

INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN DE LOS PANELES SOLARES EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN ESPACIOS LIMITADOS

Por Dr. C. Luis Hilario Bérrez Pérez*

* Presidente de Cubasolar

E-mail: berriz@cubasolar.cu

Resumen

En este trabajo se estudia la influencia que tienen factores, tales como el ángulo de inclinación y de azimut de los módulos fotovoltaicos en la producción de electricidad de un sistema fotovoltaico. Otros factores, como la radiación solar incidente sobre la superficie horizontal, el coeficiente de transparencia atmosférica de la mañana y de la tarde, el coeficiente de aprovechamiento del área, la ubicación de la instalación e inclusive los aspectos climáticos, son también tratados.

En el trabajo se demuestra que dentro de determinados rangos el ángulo de azimut influye poco en la producción de una instalación fotovoltaica, principalmente si es de inyección a red. Se demuestra también la importancia del área disponible para la producción de electricidad, lo que es básico en ciudades, techos y lugares limitados.

En el trabajo se introducen dos conceptos nuevos: la latitud equivalente ϕ_E y la diferencia entre el mediodía real y el aparente $\Delta\omega_E$ el cual conduce al concepto de longitud aparente, factores de importancia fundamentalmente cuando la transparencia atmosférica de la tarde es diferente a la de la mañana. Se incluye además una nueva forma para la determinación de las sombras provocadas por los propios módulos fotovoltaicos.

Este trabajo resulta de gran utilidad para aquellos que tratan de optimizar la producción fotovoltaica de electricidad considerando todos los factores, como son, el valor del área o terreno de la instalación.

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

INFLUENCE OF THE ORIENTATION OF SOLAR PANELS IN THE PRODUCTION OF ELECTRICAL ENERGY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN LIMITED SPACES

Abstract

This paper studies the influence of factors such as the angle of inclination and azimuth of photovoltaic modules in the production of electricity from a photovoltaic system. Other factors, such as solar radiation incident on the horizontal and oriented surface, the coefficient of atmospheric transparency in the morning and afternoon, the coefficient of use of the area, the location of the installation and even climatic aspects, are also treated.

The work shows that within certain ranges, the azimuth angle has little influence on the production of a photovoltaic installation, mainly if it is a grid injection. The importance of the area available for the production of electricity is also demonstrated, which is basic in cities, roofs and limited places.

In the work two new concepts are introduced: the equivalent latitude ϕ_E and the difference between the real noon and the apparent $D\omega_E$ which leads to the concept of apparent longitude, factors of importance especially when the atmospheric transparency of the afternoon is different from that of the morning. It also includes a new way to determine the shadows caused by the photovoltaic modules themselves.

This work is especially useful for those who try to optimize the photovoltaic production of electricity, considering all the factors such as the value of the area or land of the installation.

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

Introducción

Son muchos los factores que en estos últimos años han influenciado en la determinación de una política energética basada en la producción de electricidad a partir de las fuentes renovables de energía, y muy especialmente con el uso directo de la radiación solar como fuente energética primaria, entre ellos: el cambio climático provocado por la política energética actual altamente contaminante del medioambiente; el conocimiento de las posibilidades reales de autoabastecimiento con los recursos locales; el desarrollo científico y tecnológico, así como la disminución del costo del kilowatt-hora producido con las fuentes renovables y específicamente con la radiación solar como fuente primaria.

No son pocos los que actualmente consideran que (al igual que el autor de este artículo) el futuro energético mundial, y como es natural de cada país, estará organizado preferentemente en redes energéticas locales con el uso de los recursos locales para la producción de la electricidad y la satisfacción de las propias necesidades locales.

Cada día proliferan más las instalaciones solares fotovoltaicas para la producción de electricidad, ya sean aisladas o conectadas a la red; y Cuba no está ajena a este desarrollo. En no pocos casos no se utilizan correctamente los espacios ocupados por las instalaciones solares, principalmente por orientaciones inadecuadas de los paneles solares. Por estas razones se hace necesario la disponibilidad de metodologías de cálculo que permitan optimizar el aprovechamiento de los espacios y locales disponibles y de esta forma contribuir al desarrollo energético del país.

Para el cálculo de la energía generada por una instalación solar fotovoltaica en dependencia de la orientación de los paneles, se debe proceder de la forma siguiente:

1. Cálculo de la energía solar incidente en la superficie horizontal.
2. Cálculo de la energía solar incidente en la superficie orientada.
3. Cálculo de la energía producida por el sistema o parque fotovoltaico.

En este trabajo se ha tenido en consideración un horizonte despejado, o sea, un espacio aprovechable energéticamente cuando el Sol tiene una altura por encima de 15 grados. Otras situaciones relacionadas con las sombras serán vistas en otros trabajos.

Cálculo de la energía solar incidente en la superficie horizontal

La energía solar incidente en la superficie horizontal depende de la latitud y las condiciones climáticas del lugar, y su cálculo puede ser hecho por la ecuación:

$$H = K_T H_0 \quad (1)$$

Donde:

H : Energía solar recibida en la superficie horizontal en un período determinado que normalmente es de un día.

K_T : Coeficiente de transparencia de la atmósfera.

H_0 : Energía solar que se recibiera si no hubiese atmósfera en el mismo período.

Esta fórmula resulta cómoda, pues H_0 resulta calculable y depende del día del año y de la latitud del lugar. El coeficiente de transparencia de la atmósfera constituye un dato que generalmente se tiene o es fácil de determinar en las estaciones meteorológicas para los diferentes días del año. Aunque este coeficiente varía también con la hora del día, normalmente lo que se tiene es su valor diario, el cual resulta representativo de grandes extensiones de terreno.

En el caso de Cuba, isla tropical alargada de este a oeste y situada entre latitudes de 20 a 23 grados, la transparencia de la mañana suele ser mayor que por la tarde debido a la nubosidad y al calentamiento diurno.

En este trabajo se han tomado los datos de K_T del Polígono Experimental de Cubasolar de La Habana, el cual tiene un K_T para la mañana (hasta el mediodía solar) y otro para la tarde (después del mediodía solar). Los valores de K_T tomados constituyen los valores medios de cada mes. Para los efectos de este trabajo, los valores de K_T tomados de La Habana se pueden aplicar también al resto del país hasta latitudes de 20 grados.

El valor de la energía solar que se recibiera sobre el plano horizontal si no hubiera atmósfera se calcula por la fórmula siguiente:

$$H_0 = (24 G_{SC} / \pi) \times [1 + 0,033 \cos(360n/365)] \times [\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + (\pi \omega_s / 180) \sin \phi \sin \delta] \quad (2)$$

Donde:

G_{SC} : Constante solar $G_{SC} = 1353 \text{ W/m}^2$.

N : Día del año.

δ : declinación del sol, la cual varía con el día n del año.

ϕ : Latitud del lugar.

ω_s : Angulo horario de salida del sol.

H_0 se da en kilowatt-hora por metro cuadrado al día ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{día}$) o en megajoule por metro cuadrado al día ($\text{MJ/m}^2 \cdot \text{día}$).

La declinación del sol depende del día del año y se puede calcular por la fórmula:

$$\delta = 23,45 \sin[360(284+n)/365] \quad (3)$$

El ángulo horario de salida y puesta del sol con simetría al mediodía solar, depende de la declinación solar y de la latitud local, y puede ser calculado por la fórmula:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (4)$$

El ángulo horario de salida del sol es negativo y el de puesta es positivo. En el ecuador, ambos son de 90 grados y duran 6 horas, o sea, el sol sale a las 6:00 a.m. y se pone a las 6:00 p.m. de la tarde para cualquier día del año. A medida en que la latitud aumenta, la diferencia de la duración del día solar entre el solsticio de verano y el de invierno se hace mayor, aunque el promedio entre ambos sigue siendo de 180 grados.

En la Tabla 1 aparece en la primera columna, el mes del año promedio, y en la segunda, el día del año que corresponde a dicho mes y por el que se calcula la declinación solar promedio mensual. Por este dato de la declinación se

puede apreciar que en el solsticio de verano (21 de junio) en La Habana, al mediodía solar el sol está justamente en el cenit. En Santiago de Cuba el sol está en el cenit unos días antes del solsticio de verano y unos días después.

Los datos de K_T , o sea, de la transparencia atmosférica, tienen un valor máximo en abril y uno mínimo en noviembre y junio.

Los datos de la energía solar incidente sobre el plano horizontal son muy similares en todo el país y su valor promedio oscila alrededor de 5 kW/h/m^2 al día. Solo en algunos microclimas cubanos los datos se diferencian de los dados en la Tabla 1.

Tabla 1. Demanda energética para cada mes de la instalación hotelera

Latitud $\phi=23$								
Mes	n	δ	w_s	H_0	K_{T1}	K_{T2}	K_T	H
Enero	17	-20,9	80,7	6,95	0,54	0,5	0,52	3,62
Febrero	47	-13,0	84,4	8,07	0,52	0,5	0,51	4,12
Marzo	75	-2,4	89,0	9,32	0,59	0,58	0,59	5,45
Abril	105	9,4	94,0	10,37	0,61	0,59	0,60	6,22
Mayo	135	18,8	98,3	10,89	0,61	0,57	0,59	6,43
Junio	162	23,1	100,4	11,03	0,53	0,47	0,50	5,52
Julio	198	21,2	99,5	10,93	0,54	0,5	0,52	5,68
Agosto	228	13,5	95,8	10,53	0,58	0,54	0,56	5,89
Septiembre	258	2,2	90,9	9,67	0,53	0,49	0,51	4,93
Octubre	288	-9,6	85,9	8,41	0,53	0,49	0,51	4,29
Noviembre	318	-18,9	81,6	7,20	0,5	0,49	0,50	3,56
Diciembre	344	-23,0	79,6	6,61	0,56	0,54	0,55	3,64
Promedio		0,0	90,0	9,16	0,55	0,52	0,54	4,95

Latitud $\phi=20$								
Mes	n	δ	w_s	H_0	K_{T1}	K_{T2}	K_T	H
Enero	17	-20,9	82,0	7,40	0,54	0,5	0,52	3,85
Febrero	47	-13,0	85,2	8,44	0,52	0,5	0,51	4,31
Marzo	75	-2,4	89,1	9,56	0,59	0,58	0,59	5,59
Abril	105	9,4	93,5	10,43	0,61	0,59	0,60	6,26
Mayo	135	18,8	97,1	10,80	0,61	0,57	0,59	6,37
Junio	162	23,1	98,9	10,87	0,53	0,47	0,50	5,44
Julio	198	21,2	98,1	10,80	0,54	0,5	0,52	5,62
Agosto	228	13,5	95,0	10,52	0,58	0,54	0,56	5,89
Septiembre	258	2,2	90,8	9,83	0,53	0,49	0,51	5,02
Octubre	288	-9,6	86,5	8,74	0,53	0,49	0,51	4,46
Noviembre	318	-18,9	82,8	7,63	0,5	0,49	0,50	3,78
Diciembre	344	-23,0	81,1	7,08	0,56	0,54	0,55	3,90
Promedio		0,0	90,0	9,34	0,55	0,52	0,54	5,04

Cálculo de la energía solar incidente en la superficie orientada del módulo fotovoltaico

Todo plano, independientemente del valor de su inclinación y rotación en azimut, tiene un plano equivalente horizontal en determinado lugar de la esfera terrestre con una latitud y una longitud equivalentes. Para poder visualizar mejor las relaciones que existen entre estos valores, se puede analizar la Figura 1. En esta figura la recta $OA\beta$ es la normal al plano de referencia con inclinación sobre el plano horizontal y rotación en azimut con relación al eje norte-sur local.

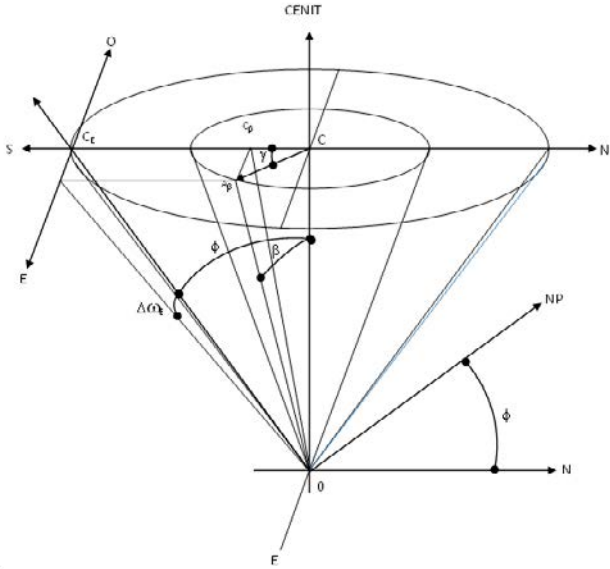


Fig. 1. Doble rotación de un plano en inclinación y en azimut.

En esta Figura se pueden apreciar los valores siguientes:
 ϕ – Ángulo de latitud, el cual hace referencia al lugar de la Tierra donde esté situado el punto local.

β – Ángulo de inclinación, referido al plano horizontal.

γ – Ángulo de azimut, referido al cenit local, tomando un valor positivo del sur al oeste y negativo del sur al este.

N, S, E Y O – Puntos cardinales: norte, sur, este y oeste.

NP – Norte olar.

o – Centro de la Tierra.

C – Centro de referencia en la superficie de la Tierra.

ϕ_E – Ángulo de latitud equivalente.

$D\omega_E$ – Diferencia entre el mediodía real y el aparente.

La latitud equivalente ϕ_E puede determinarse por la ecuación:

$$\phi_E = \phi - \tan^{-1}(\tan\beta \cdot \cos\gamma) \quad (5)$$

El valor $D\omega_E$ da la diferencia entre la longitud local y la aparente relacionada con el plano inclinado en β y γ , y puede ser determinada por:

$$\tan(D\omega_E) = \sin\gamma \cdot \cos\phi \cdot \tan\beta \quad (6)$$

Este valor es importante determinarlo, principalmente para aquellos lugares donde se tengan los valores de K_T para las mañanas y las tardes y estos sean diferentes. Así,

un ángulo de azimut puede dirigir el plano hacia la mañana o hacia la tarde según las conveniencias.

Es importante destacar que el valor $D\omega_E$ depende principalmente del valor del ángulo de inclinación β y su valor máximo en La Habana va estar dado por la fórmula:

$$\tan(D\omega_{E(\max)}) = 0,92 \tan\beta \quad (7)$$

y en Santiago de Cuba por: $\tan(D\omega_{E(\max)})$

$$= 0,94 \tan\beta \quad (8)$$

La energía H_T incidente sobre cualquier plano puede calcularse por la ecuación:

$$H_T = RH \quad (9)$$

Donde:

H: Energía solar incidente sobre el plano horizontal y se puede determinar por la fórmula:

$$R = [1 - (H_d/H)]R_b + (H_d/H)[(1 + \cos\beta)/2] + \rho(1 - \cos\beta)/2 \quad (10)$$

Donde:

ρ : Reflectancia del piso que para Cuba se puede tomar un valor de 0,2.

El valor de H_d/H se puede calcular por la ecuación:

$$H_d/H = 0,755 + 0,00653(w_s - 90) - [0,505 + 0,00455(w_s - 90)] \cos(115K_T - 103) \quad (11)$$

Una fórmula desarrollada por Klein en 1977 permite calcular el valor de R_b para cualquier plano inclinado. Esta fórmula se expresa por:

$$R_b = [(\cos\beta \sin\delta \sin\phi)(w_{sp} - w_{ss})(\pi/180) - (\sin\delta \cos\beta \sin\phi \cos\gamma)(w_{sp} - w_{ss})(\pi/180) + (\cos\phi \cos\delta \cos\beta)(\sin w_{sp} - \sin w_{ss}) + (\cos\delta \cos\gamma \sin\phi)(\sin w_{sp} - \sin w_{ss}) - (\cos\delta \sin\beta \sin\gamma)(\cos w_{sp} - \cos w_{ss})] / 2(\cos\phi \cos\delta \sin w_s + \sin\phi \sin\delta \cos\gamma) \quad (12)$$

$(w_{sp} - w_{ss})$ es la duración del día solar para el plano inclinado:

Donde:

w_{sp} : Ángulo de salida del sol.

w_{ss} : Ángulo de puesta del sol.

En este caso del plano inclinado, w_{sp} y w_{ss} no tienen por qué ser iguales, sino toman el menor valor entre w_s y un nuevo valor calculado. El valor w_s es el ángulo de salida y puesta del sol positivo en la tarde y negativo en la mañana.

Así, los nuevos valores calculados son:

$$\text{Para } \gamma > 0: \cos w_{ss} = [AB + (A^2 - B^2 + 1)^{1/2}] / (A^2 + 1) \quad (13)$$

$$\text{Para } \gamma < 0: \cos w_{ss} = [AB - (A^2 - B^2 + 1)^{1/2}] / (A^2 + 1) \quad (14)$$

Donde:

$$A = (\cos\phi / \sin\gamma \tan\beta) + \sin\phi / \tan\gamma \quad (15)$$

$$B = \tan[(\cos\phi/\tan\gamma) - (\sin\phi/\sin\theta\beta)] \quad (16)$$

En el grupo de Tablas 2, desde la A hasta la D, se reflejan los datos que relacionan R y la energía solar H_T sobre el plano inclinado para valores de latitud de 23 y 20 grados, y para ángulos de inclinación de β igual a 15 grados y 30 grados, y para ángulos de azimut que varían de 30 en 30 desde 0 hasta 360. En estas Tablas se pueden apreciar varias relaciones interesantes entre los valores de R y H_T , tales como:

La variación de la energía incidente H_T sobre la superficie inclinada varía poco con relación a la variación de la latitud desde 20 hasta 23, o sea, en todo el país.

La influencia del ángulo de azimut aumenta a medida del aumento del valor del ángulo de inclinación β . Para va-

lores pequeños de β , la influencia del ángulo de azimut se hace despreciable.

Para inclinaciones de 15°, las variaciones de la energía incidente con relación al ángulo de azimut son aceptables para valores inferiores a más o menos 60°.

El ángulo de inclinación entre valores aceptables tiene un valor significativo en la energía incidente en diferentes meses, pero no es significativo en la energía solar recibida durante todo el año. Este es un factor muy importante a tener en cuenta, pues para las condiciones de Cuba es decisivo el papel de los huracanes y vientos fuertes en las instalaciones solares, y mientras los paneles sean más inclinados, los efectos de los vientos serán mayores.

TABLA 2.A- ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL PLANO INCLINADO CON $\phi=23$ Y $\beta=15$

MES	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T
Enero	0	1,218	4,40	30	1,184	4,28	60	1,098	3,96	90	0,987	3,56	120	0,867	3,12	150	0,768	2,77
Febrero	0	1,145	4,72	30	1,122	4,62	60	1,065	4,38	90	0,989	4,07	120	0,901	3,71	150	0,829	3,41
Marzo	0	1,069	5,83	30	1,057	5,76	60	1,029	5,61	90	0,989	5,39	120	0,936	5,10	150	0,892	4,86
Abril	0	0,999	6,21	30	0,995	6,19	60	0,994	6,18	90	0,987	6,13	120	0,966	6,00	150	0,949	5,90
Mayo	0	0,948	6,09	30	0,951	6,11	60	0,968	6,21	90	0,984	6,31	120	0,986	6,33	150	0,989	6,35
Junio	0	0,926	5,10	30	0,931	5,12	60	0,956	5,26	90	0,982	5,39	120	0,995	5,47	150	1,006	5,54
Julio	0	0,936	5,31	30	0,940	5,33	60	0,962	5,45	90	0,983	5,57	120	0,991	5,62	150	0,999	5,67
Agosto	0	0,977	5,76	30	0,976	5,75	60	0,983	5,78	90	0,985	5,79	120	0,975	5,73	150	0,966	5,69
Setiembre	0	1,041	5,13	30	1,032	5,08	60	1,015	4,99	90	0,988	4,86	120	0,948	4,66	150	0,916	4,51
Octubre	0	1,119	4,80	30	1,100	4,71	60	1,053	4,51	90	0,989	4,23	120	0,913	3,91	150	0,851	3,65
Noviembre	0	1,198	4,27	30	1,168	4,16	60	1,089	3,88	90	0,988	3,52	120	0,876	3,12	150	0,785	2,80
Diciembre	0	1,241	4,51	30	1,204	4,37	60	1,108	4,02	90	0,986	3,58	120	0,855	3,11	150	0,749	2,72
PROMEDIO		1,068	5,18		1,055	5,12		1,027	5,02		0,986	4,87		0,934	4,66		0,892	4,49

MES	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T
Enero	180	0,727	2,63	210	0,768	2,78	240	0,867	3,14	270	0,987	3,58	300	1,098	3,98	330	1,185	4,29
Febrero	180	0,801	3,30	210	0,829	3,42	240	0,901	3,72	270	0,989	4,08	300	1,065	4,39	330	1,122	4,63
Marzo	180	0,878	4,79	210	0,892	4,87	240	0,936	5,11	270	0,989	5,40	300	1,029	5,62	330	1,057	5,77
Abril	180	0,948	5,90	210	0,949	5,91	240	0,966	6,01	270	0,987	6,14	300	0,994	6,19	330	0,995	6,19
Mayo	180	0,998	6,41	210	0,989	6,36	240	0,986	6,35	270	0,984	6,34	300	0,968	6,24	330	0,951	6,12
Junio	180	1,019	5,62	210	1,006	5,56	240	0,995	5,51	270	0,982	5,44	300	0,956	5,29	330	0,931	5,14
Julio	180	1,010	5,74	210	0,999	5,68	240	0,991	5,64	270	0,983	5,60	300	0,962	5,48	330	0,940	5,35
Agosto	180	0,970	5,72	210	0,966	5,70	240	0,975	5,76	270	0,985	5,82	300	0,983	5,81	330	0,976	5,76
Setiembre	180	0,907	4,47	210	0,916	4,52	240	0,948	4,69	270	0,988	4,89	300	1,015	5,02	330	1,032	5,09
Octubre	180	0,828	3,55	210	0,851	3,66	240	0,913	3,93	270	0,989	4,26	300	1,053	4,53	330	1,100	4,73
Noviembre	180	0,747	2,66	210	0,785	2,80	240	0,876	3,12	270	0,988	3,52	300	1,089	3,89	330	1,168	4,16
Diciembre	180	0,703	2,56	210	0,749	2,73	240	0,855	3,12	270	0,986	3,59	300	1,108	4,04	330	1,204	4,38
PROMEDIO		0,878	4,45		0,892	4,50		0,934	4,68		0,986	4,89		1,027	5,04		1,055	5,13

Influencia de la orientación de los paneles solares en la producción de energía...

TABLA 2.B- ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL PLANO INCLINADO CON $f=20$ Y $b=15$

MES	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t
Enero	0	1,195	4,60	30	1,165	4,48	60	1,088	4,18	90	0,988	3,79	120	0,878	3,37	150	0,788	3,03
Febrero	0	1,129	4,86	30	1,108	4,77	60	1,057	4,54	90	0,989	4,25	120	0,909	3,91	150	0,844	3,63
Marzo	0	1,057	5,91	30	1,046	5,85	60	1,023	5,72	90	0,988	5,52	120	0,941	5,26	150	0,902	5,04
Abril	0	0,990	6,19	30	0,987	6,17	60	0,989	6,18	90	0,986	6,16	120	0,971	6,07	150	0,958	5,99
Mayo	0	0,940	5,99	30	0,944	6,01	60	0,964	6,13	90	0,984	6,26	120	0,992	6,31	150	0,998	6,35
Junio	0	0,918	4,99	30	0,925	5,02	60	0,953	5,16	90	0,983	5,32	120	1,001	5,42	150	1,015	5,51
Julio	0	0,928	5,21	30	0,933	5,23	60	0,958	5,37	90	0,983	5,51	120	0,997	5,58	150	1,007	5,65
Agosto	0	0,968	5,70	30	0,969	5,70	60	0,979	5,75	90	0,985	5,79	120	0,980	5,76	150	0,975	5,74
Setiembre	0	1,030	5,16	30	1,022	5,12	60	1,009	5,05	90	0,988	4,94	120	0,953	4,77	150	0,925	4,63
Octubre	0	1,104	4,92	30	1,087	4,84	60	1,045	4,65	90	0,989	4,39	120	0,920	4,09	150	0,864	3,84
Noviembre	0	1,177	4,45	30	1,150	4,34	60	1,079	4,07	90	0,988	3,73	120	0,886	3,34	150	0,803	3,03
Diciembre	0	1,216	4,74	30	1,183	4,60	60	1,097	4,27	90	0,987	3,84	120	0,868	3,38	150	0,771	3,00
PROMEDIO		1,054	5,23		1,043	5,18		1,020	5,09		0,986	4,96		0,941	4,77		0,904	4,62

MES	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t
Enero	180	0,751	2,89	210	0,788	3,04	240	0,878	3,39	270	0,988	3,82	300	1,088	4,20	330	1,165	4,49
Febrero	180	0,819	3,52	210	0,844	3,63	240	0,909	3,92	270	0,989	4,26	300	1,057	4,56	330	1,108	4,77
Marzo	180	0,891	4,98	210	0,902	5,05	240	0,941	5,27	270	0,988	5,53	300	1,023	5,72	330	1,046	5,85
Abril	180	0,958	5,99	210	0,958	5,99	240	0,971	6,08	270	0,986	6,18	300	0,989	6,20	330	0,987	6,18
Mayo	180	1,007	6,42	210	0,998	6,37	240	0,992	6,33	270	0,984	6,29	300	0,964	6,16	330	0,944	6,03
Junio	180	1,029	5,59	210	1,015	5,53	240	1,001	5,46	270	0,983	5,36	300	0,953	5,20	330	0,925	5,04
Julio	180	1,019	5,72	210	1,007	5,67	240	0,997	5,61	270	0,983	5,54	300	0,958	5,39	330	0,933	5,25
Agosto	180	0,979	5,77	210	0,975	5,75	240	0,980	5,79	270	0,985	5,82	300	0,979	5,78	330	0,969	5,72
Setiembre	180	0,918	4,60	210	0,925	4,65	240	0,953	4,79	270	0,988	4,97	300	1,009	5,08	330	1,022	5,13
Octubre	180	0,843	3,76	210	0,864	3,86	240	0,920	4,11	270	0,989	4,42	300	1,045	4,67	330	1,087	4,85
Noviembre	180	0,769	2,91	210	0,803	3,03	240	0,886	3,35	270	0,988	3,73	300	1,079	4,08	330	1,150	4,34
Diciembre	180	0,730	2,85	210	0,771	3,01	240	0,868	3,39	270	0,987	3,85	300	1,097	4,28	330	1,183	4,61
PROMEDIO		0,893	4,58		0,904	4,63		0,941	4,79		0,986	4,98		1,020	5,11		1,043	5,19

TABLA 2.C- ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL PLANO INCLINADO CON $\phi=23$ Y $\beta=30$

MES	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t	γ	R	H_t
Enero	0	1,369	4,95	30	1,306	4,71	60	1,152	4,14	90	0,966	3,47	120	0,736	2,65	150	0,526	1,89
Febrero	0	1,228	5,06	30	1,183	4,86	60	1,087	4,46	90	0,961	3,95	120	0,789	3,24	150	0,628	2,58
Marzo	0	1,082	5,90	30	1,057	5,76	60	1,018	5,55	90	0,956	5,21	120	0,845	4,61	150	0,741	4,04
Abril	0	0,949	5,91	30	0,944	5,86	60	0,955	5,93	90	0,950	5,89	120	0,898	5,57	150	0,849	5,28
Mayo	0	0,860	5,53	30	0,865	5,54	60	0,910	5,82	90	0,945	6,04	120	0,936	5,99	150	0,930	5,96
Junio	0	0,823	4,54	30	0,831	4,57	60	0,890	4,87	90	0,942	5,15	120	0,954	5,22	150	0,966	5,31
Julio	0	0,839	4,77	30	0,846	4,79	60	0,899	5,08	90	0,943	5,33	120	0,946	5,35	150	0,950	5,38
Agosto	0	0,910	5,36	30	0,908	5,34	60	0,935	5,49	90	0,948	5,56	120	0,915	5,37	150	0,884	5,20
Setiembre	0	1,027	5,06	30	1,010	4,96	60	0,992	4,87	90	0,953	4,67	120	0,867	4,25	150	0,785	3,86
Octubre	0	1,178	5,05	30	1,139	4,87	60	1,063	4,54	90	0,960	4,09	120	0,808	3,45	150	0,666	2,85
Noviembre	0	1,331	4,74	30	1,272	4,53	60	1,134	4,04	90	0,965	3,43	120	0,751	2,67	150	0,553	1,97
Diciembre	0	1,413	5,14	30	1,345	4,88	60	1,173	4,25	90	0,967	3,51	120	0,720	2,61	150	0,495	1,80
PROMEDIO		1,084	5,17		1,059	5,06		1,017	4,92		0,955	4,69		0,847	4,25		0,748	3,84

MES	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T
Enero	180	0,440	1,59	210	0,526	1,91	240	0,736	2,68	270	0,966	3,51	300	1,152	4,19	330	1,306	4,74
Febrero	180	0,570	2,35	210	0,628	2,59	240	0,789	3,26	270	0,961	3,97	300	1,087	4,49	330	1,183	4,88
Marzo	180	0,713	3,89	210	0,741	4,04	240	0,845	4,62	270	0,956	5,22	300	1,018	5,56	330	1,057	5,77
Abril	180	0,851	5,29	210	0,849	5,29	240	0,898	5,60	270	0,950	5,92	300	0,955	5,95	330	0,944	5,88
Mayo	180	0,953	6,13	210	0,930	5,99	240	0,936	6,04	270	0,945	6,10	300	0,910	5,87	330	0,865	5,57
Junio	180	1,000	5,52	210	0,966	5,35	240	0,954	5,30	270	0,942	5,24	300	0,890	4,95	330	0,831	4,61
Julio	180	0,979	5,56	210	0,950	5,41	240	0,946	5,40	270	0,943	5,39	300	0,899	5,13	330	0,846	4,82
Agosto	180	0,895	5,28	210	0,884	5,23	240	0,915	5,42	270	0,948	5,61	300	0,935	5,54	330	0,908	5,37
Setiembre	180	0,769	3,79	210	0,785	3,88	240	0,867	4,30	270	0,953	4,73	300	0,992	4,92	330	1,010	5,00
Octubre	180	0,619	2,65	210	0,666	2,87	240	0,808	3,49	270	0,960	4,14	300	1,063	4,59	330	1,139	4,90
Noviembre	180	0,475	1,69	210	0,553	1,97	240	0,751	2,68	270	0,965	3,44	300	1,134	4,05	330	1,272	4,54
Diciembre	180	0,400	1,46	210	0,495	1,80	240	0,720	2,63	270	0,967	3,53	300	1,173	4,28	330	1,345	4,90
PROMEDIO		0,722	3,77		0,748	3,86		0,847	4,28		0,955	4,73		1,017	4,96		1,059	5,08

TABLA 2.D- ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL PLANO INCLINADO CON $\phi=20^\circ$ Y $\beta=30^\circ$

MES	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T	γ	R	H_T
Enero	0	1,325	5,10	30	1,267	4,86	60	1,129	4,32	90	0,962	3,68	120	0,752	2,88	150	0,559	2,14
Febrero	0	1,196	5,15	30	1,155	4,96	60	1,070	4,59	90	0,958	4,11	120	0,801	3,44	150	0,654	2,81
Marzo	0	1,058	5,92	30	1,037	5,79	60	1,006	5,62	90	0,953	5,32	120	0,855	4,77	150	0,761	4,25
Abril	0	0,931	5,82	30	0,928	5,80	60	0,945	5,90	90	0,948	5,92	120	0,907	5,66	150	0,866	5,41
Mayo	0	0,843	5,38	30	0,850	5,41	60	0,901	5,72	90	0,944	5,99	120	0,945	6,00	150	0,946	6,01
Junio	0	0,806	4,38	30	0,817	4,42	60	0,882	4,76	90	0,942	5,08	120	0,962	5,19	150	0,982	5,32
Julio	0	0,822	4,62	30	0,831	4,65	60	0,891	4,98	90	0,943	5,27	120	0,955	5,33	150	0,966	5,41
Agosto	0	0,892	5,26	30	0,893	5,25	60	0,926	5,43	90	0,947	5,55	120	0,923	5,41	150	0,900	5,29
Setiembre	0	1,006	5,04	30	0,992	4,96	60	0,981	4,89	90	0,951	4,74	120	0,876	4,37	150	0,803	4,01
Octubre	0	1,149	5,12	30	1,114	4,95	60	1,048	4,64	90	0,957	4,24	120	0,819	3,63	150	0,690	3,06
Noviembre	0	1,290	4,87	30	1,237	4,67	60	1,113	4,20	90	0,961	3,62	120	0,765	2,89	150	0,584	2,20
Diciembre	0	1,364	5,31	30	1,303	5,07	60	1,148	4,46	90	0,963	3,74	120	0,737	2,86	150	0,531	2,06
PROMEDIO		1,057	5,16		1,035	5,06		1,003	4,96		0,952	4,77		0,858	4,37		0,770	4,00

Cálculo de la energía producida por el sistema o parque fotovoltaico

En la producción de electricidad de un sistema fotovoltaico influyen muchos factores; varios de ellos son las condiciones del lugar, el clima, la geografía y las características del horizonte. A no ser la sombra de un árbol que se pueda cortar, todos esos factores resultan variables independientes, que son muchas veces necesarias conocer, pero que no se pueden cambiar. Sin embargo, hay algunas variables dependientes que se pueden cambiar, tales como la orientación de los módulos, su cantidad y su colocación en el área o campo.

En algunas instalaciones el área no es importante, pero en la mayoría el área es una limitante en la producción de electricidad, principalmente en las ciudades y edificaciones específicas. Pero en todo caso el área tiene un valor que hay que tener en cuenta. En no pocos casos, como ya el área existe, no se tiene en cuenta su valor lo que sin dudas, no es correcto.

Uno de los parámetros que se debe seleccionar es el ángulo de inclinación de los módulos fotovoltaicos. En esta selección influyen también varios factores. Diferentes autores recomiendan poner ángulos de inclinación iguales o superiores a 15 grados para mantener la autolimpieza de las instalaciones. Otros autores recomiendan tener en cuenta energéticamente la radiación solar que llega cuando el sol está 15 grados por encima del horizonte.

En este trabajo se ha visto que la inclinación del módulo, dentro de determinados valores, influye poco en la energía ganada durante todo el año, no así en la ganada mensualmente. Por eso, si una instalación está conectada a la red nacional, el ángulo de inclinación no es muy importante, pero si está aislada hay que tenerlo en cuenta.

Otro de los factores importantes es el viento y los ciclones. Mientras el ángulo de inclinación es mayor, mayores serán los efectos del viento.

Por estas razones, y en término general no esquemático, se recomienda una inclinación de 15 grados para insta-

laciones conectadas a la red y de 30 grados para instalaciones aisladas.

En la Figura 2 se puede apreciar el módulo de longitud L sobre el plano horizontal con un ángulo de inclinación β . El punto que da la sombra es el punto superior β y la distancia Z_o define la distancia que hay que dejar libre en el área horizontal.

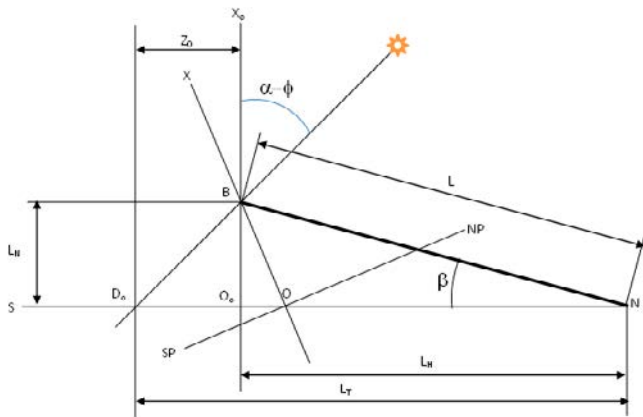


Fig. 2. La sombra del módulo fotovoltaico.

Donde:

L_t : Distancia total de una fila a la otra para que no reciba sombra.

O_oB : Altura del punto B.

D_o : Sombra de B sobre el plano horizontal.

En la Figura 3 se aprecian los dos sistemas de coordenadas: el XYZ, donde Z indica el Sur polar y Y el Este, así como el sistema $X_oY_oZ_o$ de referencia local, donde Z_o indica el Sur local, Y_o el Este y X_o el cenit.

Según estos ejes locales, las coordenadas de la sombra sobre el plano horizontal están definidas por:

$$Z_o = L_N \tan(\alpha - \phi) \quad (17)$$

$$Y_o = (OB - H) \tan \omega \quad (18)$$

$$\text{donde: } OB = LN / \cos \phi \quad (19)$$

$$H = L_N \sin \phi [\tan \phi + \tan(\alpha - \phi)] \quad (20)$$

$$Y \tan \alpha = \tan \delta / \cos \phi \quad (21)$$

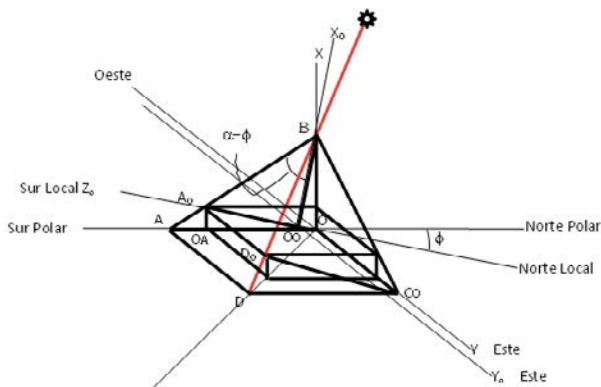


Fig. 3. La sombra en coordenadas locales $X_oY_oZ_o$

En las condiciones de Cuba, los días críticos de sombra son los cercanos al solsticio de invierno, o sea, al 21 de diciembre.

Con las fórmulas anteriores y el criterio de aprovechar toda la radiación solar que caiga sobre el terreno durante determinadas horas, se puede determinar el coeficiente de aprovechamiento del área de la instalación fotovoltaica.

En la tabla 3 A se dan los valores para La Habana y Santiago de Cuba de los coeficientes de aprovechamiento del área de los sistemas fotovoltaicos acoplados a la red en dependencia del valor del ángulo de azimut de los módulos fotovoltaicos. Se debe seleccionar el número menor de la hora seleccionada para que no le dé sombra.

En la Tabla 3 B se dan los valores también para las mismas latitudes, pero para sistemas independientes que trabajan de forma aislada. En ellos la separación entre filas debe ser un poco mayor y por lo tanto el coeficiente de aprovechamiento del área es un poco menor. Es evidente que a medida que el ángulo de inclinación aumenta, el coeficiente de aprovechamiento del área disminuye significativamente.

Por último, para el cálculo de la energía eléctrica producida por el sistema o parque fotovoltaico, se puede recurrir a la ecuación siguiente:

$$E_{pm} = \eta_s \eta_m dk_{aAsHT} \quad (22)$$

Donde:

E_{pm} es: Energía eléctrica producida por el sistema en un mes determinado.

η_s : Eficiencia del sistema que depende fundamentalmente del equipamiento utilizado, tales como los inversores.

Una eficiencia del sistema de 80 % es aceptable.

η_m : Eficiencia del módulo fotovoltaico en potencia pico (valor de fábrica).

D : Cantidad de días del mes determinado.

k_a : Coeficiente de aprovechamiento del área.

A_s : Área disponible para la instalación del sistema.

H_t : Energía incidente en el plano del módulo, calculada anteriormente.

A manera de ejemplo se puede observar en la Tabla 4 A la energía producida por un campo fotovoltaico situado en La Habana durante los diferentes meses del año, con inyección a la red eléctrica nacional, o sea, donde los módulos fotovoltaicos están colocados con un ángulo de inclinación de 15 grados y orientados directamente al sur local, esto es, sin azimut. La producción anual en dicho campo es de 1,6 GWh.

En la Tabla 4 B se dan los valores de la energía eléctrica producida por un campo de una hectárea situado en La Habana durante los diferentes meses del año, que trabaja aisladamente. En este caso, los módulos se han orientado con un ángulo de inclinación de 30 grados para favorecer la producción de invierno, por lo que el aprovechamiento del terreno es inferior.

Tabla 4 A. Energía eléctrica producida por un campo fotovoltaico de una hectárea

ϕ	Mes	β	γ	k_a	A_s	H_T	Producción
23	Enero	15	0	0,7	100 000	4,399	114,545
23	Febrero	15	0	0,7	100 000	4,714	122,764
23	Marzo	15	0	0,7	100 000	5,833	151,894
23	Abril	15	0	0,7	100 000	6,215	161,845
23	Mayo	15	0	0,7	100 000	6,094	158,690
23	Junio	15	0	0,7	100 000	5,105	132,933
23	Julio	15	0	0,7	100 000	5,315	138,401
23	Agosto	15	0	0,7	100 000	5,757	149,925
23	Setiembre	15	0	0,7	100 000	5,131	133,608
23	Octubre	15	0	0,7	100 000	4,802	125,039
23	Noviembre	15	0	0,7	100 000	4,267	111,111
23	Diciembre	15	0	0,7	100 000	4,506	117,333
23	Total					5,178	1618,088

Tabla 4 B. Energía eléctrica producida por un campo fotovoltaico de una hectárea

ϕ	Mes	β	γ	k_a	A_s	H_T	Producción
23	Enero	30	0	0,6	100 000	4,985	111,261
23	Febrero	30	0	0,6	100 000	5,071	113,187
23	Marzo	30	0	0,6	100 000	5,902	131,726
23	Abril	30	0	0,6	100 000	5,898	131,650
23	Mayo	30	0	0,6	100 000	5,530	123,419
23	Junio	30	0	0,6	100 000	4,537	101,270
23	Julio	30	0	0,6	100 000	4,767	106,404
23	Agosto	30	0	0,6	100 000	5,363	119,695
23	Setiembre	30	0	0,6	100 000	5,061	112,967
23	Octubre	30	0	0,6	100 000	5,062	112,975
23	Noviembre	30	0	0,6	100 000	4,770	106,460
23	Diciembre	30	0	0,6	100 000	5,184	115,713
23	Total					5,177	1386,727

En el próximo número se analizarán diferentes variantes de colocación de los módulos fotovoltaicos, entre ellas los colocados sobre naves a dos aguas.

Bibliografía

- STOLIK NOVYGRD DANIEL (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba*. La Habana: Ed. Cubasolar.
- BÉRRIZ PÉREZ, LUIS Y MANUEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ (2018). *Cálculo de la distancia entre filas de paneles solares fotovoltaicos*. *Eco Solar*, No. 64: abr.-jun., 2018. La Habana: Ed. Cubasolar.

BÉRRIZ PÉREZ, LUIS; MANUEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ, WILFREDO PÉREZ BERMÚDEZ Y JESÚS MIGUEL IGLESIAS FERRER (2016). *Manual de calentadores solares*, 2da. edición. La Habana: Ed. Cubasolar.

BÉRRIZ PÉREZ, LUIS Y MANUEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ (2004). *Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente*. *Eco Solar*, No. 8: abr.-jun., 2004. La Habana: Ed. Cubasolar.

DUFFIE J. A. AND W. A. BECKMAN (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. New York: Wiley Interscience.