

ANGULOS SUGERIDOS PARA OPTIMIZAR LA COLECCION ANUAL DE IRRADIACION SOLAR DIARIA EN ARGENTINA SOBRE PLANOS ORIENTADOS AL NORTE

R. Righini y H. Grossi Gallegos

División Física, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján
Rutas 5 y 7, (6700) Luján, Buenos Aires, ARGENTINA - E-mail : righini@mail.unlu.edu.ar

RESUMEN

Se estudia la optimización de la radiación anual recibida sobre planos inclinados al norte en diversas localidades de Argentina, teniendo en cuenta la radiación media diaria mensual. Aunque la energía total anual acumulada por un plano inclinado con un ángulo igual a la latitud del lugar, según la recomendación usual, presenta variaciones muy poco importantes respecto a la recibida cuando el ángulo es el óptimo anual (menos del 2% en todos los casos), hay una diferencia importante en la energía colectada en invierno cuando el ángulo del plano corresponde al óptimo invernal.

INTRODUCCION

Como habitualmente la información de irradiación solar que se puede llegar a disponer en un país está medida o estimada sobre una superficie horizontal, para evaluar el comportamiento de un sistema de aprovechamiento de la irradiación promedio que se puede recibir cada mes sobre un plano inclinado es habitual utilizar alguna de las fórmulas que se han elaborado para lograr su transformación, las que tienen diferente grado de complejidad de acuerdo a que consideren o no la anisotropía de la radiación difusa y la posibilidad de variar libremente la orientación acimutal (Duffie and Beckman, 1991). El método generalmente más utilizado, debido a su sencillez, es el propuesto por Liu y Jordan (1963), el que ha sido incluido en varios programas de simulación desarrollados en el país (Saravia y Casermeiro, 1984 ; Esteves, 1994) y que responde a la siguiente expresión:

$$\bar{H}_s / \bar{H} = (1 - \bar{H}_d / \bar{H}) \bar{R}_D + \bar{H}_d / \bar{H} (1 + \cos s) / 2 + \rho (1 - \cos s) / 2$$

\bar{H}_s , \bar{H}_d y \bar{H} son los valores medios de la irradiación estimada sobre un plano inclinado un ángulo s , la difusa y la global, respectivamente, \bar{R}_D es un factor geométrico promedio 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:

$$\bar{R}_D = [\cos(\phi - s) \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin(\phi - s) \sin \delta] / [\cos \phi \cos \delta \cos \omega_o + (\pi/180) \omega_o \sin \phi \sin \delta]$$

y ρ es el albedo propio de la superficie ubicada delante del plano, el que varía de acuerdo con el tipo de cobertura y con la época del año. Si bien existen tablas con los posibles valores de este coeficiente (ver, por ejemplo, Iqbal, 1983), suele tomarse un valor fijo cercano a 0.2, si bien en general la incidencia de este término no es importante para ángulos pequeños de inclinación.

Recientemente se compararon localmente los resultados obtenidos por la aplicación del modelo isotrópico de Liu y Jordan y del anisotrópico conocido como HDKR (Hay and Davis-Klucher-Reindt) con las mediciones registradas sobre plano horizontal y vertical (Artero *et al.*, 1997), no observándose diferencias apreciables entre los dos, si bien los días nublados y parcialmente nublados medidos en el estudio fueron insuficientes, por lo que los autores pensaban extenderlo más tiempo. Esto sería conveniente ya que se ha recomendado usar modelos anisotrópicos cuando la radiación difusa sea más del 50% de la global (Carter and Patel, 1978).

MATERIALES Y METODO

En la mayoría de las aplicaciones se trata de orientar el plano de colección hacia el norte, inclinándolo un ángulo fijo tal que optimice la radiación recibida a lo largo del año; lo habitualmente recomendado (ver, por ejemplo, Duffie and Beckman, 1974) es inclinar el plano un ángulo igual a la latitud del lugar ó 10 grados más que ella. Este criterio fue utilizado para analizar la disponibilidad de energía solar en América Latina, estimándola para los meses de julio y enero sobre un plano inclinado un ángulo igual al de la latitud del lugar, clasificando así la región en zonas para la utilización de este recurso (OLADE/PNUD, 1979).

Pero esto no puede ser una regla fija porque la energía solar disponible depende fuertemente de la climatología de las nubes y ésta es propia de cada lugar. Por lo tanto, en este trabajo se parte de la base de datos utilizada para la elaboración

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	AÑO
Abra Pampa	6.7	6.0	5.2	5.5	6.4	4.4	4.5	5.3	6.3	7.0	7.5	7.2	5.9
Colonia S. Rosa	5.1	5.0	4.0	3.4	2.8	2.6	2.8	2.9	3.8	4.8	4.9	5.1	3.9
Sombrerito	6.7	6.0	5.5	4.2	3.5	3.0	3.0	3.6	4.2	5.7	5.7	6.7	4.8
Cerro Azul	5.8	5.9	4.9	3.8	3.1	2.8	2.8	3.0	3.9	4.7	5.1	6.0	4.4
Cerrillos	5.6	5.0	4.5	3.8	3.2	3.6	3.3	3.9	4.5	5.2	5.3	5.7	4.5
San Carlos	5.8	5.3	5.5	4.6	3.8	3.5	3.6	4.4	5.1	6.1	6.5	6.5	5.1
R. de la	5.1	4.8	3.4	2.8	2.9	2.3	2.9	3.4	4.1	4.5	5.0	6.3	4.0
R. Sáenz Peña	6.4	6.2	5.0	3.7	3.1	2.9	2.9	3.4	4.5	5.4	5.8	6.5	4.6
Famailá	5.6	5.9	4.0	3.1	3.1	2.4	2.7	3.2	4.2	5.2	5.2	5.3	4.2
El Colorado	5.6	4.9	4.6	3.2	3.1	2.4	2.4	3.3	3.9	4.8	5.4	5.7	4.1
Mercedes	6.8	6.0	5.6	4.1	3.4	2.6	3.1	3.7	4.5	5.9	6.2	7.1	4.9
La Rioja	5.7	4.9	4.4	3.5	3.3	2.5	2.8	3.6	4.9	4.9	5.2	5.3	4.2
Rafaela	6.8	6.0	5.1	3.8	3.0	2.4	2.7	3.4	4.5	5.6	6.2	6.8	4.7
Córdoba	6.3	5.7	4.7	3.6	3.4	2.4	2.6	3.3	4.3	5.2	6.0	6.2	4.6
San Juan	7.7	7.2	6.0	4.7	3.8	2.9	2.9	4.2	5.2	7.0	7.9	8.2	5.6
Paraná	6.6	5.7	5.0	3.8	3.0	2.6	2.8	3.5	4.4	5.5	6.3	6.6	4.6
Marcos Juárez	6.5	5.9	5.0	3.5	2.6	2.2	2.4	3.3	4.3	5.4	6.1	6.5	4.5
Oliveros	5.8	5.1	4.4	3.2	2.4	1.9	2.1	2.7	3.6	4.7	5.3	5.5	3.9
Río IV	6.8	5.9	4.7	3.9	2.9	2.4	2.4	3.5	4.2	5.5	6.2	6.4	4.4
V. Mercedes	6.4	5.7	4.5	3.3	2.7	2.1	2.6	3.4	4.5	5.4	6.1	7.1	4.5
San Miguel	6.6	5.8	4.5	3.3	2.5	1.9	2.2	2.9	4.0	5.1	5.8	6.6	4.3
Rama Caída	7.0	6.3	5.1	3.6	3.0	2.2	2.6	3.6	4.5	6.0	6.7	7.4	4.8
Anguil	6.9	6.5	4.9	3.3	2.5	1.9	2.0	3.0	4.0	5.2	6.4	7.0	4.5
Balcarce	6.6	6.2	4.7	3.3	2.2	1.7	1.8	2.7	3.6	5.2	6.2	6.7	4.2
Alto Valle	7.5	6.7	5.0	3.2	2.1	1.8	1.8	2.8	3.7	5.6	6.4	7.3	4.5
Bariloche	7.6	6.6	4.9	3.3	2.0	1.7	1.8	2.5	4.0	5.7	7.2	7.8	4.6
Trelew	7.2	6.1	4.5	2.9	1.9	1.4	1.7	2.5	3.8	5.3	6.5	7.2	4.2
Ushuaia	5.2	4.7	2.0	1.5	0.6	0.4	0.6	1.3	2.7	4.2	5.1	5.5	2.8

Tabla 1. Promedios mensuales y anual de la irradiación solar global diaria incidente sobre plano horizontal considerados para la elaboración de las cartas (expresados en kWh/m²), provenientes de piranómetros de la Red Solarimétrica.

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	AÑO
Ceres	6.5	6.1	4.9	4.0	3.1	2.5	2.7	4.1	4.6	5.6	6.4	6.6	4.8
La Banda	5.9	5.4	4.2	3.4	2.7	2.3	2.6	3.2	4.3	5.2	5.8	5.9	4.2
Reconquista	6.4	5.7	4.9	4.1	3.2	2.6	2.9	3.5	4.5	5.4	6.3	6.5	4.7
Villa Reynolds	7.1	6.3	4.8	3.7	2.7	2.4	2.5	3.4	4.4	5.9	6.5	6.9	4.7
C. del Uruguay	6.7	6.1	5.0	3.9	2.9	2.4	2.5	3.2	4.3	5.4	6.5	6.9	4.6
Guaqueguaychú	6.6	5.9	4.5	3.7	2.6	2.0	2.2	2.9	3.7	5.0	6.2	6.3	4.3
Mazaruca	6.8	6.1	4.9	3.4	2.7	2.0	2.2	3.1	4.1	5.2	6.5	6.9	4.5
Salto Grande	6.9	6.1	4.9	3.9	3.0	2.4	2.5	3.3	4.1	5.5	6.3	6.8	4.6
M. Caseros	6.9	6.1	5.2	4.1	3.1	2.5	2.7	3.3	4.2	5.6	6.5	7.0	4.8
Formosa	6.4	6.0	5.0	4.0	3.3	3.1	3.0	3.4	4.2	5.3	6.1	6.5	4.7
Las Lomitas	6.4	6.1	5.3	4.1	3.2	2.8	3.1	4.0	4.4	5.6	6.1	6.2	4.8
Colonia Benítez	6.4	6.3	4.8	3.9	3.2	2.7	2.9	3.4	4.3	5.3	6.7	6.6	4.7
Las Breñas	6.1	6.1	5.0	4.2	2.9	2.6	2.8	3.7	4.5	5.6	6.9	6.7	4.8
Embalse Río III	6.2	5.6	4.5	3.7	2.8	2.4	2.5	3.5	4.2	5.0	6.1	6.5	4.4
Pilar (Córdoba)	7.8	6.1	4.9	3.9	3.0	2.6	2.7	3.7	4.5	5.3	6.4	6.6	4.8
Laboulaye	6.7	6.2	5.0	3.8	2.8	2.2	2.3	3.3	4.4	5.3	6.5	6.7	4.6
Camaronés	6.6	5.8	3.7	2.7	1.4	1.1	1.3	2.3	3.3	5.1	6.4	6.4	3.8
Faro Blanco	6.6	5.7	4.2	2.7	1.4	1.1	1.3	2.2	3.4	5.1	6.1	7.0	3.9
Pto. Deseado	5.7	4.9	3.2	2.2	1.1	0.9	1.1	2.0	2.9	4.3	5.4	5.3	3.2
Paso de Indios	7.4	6.3	4.6	3.0	1.7	1.3	1.6	2.6	3.9	5.5	6.6	7.4	4.3
C. Rivadavia	6.6	5.8	3.9	2.7	1.5	1.2	1.4	2.4	3.5	5.0	6.3	6.9	3.9
Gdor. Gregores	6.5	5.3	3.6	2.4	1.4	0.9	1.1	2.1	2.9	4.6	6.1	6.6	3.6
Río Gallegos	5.2	4.1	3.0	1.8	1.0	0.7	0.8	1.6	2.8	4.0	4.7	4.9	2.9
Lago Argentino	6.7	5.2	3.7	2.3	1.2	0.8	1.0	2.0	3.3	4.9	6.4	7.1	3.5

Tabla 2. Promedios mensuales y anual de la irradiación solar global diaria incidente sobre plano horizontal considerados para la elaboración de las cartas (expresados en kWh/m²), estimados a partir de valores de heliofanía relativa.

de las cartas de radiación solar de Argentina (Grossi Gallegos, 1988 a y b), la que se presenta como Tabla 1 y 2 para cada localidad. En cada uno de los sitios se buscó el ángulo de inclinación del plano que maximiza la suma anual de radiación solar recibida. También se buscaron los ángulos óptimos para los meses invernales (Junio, Julio y Agosto) y para todo el

Estación	Latitud (°)	Óptimo Anual (°)	Óptimo Invernal (°)	Óptimo para el resto del año (°)	Diferencia (%)
----------	-------------	------------------	---------------------	----------------------------------	----------------

Abra Pampa	22,717	23,14	49,55	11,42	9,50
Colonia S. Rosa	23,367	17,66	46,11	8,68	9,94
Sombrerito	28,65	24,53	53,53	14,66	11,36
Cerro Azul	27,617	22,68	51,68	12,85	11,02
Cerrillos	24,911	22,56	50,06	12,02	9,88
San Carlos	25,883	24,03	51,48	14,03	10,07
R. de la Frontera	25,754	19,72	48,71	10,24	10,61
R. Sáenz Peña	26,847	21,21	51,00	12,04	11,65
Famaillá	27,068	23,00	50,33	12,15	10,76
El Colorado	26,325	20,11	49,08	11,46	10,6
Mercedes	29,171	24,24	53,71	15,04	11,73
La Rioja	29,423	26,24	53,54	16,59	9,84
Rafaela	31,217	25,36	55,28	16,52	12,13
Córdoba	31,495	26,67	55,74	16,81	11,50
San Juan	31,561	26,86	56,80	17,94	12,57
Paraná	31,579	26,64	56,08	17,18	11,84
Marcos Juárez	32,654	26,06	56,18	17,81	12,22
Oliveros	32,195	24,56	54,54	16,35	11,72
Río IV	33,081	27,65	57,17	18,78	11,92
V. Mercedes	33,717	27,55	57,63	18,61	12,42
San Miguel	34,55	26,98	57,75	18,55	12,89
Rama Caída	34,667	28,97	59,06	19,99	12,69
Anguil	22,5	10,70	42,28	5,26	11,58
Balcarce	37,75	29,28	60,74	21,50	13,76
Alto Valle	39,017	30,34	62,48	22,57	14,70
Bariloche	41,2	32,54	65,00	24,57	15,41
Trelew	43,244	35,06	66,88	26,80	14,93
Ushuaia	54,714	42,27	77,04	35,38	1,60
Ceres	29,882	24,79	53,87	16,45	0,27
La Banda	27,705	20,84	50,54	12,58	32,92
Reconquista	29,166	24,17	53,41	15,00	20,67
Villa Reynolds	33,773	27,61	58,01	18,82	22,34
C. del Uruguay	32,426	26,25	56,48	17,38	23,54
Gualectuaychú	32,965	25,30	55,99	17,05	30,29
Mazaruca	33,595	25,86	56,86	17,68	29,92
Salto Grande	31,221	24,77	55,08	16,02	26,06
M. Caseros	30,379	24,19	54,47	15,32	25,58
Formosa	26,249	21,13	50,76	11,42	24,23
Las Lomitas	24,705	19,51	48,60	11,14	26,61
Colonia Benítez	27,417	21,32	51,46	12,22	28,60
Las Breñas	27,065	20,79	50,61	12,86	30,19
Embalse Río III	32,206	26,77	56,16	17,74	20,32
Pilar (Córdoba)	31,677	26,12	56,09	17,05	21,25
Laboulaye	34,13	28,02	58,00	19,55	21,80
Camaronés	44,794	34,73	67,44	27,75	29,00
Faro Blanco	47,2	38,61	70,56	30,94	22,25
Pto. Deseado	47,734	38,04	70,38	30,37	25,49
Paso de Indios	43,863	35,24	67,25	27,91	24,46
C. Rivadavia	45,855	37,33	69,23	29,48	22,83
Gdor. Gregores	48,715	39,47	71,78	31,45	23,41
Río Gallegos	51,603	42,53	74,36	34,02	21,34
Lago Argentino	50,333	40,72	73,37	33,44	23,60

Tabla 3. Ángulos Óptimos de inclinación del plano inclinado (°) y diferencia porcentual entre la radiación colectada en invierno con el ángulo óptimo invernal y la recibida por el plano con un ángulo de inclinación igual al óptimo anual en el mismo período.

año exceptuando el invierno. El objetivo de contar con estos dos valores adicionales para cada localidad es sugerir esas inclinaciones los meses correspondientes, habida cuenta que es habitual cambiar durante el invierno el ángulo de inclinación para mejorar la radiación recibida durante los meses de menor insolación. Realizando, por lo tanto, estos cambios de inclinación sugeridos para invierno y para el resto del año, se puede colectar una energía mayor que si el ángulo de inclinación quedara con un valor igual al óptimo anual pero fijo todo el año.

El método empleado para calcular el máximo de radiación recibida por el plano es el método de quasi-Newton, 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.

CONCLUSIONES

Aunque la energía total anual acumulada por un plano inclinado con un ángulo igual a la latitud del lugar, según la recomendación usual, presenta variaciones muy poco importantes respecto a la recibida cuando el ángulo es el óptimo anual (menos del 2% en todos los casos), hay una diferencia importante en la energía colectada en invierno cuando el ángulo del plano corresponde al óptimo invernal. En estos casos hay diferencias significativas (6 al 20%) que justifican variar el ángulo del plano de colección en invierno, período en el cual el recurso solar es escaso. Para todas las estaciones analizadas, la diferencia porcentual entre la energía colectada anualmente manteniendo un ángulo fijo igual a la latitud y la recibida variando dos veces el ángulo (óptimo invernal y óptimo para el resto del año) se encuentra entre el 2 %y el 4%.

REFERENCIAS

- Artero, R., Caram, M., Rauek, C., Steszak, G. y Esteves, A. (1997). Radiación solar sobre planos inclinados. Evaluación de dos métodos de cálculo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 1 (1), 221-224.
- Casermeyro, M. y Saravia, L. (1984). Cálculo térmico horario de edificios solares pasivos. En *Actas de la 9na. Reunión de Trabajo de la ASADES*, pp. 41-47, San Juan, Argentina.
- Carter and Patel, A. M. (1978). Evaluation of methods of calculating solar radiation on inclined surfaces. Final Report COO/4494-1, DOE.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York.
- Esteves, A (1994) Simulación Térmica de Edificios. Aplicación de los modelos QUICK y SIMEDIF. En *Actas de la 7ma. Reunión de Trabajo de la ASADES*, Tomo II, pp. 543-550, Rosario, Argentina.
- Grossi Gallegos, H. (1998 a). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 4, 119-123.
- Grossi Gallegos, H. (1998 b). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, 33-42.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Inc.
- Liu, B.Y.H. y Jordan, R.C. (1961). Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASHRAE J.* 3 (10), 53-59.
- OLADE/PNUD (1979). *Future Requirements of Non-conventional Energy Sources in Latin America*, Organización Latinoamericana de Energía, 282 pp., Quito, Ecuador, June 1979.