



ORIGINAL

Recibido: 20/12/2020 | **Aprobado:** 14/02/2021

Influencia de los factores que explican las ganancias de energía de los paneles bifaciales.

Influence of Factors that explain the Energy gains of Bifacial Panels.

Luis Gutiérrez Urdaneta. [urdaneta@emfre.une.cu] 
Empresa de Fuentes Renovables de Energía. La Habana, Cuba.

Lenyer Padrón Suárez. [lenyer@emfre.une.cu] 
*Especialista de Protecciones.
Empresa de Fuentes Renovables de Energía. La Habana, Cuba.*

Resumen

La introducción de paneles bifaciales en la generación a gran escala es relativamente reciente en el mundo. En los estudios realizados en otros países, tanto por académicos como por fabricantes, se listan varios factores que influyen en la radiación que llega al reverso del panel: el albedo, la elevación del módulo, la distancia entre filas o seguidores, la estructura de montaje del módulo en el reverso y otros. Los autores realizaron 321 simulaciones de tres sitios con diferentes latitudes, usando el sistema de ángulo fijo (SAF) y el de seguimiento sobre un eje horizontal (HSAT), y obtuvieron seis ecuaciones de regresión lineal múltiple. A partir de ellas se cuantificó la influencia de los principales factores que afectan la generación en los sistemas SAF y HSAT con paneles bifaciales. Los coeficientes hallados para los diferentes factores podrían ser útiles para futuros proyectos en Cuba.

Abstract

The introduction of bifacial panels in utility-scale farms is quite recent in the world. Previous studies carried out by scholars and manufacturers; mention some factors affecting the irradiation that reaches the rear of the modules: albedo, module height, distance among rows or trackers, structure on the rear side of the module and others. The authors generated 321



simulations of three sites with different latitudes, using the fixed tilt system (SAF) and the horizontal single axis tracker (HSAT), and obtained six equations of multiple linear regression. From them, the influence of the key factors affecting the generation with SAF and HSAT, was quantified. The coefficients obtained for each factor could be useful for future projects in Cuba.

Palabras claves: albedo; ángulo fijo; paneles bifaciales; seguimiento solar.

Keywords: albedo; fixed tilt; bifacial module; solar tracking.

Introducción

Los módulos bifaciales pueden aumentar la generación con relación a los monofaciales. El abaratamiento en su producción ha determinado que su proporción en el mercado mundial de paneles haya crecido desde 2018. Aunque se han llevado a cabo varios estudios teóricos y prácticos a partir de resultados empíricos a nivel internacional, lo cierto es que, por la complejidad de los factores que inciden en las ganancias de energía de los módulos bifaciales, así como por lo reciente de su introducción, son necesarias más investigaciones, fundamentalmente en parques fotovoltaicos de gran escala. Para Cuba, este tema es relativamente nuevo. El objetivo del presente artículo ha sido medir la influencia marginal de los factores que explican las ganancias de energía de los paneles bifaciales en sitios con diferentes niveles de radiación y latitud, de manera que sus resultados sean de utilidad para la futura introducción de esta tecnología en Cuba y la toma de decisiones para su microlocalización, en función de las características de cada localidad.

Población y muestra

Se revisó la literatura internacional sobre los factores que influyen en las ganancias de radiación y generación de los paneles bifaciales. Se utilizaron las bases de datos meteorológicos del Centro de Física de la Atmósfera de tres sitios diferentes. Fueron realizadas 321 simulaciones



mediante un reconocido *software* (PVsystem, 2019) tanto para SAF como HSAT, y se obtuvieron las ecuaciones de regresión que permitieron determinar las contribuciones marginales de dichos factores para los sitios con ambas tecnologías.

Sitios y bases de datos meteorológicos del Centro de Física de la Atmósfera.

Se seleccionaron dos sitios en latitudes extremas de Cuba y uno en la latitud media (figura 1). 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” (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, 2013).

Figura 1. *Sitios seleccionados.*



Tabla 1. Radiación y temperatura de los tres sitios.

	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

Revisión de la literatura internacional.

Yusufoglua, Leea y Pletzer (2014) realizaron un ensayo con un módulo inclinado (SAF) hacia el Sur en Oslo (latitud 60⁰) y el Cairo (latitud 30.1⁰) y concluyen que con una elevación (distancia desde suelo al borde más bajo del módulo) de 2 metros, en ambas ciudades el ángulo óptimo de los paneles bifaciales es ligeramente superior al de los monofaciales con un valor de albedo de 0,2. Sin embargo, cuando el nivel de albedo aumenta a 0,5 esta diferencia entre ángulos óptimos se reduce notablemente. Además, con el ángulo óptimo y diferentes albedos, observan que en el Cairo la producción de energía es más sensible a la elevación. Un aumento del albedo aumenta las ganancias de energía en ambas latitudes.

El fabricante de módulos LG Electronics (2018) menciona los factores que afectan la generación bifacial en SAF: el albedo, la elevación, la distancia entre el inicio de la primera fila y el de la siguiente (en lo adelante, distancia entre filas), el sombreado por la estructura de



montaje del módulo y el número de filas (a menor número de filas mayor ganancia de energía). Realiza simulaciones con PVsyst de seis sitios con SAF y con seguimiento sobre un eje SAT. Utiliza sólo como variables el albedo (el albedo se representa como fracción o como porcentaje) y la elevación o la altura del eje. Estas simulaciones se realizaron con combinaciones de albedos (15%, 30%, 50%, 70% y 85%) y elevaciones (0,3 m, 0,5 m, 0,8 m, 1 m y 1,5 m) para SAF y alturas de eje desde el suelo (1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m y 3 m) para SAT.

Sun, Ryyan, Deline y Alam (2017) introducen otro elemento que es el azimut en el caso de los SAF bifaciales. De acuerdo a sus conclusiones, derivadas de simulaciones, cuando la latitud del sitio es menor que la latitud Lat_{cri} la orientación Este-Oeste produce mayor electricidad bajo las premisas de ausencia de sombreado por objetos cercanos e infinito tamaño del terreno. Los autores advierten, no obstante, que las ecuaciones de regresión halladas son para condiciones ideales, y que los resultados pueden cambiar con las condiciones prácticas.

$$Lat_0 = \frac{E}{H} \cdot (44 \cdot R_A - 62) + 37 \cdot R_A + 12 \quad (1)$$

$$Si Lat_0 \leq 0, Lat_{cri} = 0^0 \text{ y si } Lat_0 > 0, Lat_{cri} = Lat_0$$

donde:

R_A : Albedo, E : Elevación del módulo y H : Ancho de la banda receptora

Stein J.S., Riley D., Lave1 M., Hansen C., Deline C. y Toor F. (2017) luego de realizar pruebas de campo con pequeños sistemas SAF, concluyen que la producción total de energía parece maximizarse, cuando la orientación de los paneles bifaciales es la misma que la de los monofaciales.

Guerrero-Pérez y Chaouki-Almagro (2018) definen que los principales factores que inciden en las ganancias bifaciales en los sistemas con seguimiento son el albedo, la distancia entre ejes, la altura del eje y la estructura de montaje del módulo. Refieren que, durante



septiembre, octubre y noviembre de 2018 en las instalaciones de BITEC (Bifacial Tracker Evaluation Center, Estados Unidos) se midió el albedo para tres tipos de superficies: suelo estacional, grava y una cubierta blanca. Se midió la producción de energía de dos módulos bifaciales Jolywood JW-D72N-355 ubicados en un rastreador bifacial para cada condición de albedo con una distancia entre ejes de 10 metros. La ganancia bifacial toma como referente la producción de los módulos monofaciales. La ganancia de energía estimada fue de 7,9% en la hierba, del 11,9% en la gravilla y del 19,2% en la cubierta blanca.

Guari (2019), calculó la contribución porcentual de los factores más importantes que impactan en las ganancias de energía para SAF con módulos bifaciales. Realizó simulaciones con PVsyst para un parque de 766 kWp en Alemania. Este es un enfoque importante pues tiene en cuenta la interdependencia que existe entre varios factores, y el análisis es más integral. Según su estudio, la contribución relativa de los factores fue: albedo (54,47%), inclinación (33,79%) y ratio de cobertura del suelo (14,07%). Sorprendentemente, la contribución de la elevación fue insignificante (0,67%). La medida de la contribución relativa mediante el análisis de varianza (ANOVA), aunque válida, tiene como principal limitación que depende de los rangos absolutos que se hayan tomado para las variaciones de cada uno de los factores en las simulaciones. No permite distinguir el signo de las contribuciones y, además, no permite realizar predicciones.

Castillo-Aguilella y P.S. Hauser (2016) desarrollaron un modelo empírico para SAF. Realizaron siete pruebas con bifaciales, una en Nueva York y seis en Arizona. Se tuvieron en cuenta tres factores: la elevación del módulo, el ángulo de inclinación y el albedo. Para cada una de estas variables, el rendimiento energético bifacial aumentó a medida que aumentaba cada una de las variables. Cinco de las condiciones experimentales presentadas funcionaron durante al



menos un año y la de Nueva York durante 2,5 años. La siguiente ecuación se obtuvo mediante un algoritmo de mejor ajuste (*best-fit*).

$$\text{Total Bifacial Energy Yield (\%)} = 0,317 \cdot \theta + 12,145 \cdot h + 0,1414 \cdot \alpha + 100\% \quad (2)$$

Where:

Total Bifacial Energy Yield (%): Total bifacial energy yield of the bifacial module, when compared to an equivalent STC rated monofacial one, θ : tilt angle (degrees), h : elevation (meters) and α : albedo (%)

Según estos autores, ese modelo podría utilizarse para la predicción en las siguientes condiciones: sistemas en los que la Razón Bifacial (BR) es mayor al 70%, la elevación mínima del módulo varía de 0,15 m a 0,8 m, el módulo, el ángulo de inclinación varía de 7,5° a 35°, en el que el albedo varía del 10% al 90%, en el que el rango de latitud es de 21 a 51°, y los sistemas que utilizan sistemas no híbridos de células bifaciales.

Casi todos los artículos revisados mencionan u ordenan algunos factores. Guari (2019), mide de forma integral las variaciones de energía debidas a varios factores, utilizando la varianza como criterio. Como se explicó anteriormente, este enfoque tiene algunas limitaciones. En el último artículo citado se desarrolló un modelo empírico para estimar la ganancia bifacial teniendo en cuenta el albedo, la elevación y el ángulo de inclinación. Este enfoque se acerca mucho más al método utilizado por los autores del presente trabajo, quienes han tratado de cuantificar la influencia marginal de los factores más importantes que explican las ganancias de energía de los módulos bifaciales en el rango de latitud cubana, tanto para SAF como HSAT, utilizando un modelo de regresión lineal múltiple.



Diseño del experimento: selección de sitios y rangos de factores.

El principal objetivo de este trabajo es la cuantificación de los factores que afectan la generación de energía en los sistemas SAF y HSAT con el uso de módulos bifaciales, o lo que es igual, la determinación de la sensibilidad de la generación de energía a los principales factores que la afectan. A continuación, se describen los detalles del diseño del experimento.

Sitios seleccionados

Se seleccionaron tres sitios en el occidente, en el centro y en el oriente, dos de ellos con latitudes extremas y uno en latitud media de Cuba.

Factores a evaluar para el sistema SAF:

- I: La inclinación de los módulos
- Nf: Número de filas
- Df: Distancia entre filas en metros
- E: Elevación del suelo de la parte más baja del módulo en metros
- Ra: Albedo en fracción

Estos son los símbolos que se utilizarán en el resto de este artículo. La energía producida por los SAF se denominará como Gsaf (en MWh).

Se utilizarán los siguientes rangos en la variación de los factores (tabla 2).

Tabla 2. *Rango de variación de factores para SAF.*

Factor	Variación entre:	Comentarios
I	15 y 23 grados	Rango del ángulo óptimo para módulos monofaciales. Una inclinación mayor que 23 ⁰ no es aconsejable por los riesgos de fuertes vientos.
Nf	10 y 30 filas	-
Df	4,9 y 6,7 metros	Límite inferior: Cálculo de distancia mínima promedio de los tres sitios para evitar sombreado en el solsticio de invierno a las 8:00 AM (hora solar) con 15 ⁰ de inclinación. Límite superior: 1,05 m más de la distancia mínima promedio de los tres sitios para evitar sombreado en el solsticio de invierno a las 8:00 AM (hora solar)



		con 23^0 .
E	0,4 y 1,2 metros	Razones prácticas
Ra	20 y 60%	Razones prácticas

Para evaluar la orientación de los paneles y para calcular Lat_0 , se utiliza la ecuación (1) (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo de Lat_0 .

Elevación	Ancho banda receptora	Ra	Lat_0
0	3,37	0,50	30.5

De acuerdo con estos resultados, si la latitud de los sitios seleccionados es menor que 30.5^0 , la orientación Este-Oeste maximizaría la generación. Para probar esto, realizamos una simulación con PVsyst, como recomiendan Sun et al (2017), con magnitudes críticas reales (tabla 4):

Tabla 4. Cálculo de la generación con orientación Norte-Sur y Este-Oeste.

	Latitud	Df	Nf	I óptima según simulación	Generación con Azimut		$G_{saf} -90^0 / G_{saf} 0^0$		
					E	Ra		0^0	-90^0
La Habana	23.10	7	8	23^0	0	0,50	1 670	1 559	93,4%
Sancti Spíritus	21.57	7	8	23^0	0	0,50	1 795	1 698	94,6%
Guantánamo	19.94	7	8	22^0	0	0,50	1 727	1 675	95,3%

Aunque es cierto que con la reducción de la latitud, disminuye la diferencia relativa en la generación con la orientación Norte-Sur, con ésta la generación es mayor en los tres casos. De tal forma se tomará como referente un azimut de 0^0 para la realización de nuestro experimento.

Los rangos de la distancia entre filas, se calcularon con la aplicación “Distancia, filas y columnas”, disponible en la Empresa de Fuentes Renovables de Energía y desarrollada por los propios autores del presente texto (Gutiérrez y Padrón, 2020) (tabla 5).



Tabla 5. Cálculo de distancias mínimas con ángulos de 15^0 y 23^0

Sitio	Latitud	Hora solar	Ancho banda receptora	Inclinación	Df	Inclinación	Df
La Habana	23.10	8 AM	3,37 m	15^0	5,05 m	23^0	5,82 m
S. Spíritus	21.57				4,94 m		5,64 m
Guantánamo	19.94				4,82 m		5,47 m

A partir de esta información, se utilizará un rango de entre 4,9 y 6,7 metros para Df en las simulaciones.

Factores a evaluar para el sistema HSAT:

- Nc: Número de columnas de seguidores solares
- De: Distancia entre los ejes de los seguidores en paralelo n metros
- J: Elevación del eje desde el suelo del seguidor en metros
- Ra: Albedo en fracción

Estos también son los símbolos que se utilizarán en el resto de este artículo. La energía producida por los HSAT se denominará como Ghsat.

Se utilizarán los siguientes rangos en la variación de los factores (tabla 6).

Tabla 6. Rango de variación de factores para HSAT.

Factor	Variación entre:	Comentarios
Nc	15 y 40 columnas	-
De	4,6 y 5,8 metros	Límite inferior: Cálculo de distancia mínima media de los tres sitios para evitar sombreado en el solsticio de invierno a las 8:00 AM (hora solar). Límite superior: 1,20 m más de distancia mínima media para evitar sombreado en el solsticio de invierno a las 8:00 AM.
J	1 y 2 metros	Razones prácticas
Ra	20 y 60%	Razones prácticas



Los rangos de la distancia entre los ejes de los seguidores en paralelo, se calcularon con la misma aplicación “Distancia, filas y columnas” (tabla 7).

Tabla 7. *Cálculo de distancias mínimas entre ejes con ángulo de 45⁰*

Sitio	Latitud	Hora solar	Ancho banda receptora	Inclinación máxima de inclinación en el seguimiento	De
La Habana	23.10	8 AM	1,67 m	45 ⁰	4,76 m
S. Spíritus	21.57				4,57 m
Guantánamo	19.94				4,40 m

A partir de esta información, se utilizará un rango de entre 4,6 y 5,8 metros en las simulaciones.

Diseño del experimento: parámetros tecnológicos para los SAF y HSAT

Para las simulaciones se utilizará el PVsyst V6.8.1. En los SAF, para conformar las cadenas se utilizarán 2 módulos LR6-60 BP 320 M Bifacial, de Longi Solar en columna en forma de “retrato”. El ancho de la banda receptora es de 3,37 m.

En los HSAT, para conformar las cadenas se utilizará 1 módulo LR6-60 BP 320 M Bifacial, de Longi Solar en fila en forma de “retrato”. El ancho de la banda receptora es de 1,66 m.

Tanto en SAF como en los HSAT no existen pérdidas menores por obstrucción de la luz en el reverso del panel debido a las estructuras de montaje. El perfil del horizonte será el propio de PVsyst. Las simulaciones en los tres sitios se realizarán con un parque de 1 000 kWp, y con 30 inversores (figura 2).



Figura 2. Configuración del sistema SAF (arriba) y HSAT debajo

Definición de un sistema red, Variante "Nueva variante de simulación SAF Cienfuegos"

Configuración global sistema

Núm. de tipos de sub-conjuntos: 1

Esquema Simplificado

Resumen sistema global

Núm. de módulos	3124	Potencia nominal FV	1000 kWp
Superficie módulos	5178 m ²	Potencia máxima FV	957 kWdc
Núm. de inversores	30	Potencia nominal CA	900 kWac

Conjunto FV

Nombre y orientación del sub-conjunto

Nombre: Conjunto FV

Orientación: **Plano Inclinado Fijo**

Inclinación: 15°
Acimut: 0°

Ayuda al dimensionamiento

Entrar Prom deseada: 1000.0 kWp

Redimens. superficie disponible(módulos): 5179 m²

Selección del módulo FV

Disponible actualmente: [dropdown] Filter: All PV modules

Módulo bifacial: Sistema bifacial

Longi Solar: [dropdown] 320 Wp 28V Si-mono LR6-60 BP 320 M Bifacial Since 2019 Manufacturer 2019

Use Optimizer:

Dimensionamiento de voltajes: 27.3 V
Voc (0°C): 43.7 V

Selección del inversor

Disponible actualmente: [dropdown] Output voltage 480 V Tri 60Hz

Sungrow: [dropdown] 30 kW 280 - 950 V TL 60 Hz SG30KU Since 2014

Núm. de inversores: 30

Voltaje de funcionam.: 280-950 V Potencia global inv.: 900 kWac

Voltaje máx. de entrada: 1000 V **inversor con 2 MPPT**

Utilice característica mu:

Dimensionamiento del conjunto

Núm. de módulos y cadenas

Mód. en serie: 22 entre 11 y 22

Núm. de cadena: 142 entre 128 y 142

Perdida sobrecarga: 0.0 %

Relación Pnom: 1.11

Núm. módulos: 3124 Superficie 5178 m²

Cond. de funcionamiento

Vmp (70°C): 600 V

Vmp (20°C): 743 V

Voc (0°C): 961 V

Irradiancia plano: 1000 W/m²

Imp (STC): 1380 A

Isc (STC): 1453 A

Isc (en STC): 1453 A

Potencia nom. Conjunto (ST1000 kWp)

Configuración global sistema

Núm. de tipos de sub-conjuntos: 1

Esquema Simplificado

Resumen sistema global

Núm. de módulos	3124	Potencia nominal FV	1000 kWp
Superficie módulos	5178 m ²	Potencia máxima FV	936 kWdc
Núm. de inversores	30	Potencia nominal CA	900 kWac

Nombre y orientación del sub-conjunto

Nombre: Conjunto FV

Orientación: **helióstatos ilitados, eje horiz.**

Ayuda al dimensionamiento

Entrar Prom deseada: 1000.0 kWp

Redimens. superficie disponible(módulos): 5179 m²

Cond. de funcionamiento

Vmp (60°C): 629 V

Vmp (20°C): 743 V

Voc (-10°C): 988 V



Diseño del experimento: muestras con valores de factores aleatorios.

Con vistas a lograr una valoración integral de la contribución marginal de cada factor a la generación en su interacción con los demás, se prepararon tablas para la generación de números aleatorios para cada uno de los factores listados en las tablas 5 y 6. Se tomaron las muestras resultantes y se introdujeron en PVsyst. En la tabla 8, a manera de ejemplo, se muestra una vista parcial de números aleatorios generados para SAF con límites. Para cada uno de los seis análisis de regresión se utilizaron diferentes series de números aleatorios.

Tabla 8. *Números aleatorios generados*

Número de muestra	Límites en la generación de números aleatorios				
	15-23	10-30	4,9-6,7	0,4-1,2	0,2-0,6
	I	Nf	Df	E	Ra
1	16	21	5,9	0,8	56%
2	23	26	5,4	0,6	24%
3	20	14	5,9	0,4	32%
4	19	21	5,9	0,5	57%
5	17	16	5,2	1,2	51%
6	19	30	6,1	0,9	22%
7	16	22	5,5	0,9	40%
8	16	26	5,7	0,7	60%
9	23	30	5,6	0,7	52%
10	21	23	6,1	0,7	23%

Los resultados de las regresiones lineales.

Se tomaron 50 o más muestras para cada sitio según el sistema SAF o HSAT. En total se realizaron 321 simulaciones, una por cada muestra, con un nivel de significación de 5%. En algunos casos hubo que realizar varias regresiones para eliminar las variables cuya relación con la energía no era estadísticamente significativa. Los resultados de las regresiones múltiples finales se muestran en las tablas 9 y 10.



Tabla 9. Resultado de regresiones $\alpha=0,05$ (Sistemas SAF)

	La Habana		Sancti Spíritus		Guantánamo	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
	23,10	-82,34	21,57	-79,21	19,94	-75,1
Coeficientes de la regresión final						
Constante (C SAF)	1 407,47		1 544,96		1 491,76	
(I) Inclinación	-		-0,62		-1,22	
(Nf) Número de filas	-		-		-	
(Df) Distancia e/. inicio de la fila anterior e inicio de la siguiente (m)	22,68		23,64		23,16	
(E) Elevación (m)	52,82		54,30		53,08	
(Ra) Albedo (%)	283,86		294,89		290,22	
Número de muestras	56		56		56	
Error de estimación	3,67		3,81		3,74	
R ²	99,10		99,12		99,13	
R ² ajustado	99,05		99,05		99,06	
R ² predicción	98,94		98,91		98,93	
Estadígrafo Durbin-Watson	2,01737 > Du (1.683)		2,12651 > Du (1.72461)		1,87781 > Du (1.72461)	
Comentarios	I y Nf no tienen relación significativa con Gsaf (P>0,05).		Nf no tiene relación significativa con Gsaf (P>0,05).		Nf no tiene relación significativa con Gsaf (P>0,05).	

Tabla 10. Resultado de regresiones $\alpha=0,05$ (Sistemas HSAT)

	La Habana		Sancti Spíritus		Guantánamo	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
	23.10	-82.34	21.57	-79.21	19.94	-75.1
Coeficientes de la regresión final						
Constante (C HSAT)	1 689,03		1 843,91		1 759,98	
(Nc) Número de columnas de seguidores	-		-0,08		-0,10	
(De) Distancia entre los ejes de los seguidores (m)	32,27		36,80		39,13	
(J) Elevación del eje desde el suelo (m)	44,33		43,71		41,95	
(Ra) Albedo (%)	447,60		454,37		448,38	
Número de muestras	51		51		51	
Error de estimación	3,15		1,96		1,91	
R ²	99,72		99,90		99,90	
R ² ajustado	99,70		99,89		99,89	



R ² predicción	99,67	99,88	99,88
Estadígrafo Durbin-Watson	1,81601 > Du (1.67538)	2,34894 > Du (1.72179)	2,21703 > Du (1.72179)
Comentarios	Nc no tiene relación significativa con Ghsat (P>0,05).	-	-

Análisis de los resultados

Todas las regresiones realizadas arrojan un R² de más del 99%. El error de estimación, en el peor de los casos, es de sólo 3,81 MWh. Se cumplen los siguientes supuestos del modelo de regresión lineal múltiple: homocedasticidad, normalidad en la distribución de las perturbaciones aleatorias; no se evidencia correlación de acuerdo a la prueba Durbin-Watson y no se revela colinealidad entre las variables. Las ecuaciones de regresión, a los efectos de predicción, son sólo válidas dentro de los rangos de las variables independientes (límites).

Las ecuaciones de regresión resultantes son las siguientes (tabla 11):

Tabla 11. Ecuaciones de regresión lineal finales.

SAF	La Habana	$G_{saf} = 1\,407,47 + 22,68 \cdot D_f + 52,82 \cdot E + 283,86 \cdot R_a$
	S. Spíritus	$G_{saf} = 1\,544,96 + 23,64 \cdot D_f + 54,30 \cdot E + 294,89 \cdot R_a - 0,62 \cdot I$
	Guantánamo	$G_{saf} = 1\,491,76 + 23,16 \cdot D_f + 53,08 \cdot E + 290,22 \cdot R_a - 1,22 \cdot I$
HSAT	La Habana	$G_{hsat} = 1\,689,03 + 32,27 \cdot D_e + 44,33 \cdot J + 447,60 \cdot R_a$
	S. Spíritus	$G_{hsat} = 1\,843,91 + 36,80 \cdot D_e + 43,71 \cdot J + 454,37 \cdot R_a - 0,08 \cdot N_c$
	Guantánamo	$G_{hsat} = 1\,759,98 + 39,13 \cdot D_e + 41,95 \cdot J + 448,38 \cdot R_a - 0,10 \cdot N_c$

La derivada parcial de G_{saf} o G_{hsat} con relación a cada factor, da como resultado el propio coeficiente asociado a cada uno, y se interpreta como la contribución marginal de cada factor a la generación.



Para los SAF:

- El factor que más contribuye marginalmente a la generación es el albedo, aún expresado en unidades diferentes a Df y E, debido a razones prácticas.
- El segundo factor es la elevación de los módulos.
- El tercero es la distancia entre filas.
- La inclinación solo contribuye marginalmente en Sancti Spíritus y Guantánamo, sitios de más baja latitud. Los coeficientes son de signo negativo y relativamente despreciables. No obstante, estos resultados hallados en conjunción con el resto de los factores, contradice en cierta medida la afirmación de otros estudios de que el ángulo óptimo para los bifaciales es ligeramente mayor que aquel para los monofaciales.

La contribución marginal promedio de los tres sitios de Df, E y Ra para los SAF se muestra a continuación (tabla 12).

Tabla 12. *Contribución marginal promedio y desviación típica en SAF.*

Factor	Promedio	Desviación típica	% Desv. típ./Promedio
Df	23,16	0,48	2,1%
E	53,40	0,79	1,5%
Ra	289,66	5,54	1,9%

De aquí que, como promedio, con un aumento del albedo en sólo 0,08 (8 %) debe esperarse un incremento aproximado de energía de 23 MWh. Para obtener esa misma ganancia de energía la elevación de los módulos debería aumentarse en 0,43 metros o ampliarse la distancia entre filas en 1,0 metros.

Para los HSAT:

- El factor que más contribuye marginalmente a la generación es el albedo, aún expresado en unidades diferentes a De y J, debido a razones prácticas.



- El segundo factor es la elevación del eje desde el suelo.
- El tercer factor es la distancia entre los ejes de los seguidores en paralelo.
- El número de columnas de seguidores solo contribuye marginalmente en Sancti Spíritus y Guantánamo, sitios de más baja latitud, en una magnitud relativamente pequeña.

La contribución marginal promedio de los tres sitios de Df, E y Ra para los HSAT se muestra a continuación (tabla 13).

Tabla 13. Contribución marginal promedio y desviación típica en HSAT.

Factor	Promedio	Desviación típica	% Desv. típ./Promedio
De	36,07	3,49	9,7%
J	43,33	1,23	2,8%
Ra	450,12	3,71	0,8%

Como media, con un aumento del albedo en 0,08 (8 %) la energía aumentaría de manera aproximada 36 MWh. Para obtener esa ganancia en generación debería aumentarse la elevación del eje en 0,8 metros o ampliarse la distancia entre los ejes de los seguidores en 1,1 metros.

Otras relaciones entre los coeficientes de regresión.

Además de las observaciones anteriormente adelantadas, las razones entre los diferentes coeficientes de regresión permiten adelantar otras (tabla 14).

Tabla 14. Relación entre contribuciones.

		La Habana	Sancti Spíritus	Guantánamo	Promedio
Radiación diaria horizontal		5,25	5,52	5,39	-
Constante (C SAF)		1 407,47	1 544,96	1 491,76	-
Constante (C HSAT)		1 689,03	1 843,91	1 759,98	-
SAF	E (m)	52,82	54,30	53,08	53,40
	Df (m)	22,68	23,64	23,16	23,16
	E/Df	2,33	2,30	2,29	2,31
	Ra	283,86	294,89	290,22	289,66
HSAT	J (m)	44,33	43,71	41,95	43,33



	De (m)	32,27	36,80	39,13	36,07
	J/De	1,37	1,19	1,07	1,20
	Ra	447,60	454,37	448,38	450,12
Ra HSAT/Ra SAF		1,58	1,54	1,54	1,55
J HSAT/ E SAF		0,84	0,80	0,79	0,81
De HSAT/Df SAF		1,42	1,55	1,69	1,56

- La contribución marginal del albedo (Ra) es mayor en la medida que la radiación global es superior en ambos sistemas.
- Las constantes (C SAF y C HSAT) son mayores en la medida que la radiación global es superior.
- Las contribuciones marginales de la elevación del módulo (E) y de la distancia entre filas (Df), son mayores en la medida que la radiación global es superior.
- La contribución marginal de la elevación del módulo (E) es superior a la contribución de la distancia entre filas (Df) en los SAF. Lo mismo ocurre con la elevación del eje (J) y la distancia entre ejes (De) en los HSAT.
- La contribución marginal de la elevación del módulo con relación a la contribución de la distancia entre filas en los SAF es mayor que la contribución marginal de la elevación del eje con relación a la contribución de la distancia entre ejes en los HSAT (E/Df *versus* J/De).
- La contribución marginal del albedo a las ganancias de energía es, como promedio, 1,55 veces superior en los HSAT con relación a los SAF (Ra HSAT/Ra SAF).
- La contribución de la elevación del eje en los HSAT es menor que la contribución de la elevación del módulo en los SAF (J HSAT/E SAF).
- La contribución de la distancia entre los ejes en los HSAT es mayor que la contribución de la distancia entre las filas en los SAF (De HSAT/Df SAF).



- Parece ser que, en la medida que baja la latitud:
 - se reducen las razones (E/Df) en los SAF y (J/De) en los HSAT,
 - se reducen las razones (J HSAT/E SAF) y
 - aumentan las razones (De HSAT/Df SAF).

Conclusiones

1. Con este trabajo los autores han analizado la contribución marginal de cada factor asociado a las ganancias de energía por el uso de paneles bifaciales con las tecnologías SAF y HSAT. Uno de los hallazgos ha sido que, marginalmente, el albedo y la elevación del módulo o la elevación del eje, según la tecnología, son más importantes que la propia distancia entre filas o la distancia entre los ejes, según el sistema. De esta forma, ante limitaciones de espacio, pueden ser tomadas otras alternativas para elevar la generación.
2. Según se deriva también de este trabajo, las ganancias de energía debido a mayores niveles de radiación global horizontal y albedo, son muy superiores en la tecnología HSAT, de manera que se debería dar prioridad a su utilización en sitios con mayor albedo.

Reconocimientos

Los autores agradecen la colaboración del Máster en Estadística Luis Piña León, en la revisión, discusión y recomendaciones para la realización de las regresiones y el análisis estadístico.

Referencias Bibliográficas

Bárceñas Castro M. et al. (2013), *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. <ftp://pegasus/Upload/>
- Castillo-Aguilella y Hauser S., *Multi-Variable Bifacial Photovoltaic Module. Test Results and Best-Fit*, Estados Unidos, Annual Bifacial Energy Yield Model", IEEEAccess, March 7, 2016, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2016.2518399
- Guari Borrull M. (2019), *Performance optimization of bifacial module PV power plants based on simulations and measurements*, Tesis de Maestría, Hamburg University of Applied Sciences,. Disponible en <https://edoc.sub.uni-hamburg.de>
- Guerrero-Pérez J., y Chaouki-Almagro S. (2018), *Bifacial trackers, the real deal*, BITEC Results 1 – Fall 2018. SOLTEC. Disponible en <https://soltec.com/es/soltec-lab/>
- Gul M., Kotak Y., Muneer T. y S. Ivanova. (2018), *Enhancement of albedo for solar energy gain with particular emphasis on overcast skies*, Energies 2018, 11, 2881, ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en11112881. Disponible en <https://www.mdpi.com/journal/energies>.
- Gutiérrez Urdaneta L., Padrón Suárez L. (2020), *Aplicación Distancia filas y columnas*, La Habana, Empresa de Fuentes Renovables de Energía, disponible en <ftp://pegasus/Upload/>
- LG Electronics (2018), *Bifacial design guide*, Corea del Sur. Disponible en <http://www.lg-solar.com>
- PVsystem. Geneva (2019) Switzerland: Group of Energy Institute of the Sciences of the Environment University of Geneva. Licencia concedida a C.R. TECHNOLOGY SYSTEMS en septiembre de 2020, <https://www.pvsyst.com/download-pvsyst/>
- Stein J. S., Riley D., Lavel M., Hnasen C., Deline C. y Toor F. (2017), *Outdoor field performance from bifacial photovoltaic modules and systems*, Estados Unidos, 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366042.
- Sun X., Ryyan Khan M., Deline,C. y Alam M.A. (2017), *Optimization and performance of bifacial solar modules: a global perspective*, Elsevier, DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.041, 2017. Disponible en <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1709/1709.10026.pdf>.
- Yusufoglu U.A., Leea T.H. y Pletzer T.M (2014), *Simulation of energy production by bifacial modules with revision of ground reflection*, 4th. International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.08.111, Energy Procedia 55.

