

MÉTODO GRÁFICO Y SIMPLIFICADO DE CÁLCULO DE IRRADIACIÓN MEDIA MENSUAL SOBRE UN PLANO INCLINADO

C. Navntoft ⁽¹⁾⁽²⁾, F. Garreta ⁽¹⁾⁽³⁾

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Buenos Aires
Departamento de Ingeniería Civil - Laboratorio de Estudios sobre Energía Solar
(UTN-FRBA-LESES), Mozart 2300, (1407) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina
Tel.: (+5411) 4601-8112 (int. 7139) Fax: (+5411) 4638-8115 e-mail: utnsolar@gmail.com

RESUMEN

La energía media mensual que recibe el plano inclinado es distinta a la del plano horizontal y debe corregirse por medio de un factor que depende de la ubicación geográfica del plano, su inclinación, el día del año y el coeficiente de claridad atmosférica. En este trabajo se presenta un método simplificado para calcular el factor de corrección mencionado con el objetivo de ser aplicado en el campo de la educación y técnico. Consta de una secuencia de gráficos elaborados con las ecuaciones que describen la variación del factor mencionado a lo largo del año, en la que el usuario pasa de uno a otro sin hacer cuentas pero sin perder la percepción de las magnitudes involucradas. El método apunta a la enseñanza de la radiación solar y puntualmente a mostrar los efectos de la variación de los distintos factores involucrados. El error de estimación del método varía con la inclinación del plano, siendo de 6.25% para una inclinación de 15° y de 12,18% para una inclinación de 90°.

Palabras clave: radiación solar, metodología cálculo, gráficos y educación.

INTRODUCCION

El impacto ambiental de los combustibles fósiles y los crecientes precios del petróleo han hecho que las energías renovables, particularmente la energía solar y la eólica, avancen cada vez con más fuerza. En este contexto, ha surgido un interés por implementar la enseñanza del aprovechamiento de la energía solar en distintos niveles educacionales desde el inicial hasta el universitario pasando por el nivel técnico y el terciario. La internalización de principios en el uso de energía solar comienza con el origen del recurso y estimación de la radiación solar que puede recibir un plano en un determinado período de tiempo.

La cantidad de energía media mensual que recibe una superficie inclinada es distinta a la horizontal. Para obtener el valor en plano inclinado debe utilizarse factores de corrección que dependen de la ubicación geográfica de la superficie, su pendiente o inclinación, el albedo local, el día del año y el coeficiente de claridad atmosférica. El método desarrollado y que se presenta en este trabajo apunta al uso de gráficos para comprender las diferentes instancias que atraviesa la radiación solar hasta llegar al plano del captador, permitiendo a su vez, estimar las magnitudes de la irradiación en planos inclinados con orientación Norte, es decir, un método estimativo visual. No se pretende reemplazar a los programas de cálculo ni ser la única herramienta de estimación, sino apuntar a lograr observar la variación de los factores involucrados sin necesidad de usar calculadora, computadora o desarrollar exigencia matemática.

Este método resulta particularmente interesante en ámbitos donde el estudio del recurso solar no necesita ser explicado en profundo detalle, pero demanda cierto conocimiento para focalizarse en tecnología solar. Por ejemplo, cursos para proyectistas e instaladores de energía solar térmica o fotovoltaica, o seminarios donde se pretende que el asistente pueda estimar cuanta radiación solar llega al techo de sus casa para poder evaluar la factibilidad de la instalación de sistemas. Así también, resulta sumamente valioso para la introducción al mundo de la energía solar ya que permite una aproximación sencilla a los valores reales del recurso solar a nivel de la superficie terrestre. En casos que el alumno se interese en profundizar el tema radiación, a partir de la ejercitación del método será más sencillo introducir conceptos más complejos.

METODOLOGÍA

La esencia del método consiste en traducir los resultados obtenidos con la aplicación de las fórmulas correspondientes en curvas sencillas de fácil interpretación visual. De esta manera, las curvas que se muestran en la sección de resultados, fueron obtenidas siguiendo los procedimientos descriptos en [Grossi Gallegos, 2002]. Los mismos se detallan a continuación en las ecuaciones 1 a 7.

⁽¹⁾ Investigador, Grupo de Energía Solar, UTN - FRBA

⁽²⁾ Doctorando, Escuela de Posgrado, UNSAM

⁽³⁾ Docente e investigador, Centro de Investigación, Hábitat y Energía, FADU – UBA

La irradiación extraterrestre media mensual ($\overline{H_{ET}}$) se calculó según se describe en la Ec(1):

$$\overline{H_{ET}} \left[\frac{J}{m^2} \right] = \left(\frac{24}{\pi} \right) \cdot 3600 \cdot I_{CS} \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot (DJ - 2)}{365} \right) \right] \cdot \left[\cos \phi \cdot \cos \overline{\delta} \cdot \overline{\text{sen} \omega_S} + \overline{\omega_S} (\pi/180) \cdot \text{sen} \phi \cdot \overline{\text{sen} \delta} \right] \quad (1)$$

donde I_{CS} es la constante solar que tiene un valor de 1367 W/m², DJ es el día juliano optimizado para obtener la irradiación media mensual, ϕ es la latitud de la localidad, $\overline{\delta}$ es la declinación media del eje terrestre y $\overline{\omega_S}$ es el valor medio del ángulo solar de salida para el mismo mes.

La irradiación en el plano horizontal a tope de atmósfera está relacionada con la irradiación en la superficie terrestre a través del índice de claridad atmosférica o K_T . El mismo se define en la ecuación (2):

$$\overline{K_T} = \frac{\overline{H_T}}{\overline{H_{ET}}} \quad (2)$$

Donde $\overline{H_T}$ es la irradiación media mensual en el plano horizontal expresada en J/m² en la superficie terrestre y $\overline{H_{ET}}$ la irradiación media mensual en el plano horizontal a tope de atmósfera en las mismas unidades.

El factor de plano inclinado se define según la ecuación (3):

$$\overline{F_{PI}} = \frac{\overline{H_{TI}}}{\overline{H_T}} \quad (3)$$

donde $\overline{H_T}$ es la irradiación media mensual en el plano horizontal y $\overline{H_{TI}}$ es la irradiación media mensual en el plano inclinado en la superficie terrestre expresada en J/m² y que se calcula utilizando la Ec. (4):

$$\overline{H_{TI}} = \overline{H_T} \cdot \left[\left(1 - \overline{K_D} \right) \cdot \overline{R_B} + \overline{K_D} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \right] \quad (4)$$

donde β es la inclinación del plano de interés con respecto a la horizontal, ρ es el albedo del lugar, $\overline{K_D}$ es la fracción media de irradiación difusa a total y $\overline{R_B}$ es el factor de modificación de la irradiación directa sobre el plano de interés.

El $\overline{K_D}$ está relacionado con el $\overline{K_T}$ mediante la Ec. (5):

$$\overline{K_D} = 0.775 + 0.347 \cdot (\pi/180) \cdot (\overline{\omega_S} - 90^\circ) - \left[0.505 + 0.261 \cdot (\pi/180) \cdot (\overline{\omega_S} - 90^\circ) \right] \cdot \cos(115^\circ \cdot \overline{K_T} - 103^\circ) \quad (5)$$

El $\overline{R_B}$ se calcula a partir de la relación establecida en la Ec. (6):

$$\overline{R_B} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\overline{\delta}) \cdot \overline{\text{sen}(\overline{\omega_S})} + (\pi/180) \cdot \overline{\omega_S}' \cdot \text{sen}(\phi - \beta) \cdot \overline{\text{sen}(\delta)}}{\cos(\phi) \cdot \cos(\overline{\delta}) \cdot \overline{\text{sen}(\overline{\omega_S})} + (\pi/180) \cdot \overline{\omega_S} \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \overline{\text{sen}(\delta)}} \quad (6)$$

donde $\overline{\omega_S}$ es el valor medio mensual del ángulo solar de salida del sol para el plano horizontal y $\overline{\omega_S}'$ es el valor mínimo entre $\overline{\omega_S}$ y el valor del ángulo solar de salida para el plano inclinado. Está dado por la Ec. (7):

$$\overline{\omega_s}' = \text{mínimo} \begin{cases} \arccos(-\text{tg}(\phi - \beta) \cdot \text{tg}(\overline{\delta})) \\ \arccos(-\text{tg}(\phi) \cdot \text{tg}(\overline{\delta})) \end{cases} \quad (7)$$

Con el fin de simplificar el cálculo visual y permitir un acceso ordenado a las curvas se realizaron las siguientes simplificaciones:

- 1) El comportamiento de la irradiación solar extraterrestre ($\overline{H_{ET}}$) es simétrico con respecto al día 15 del mes de Junio o el día juliano 182.
- 2) Los coeficientes medios mensuales del índice claridad atmosférica ($\overline{K_T}$) son conocidos o están disponibles en bases de datos. En su defecto, se conocen los valores de las medias mensuales de la irradiación solar en el plano horizontal.
- 3) Si los $\overline{K_T}$ están disponibles solo para ciertas localidades del país, existen dos posibilidades: La primera es extrapolar los $\overline{K_T}$ de localidades cercanas y la segunda es estimar algunos valores tentativos. En este último caso, se recomienda 0,45 para invierno, 0,50 para equinoccios y 0,55 para verano. Estos valores están basados en los datos de Fabris y Yarkes (1985). Si bien para algunas localidades estos valores pueden no ser representativos, para la mayoría de las localidades del país son bastante aproximados.
- 4) Si lo que se tiene son las medias mensuales de irradiación en el plano horizontal, se puede utilizar el método ingresando directamente a través de los valores de irradiación en la superficie terrestre, marcado como la Figura 1B.
- 5) El albedo se considera de 0,2 para todas las situaciones.
- 6) Las inclinaciones del captador para las que se realizaron las curvas son 0, 15, 30, 45, 60 y 90 grados. Se seccionaron estos valores de inclinación porque son los que se utilizan frecuentemente en la práctica.

RESULTADOS

Para la explicación del método tomaremos como ejemplo su aplicación a la latitud de Catamarca ubicada a 28°S para estimar la radiación solar que llega a un plano inclinado 30° en el mes de Abril, con un índice de claridad de atmósfera igual a 0,48. La aplicación del método se encuentra en la figura 1:

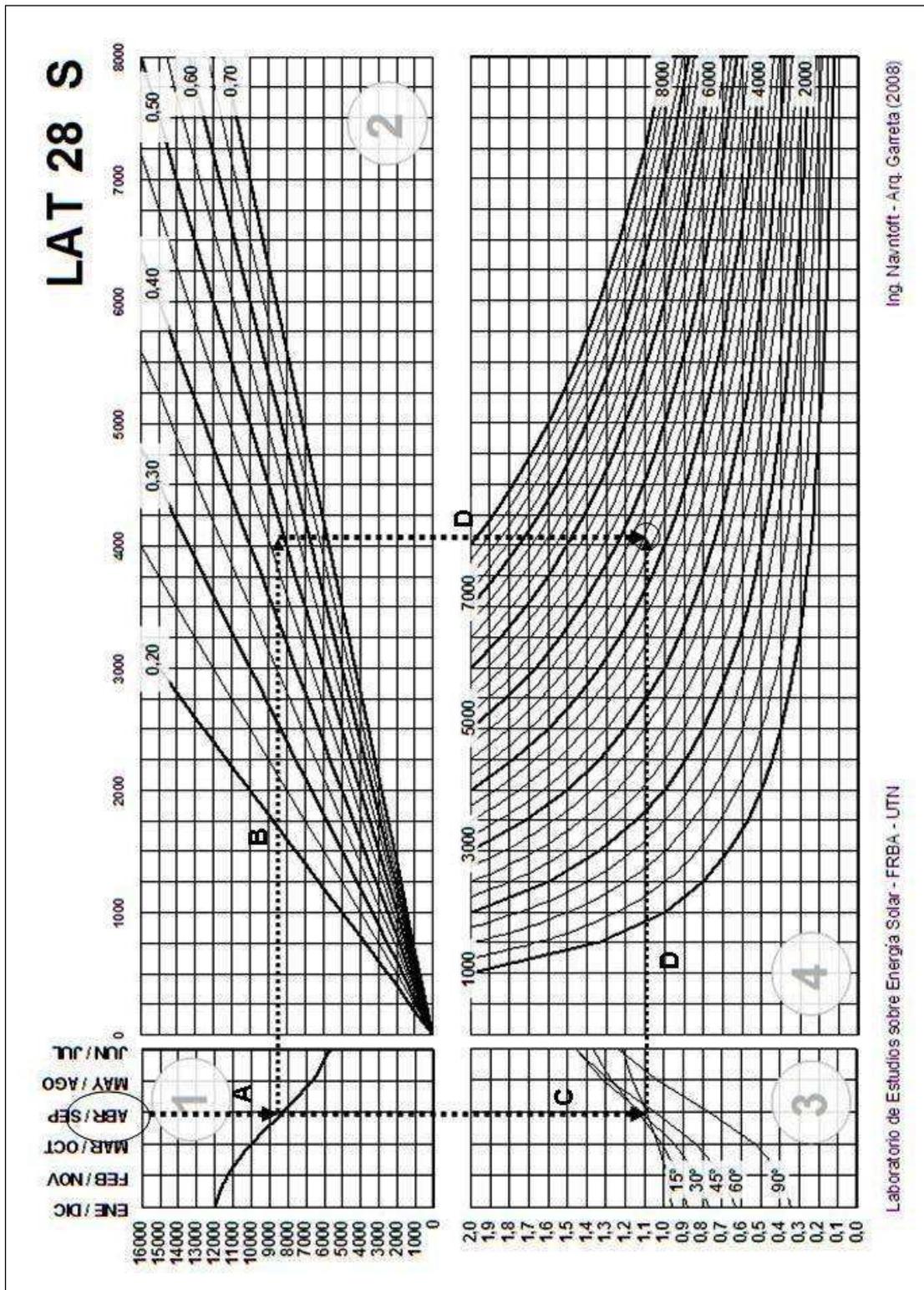
El primer paso consiste en determinar la irradiación extraterrestre en el plano horizontal (H_{ET}). Esto se realiza ingresando al área 1 tomando el mes deseado en el eje superior como lo indica la flecha marcada con A. La línea se prolonga hasta que corta la curva de irradiación extraterrestre y el valor obtenido se anota en una tabla ad-hoc. Para el ejemplo elegido, H_{ET} toma un valor aproximado de 8500 Wh/m².

El segundo paso consiste en determinar la irradiación incidente sobre superficie terrestre en el plano horizontal. Para realizar esto se traza una línea horizontal desde el punto determinado anteriormente hasta la intersección con una de las rectas del área 2 con la flecha B. Cada recta del área 2 de la figura corresponde a un valor de K_t . Desde este punto de intersección se traza una recta vertical hasta el eje x superior. La intersección de la recta con el eje, da el valor de irradiación en el plano horizontal sobre la superficie terrestre (H_T). Si en vez de contar con los K_t se tienen datos de irradiación media mensual, se puede ingresar a la figura a través de este paso directamente, partiendo del valor correspondiente en el eje x superior.

En los casos de que la localidad no figure en la planilla de datos de K_t , se recomienda utilizar para invierno 0,45, en equinoccios 0,50 y en verano 0,55.

El tercer paso consiste en determinar el factor de corrección para la irradiación que llega al plano inclinado (F_{PI} , Factor de Plano Inclinado). Para ello se utiliza el área 3 de la figura, ingresando con una línea que comienza en el mes de Abril (en 1), y corta con la curva correspondiente a la inclinación de 30°. El valor obtenido es de 1,09 aproximadamente. Este paso está marcado con la flecha C.

El cuarto paso consiste en saber la cantidad de energía que llega al plano inclinado. Para ello se traza una línea horizontal desde la intersección del paso 3 y una línea vertical desde la intersección del paso 2. El punto de intersección entre las flechas D, en el área 4, da el valor de irradiación en el plano inclinado. Continuando las curvas inmediatas al punto obtenido, se encuentra el valor de radiación media mensual sobre el plano. El valor alcanzado es, estimativamente, 4500 Wh/m² por día, promedio mensual.



Ing. Navntoft - Arq. Garreta (2008)

Laboratorio de Estudios sobre Energía Solar - FRBA - UTN

Figura 1. Curvas que integran el método simplificado para la latitud de Catamarca (28° S). Las flechas muestran los diferentes pasos que deben realizarse para evaluar visualmente la irradiación sobre el plano inclinado. A) Curvas para el cálculo visual de la irradiación media mensual a tope de atmósfera ($\overline{H_{ET}}$). B) Curvas de K_T para el cálculo visual de la irradiación media mensual en el plano horizontal ($\overline{H_T}$). Si se poseen las medias mensuales, se puede comenzar el método en este punto. C) Curvas para el cálculo visual de F_{PI} . D) Curvas para el cálculo visual de la irradiación media mensual en el plano inclinado ($\overline{H_{TI}}$).

ERRORES ASOCIADOS

Para simplificar la disposición visual de las curvas se realizaron varias modificaciones y simplificaciones. Cada una de ellas conlleva un error que se describe en esta sección. Para el cálculo de los errores se utilizó la localidad de Catamarca, ubicada a 28° de latitud sur y cuyos datos de irradiación media mensual en el plano horizontal se hallan en Grossi Gallegos y Righini, (2005) y los K_t correspondientes en Fabris y Yarko (1985).

La irradiación media mensual extraterrestre se asumió idéntica para los meses de enero y diciembre y se calculó como el promedio $\overline{H_{ET}}$ calculado con la ecuación (1) para ambos meses. Este mismo procedimiento se repitió para los pares de meses febrero-noviembre, marzo-octubre, abril-septiembre, mayo-agosto y junio-julio. Esta modificación permitió disponer las curvas de $\overline{H_{ET}}$ en la mitad del espacio total.

La segunda modificación que se realizó fue el cálculo de $\overline{F_{PI}}$. Se calculó un promedio del mismo para los mismos pares de meses descriptos anteriormente.

Las curvas de irradiación media mensual en el plano horizontal y en el plano inclinado se encuentran espaciadas cada 250 Wh/m². Esta es la mínima separación que permite una identificación clara a simple vista de las curvas. De esta manera, el error máximo asociado a la determinación visual de ambas magnitudes es de 125 Wh/m², es decir, la distancia media entre dos curvas sucesivas.

Las curvas de $\overline{K_T}$ están espaciadas cada 0,05 unidades. De esta manera, el error máximo que puede cometer el usuario es de 0,025 unidades.

Es necesario agregar el error de las bases de datos de entrada, ya sea a través de las medias mensuales de irradiación en el plano horizontal o el $\overline{K_T}$. Para las coordenadas geográficas en donde el $\overline{K_T}$ fue determinado a partir de mediciones locales, el error es del alrededor del 5% [Grossi Gallegos, 2002]. Para aquellas coordenadas en donde el $\overline{K_T}$ o las medias mensuales fueron interpoladas, el error no supera el 10%. [Grossi Gallegos, 2007].

De esta manera, el error total del método puede estimarse realizando la propagación de errores de productos. El error total varía de acuerdo desde donde se ingresa a la figura del método. Si se comienza con los valores de irradiación media mensual en el plano horizontal, ingresando al gráfico a través de la figura 1B, entonces el error para la irradiación en el plano horizontal es el de las medias mensuales, que dependiendo de su origen pueden ser del 5% o del 10%. Si se comienza a través de los valores de irradiación extraterrestre, es decir, comenzando por la figura 1A, entonces el error para la irradiación en el plano horizontal es del 11.32%. Luego deben agregarse los errores correspondientes a la inclinación del plano para la que se desea realizar el cálculo. La tabla 1 muestra los errores cuadráticos medios para cada uno de los pasos del método. La tabla 2 muestra los errores totales para las dos opciones de uso del método visual. Cabe mencionar que los errores aquí son los que aplican a la peor situación. En la práctica, las estimaciones visuales tienen menor error. Todos los errores fueron calculados para el ejemplo de Catamarca y el número de datos utilizados para el cálculo fue N=12, es decir uno por mes.

Estimación	Ecm	E %
$H_{ET} (Wh/m^2)$	299,12	3,26%
$H_T (Wh/m^2)$	130,56	2,81%
$K_t (adim)$	0,025	5,25%
$FPI 15^\circ(adim)$	0,013	1,25%
$FPI 30^\circ(adim)$	0,029	2,67%
$FPI 45^\circ(adim)$	0,041	3,95%
$FPI 60^\circ(adim)$	0,049	5,20%
$FPI 90^\circ(adim)$	0,040	7,18%

Tabla 1. Errores cuadráticos medios (Ecm) y errores expresados en porcentajes (E%) de las modificaciones incluidas en las curvas.

Comienzo	E. Tot. 0°	E. Tot. 15°	E. Tot. 30°	E. Tot. 45°	E. Tot. 60°	E. Tot. 90°
1A	11,31%	12,56%	13,98%	15,26%	16,51%	18,49%
1B*	5%	6,25%	7,67%	8,95%	10,20%	12,18%
1B**	10%	11,25%	12,67%	13,95%	15,20%	17,18%

Tabla 2. Errores totales expresados en porcentajes para las distintas formas de uso del método. *Error a partir de utilizar el gráfico con datos medidos. **Error a partir de utilizar gráfico con datos interpolados.

CONCLUSIONES.

Se ha presentado un método visual de cálculo de la irradiación solar en un plano inclinado orientado al norte y se han calculado los errores de su aplicación a la provincia de Catamarca. El mismo permite estimar la irradiación

media mensual que llega a un plano inclinado con un error dependiente de la inclinación del plano. En el caso que no se posean datos de medias mensuales, el error va desde 11,31% para el plano horizontal hasta 18,49% para el plano inclinado a 90°. En el caso de que se posean las medias mensuales provenientes de mediciones, el error va desde el 5% en el plano horizontal hasta el 12,18% para un plano inclinado a 90°. En el caso de que se posean las medias mensuales provenientes de interpolaciones, el error va desde el 10% en el plano horizontal hasta el 17,18% en el plano inclinado a 90°. Bajo ningún aspecto se pretende reemplazar el rigor de los programas de cálculo convencionales, sino lograr un acercamiento a la estimación de la radiación solar de una manera sencilla, gráfica y secuencial. Algunos de los beneficios que presenta el método radican en la facilidad de su utilización y la comprensión de la complejidad del tema a través de una rutina de cálculo gráfica, secuencial, y sobre todo, operativamente sencilla. Los errores del método son aceptables para las utilidades mencionadas ya que incluso en instalaciones térmicas o fotovoltaicas el factor de sobredimensionamiento suele ser de hasta el 10%, o superior, en algunos casos.

El método se presenta como una pequeña publicación, con una introducción, explicación del método, una hoja que incluye datos de K_T por cada estación y una hoja de gráficos por cada cinco grados de variación de Latitud. Se incluyen gráficos para las latitudes 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55. Por lo tanto, el alumno o el interesado puede realizar los cálculos de forma visual, rápida y sencilla sin programas o calculadoras, utilizando un material elaborado en base a una cuidadosa síntesis. Esta faceta, tiene particular incidencia en zonas rurales aisladas, donde resulta dificultoso contar con computadoras disponibles para utilizar los programas adecuados. También es aplicable para los cursos de instaladores de energía solar térmica y fotovoltaica ya que no siempre se dispone de suficiente tiempo para la explicación de programas de cálculo de radiación solar con computadoras o calculadoras.

Se considera que el método tiene potenciales aplicaciones en el ámbito educativo, técnico y en el campo político. En el primero, brinda una metodología dinámica y pedagógica de acercamiento al uso de la energía solar que permite que el alumno interactúe con valores reales de radiación solar. En el segundo, representa una alternativa aceptable para estimar el potencial solar de un lugar o zona, con aceptables resultados para aplicaciones sin elevada precisión. Y en el ámbito político, ofrece una herramienta que permite hacer estudios para la planificación energética y contribuir a la toma de decisiones sobre política energética regional. El procedimiento de estimación de radiación solar se ha probado por primera vez en el 1er Seminario de Energías Renovables, dictado en el Centro de Ingenieros de Catamarca, durante el mes de junio de 2008. El objetivo era determinar valores de radiación para calcular el rendimiento de equipos solares térmicos a lo largo del año, en diferentes zonas del país. Los resultados fueron satisfactorios, ya que los alumnos participantes pudieron internalizar el camino que sigue la radiación solar desde el tope de atmósfera y su depreciación a lo largo del trayecto hasta el captador. Queda como tarea a futuro, evaluar el error para cada una de las localidades que formarán el cuaderno.

REFERENCIAS

- [1] Fabris A., Yarke E.(1985). Tablas del cociente carga colector para 60 localidades de la argentina. Instituto Solar de Arquitectura, Buenos Aires, Argentina.
- [2] Grossi Gallegos H.(2002). Notas sobre radiación solar. Ed. Universidad Nacional de Luján, Departamento de Ciencias Básicas.
- [3] Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007) “Atlas de energía solar de la República Argentina”. Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 74 páginas + 1 CD-ROM, mayo de 2007 (ISBN 978-987-9285-36-7), Registro de la Propiedad Intelectual No. 554247 del 15 de marzo de 2007.

ABSTRACT

The monthly average energy that reaches a tilted plane is different from that of the horizontal plane and must be corrected by means of a factor that depends on the latitude of the plane location, the tilt angle, the julian day and the atmospheric clearness index (Kt). In this work, a simplified method to calculate the mentioned correction factor is presented. The goal of the method is to be used in the educational and technical fields. It is based on a series of curves that allow for the visual calculation of the factor without any use of calculators or computer programs. The user goes from one curve to the other and after determining three points in three different graphics, the correction factor is automatically obtained. The method is aimed to be used in the teaching of solar radiation in different levels and it allows to show the effects of the variation of the involved variables. The error of the method is dependant on the visual accuracy of the user and the tilt of the plane of interest going from 11,25% at a 15° tilt angle to 17,18% at a 90° tilt angle.

Keywords: solar energy, technology and education.