

ÁNGULO ÓPTIMO PARA PLANOS COLECTORES DE ENERGÍA SOLAR INTEGRADOS A EDIFICIOS

H. Grossi Gallegos y R. Righini

GERSolar-INEDES, Universidad Nacional de Luján, Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,
Buenos Aires, ARGENTINA, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

Recibido: 08/08/12; Aceptado: 01/10/12

RESUMEN: El presente artículo estudia la dependencia de la energía media anual colectada por planos orientados al norte inclinados distintos ángulos respecto de la horizontal en 17 diferentes localidades de Argentina, entre 25° y 65° de latitud. Analizando las recomendaciones usuales consistentes en inclinar los planos un ángulo igual a la latitud o la latitud más diez grados se concluye que es recomendable inclinar las superficies un ángulo igual a la latitud. También se muestra una relación entre el ángulo óptimo y la latitud, la que puede ser usada para orientar de manera eficiente los sistemas que empleen la radiación solar como fuente de energía. Para altas latitudes el ángulo óptimo debe calcularse considerando la existencia de un alto valor elevado de albedo en el suelo debido a la presencia de nieve o hielo de forma permanente.

PALABRAS CLAVE: energía solar, sistemas integrados, ángulo óptimo de inclinación, latitud.

INTRODUCCION

El aprovechamiento de la radiación solar para la generación de energía eléctrica puede hacerse a través de 3 tipos de instalaciones: (1) con seguimiento total del sol en 2 ejes, (2) con seguimiento en 1 eje (con 2 ó 4 ajustes a lo largo del año) o (3) sin seguimiento.

Si bien la mayor generación de energía anual la van a proporcionar los sistemas animados de seguimiento continuo en 2 ejes (los que suelen ser destinados a plantas de potencia), también en algunos sistemas de gran porte con orientación fija se utiliza el ajuste manual aplicado 2 ó 4 veces por año (ajuste verano e invierno, o ajuste practicado en verano, otoño, invierno y primavera). En los sistemas de pequeño porte (en zonas aisladas y periurbanas) o en los incorporados a edificios (inclusive, como parte de su diseño) lo habitual son los sistemas fijos.

Este artículo está destinado a analizar el ángulo óptimo de instalación de sistemas fotovoltaicos integrados a los edificios (conocidos en inglés como BIPV: Building Integrated Photovoltaic), en particular los orientados al Norte (hemisferio Sur). En los últimos años han aparecido varios trabajos en el hemisferio Norte tratando este tema y buscando brindar a los diseñadores herramientas eficaces relacionadas con la inclinación que deben tener los planos colectores de las instalaciones (Gunerhan y Hepbasli, 2007; Shariah et al., 2002; Cheng et al., 2005; Cheng et al., 2009) de manera de obtener la máxima potencia. Este último trabajo enfocó su desarrollo en la validación de la recomendación de que la mayor eficiencia del sistema fotovoltaico fijo se logra tomando como ángulo óptimo de inclinación (β_{opt}) a la latitud del lugar (ϕ), utilizando para ello un programa de simulación PvSyst elaborado por la Universidad de Ginebra, Suiza (<http://www.pvsyst.com>) el que fue aplicado a datos de distinta procedencia ubicados en latitudes del hemisferio Norte desde 0° hasta 85°. Este programa usa como base el modelo de Aguiar *et al.* (1988) para generar valores diarios de radiación solar a partir de totales mensuales, y, en un segundo paso, el modelo gaussiano autorregresivo de Aguiar y Collares-Pereira (1992) para generar valores horarios.

El rendimiento de estos sistemas de aprovechamiento energético depende del ángulo óptimo de inclinación que se le dé a los planos de colección de radiación solar, de manera de maximizar la energía recibida. También depende de la nubosidad, del albedo y de las sombras proyectadas sobre ellos por otras construcciones.

Para analizar la influencia del ángulo de inclinación, es necesario utilizar ecuaciones de transposición que difieren fundamentalmente en las expresiones que se utilizan para descomponer la misma en irradiación directa y difusa, dado que en general se dispone de datos de irradiación global sobre plano horizontal medidos o estimados. En las ecuaciones resulta importante establecer correctamente la componente difusa de la radiación solar reflejada por el suelo, por lo que el valor adoptado para el albedo del suelo adquiere importancia. Esta importancia es creciente a medida que aumenta el ángulo de inclinación de la superficie colectora, por lo general, orientada hacia el Norte (salvo que limitantes del sistema o del medio que lo rodean lo impidan).

Dado que existen proyectos financiados por la ANPCYT relacionados con sistemas de generación fotovoltaica en zonas rurales y en regiones urbanas (PICTO-2010-0087 y PICTO-2010-0121, http://www.agencia.gob.ar/IMG/pdf/Res.330-11_PICTO_CIN_II_.pdf) y una ley (N° 4024/11), en etapa de reglamentación, que tiene como objeto establecer en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires “un régimen de incentivo para promover el uso de sistemas de captación de energía solar con el propósito de producir energía eléctrica, generar agua caliente o calefaccionar ambientes”, creemos importante discutir algunos aspectos que actualicen y difundan los resultados relacionados con la inclinación más adecuada para las superficies colectoras en todo el territorio nacional.

En trabajos anteriores hemos considerado ya este tema (Righini y Grossi Gallegos, 1999 y 2011), llegando finalmente a elaborar un mapa con la distribución de la energía solar colectada anualmente por un plano inclinado un ángulo óptimo en la República Argentina (Righini y Grossi Gallegos, 2011). En este último (Figura 1) es posible ver cómo se modifican las isolíneas correspondientes al plano horizontal (Grossi Gallegos, 1998), suavizando su trazado y aumentando sus valores.

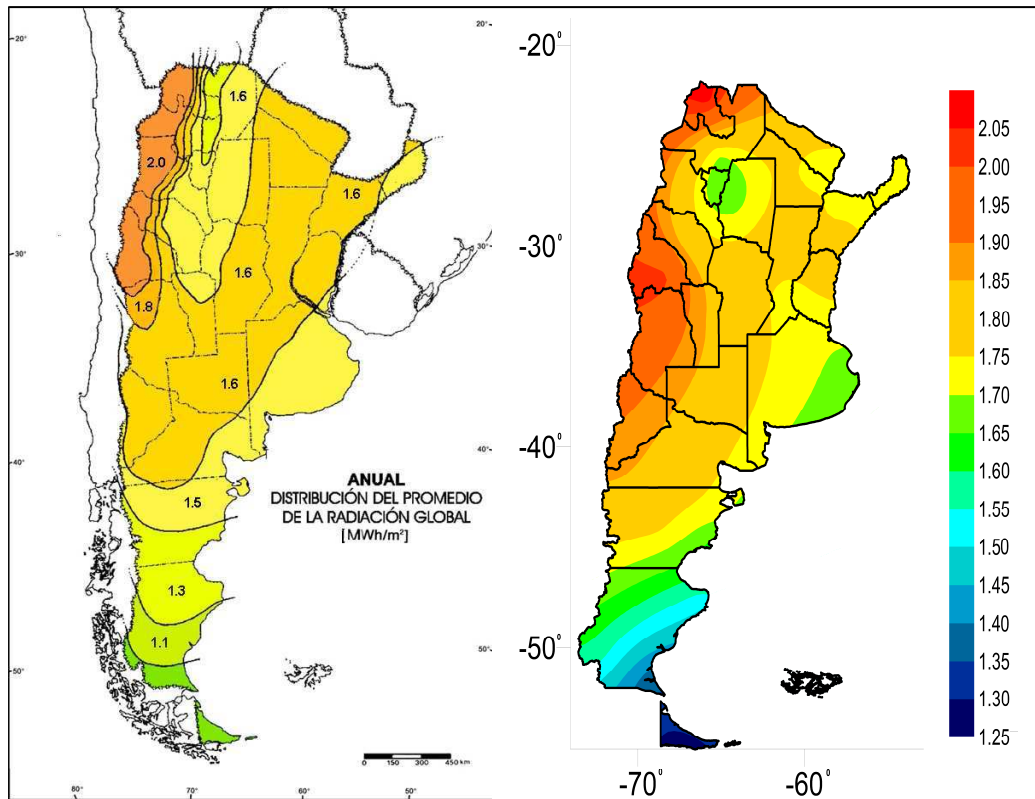


Figura 1: (Izquierda) Distribución del promedio anual acumulado de la radiación global sobre plano horizontal (adaptado de Grossi Gallegos, 1998) y (derecha) sobre planos inclinados un ángulo óptimo (Righini y Grossi Gallegos, 2011); la unidad de la escala es MWh/m^2 .

MATERIALES Y MÉTODO

En trabajos anteriores utilizamos, para realizar la transposición de los valores de irradiación global medidos sobre plano horizontal, la expresión presentada por Liu y Jordan (1963) que presupone la distribución isotrópica de la radiación difusa, a pesar de que su anisotropía fue verificada experimentalmente y evaluada por diferentes autores. Gueymard (2009) estudió el comportamiento de algunos de estos modelos en base al ajuste de los valores calculados en comparación con los valores medidos sobre planos inclinados 40° y 90° y por un sistema dotado de seguimiento en 2 ejes, ubicados en el Laboratorio de Investigación en Radiación Solar del NREL (National Renewable Energy Laboratory) en Denver, Colorado, EEUU. Analizó 12 meses de datos separados en dos grupos: verano (5 meses) e invierno (7 meses), y este último, “con nieve” y “sin nieve”

Gueymard afirma que, cuando no se mide localmente el albedo, “la simplificación usual en la vasta mayoría de los casos prácticos de ingeniería es tomar un albedo fijo de 0,2”. Midiendo con un sensor termoelectrónico invertido encontró que el albedo de invierno variaba entre 0,05 y 1,0 con una media de $0,375 \pm 0,277$; de manera similar, en verano encontró un mínimo de 0,05 y un máximo de 0,552 registrando una media de $0,184 \pm 0,033$. El albedo promedio anual fue 0,274 (algo mayor que el valor convencionalmente empleado de 0,2).

Si se denomina I_β a la irradiancia total recibida sobre un plano inclinado un ángulo β , I_{bn} a la irradiancia directa normal, I_d a la irradiancia difusa horizontal, I a la irradiancia global horizontal, θ al ángulo de incidencia y ρ al albedo, la expresión que permite su evaluación es:

$$I_\beta = I_{bn} \cos \theta + I_d R_d + \rho I R_r \quad (1)$$

magnitudes que están relacionadas por:

$$I = I_{bn} \cos \theta_z + I_d \quad (2)$$

en donde θ_z es el ángulo cenital. El cálculo de la componente directa es geométrico e idéntico en todos los modelos de transposición; suponer que la irradiancia difusa reflejada por el suelo es isotrópica, permite simplificar las cosas y considerar que:

$$R_r = (1 - \cos \beta)/2 \quad (3)$$

El factor R_d es el que da lugar a los diferentes modelos de distribución de la radiación difusa; si se la considera idealmente isotrópica, el factor puede tomar la forma:

$$R_d = (1 + \cos \beta)/2 \quad (4)$$

Estos supuestos llevaron a Liu y Jordan a proponer la siguiente expresión (las barras indican valores medios mensuales):

$$\frac{\overline{H_\beta}}{\overline{H}} = \left(1 - \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}\right) \overline{R_b} + \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (5)$$

en donde R_b es el factor geométrico que da cuenta de la relación existente entre la radiación directa recibida en el plano inclinado con respecto al horizontal y que es función de los ángulos característicos del plano:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_\beta + (\pi/180) \omega'_\beta \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (6)$$

en donde φ es la latitud (negativa en el hemisferio sur), δ la declinación, ω_s el ángulo horario de salida de sol y ω_β el ángulo de salida del sol para el plano inclinado un ángulo β (negativo en nuestra convención); ω'_β se calcula tomando el menor valor entre ω_s y ω_β .

Los resultados obtenidos por Gueymard (2009) mostraron que la aproximación isotrópica subestima sistemáticamente en todos los casos. Utilizando un subconjunto de datos de referencia con un albedo constante de 0,2 para un plano inclinado 40° el error sistemático (MBS) entre los datos calculados y los medidos en el plano inclinado fue de -5,6% y la dispersión de los valores (RME) 8,3%.

Sin dejar de tomar en cuenta estos resultados anteriormente citados, tomaremos los ángulos óptimos hallados en el trabajo de Righini y Grossi Gallegos (2011) con el modelo isotrópico y trataremos de poner en evidencia algunas relaciones interesantes, como así también verificar en la porción del hemisferio Sur en la que se extiende nuestro país la validez de la recomendación de tomar como ángulo óptimo de inclinación del plano el de la latitud, o la propuesta por Duffie y Beckman (1974) para instalaciones aisladas de tomar la latitud más 10°. En todos los casos, el criterio utilizado tiene por objeto mejorar la curva de generación a lo largo del año, incrementando la colección en invierno y reduciéndola parcialmente en verano.

Para la fracción de los promedios de radiación difusa a global consideramos la fórmula propuesta por Collares Pereira y Rabl (1979) como alternativa a la de Page (1961), si bien el ensayo de ambas con datos de Ushuaia mostró que no son adecuadas para latitudes elevadas (Grossi Gallegos *et al.*, 2006).

RESULTADOS

En el trabajo ya citado de Righini y Grossi Gallegos (2011) se tomaron los valores promedio mensuales medidos o estimados utilizados para el trazado de las cartas de irradiación solar global de Argentina (Grossi Gallegos, 1998) y para cada una de esas ubicaciones se buscó el ángulo de inclinación del plano que maximiza la suma anual de los valores medios recibidos en él. El método empleado para calcular el máximo de radiación recibida por el plano es el de quasi-Newton (Bakhbvalov, 1976), con una precisión de 10^{-6} y una límite de convergencia de 10^{-3} , tomando como variable el ángulo de inclinación del plano inclinado y sumando la radiación mensual promedio recibida por el mismo en cada localidad para los períodos considerados en la optimización. El algoritmo de optimización empleado fue desarrollado por la Universidad Leon Lasdon de Austin (Texas) y la Universidad Allan Warren (Cleveland).

Como fuera mencionado anteriormente, tomamos como valor de albedo 0,2 para todos los sitios analizados y todos los períodos considerados. Esto constituye una primera aproximación al problema, ya que la posible existencia de nieve o hielo en el suelo incrementa el valor de albedo.

En la Tabla 1 se listan las estaciones consideradas en este trabajo, consignando su ubicación geográfica, la radiación anual promedio acumulada sobre un plano horizontal y la que se recibiría en total sobre el plano inclinado el ángulo óptimo determinado, el que se incluye (con valor negativo, en esta convención, y redondeado a los fines prácticos al valor entero más próximo); fueron elegidas por presentar una estadística razonable y estar distribuidas latitudinalmente de manera conveniente

para cubrir todo el país. Cabe aclarar que para las estaciones de Bariloche y Ushuaia se calcularon los ángulos óptimos considerando también un albedo de 0,7 para los meses de junio, julio y agosto, y de 0,2 para el resto del año, obteniendo poca o nula variación en los resultados anuales obtenidos utilizando un albedo de 0,2 para todo el año (los ángulos óptimos en este caso resultaron ser $-33,63^\circ$ para Bariloche y $-43,02^\circ$ para Ushuaia). Se analizó también la Base Almirante Brown, ubicada en la Antártida, que no había sido considerada en el trabajo de referencia; para esta estación se adoptó en primera instancia un albedo de 0,7 fijo durante todo el año. Si para ella se toman otros valores de albedo se obtienen los siguientes resultados: para 0,6 el ángulo óptimo resulta ser $-62,33^\circ$ y la energía total anual $1,09 \text{ MWh/m}^2$ (con una ganancia de 39,74% con respecto a la horizontal), para 0,8 el ángulo óptimo pasa a ser $-69,40^\circ$ y la energía total $1,14 \text{ MWh/m}^2$ (con una ganancia de 46,15%); y para 0,9 el ángulo óptimo resulta $-73,19^\circ$ y la energía total $1,19 \text{ MWh/m}^2$ (con una ganancia de 52,56%), lo que evidencia la importancia ya resaltada del valor del albedo considerado. La incidencia del valor del albedo elevado para una altura solar baja hace que ángulo óptimo se aproxime o aún supere a la latitud.

Estación	Coordenadas	$E_{t,0}$ [MWh/m ²]	$E_{t,opt}$ [MWh/m ²]	Ganancia [%]	Ángulo óptimo [°]	$E_{t, \text{latitud}}$ [MWh/m ²]	$E_{t, \text{latitud}+10}$ [MWh/m ²]
El Sombrerito	27,65S; 58,77W	1,75	1,87	6,86	-25	1,87	1,83
San Carlos	25,88S; 65,88W	1,87	1,96	4,81	-24	1,96	1,94
Mercedes	29,17S; 58,02W	1,78	1,91	7,30	-24	1,91	1,87
Córdoba	31,49S; 64,18W	1,68	1,76	4,76	-27	1,75	1,72
San Juan	31,56S; 68,53W	2,05	2,23	8,78	-27	2,22	2,18
Rafaela	31,28S; 61,55W	1,71	1,83	7,02	-25	1,83	1,78
Paraná	31,58S; 60,48W	1,68	1,83	8,93	-27	1,82	1,79
M. Juárez	32,68S; 62,12W	1,64	1,75	6,71	-26	1,74	1,70
V. Mercedes	33,72S; 65,48W	1,64	1,77	7,93	-28	1,77	1,72
San Miguel	34,55S; 58,73W	1,55	1,68	8,39	-27	1,67	1,62
Rama Caída	34,67S; 68,38W	1,76	1,93	9,66	-29	1,93	1,88
Anguil	36,5S; 63,98W	1,64	1,78	8,54	-29	1,76	1,72
Alto Valle	39,02S; 67,57W	1,64	1,81	10,37	-30	1,79	1,74
Bariloche	41,20S; 71,17W	1,68	1,88	11,90	-33	1,86	1,81
Trelew	43,24S; 65,27W	1,53	1,77	15,69	-35	1,76	1,71
Ushuaia	54,72S; 67,75W	1,02	1,24	21,57	-42	1,22	1,01
Alte. Brown	64,88S; 62,88W	0,78	1,11	42,31	-68	1,11	1,10

Tabla 1: Energía solar acumulada en un año sobre un plano mirando al Norte, inclinado a diferentes ángulos (nulo, óptimo, igual a la latitud y a la latitud más 10°) con respecto a la horizontal y ganancia porcentual del plano inclinado un ángulo óptimo con respecto a la recibida sobre un plano horizontal para diferentes ubicaciones en Argentina.

En la Figura 2 se representa la variación del módulo del ángulo óptimo en función del módulo de la latitud de la estación (no se incluyó la base antártica); agregamos la línea de tendencia en una aproximación lineal de la relación, y la recta que representa la supuesta igualdad entre el ángulo óptimo y la latitud. Puede apreciarse que, a medida que aumenta la latitud hacia el Sur, lo hace también la discrepancia.

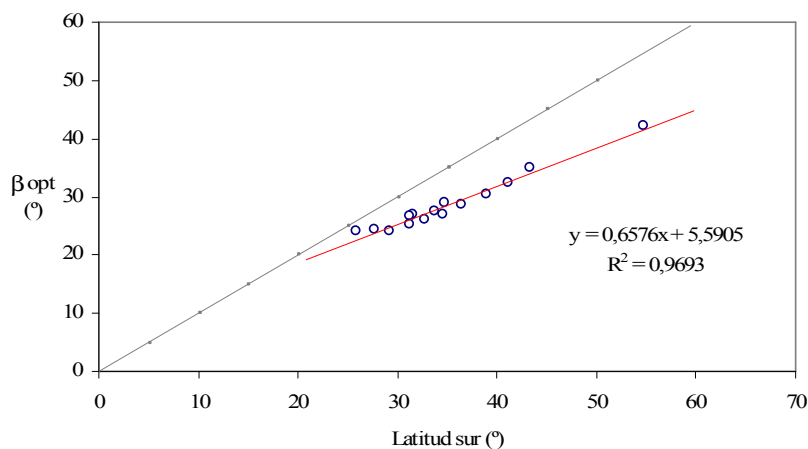


Figura 2: Variación del ángulo óptimo con la latitud para las estaciones consideradas en el trabajo (excluyendo a Almirante. Brown); se incluye la recta que corresponde al ángulo óptimo igual a la latitud.

Obtuvimos, entonces, una correlación lineal que vincula el ángulo óptimo de inclinación de los planos colectores con la latitud; la misma puede resultar útil para los diseñadores de sistemas planos de aprovechamiento de la energía solar para generar electricidad:

$$|\beta_{\text{opt}}| = 0,6576 |\phi| + 5,5905 \quad (7)$$

La latitud y el ángulo óptimo están expresados en grados sexagesimales. Cabe destacar que si se agrega la Base Almirante Brown se distorsiona la relación lineal (baja el coeficiente de determinación) y se hace prácticamente paralela a la latitud.

Por otra parte, pudo observarse que, para las estaciones elegidas en Argentina continental, la energía anual colectada sobre un plano orientado hacia el ecuador e inclinado el ángulo óptimo difiere en poco o nada de la que se colecta si la pendiente del plano coincide con la latitud, por lo que la recomendación del trabajo de Cheng *et al.* (2009) es válida. Por el contrario, si el ángulo elegido fuera la latitud más 10°, en todos los casos la ganancia es inferior a las de las opciones anteriores, llegando a ser negativa en Ushuaia.

En la Figura 3 hemos representado la variación de la ganancia de energía solar colectada en un año sobre un plano inclinado el ángulo óptimo en función del módulo de la latitud, poniendo en evidencia así la importancia de tener en cuenta estos valores a medida que aumenta hacia el Sur la ubicación de las localidades.

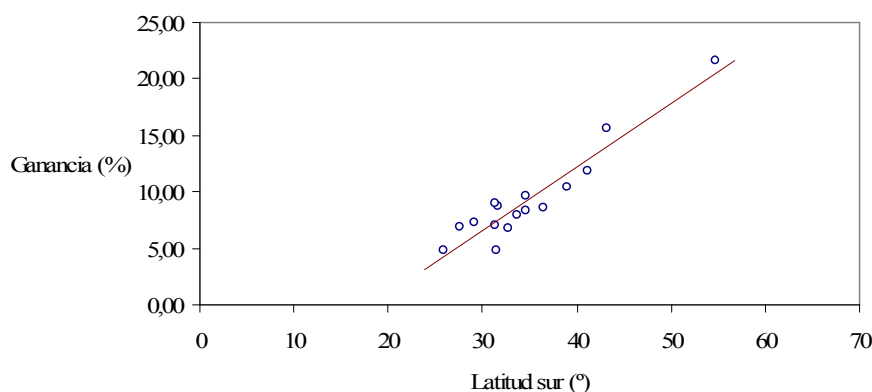


Figura 3: Ganancia relativa porcentual con respecto al plano horizontal obtenida al inclinar el plano el ángulo que optimiza la energía anual en función de la latitud del lugar.

En las Figuras 4 y 5 puede verse cómo varía a lo largo del año la energía solar total media diaria recibida en los diferentes ángulos mencionados en el trabajo; no solamente se aumenta la ganancia sino que también disminuyen las diferencias entre los meses de invierno y los de verano, facilitando el empleo de los sistemas de aprovechamiento energético. Se presentan, como ejemplos extremos, los casos de El Sombrerito y Ushuaia.

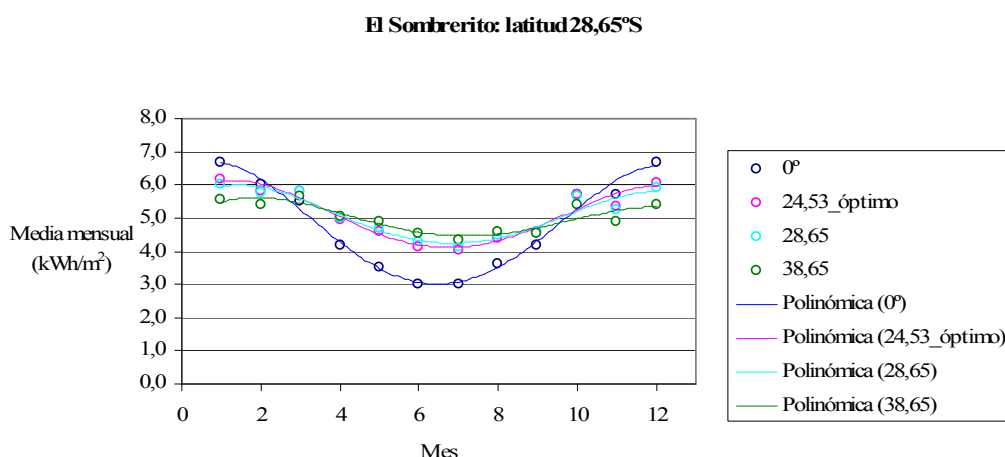


Figura 4: Variación mensual de la energía solar media diaria colectada por un plano inclinado los ángulos que se indican en la estación El Sombrerito.

Ushuaia: latitud 54,72°S

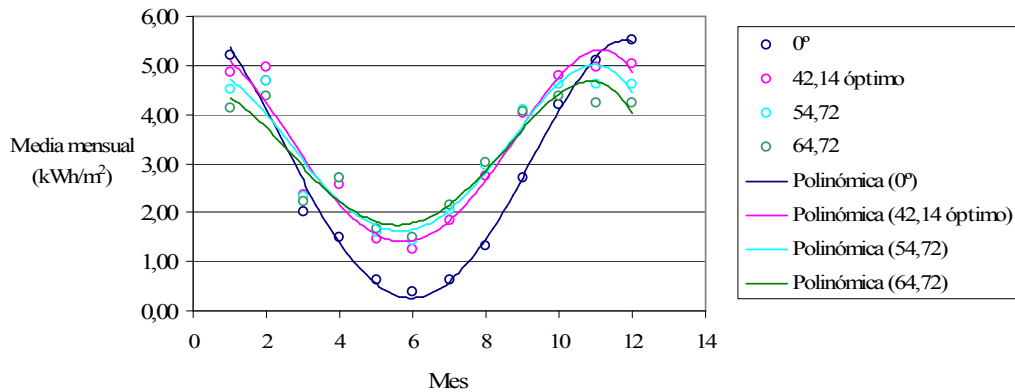


Figura 5: Variación mensual de la energía solar media diaria colectada por un plano inclinado los ángulos que se indican en la estación Ushuaia.

CONCLUSIONES

La energía solar media anual recibida en planos de colección inclinados respecto de la horizontal un ángulo que la maximice difiere muy poco de la colectada cuando el ángulo de inclinación se hace igual a la latitud del lugar, por lo que no se hace crítico su uso; la diferencia es mucho mayor si el ángulo elegido es la latitud más 10°. La ganancia lograda al inclinar los planos de colección con un ángulo óptimo o igual a la latitud es importante, y aumenta al crecer la misma. La relación encontrada en este artículo entre el ángulo óptimo y la latitud brinda una herramienta sencilla para proyectistas que deseen inclinar los planos de colección manteniéndolos fijos todo el año (como ocurre en el caso de su integración en la estructura de los edificios). El albedo del suelo tiene un papel destacado en el cálculo del ángulo de inclinación óptimo, pero su influencia recién es importante en zonas de alta latitud donde, en el hemisferio Sur, existe un doble fenómeno: bajas alturas solares y altos albedos debidos a la presencia de nieve o hielo durante todo el año. Finalmente, mostramos a manera de ejemplo cómo se modifica la variación de los promedios mensuales de la irradiación solar diaria recibida sobre el plano al adoptar diferentes ángulos como pendiente, aumentando los valores de invierno y reduciendo los de verano.

REFERENCIAS

- Aguiar R., Collares-Pereira M. and Conde, J. P. (1988) A simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of markov transition matrices. *Solar Energy* vol. 40, No.3, pp. 269-279.
- Aguiar R., Collares-Pereira M. (1992) TAG: a time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation. *Solar Energy* vol. 49, 167-174.
- Bakhbvalov N. (1976) *Methodes Numeriques*. Editions Mir, 1er. édition, Moscú.
- Cheng C. L., Sanchez Jiménez Charles S., Lee Meng-Chieh (2009) Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans. *Renewable Energy* vol. 34, 1644-1650.
- Collares-Pereira M. and Rabl A. (1979) The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* vol. 22 No. 2, pp. 155-164 (1979).
- Duffie J. A. and Beckman W. A. (1974) *Solar Energy Thermal Processes*. First Edition, John Wiley & Sons, INC., USA.
- Grossi Gallegos H. (1998) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 5, pp. 33-42.
- Grossi Gallegos H., Roberti A. y Sierra V. (2006) Análisis de los datos de radiación solar disponibles en Ushuaia, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 10, pp. 11.09-11.14 versión CD-ROM.
- Gueymard C. (2009) Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applicatios. *Solar Energy* vol. 83, pp. 432-444.
- Liu B.Y.H. and Jordan R.C. (1963) The Long Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors. *Solar Energy* vol. 7 No. 2, pp. 53-74.
- Page J.K. (1961) The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. In *Proc. U.N. Conf. on New Sorces of Energy, Paper No. S98* vol. 4, pp. 378-390.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (1999) Ángulos sugeridos para optimizar la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos orientados al norte. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 3 N° 2, pp. 11.33-11.37.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2001) Optimización de la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos inclinados en función del ángulo y del albedo de superficie. *Información Tecnológica* (ISSN 0716-8756) vol. 12 N° 3, pp. 177-180.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2011) Mapa de energía solar colectada anualmente por un plano inclinado un ángulo óptimo

en la República Argentina. En *Actas del Cuarto Congreso Nacional – Tercero Iberoamericano sobre Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011* (ISBN 987-21933-2-0), trabajo 11-161, Mar del Plata, Argentina, 6 al 9 de junio de 2011.

ABSTRACT

This article examines the dependence of the mean annual energy collected by North-oriented planes inclined different angles from the horizontal in 17 different locations of Argentina, between 25° and 65° South latitude. Analyzing the usual recommendations of inclining the planes an angle equal to the latitude or to the latitude plus 10 degrees is concluded that tilting surfaces an angle equal to the latitude is suitable. Also a relationship between the optimum angle and latitude is shown, which can be used efficiently to orientate the systems using solar radiation as an energy source. For high latitudes the optimal angle must be calculated considering the existence of a high albedo on the floor due to the presence of snow or ice on a permanent basis.

Key words: solar energy, integrated systems, optimal tilted angle, latitude.