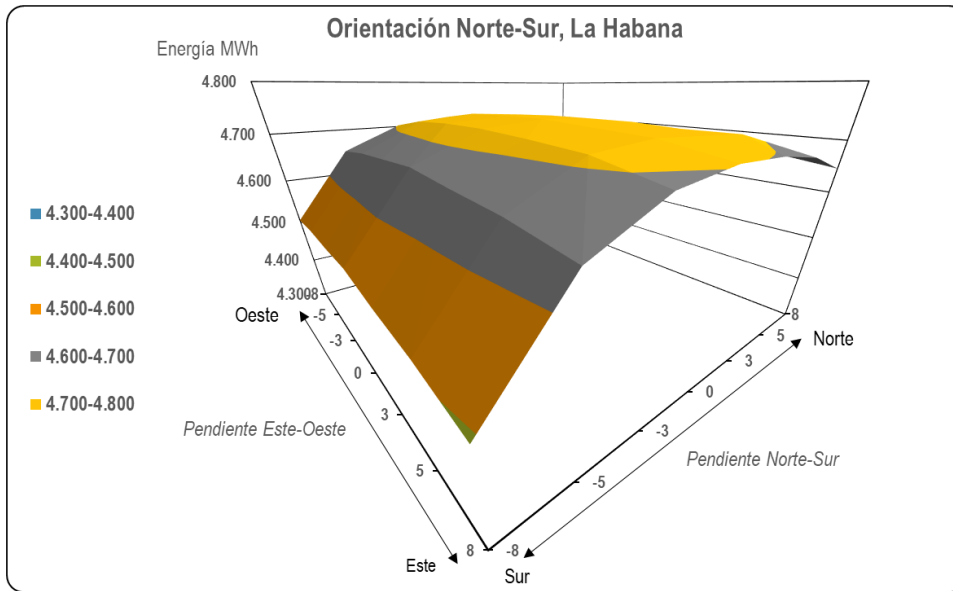
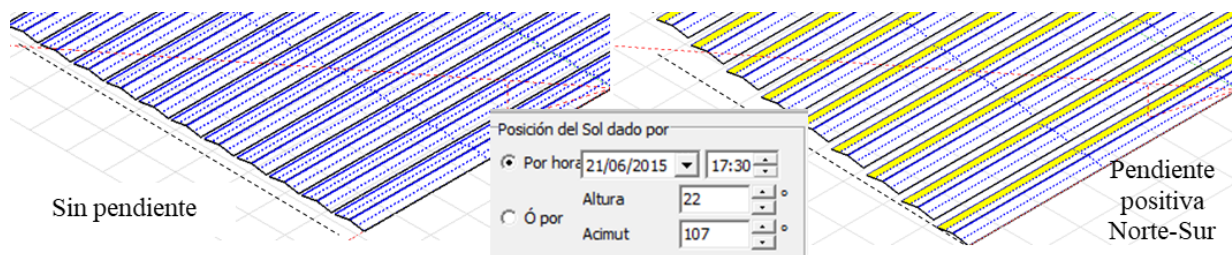


Gráfico en 3D con los resultados de las simulaciones en La Habana

En la medida que aumenta o disminuye la pendiente Norte-Sur, se reduce la generación. Puede ser intuitivamente difícil captarlo. Cuando la pendiente es negativa, aumenta el sombreado de los módulos situados delante en la cúpula, sobre todo en el periodo octubre-marzo. Si es positiva, se incrementa el sombreado de los paneles traseros de la cúpula, fundamentalmente en los meses de abril a septiembre (figura 10).

Figura 10.



Paneles sombreados (en amarillo) el 21 de junio a las 5:30 PM en el sitio de La Habana.



Tabla 6.

	La Habana	Sancti	Guantánamo
Promedio	4 672	4 851	4 700
Desviación típica	71	68	63
Desviación típica/Promedio (%)	1,5%	1,4%	1,3%
Generación máxima/mínima	1,05	1,05	1,05

Dispersión de resultados. Orientación Norte-Sur

Con respecto a la orientación Este-Oeste versus Norte-Sur en terrenos con pendientes, se precisa que con cada combinación de pendientes se seleccionó la orientación con mayor generación. En los tres sitios coincidió la misma regla de decisión, excepto una discreta variación en Guantánamo (figura 11): en las combinaciones de pendientes cuyos escaques están en amarillo, la orientación Este-Oeste es la apropiada. En el resto, con la Norte-Sur, la producción de energía es mayor.

Figura 11

		La Habana y Sancti Spíritus						
		La orientación de mayor generación						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente Norte-Sur	-8	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S
	-5	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S
	-3	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S
	0	N-S	N-S	N-S	E-O	N-S	N-S	N-S
	3	N-S	N-S	E-O	E-O	E-O	N-S	N-S
	5	N-S	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O	N-S
	8	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O

		Guantánamo						
		La orientación de mayor generación						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente Norte-Sur	-8	N-S	N-S	N-S	E-O	N-S	N-S	N-S
	-5	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S
	-3	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S	N-S
	0	N-S	N-S	N-S	E-O	N-S	N-S	N-S
	3	N-S	N-S	E-O	E-O	E-O	N-S	N-S
	5	N-S	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O	N-S
	8	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O

. Reglas de decisión según combinaciones de pendientes en sitios

La selección de la orientación apropiada, en determinadas combinaciones de pendientes, puede arrojar beneficios adicionales en la generación. El beneficio de seleccionar una orientación puede ser significativo, sobrepasando, incluso, el 3% (números sobre los cuales hay una línea) en una misma superficie y con la misma potencia (Figura 12): solo hay que seleccionar la doble orientación que maximiza la energía.

Lo más revelador es que con la orientación Norte-Sur se pueden alcanzar en todos los sitios, con determinadas composiciones de pendientes, aumentos de energía de más de un 3% (valores con línea en escaques naranja) en relación con la generación que se obtendría con la orientación “tradicional” Este-Oeste.

Los autores también realizaron otras 294 simulaciones para los tres sitios con una fracción para el efecto eléctrico del 100% y los resultados para la regla de decisión fueron muy similares.

Figura 12

		La Habana: % más de energía de la opción							
		Pendiente Este-Oeste							
		-8	-5	-3	0	3	5	8	
Pendiente Norte-Sur	-8	4,0%	2,3%	0,7%	0,1%	0,6%	2,1%	3,8%	
	-5	5,3%	3,5%	2,0%	1,3%	1,9%	3,3%	5,1%	
	-3	5,2%	3,3%	2,1%	1,3%	1,9%	3,2%	4,9%	
	0	3,8%	1,9%	0,6%	0,04%	0,5%	1,7%	3,6%	
	3	2,2%	0,2%	0,9%	1,6%	1,0%	0,1%	2,1%	
	5	1,1%	0,9%	2,0%	2,7%	2,1%	0,9%	0,9%	
	8	0,8%	2,7%	3,8%	4,5%	3,9%	2,9%	1,0%	

		Sancti Spiritus: % más de energía de la opción							
		Pendiente Este-Oeste							
		-8	-5	-3	0	3	5	8	
Pendiente Norte-Sur	-8	3,9%	2,2%	0,6%	0,1%	0,6%	2,0%	3,7%	
	-5	5,3%	3,6%	2,1%	1,3%	2,0%	3,4%	5,1%	
	-3	5,0%	3,3%	1,9%	1,2%	1,8%	3,1%	4,6%	
	0	3,7%	1,9%	0,7%	0,02%	0,6%	1,8%	3,5%	
	3	2,3%	0,5%	0,8%	1,4%	0,8%	0,2%	2,2%	
	5	1,3%	0,6%	1,8%	2,5%	1,9%	0,6%	1,1%	
	8	0,4%	2,3%	3,5%	4,2%	3,6%	2,5%	0,6%	

		Guantánamo: % más de energía de la opción							
		Pendiente Este-Oeste							
		-8	-5	-3	0	3	5	8	
Pendiente Norte-Sur	-8	3,6%	1,8%	0,3%	0,1%	0,3%	1,7%	3,5%	
	-5	5,2%	3,4%	1,9%	1,1%	1,9%	3,3%	5,1%	
	-3	4,9%	3,2%	1,7%	1,0%	1,7%	3,1%	4,7%	
	0	3,8%	2,0%	0,6%	0,06%	0,6%	1,9%	3,6%	
	3	2,5%	0,7%	0,6%	1,3%	0,7%	0,5%	2,3%	
	5	1,5%	0,3%	1,6%	2,3%	1,7%	0,2%	1,4%	
	8	0,1%	1,9%	3,3%	3,9%	3,4%	2,0%	0,3%	

Selección Este-Oeste
Selección Norte-Sur

Porcentaje de energía adicional al seleccionar la opción E-O o N-S.



Otro resultado interesante, aunque esperado al mantenerse un GRC igual para los tres sitios, es que parece ser que en la medida que se reduce la latitud, las ganancias o pérdidas de energía en terrenos con pendientes se reduce en relación con aquellas que se obtendrían en terrenos totalmente llanos (tabla 7).

Tabla 7

	La Habana	Sancti Spíritus	Guantánamo
Máximo	3,3%	3,1%	2,6%
Mínimo	-5,2%	-4,8%	-4,6%

Máximas y mínimas ganancias o pérdidas versus terreno llano

El índice de ocupación del terreno con la doble orientación vs. los sistemas de ángulo fijo,

Debido a que la tierra es un recurso no renovable, limitado y escaso, el índice de ocupación del terreno (GCR) es uno de los indicadores más importantes a la hora de evaluar alternativas. Es una medida de cuan intensivamente se utiliza la superficie disponible.

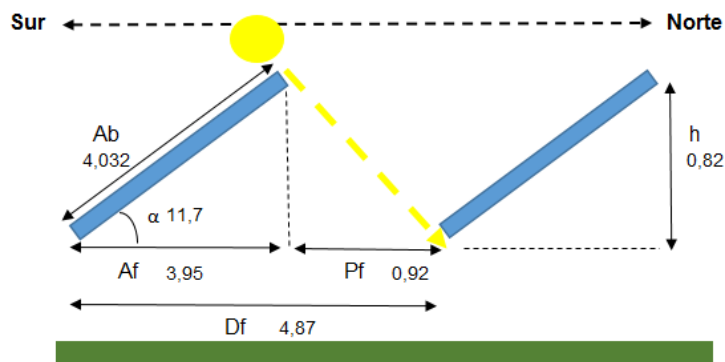
$$GCR = \frac{\text{Área del módulo}}{\text{Área del terreno}} = \frac{\text{Ancho de la banda receptora}}{\text{Distancia entre inicios de fila o entre inicios de cúpulas}} \quad (1)$$

Está siendo común en el mundo, situación que debe ser más frecuente con el tiempo, que los parques fotovoltaicos se construyan en lugares menos óptimos desde el punto de vista de la radiación y con disponibilidad de tierra limitada o con restricciones (Smith, 2017). Es de esperarse un aumento del costo de la tierra disponible en el futuro debido, entre otros factores, al desarrollo de la propia generación fotovoltaica. Por lo tanto, la optimización del espacio es una necesidad.

La mayor parte de los parques fotovoltaicos en terrenos en Cuba, se construyen con paneles inclinados al Sur y azimut 0° como se muestra en la figura 13.



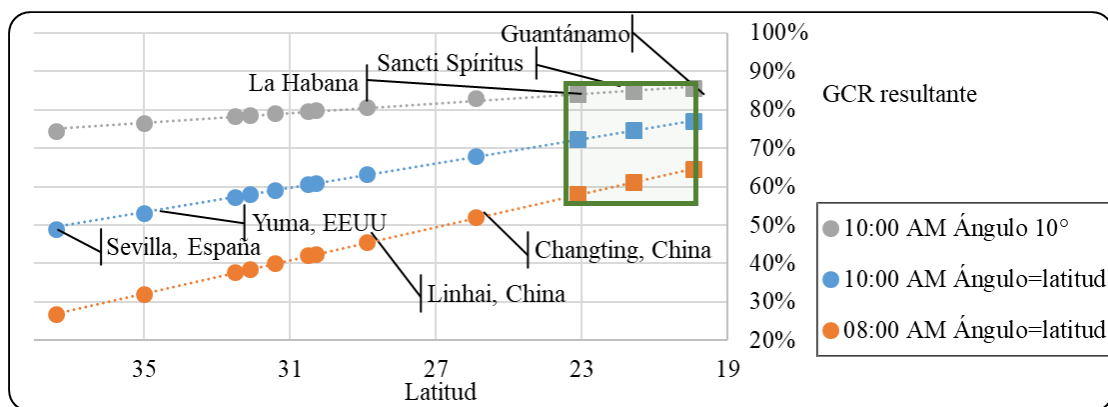
Figura 13



Vista lateral de un parque con sistema de ángulo fijo.

Debido a las dimensiones descritas en la tabla 2, en el presente estudio se ha asumido un GRC de 90% en los tres sitios con los sistemas de doble orientación. Para los sistemas de ángulo fijo, en la medida que baja la latitud, es posible utilizar un GRC mayor (figura 14).

Figura 14.



Cálculo de los autores del GCR de los SAF, según latitudes de 12 sitios.

Por ello, se determinaron los índices de ocupación del terreno según las combinaciones de pendientes del sitio de Guantánamo, de haberse utilizado un sistema de ángulo fijo (SAF), con las siguientes condiciones: se minimizó la distancia entre inicios de filas (D_f) que garantizara la ausencia de sombreado entre paneles a las 8:00 AM el 21 de diciembre, el pasillo mínimo entre filas es de 0,92 m (para operación y mantenimiento) y el ángulo de inclinación mínimo de los



paneles es de 10° (tabla 8). Para determinar la distancia entre filas, se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por uno de los autores, así como la aplicación informática desarrollada (Gutiérrez Urdaneta, 2022). Esta aplicación informática está a disposición de todas las entidades cubanas y se enviaría a solicitud.

Tabla 8.

Pendiente	Pendiente Este-Oeste °							
	Grados	-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente Norte-Sur °	-8	74%	73%	73%	72%	71%	70%	69%
	-5	79%	78%	78%	77%	76%	76%	75%
	-3	82%	82%	81%	80%	80%	79%	78%
	0	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%
	3	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%
	5	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%
	8	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%

GRC posible con Sistema de Ángulo Fijo. (GRC con doble orientación 90%)

En todos los casos, con el sistema de doble orientación, se pueden lograr mayores índices de ocupación del terreno. Esta ventaja aumenta cuando la pendiente Norte-Sur es negativa, independientemente de la pendiente Este-Oeste.

Respecto a la doble orientación adecuada: terreno con pendientes versus terreno llano, es importante precisar que con la selección de la orientación adecuada, pueden reducir al mínimo las pérdidas de energía que se producirían si solo se optara por la variante de doble orientación Este-Oeste. De utilizarse la doble orientación apropiada, se podrían obtener ganancias de energía de hasta más 3,3% en La Habana, en relación con la doble orientación Este-Oeste sin pendiente. Asimismo, las pérdidas con la orientación Norte-Sur *versus* la Este-Oeste pueden alcanzar hasta 4,9% en el mismo sitio (figura 15). La opción de nivelar o no el terreno sería, entonces, una decisión económica en cada caso específico: costos de nivelación *versus* reducción de la generación.



Figura 15

		La Habana: +/- energía vs. terreno llano						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente Norte-Sur	-8	-4,9%	-4,6%	-4,6%	-4,4%	-4,7%	-4,8%	-5,2%
	-5	-1,8%	-1,5%	-1,4%	-1,3%	-1,5%	-1,7%	-2,0%
	-3	-0,7%	-0,3%	-0,3%	-0,3%	-0,4%	-0,5%	-1,0%
	0	-0,4%	-0,1%	-0,1%	-	-0,2%	-0,3%	-0,7%
	3	-0,5%	-0,3%	0,7%	1,4%	0,7%	-0,4%	-0,8%
	5	-0,8%	0,3%	1,5%	2,3%	1,5%	0,3%	-1,1%
	8	-0,8%	1,4%	2,6%	3,3%	2,6%	1,3%	-0,9%

		Sancti Spiritus: +/- energía vs. terreno llano						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente Norte-Sur	-8	-4,5%	-4,3%	-4,2%	-4,0%	-4,3%	-4,5%	-4,8%
	-5	-1,4%	-1,2%	-1,1%	-1,1%	-1,2%	-1,4%	-1,8%
	-3	-0,6%	-0,3%	-0,2%	-0,2%	-0,3%	-0,5%	-1,0%
	0	-0,3%	-0,1%	0,0%	-	-0,2%	-0,3%	-0,7%
	3	-0,5%	-0,2%	0,7%	1,3%	0,5%	-0,4%	-0,8%
	5	-0,8%	0,1%	1,4%	2,1%	1,3%	0,0%	-1,2%
	8	-1,1%	1,0%	2,4%	3,1%	2,3%	1,0%	-1,2%

		Guantánamo: +/- energía vs. terreno llano						
		Pendiente Este-Oeste						
		-8	-5	-3	0	3	5	8
Pendiente Norte-Sur	-8	-4,4%	-4,2%	-4,1%	-3,7%	-4,1%	-4,2%	-4,6%
	-5	-1,4%	-1,1%	-1,0%	-1,0%	-1,1%	-1,2%	-1,6%
	-3	-0,7%	-0,4%	-0,3%	-0,3%	-0,3%	-0,5%	-0,9%
	0	-0,5%	-0,2%	-0,1%	-	-0,1%	-0,3%	-0,7%
	3	-0,6%	-0,3%	0,4%	1,1%	0,4%	-0,4%	-0,8%
	5	-0,9%	-0,4%	1,1%	1,8%	1,1%	-0,4%	-1,1%
	8	-1,5%	0,4%	2,0%	2,6%	2,0%	0,4%	-1,6%

	Selección Este-Oeste
	Selección Norte-Sur

Porcentaje de mayor o menor energía versus terreno llano.

Conclusiones

1. La selección de cualquier tecnología fotovoltaica depende, entre otros factores, de las características del sitio y de la evaluación económica. Los autores han introducido la doble orientación Norte-Sur como novedad, y han adelantado algunas reglas que permiten seleccionar la orientación más beneficiosa, sea Norte-Sur o Este-Oeste en



terrenos con pendientes. No obstante, análisis similares deben realizarse en sitios específicos y con las pendientes concretas antes de realizar la selección definitiva, incluso, teniendo en cuenta el azimut del parque cuando difiera de 0 y 90°.

2.Los terrenos con pendientes son los más frecuentes en la práctica. De acuerdo con los resultados mostrados, la selección apropiada de la doble orientación puede aportar beneficios significativos de energía y de economía, en determinadas combinaciones de pendientes, por lo cual se recomienda que estos resultados sean tenidos en cuenta para futuros proyectos.

3.La consistencia de los resultados obtenidos, aún sin haber hallado referentes de estudios previos sobre la orientación Norte-Sur y de la comparación de sus resultados energéticos *versus* la Este-Oeste, permite a los autores recomendar que la doble orientación Norte-Sur se incorpore al portafolio de tecnologías fotovoltaicas para futuros proyectos en Cuba. Una vez más se concluye que cada sitio requiere un análisis específico: un traje a la medida. Solo así se logrará la óptima combinación productiva de un recurso infinito, la luz solar, con uno escaso y limitado, la tierra.

Referencias bibliográficas

Bárcenas Castro, M., Borrajero Montejo, I., Peláez Chávez, J., Guerra Domínguez, A., Ávila Koslov, M., Águila Tárano, L., . . . Angulo Llano, G. (2013). *Determinación de la distribución de radiación solar sobre el territorio nacional partiendo de la información que brinda la red heliográfica*. Informe de Resultado, Centro de Física de la Atmósfera, INSMET, La Habana.



Cossu, S., Baccoli, R., y Ghiani, E. (2021). Utility Scale Ground Mounted Photovoltaic Plants with Gable Structure and Inverter Oversizing for Land-Use Optimization. *Energies*, 14(3084), 2-16. doi:10.3390/en14113084

EPA-NREL. (2013). *Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills*. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-03/documents/best_practices_siting_solar_photovoltaic_final.pdf

Group of Energy, Institute of the Sciences of the Environment. (2019). *PVsyst V6.81*. University of Geneva. Obtenido de <https://www.pvsyst.com/download-pvsyst/>

Gutiérrez Urdaneta, L. (2022). Distancias de diseño de parques fotovoltaicos sobre terrenos con pendientes. *Roca, Universidad de Granma*, 18(1). Obtenido de <https://revistas.udg.co.cu/index.php/roca/issue/view/92>

Lewis, G. (9 de Agosto de 2013). Dealing With Uneven Topography for PV Layouts. Solar FlexRack. Obtenido de <https://solarflexrack.com/dealing-with-uneven-topography-for-pv-layouts/>

Mermoud, A., y Lejeune, T. (2010). Partial shadings on PV arrays: by-pass diode benefits analysis. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Universidad de Ginebra*. doi:10.4229/25THEUPVSEC2010-4BV.1.81

Ossenbrink, R. (30 de Octubre de 2013). IBC Solar: East-west solar park for own consumption in Germany. (S. Energy, Ed.) Alemania. Obtenido de <https://www.sunwindenergy.com/news/ibc-solar-east-west-solar-park>

Padrón Suárez, L., Gutiérrez Urdaneta, L., y Valladares Aguilera, J. (2021). Sistemas fotovoltaicos con limitaciones de terreno: la doble orientación como alternativa. *Ingeniería Energética*, 42(3), 1-11. Obtenido de <https://rie.cujae.edu.cu>



PVEurope. (7 de junio de 2016). IBC Solar: 1 MW rooftop PV plant for food cooling in Norway with self-consumption. Obtenido de <https://www.pveurope.eu/installation/ibc-solar-1-mw-rooftop-pv-plant-food-cooling-norway-self-consumption>

Smith, S. (Octubre de 2017). *Solar tracker site design: How to maximize energy production while maintaining the lowest cost of ownership*. Obtenido de Solvida Energy Group, Estados Unidos: https://solarflexrack.com/wp-content/uploads/2018/03/Solar_Tracker_Site_Design_White_Paper_Rev1_-Stephen-Smith.pdf

