

Influencia combinada del espaciamiento y la inclinación de módulos en generación fotovoltaica

Combined influence of rows spacing and module inclination in photovoltaic generation

Orestes Castillo Castillo¹, Antonio Sarmiento Sera²

¹Compañía Contratista de Obras de la Aviación CCOA, MITRANS, La Habana, Cuba

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Correo electrónico: orestes.castillo@ccoa.avianet.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 16 de diciembre del 2016 Aprobado: 15 de febrero del 2017

Resumen

En este artículo se presenta la situación del uso de filas de módulos fotovoltaicos en una azotea, para la generación de energía eléctrica. Esta opción contiene el compromiso entre la cantidad de filas y módulos, con cuyo aumento se puede incrementar la generación, aunque se disminuye el espaciamiento entre filas con lo que se incrementan las pérdidas por sombras por interacción entre filas; así también con la posibilidad de reducción de la inclinación de los módulos, con lo que se disminuyen sus alturas y la longitud de las sombras con reducción de sus pérdidas, pero se disminuye la captación solar de cada módulo. Se analizó la situación y se obtuvo la cantidad de filas y la inclinación que lograron la máxima generación eléctrica de origen fotovoltaico, en la superficie de limitada área útil. Los resultados, aunque fueron para un caso específico, sirven de guía para otros similares.

Palabras claves: filas fotovoltaicas, generación fotovoltaica máxima, sombras fotovoltaicas

Abstract

Cuba In this paper, the situation of the use of photovoltaic modules rows was presented in a roof, for the electric power generation. This option contains the commitment between the quantity of rows and modules with whose growing can increase the generation. Although it diminishes the spacing among lines with what the losses are increased by shades among lines and with the possibility of reduction of the inclination of the modules, with what diminishes its heights and the longitude of the shades with reduction of their losses, but it diminishes the solar reception of each module. The situation was analyzed and it was obtained the quantity of lines and the inclination that achieved the maximum electric generation of photovoltaic origin, in the surface of limited useful area. The results, although it was for a specified case, it serves as guide for other similar ones.

Key words: maximum photovoltaic generation, photovoltaic shades, photovoltaic rows

INTRODUCCIÓN

Dentro de la tecnología solar fotovoltaica (FV), se utiliza la colocación de los módulos fotovoltaicos en filas con estructuras metálicas para su sujeción al terreno o superficie donde se coloquen. En varias ocasiones la extensión o superficie disponible es reducida, de alto costo o escasa posibilidad de ampliación. Se destaca el caso de las superficies en cubiertas de los edificios o azoteas con una extensión limitada y donde resulta un típico objetivo la obtención de la cantidad máxima de generación eléctrica de origen fotovoltaico.

Considerando como ejemplo el caso de una azotea de superficie horizontal en la localidad de La Habana, con un sistema FV conectado a la red, el uso de filas de módulos presenta dos características que influyen en la cantidad de energía generada, que son:

Primero, las filas delanteras provocan sombras en las filas traseras, sobre todo en las primeras horas de la salida del Sol, por la dirección cercana a la horizontal que los rayos solares poseen, así como en horas cercanas a la puesta del Sol, como se ilustra en la figura 1.

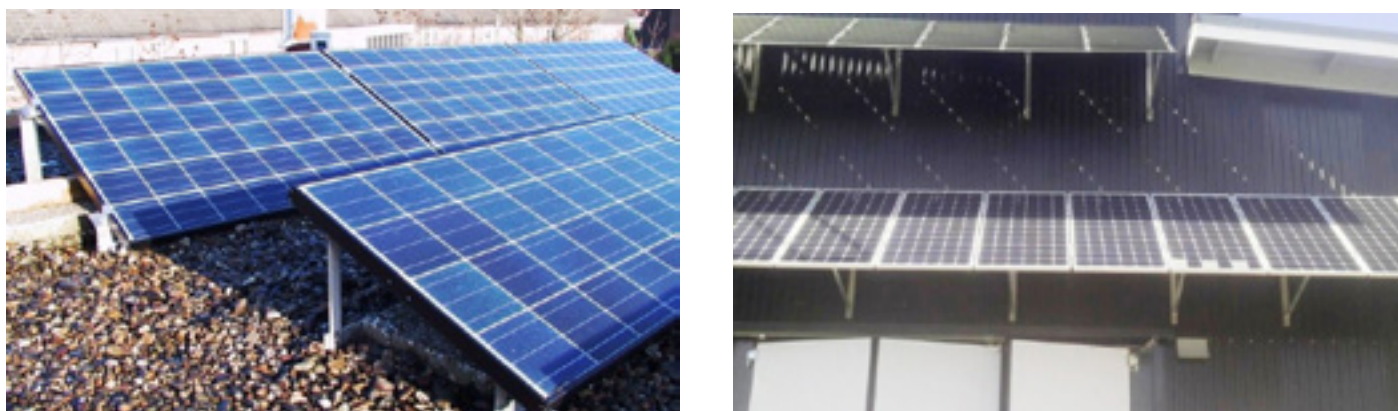


Fig. 1. Dos situaciones de sombras sobre los módulos en el atardecer [1]

Este fenómeno produce pérdidas de generación, cuyos análisis y modelos se han reportado [2;3], estas pérdidas pueden controlarse en algún grado con un adecuado dimensionado [4] del espaciamiento entre las filas.

En segundo lugar, se conoce que la inclinación básica que logra la máxima captación de radiación solar es la similar a la latitud del lugar, 23° en el caso considerado, pero que la disminución de la inclinación de los módulos de las filas reduce la longitud de las sombras que los módulos proyectan hacia el norte donde resulta típico que se encuentren las demás filas, debido a que con menor inclinación, la altura que los módulos obtienen sobre la superficie horizontal de la azotea, disminuye. Estas dependencias están reportadas para casos específicos, con procedimientos de mediana complejidad [5;6].

El problema que se declara en el artículo es la necesidad de encontrar la combinación simultánea del espaciamiento e inclinación de los módulos para obtener la mayor generación fotovoltaica posible en casos dados como la azotea mencionada, para lograr la máxima producción eléctrica en estas condiciones. La solución de este problema constituye el objetivo a cumplir. Como hipótesis se establece que los compromisos entre los efectos deben ofrecer un máximo de generación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como caso específico se consideran las siguientes características:

Longitud de la azotea: 23 m, orientada en la dirección norte – sur.

Ancho de la azotea: 13 m.

Módulo fotovoltaico WRS320 con 320 W y $1,968 \times 0,992$ m² de área.

Se consideran filas de 10 módulos cada una. En cada uno de los extremos de la azotea se reserva 1,5 m para facilitar la movilidad y se explora inicialmente un conjunto de posibles cantidades de filas desde 5 hasta 10 filas, distribuidas en la longitud de 20 m, con lo que se obtiene una variación de espaciamientos entre filas. Este procedimiento presenta la limitación de ofrecer una variación con un mediano escalonamiento. Los módulos se colocan con su mayor longitud en la dirección inclinada. Se considera inicialmente una inclinación fija para los módulos, de 23° , según recomendación citada [7], con observaciones para el uso y los períodos del año que se traten.

El programa de cálculo por computadora PVSYST se caracteriza por su calidad en el estudio de sistemas fotovoltaicos, en especial por su análisis en el tipo de pérdidas como las debidas a sombras y otras. Recientemente se publicó [8] su uso incluyendo el cálculo de sombras de origen cercano o entre filas de módulos FV. Con este programa se obtienen las potencias fotovoltaicas generadas para combinaciones de espaciamientos e inclinaciones y mediante este proceder, obtener las condiciones de mayores potencias.

El presente artículo, después de enunciar la introducción general de la tarea, expone las herramientas y métodos utilizados para llegar a los resultados, su discusión y conclusiones. Dentro de los diferentes procedimientos para analizar el efecto de dos variables independientes sobre una dependiente, se presenta un método gráfico válido, con facilidad de visualización. Existen otros procedimientos para analizar la influencia de las sombras sobre las superficies de captación de radiación solar, aunque presentan determinadas complejidades [9]. Los resultados iniciales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características generales del conjunto de filas analizadas

Cantidad de filas	Espaciamiento	Cantidad de módulos	Potencia FV	Energía entregada	Pérdidas por sombreado	Índice Aprovechamiento del terreno
	[m]		[kW]	[MWh/año]	(%)	(%)
5	4,00	50	16,0	27,15	1,9	49
6	3,33	60	19,2	32,20	3,1	59
7	2,86	70	22,4	34,92	10,0	69
8	2,50	80	25,6	33,52	24,4	79
9	2,22	90	28,8	30,58	38,9	89
10	2,00	100	32,0	25,33	54,5	98

En la figura 2 se representa la dependencia obtenida de la producción o entrega de energía en función de la cantidad de filas, observándose que inicialmente se obtiene el máximo valor de producción de energía para 7 filas.

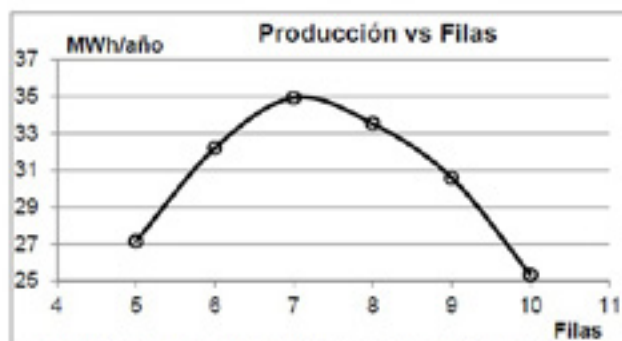


Fig. 2. Dependencia de la producción energética vs la cantidad de filas

Fig. 2. Dependencia de la producción energética vs la cantidad de filas

Una primera selección resulta con 7 filas y un espaciamiento $E_s = 2,86$ m entre filas, para la cual se analizan diferentes opciones de inclinaciones y se presentan en la tabla 2.

Para evitar la participación de los diferentes coeficientes de eficiencia que los inversores puedan tener, en el nivel de energía entregada a la red eléctrica, en el presente trabajo se considera energía Entregada a la energía que se entrega al inversor y en ese sentido se busca el máximo valor de la energía entregada. En la figura 3 se muestra el esquema de las 7 filas confeccionado por el PVSYST, se observa la orientación de los módulos al sur.

En la figura 4 se presenta el diagrama de pérdidas confeccionado por el PVSYST, donde se muestra el valor de 37,27 MWh/año entregado a la entrada del inversor y arriba el letrero de: -3,6% Near Shadings *according to strings*, el que puede interpretarse como un 3,6% de pérdidas debido a sombras cercanas de las filas fotovoltaicas [6].

Tabla 2. Características generales para 7 filas y diferentes inclinaciones

Ángulo de Inclinación	Energía entregada	Pérdidas por Sombreo
[Grados]	[MWh/año]	(%)
23	34,92	10,0
21	35,14	9,5
19	36,19	6,7
17	36,59	5,6
15	37,27	3,6
13	37,74	2,2
11	37,77	1,7
9	37,82	1,1
7	37,70	0,9

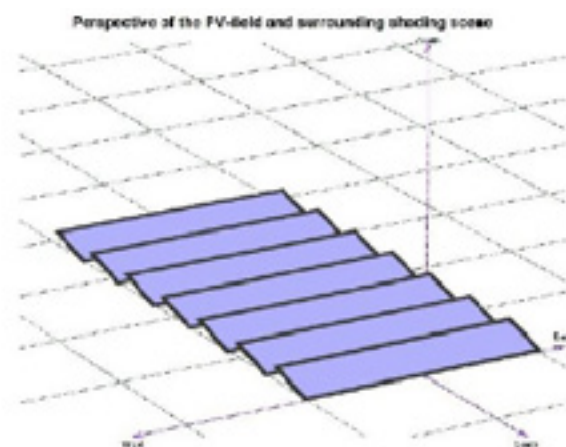


Fig. 3. Esquema de las 7 filas confeccionados por el PVSYST

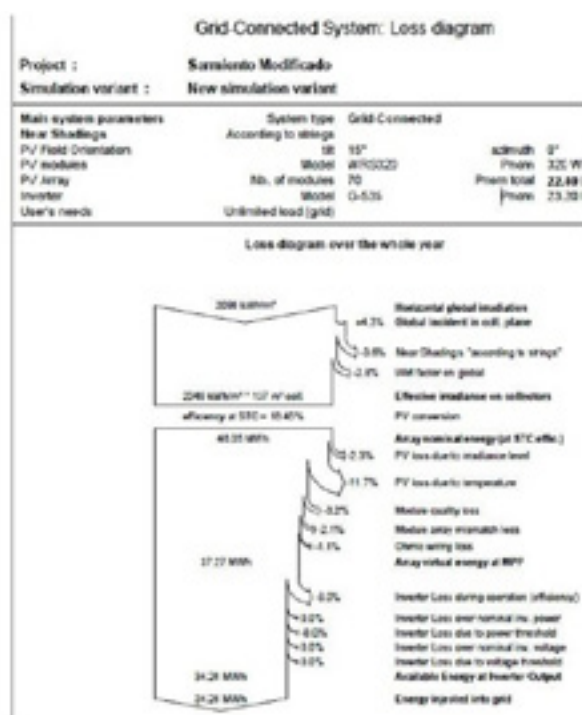


Fig. 4. Diagrama de pérdidas confeccionado por el PVSYST

RESULTADOS

La máxima generación se obtiene para una inclinación de 9° , aunque se decide seleccionar como máxima entrega a la producida con una inclinación de 15° para permitir que la lluvia o el lavado manual, resulten beneficiosos en el proceso de limpieza de los módulos. Siendo como regla, utilizar la mínima inclinación de 15° .

Se elaboraron tablas similares a la tabla 2, para otras cantidades de filas o espaciamentos, como los señalados en la tabla 1, para comprobar las combinaciones de las variables espaciamento e inclinación. El resultado de estas simulaciones se presenta en la figura 5, con la cantidad de filas en la leyenda.

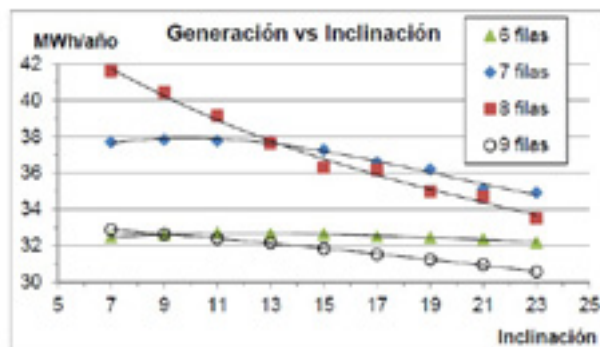


Fig. 5. Distribución de la generación eléctrica en función de la inclinación de los módulos, para diferentes cantidades de filas

DISCUSIÓN

Resulta útil el análisis de la influencia de ambos parámetros (cantidad de filas e inclinación) en la generación fotovoltaica, teniendo en cuenta además, que el espaciamento tiene una amplia influencia.

Después de establecido el espaciamento, la disminución de la inclinación provoca por una parte, una disminución en la captación de la radiación solar, aunque desde los 23° hasta los 15° solo se reduce la captación de radiación solar en un 1 % [5], ya que sin otras influencias, la máxima captación es para 23° , mientras que por otra parte, la reducción de la inclinación, provoca una reducción en la longitud de las sombras y de hecho en las pérdidas por sombras del 6 %, resultando el efecto de reducción de pérdidas superior, de los dos analizados en este párrafo.

El índice de aprovechamiento del terreno se define [10], como:

u : longitud inclinada del módulo / espaciamento entre filas,

También resulta interesante señalar que el índice de aprovechamiento del terreno es del 69 % en la opción de 7 filas (tabla 1) y que resulta del 98 % para 10 filas, aunque esta última opción no resulta ventajosa pues demasiadas filas provocan un espaciamento menor, con mayores pérdidas y menor generación que otras opciones.

Como resumen, en la figura 5 se puede observar que la máxima generación se obtiene con una inclinación de 15° (menores inclinaciones fueron descartadas) y para 7 filas, que corresponde con un espaciamento de $20(\text{m}) / 7(\text{fila}) = 2,86(\text{m/fila}) = E_s$, resultando los parámetros del objetivo de trabajo establecido.

Debe observarse que los resultados obtenidos son para un caso específico de una azotea, pero que el procedimiento puede servir para otros muchos casos, incluyendo el de grandes parques fotovoltaicos montados con filas fotovoltaicas. Se destaca la importancia del resultado presentado.

CONCLUSIONES

En el caso analizado, la máxima generación se obtuvo para una inclinación de 15° y un espaciamento entre filas de 2,86 m.

La instalación de filas fotovoltaicas para la generación eléctrica en superficies de área limitada, como el caso de azoteas, provoca el compromiso entre la cantidad de filas y módulos a utilizar, con sus respectivos espaciamentos, junto con la inclinación que se decida para los módulos, pudiendo obtenerse los valores simultáneos de ambos parámetros con los que se logra la máxima generación eléctrica de origen fotovoltaico. Los resultados obtenidos, aunque para un caso específico de una azotea, sirven de guía para situaciones similares.

REFERENCIAS

1. Contero Salvadores J. Shadowing effect on the performance in solar pv-cells [Tesis de Maestría]. Suecia: Universidad de Gävle. Suecia; 2015. [Citado: Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&c->

- d=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjwhrOX4N7NAhWD8YMKHb14AOYQFggjMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.diva-portal.se%2Fsmash%2Fget%2Fdiva2%3A823921%2FFULLTEXT01.pdf&usg=AFQjCNHFYiD1ds3XPf2K00xEiE-pAHFvGHQ.
2. Pallejá Cabré J. Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico [Tesis de doctorado. Departamento de Electrónica]. Vigili, España: Universitat Rovira; 2016. [Citado: Disponible en: https://www.google.com/search?q=sombras+en+paneles+fotovoltaicos&biw=1366&bih=657&source=Inms&sa=X&ved=0ahUKEwjPq5mima_NAhVFdh4KHRXfAVgQ_AUIBSgA&dpr=1#q=sombras+en+filas+fotovoltaicas&start=30.
 3. Sadineni S, et al. Spacing analysis of an inclined solar collector field. In: ASME 2nd International Conference on Energy Sustainability Energy Sustainability; Jacksonville, Florida: 2008. p. 3-4. [Citado Disponible en: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=162680>.
 4. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red. Madrid, España: Universidad de Castilla-La Mancha 2011. [Citado Disponible en: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/01/18/calculo-de-la-distancia-minima-entre-placas-solares/>.
 5. Elhab B, et al. Optimizing tilt angles and orientations of solar panels for Kuala Lumpur, Malaysia. Scientific Research and Essays. 2012;7(42): 3758-65. [Citado Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cad=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiarqDk397NAhVG6IMKHZecAKIQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.wseas.us%2Flibrary%2Fconferences%2F2012%2FZlin%2FENAGROBIO%2FENAGROBIO-14.pdf&usg=AFQjCN-Fg6zMNLwwwmfwAWS4HwJfdwIDKkQ>.
 6. Quaschnig V. Understanding Renewable Energy Systems. London, England: Earthscan, London, NW1 0JH, UK; 2005. [Citado Disponible en: https://www.google.com/search?q=sombras+en+paneles+fotovoltaicos&biw=1366&bih=657&source=Inms&sa=X&ved=0ahUKEwjPq5mima_NAhVFdh4KHRXfAVgQ_AUIBSgA&dpr=1#q=Understanding+Renewable+Energy+Systems.
 7. Bériz Pérez L, Álvarez González M. Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente. Eco Solar. 2004;8.
 8. Osorio Laurencio L, Montero Laurencio R. Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal. Ingeniería Energética. 2016;XXXVII(1):52.
 9. Sarabia Escriba E. Cálculo de Sombras en Programas de Simulación Térmica de Edificios [Tesis de Doctorado]. España: Universidad Politécnica de Valencia; 2010. [Citado: Disponible en: <https://www.google.com/search?q=C%-C3%A1lculo+de+Sombras+en+Programas+de+Simulaci%C3%B3n+T%C3%A9rmica+de+Edificios&ie=utf-8&oe=utf-8>.
 10. Perpiñán Lamigueiro O. Energía Solar Fotovoltaica. En: Creative Commons. España 2016. [Citado Disponible en: <http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>.