

TRANSPORTE DE IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL A UNA SUPERFICIE INCLINADA: EFECTO DE LA SEPARACIÓN DIRECTA-DIFUSA

Piccioli I.*, Laguarda A.*, Abal G.**

*Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República,
Herrera y Reissig 565, CP 11300, Montevideo, Uruguay

**Laboratorio de Energía Solar, Universidad de la República,
Av. Luis Batlle Berres sn km 508, CP 50000, Salto, Uruguay

RESUMEN

Predecir con precisión la radiación solar que incide en una superficie de inclinación arbitraria es un aspecto central para el desarrollo del campo de la energía solar fotovoltaica, así como para aplicaciones en arquitectura y generación solar térmica. En el presente trabajo se describen y evalúan diez modelos de pasaje de radiación en plano horizontal a plano inclinado -modelos de transporte-, a partir de datos de irradiancia global, directa y difusa de la región de Salto, Uruguay. Se comparan los desempeños a nivel horario y 15-minutal de los distintos modelos en términos de sus sesgos y dispersión respecto a la media de irradiancia global en plano inclinado, así como el impacto en los mismos de utilizar un modelo fenomenológico de separación directa-difusa, útil en caso de no contar con datos de irradiancia difusa.

PALABRAS CLAVE: Energía solar, Modelos de transporte, Radiación difusa

ABSTRACT

Accurately predicting solar radiation on inclined surfaces is a central task for the development of the photovoltaic field, as well as for architecture and thermal generation purposes. In this work, ten different transposition models are described, compared and evaluated from global, direct and diffuse radiation data from Salto, Uruguay. Performances for hourly and 15-minute data are compared by calculating the bias and dispersion relative to the mean of the global irradiance on a tilted surface. Finally we evaluate the consequences on the performance of using a phenomenological direct-diffuse separation model, useful in case of not having diffuse radiation data.

KEYWORDS: Solar energy, Transposition models, Diffuse radiation

INTRODUCCIÓN

Es frecuente que las medidas o estimativos satelitales disponibles para una ubicación geográfica de interés estén referidas a un plano horizontal, en tanto los proyectos de captación de energía solar (ya sea con fines térmicos o fotovoltaicos) usualmente utilizan paneles inclinados y por tanto requieren conocer la irradiación global incidente sobre un plano inclinado, generalmente orientado hacia el Ecuador. Se utilizan entonces “modelos de transporte o transposición” para estimar la irradiación sobre plano inclinado a partir de la medida sobre plano horizontal. Para un proyecto de aprovechamiento de energía solar de este tipo, la incertidumbre introducida por esta transposición impacta en la incertidumbre respecto a la energía utilizable estimada. Es importante caracterizar y tener en cuenta dicha incertidumbre de modo de reducir el riesgo financiero del proyecto y fomentar las inversiones en el subsector energético solar. Además, conocer la radiación incidente en superficies inclinadas y su incertidumbre asociada es de interés para la incorporación de técnicas de arquitectura solar pasiva en edificios.

La irradiancia solar global incidente en una superficie inclinada de orientación arbitraria se separa habitualmente en tres componentes: (i) irradiancia directa (esencialmente fotones que llegan sin ser dispersados por la atmósfera), (ii) difusa (fotones que llegan de todas las direcciones hemisféricas luego de sufrir procesos de absorción y dispersión en la atmósfera), y (iii) irradiancia reflejada por superficies cercanas sobre la superficie de interés, de modo que

$$G_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri} \quad (1)$$

donde indicamos la irradiancia global en plano inclinado como G_i (o GTI) y sus componentes directa, difusa y reflejada por G_{bi} , G_{di} y G_{ri} respectivamente.

A partir de la hipótesis de Liu-Jordan (1961), la transposición de la componente directa se reduce a un problema geométrico (basta con multiplicar por la razón entre los cosenos de los ángulos de incidencia sobre las superficies inclinada y horizontal). La irradiancia reflejada por superficies circundantes puede ser un problema complejo, involucrando factores de vista, reflexiones múltiples, emisividad y rugosidad de las superficies reflectoras, entre otros factores. A efectos de avanzar sobre el caso concreto, se utilizan hipótesis simplificadoras sobre este término: se considera solamente la reflexión del suelo (plano horizontal) supuesto un reflector difuso hemisférico isotrópico, con cierta reflectividad efectiva ρ_g . Bajo estas condiciones, siempre que la reflectividad y la inclinación de la superficie no sean muy altas, la componente reflejada contribuirá una fracción pequeña del total incidente en la superficie inclinada y puede ser modelada en forma aproximada sin afectar demasiado el desempeño del modelo. El transporte a plano inclinado de la componente difusa no es trivial, debido la naturaleza variable y generalmente anisotrópica de la distribución de la irradiancia difusa en la bóveda celeste.

La región de interés para este trabajo abarca el territorio del Uruguay, sur de Brasil y una amplia zona de la Provincia de Buenos Aires. Predominantemente se trata de una llanura pampeana con poca elevación y un clima subtropical templado. La nubosidad parcial es la condición de cielo más frecuente y, en media, la fracción difusa en la región (razón entre la irradiación difusa y global) representa un 47% de la radiación global (Abal et al., 2017).

El desempeño de los diferentes modelos de trasposición depende del clima predominante en el local de interés. Este trabajo evalúa varios modelos en uso corriente en otras partes del mundo contra datos terrestres de calidad y analiza el impacto en el desempeño debido al uso de un modelo de separación para las componentes directa y difusa de irradiación global horizontal. Para eso se utiliza el modelo de separación de (Ruiz-Arias, 2010) con coeficientes ajustados localmente. Este modelo ha sido evaluado como uno de los mejores para la región considerada (Abal et al., 2017).

MODELOS DE TRASPOSICIÓN

Los primeros intentos de modelar la distribución de la radiación difusa asumen una distribución isotrópica (Liu y Jordan, 1961), lo cual tiende a subestimar la irradiación sobre el plano inclinado (Duffie y Beckman, 2006). No obstante, el modelo isotrópico es el más simple; aún hoy es bastante usado en software de simulación solar de uso corriente y es el punto de partida para introducir modelos más sofisticados.

Un cielo cubierto es el que más se acerca a una distribución isotrópica de irradiancia difusa. Modelos posteriores reconocen la naturaleza anisotrópica de la radiación solar, especialmente en condiciones de cielo claro o parcialmente cubierto, distinguiendo la componente circunsolar de la irradiancia difusa desde donde la irradiancia es mayor, así como una franja a lo largo del horizonte conocida como “brillo del horizonte” (Klucher, 1979; Hay y Davies, 1980). Desde entonces, se han propuesto varios modelos (Steven y Unsworth 1979; Klucher 1979; Hay y Davies 1980; Gueymard 1987; Hay 1993; Perez et al., 1987) que tienen en cuenta diferentes factores para estimar la porción de radiación proveniente del disco circunsolar y el brillo del horizonte, así como los parámetros que determinan las condiciones del cielo en términos de su anisotropía.

Suponiendo isotrópica la radiación proveniente del reflejo de las superficies circundantes, la Ec.(1) para una superficie orientada al ecuador con inclinación β con respecto al plano horizontal, se expresa

$$G_i = r_b G_{bh} + r_d G_{dh} + \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) G_h \quad (2)$$

donde $r_b = \cos\theta / \cos\theta_z$ es la razón directa, $r_d = G_{di}/G_{dh}$ es la razón difusa, θ el ángulo de incidencia en la superficie inclinada y θ_z el ángulo cenital. Estos ángulos se expresan en términos de la inclinación, ubicación, día juliano y hora del día (Duffie y Beckman, 2006). G_h , G_{bh} y G_{dh} son la irradiancia global sobre plano horizontal y sus componentes directa y difusa respectivamente. La razón difusa, r_d , es el único término que recibe distinto tratamiento en cada modelo.

En este trabajo se evalúan 10 modelos para la razón difusa, separables en tres grandes grupos según su grado de sofisticación: modelos de primera generación (isotrópico – Iso), de segunda generación (Klucher – Klu; Hay-Davies - HD1 y HD2; Skartveit - Ska; Reindl - Rei) y de tercera generación (Gueymard - Gue; Perez - Per1 y Per2; y Muneer - Mun). Por brevedad, usaremos las siglas para referirnos a cada modelo. En la Tabla 1 se muestra r_d para cada uno de los modelos evaluados así como su referencia bibliográfica.

Tabla 1. Factor de razón difusa r_d para los modelos evaluados y su respectiva referencia bibliográfica. Los mismos se encuentran organizados según su generación.

Modelo	Razón difusa r_d	Referencias
Iso	$r_d^{Iso} = (1 + \cos \beta) / 2$	(Liu y Jordan, 1961)
Klu	$r_d^{Klu} = r_d^{Iso} [1 + f \sin^3(\beta/2)] (1 + f \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z)$	(Klucher, 1979)
HD1-2	$r_d^{HD} = (1 - A_i)r_d^{Iso} + A_i r_b$	(Hay y Davies, 1980; Hay, 1993)
Ska	$r_d^{Ska} = (1 - A_i - Z)r_d^{Iso} + A_i r_b + Z \cos \beta$	(Skartveit y Olseth, 1986)
Rei	$r_d^{Rei} = (1 - A_i)r_d^{Iso} [1 + f' \sin^3(\beta/2)] + A_i r_b$	(Reindl, 1990)
Gue	$r_d^{Gue} = (1 - N_{pt})r_{d0} + N_{pt}r_{d1}$	(Gueymard, 1987)
Per1-2	$r_d^{Per} = (1 - F_1)r_d^{Iso} + F_1 r_b + F_2 \sin \beta$	(Perez et al., 1987, 1990)
Mun	$r_d^{Mun} = (1 - A_i)r_{d1} + A_i r_b$	(Muncer, 2004)

El modelo Klu considera la radiación circunsolar y el brillo del horizonte por medio de los factores $(1 + f \sin^3(\beta/2))$ y $(1 + f \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z)$, respectivamente, donde $f = 1 - f_d^2$ vale 0 cuando el cielo está totalmente cubierto (en cuyo caso el modelo se reduce al isotrópico $R_d^{Klu} = R_d^{Iso}$) y se acerca a 1 en condiciones de cielo claro, siendo $f_d = G_{dh}/G_h$ la fracción difusa. Los modelos HD1 y HD2 estiman qué porción de radiación difusa proviene del disco circunsolar por medio de un índice de anisotropía dado por la transmitancia directa, $A_i = G_{bh}/G_{oh} = G_b/G_0$ donde G_0 y G_{oh} son la irradiancia extraterrestre y su proyección horizontal respectivamente. Esta parte de la difusa se trata como directa (con el factor r_b) y se desprecia el brillo del horizonte (modelo HD1). El modelo HD2 simplemente cambia el índice de anisotropía por $A_i' = G_{bn}/G_{sc}$ donde G_{bn} es la irradiancia en incidencia normal (o DNI) y $G_{sc} = 1367 W/m^2$ es la constante solar. El modelo Ska es una adaptación del HD1 para latitudes altas. Se introduce el parámetro $Z = \max(0, 0.3 - 2A_i)$ bajo la suposición de que en condiciones de cielo totalmente cubierto el 30% de G_{dh} proviene de la región circunsolar mientras que el 70% restante es isotrópica de la bóveda celeste. En el modelo Rei (Reindl, 1990) se combinan los modelos HD1 y Klu: se considera el factor de corrección para el brillo de horizonte de Klucher con $f' = \sqrt{1 - f_d}$ y el índice de anisotropía de Hay-Davies para la parte circunsolar de la irradiancia difusa. Este modelo es conocido como modelo HDKR (Duffie y Beckman 2006). Estos cinco modelos (Klu, HD1, HD2, Ska y Rei) están relacionados e integran la familia de segunda generación.

Gueymard (Gue) asume que la irradiancia de cielo parcialmente nublado es una suma ponderada de la irradiancia en condiciones de cielo claro y la de cielo cubierto. El factor de ponderación (la opacidad N_{pt}) se deriva empíricamente mientras que r_{d0} y r_{d1} son razones difusas para condiciones de cielo claro y cubierto respectivamente. r_{d0} se halla a través de una regresión polinomial dependiente de $\cos \theta$, β y la altitud solar α_s , mientras que r_{d1} se obtiene del modelo de Steven (Steven y Unsworth, 1979). Este es un modelo que permite un buen grado de ajuste al clima local. Los modelos Per1 y Per2 (Perez et al., 1987, 1990) dividen el hemisferio celeste en tres zonas: la región circunsolar (considerada como una fuente de radiación puntual), la banda del horizonte (supuesta de ancho infinitesimal) y un fondo isotrópico. Los coeficientes F_1 y F_2 están asociados al brillo circunsolar y del horizonte respectivamente, y dependen de tres parámetros: el ángulo cenital, el índice de claridad $k_t = G_h/G_{oh}$ y un brillo $\Delta = G_{dh}/(G_0 \cos \theta_z)$. Per1 y Per2 difieren en el tipo de

dependencia entre los coeficientes F_1 y F_2 y los parámetros mencionados. El modelo Mun (Muneer, 1990) trata por separado las superficies iluminadas ($\theta < \frac{\pi}{2}$) por irradiancia directa de las que se encuentran en sombra ($\theta > \frac{\pi}{2}$), además de distinguir entre condiciones de cielo claro y cubierto. Para superficies a la sombra y/o cielo cubierto, $R_d^{Mun} = R_{d1}$ como en el modelo Gue, mientras que para superficies iluminadas y cielo no cubierto R_d^{Mun} es parametrizado como se indica en la Tabla 1. Estos cuatro modelos se consideran de tercera generación.

METODOLOGÍA

Se trabajó con datos de irradiancia de la estación de medida del Laboratorio de Energía Solar (LES) ubicada en Salto, Uruguay (Latitud = 31.28°S, Longitud=57.92°W, Altura = 60 m snm), correspondientes a los años 2015 y 2016 (<http://les.edu.uy>). Estos datos incluyen las tres componentes de la irradiancia horizontal, medidas por piranómetros Kipp & Zonen CMP10 (estándar secundario) ventilados, y pirheliómetro CHP1 para la medida de la irradiancia directa. La medida de difusa se realiza con una esfera de sombra, montada en un sistema de seguimiento de precisión SOLYS2 de Kipp & Zonen equipado con sensor de ajuste fino. La irradiancia global sobre un plano inclinado (GTI) a $\beta = 30^\circ$ orientado al Norte se midió con piranómetros Kipp & Zonen CMP6 (Primera clase). Todos los piranómetros reciben mantenimiento diario y son calibrados con frecuencia bianual con el estándar secundario CMP22 del LES, con trazabilidad al patrón mundial. También se registran las variables meteorológicas usuales. Los datos se registran a cada minuto como promedio de 6 lecturas, y posteriormente se integran a 15 y 60 minutos (formatos PX-15 y PX-60 respectivamente). La incerteza (P95) asignada a las medidas de plano horizontal (estándar secundario) es de 2% para PX-60 y 3% para PX-15. La incerteza (P95) para GTI es algo mayor: 4% para PX-60 y 6% para PX-15, teniendo en cuenta que la medida no es ventilada y se trata de un piranómetro de primera clase. Se trabaja con irradiancia en estos intervalos de tiempo para atenuar el efecto de fenómenos rápidos de sobreirradiancia asociados a configuraciones particulares de nubes. Los 10999 datos diurnos PX-15 corresponden al período comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2016, mientras que los 5068 datos diurnos PX-60 corresponden al período entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2016. Sobre estos datos se aplica un conjunto de filtros de control de calidad, tanto en plano horizontal como en inclinado, como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Filtros aplicados a los datos de radiación horarios y quinceminutales, así como el porcentaje de datos descartados por cada filtro.

Filtro	Condición	PX-15		PX-60	
		Datos	%	Datos	%
F0	$\cos \theta_z \geq 0$ válidos	10999		5068	
F1	$\cos \theta_z \geq 0.12$	10201	7.3	4647	8.1
F2	$\cos \theta \geq 0.12$	9864	3.3	4403	5.3
F3	$(G_{bn} \cos \theta_z + G_{dh} - G_h)/G_h < 0.05$	8418	14.7	3822	13.2
F4	$0.05 < f_d = G_{dh}/G_h < 1.03$	8404	0.2	3817	0.1
F5	$0.1 < k_t = G_h/G_{oh} < 0.85$	8335	0.8	3795	0.6
Todos	% descartado		24.2		25.1

Para cada modelo, se calculó el desvío medio (rMBE) y el desvío cuadrático medio (rRMSE) relativos a la media de GTI para todos los datos filtrados a nivel F5. Para los datos horarios, en segunda instancia se aplicó el modelo de separación directa-difusa propuesto por Ruiz Arias (2010) con parámetros ajustados localmente. Este modelo de fracción difusa fue evaluado para Salto con incertidumbre de 16.6% de la media y sesgo despreciable – modelo RA2 en Abal et al. (2016)- . Se recalculan los indicadores de cada modelo de trasposición usando la irradiación difusa proveniente del modelo RA2 en lugar del valor medido, de modo de estimar el impacto en la incertidumbre final.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados principales de este trabajo se resumen en la Tabla 3. y la Fig. 1. La Tabla 3 muestra los indicadores a nivel quinceminutal y horario para los modelos considerados, relativos a un promedio de GTI de $635.4 W/m^2$ para los datos a escala quinceminutal y $632.4 W/m^2$ a escala horaria. En el caso horario (PX-60) se muestran indicadores con y sin separación de las componentes directa-difusa. La separación directa-difusa tiene un rMBE de -3.2% y un rRMSD de 26% respecto a una f_d media de 0.35. La Fig. 1 muestra la dispersión de los datos respecto a la predicción de GTI para los modelos de peor y mejor desempeño (Iso y Per2 respectivamente) a ambas escalas temporales y en el caso horario con datos de GTI medidos en tierra y obtenidos a través del modelo de separación.

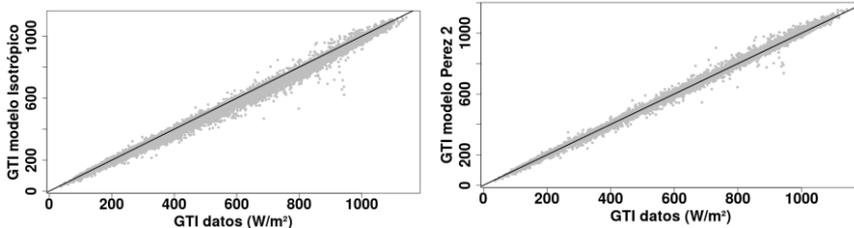
CONCLUSIONES

Todos los modelos, excepto el isotrópico, presentan sesgos pequeños en ambas escalas temporales. A escala PX-15 la incertidumbre típica es 3.3%, por debajo de la incertidumbre asignada a la medida de GTI (dominante) de 6%. Los modelos Per1, Per2 y Klu presentan el mejor desempeño, por poco margen, pero no es posible establecer un ordenamiento claro al estar por debajo del nivel de incertidumbre de las medidas. A escala PX-60 se mantiene el mismo resultado con sesgo pequeño e incertidumbre típica de 4% de la media GTI. Estos indicadores son consistentes con los obtenidos por Yang (2016) para datos quinceminutales en la región de Eugene, Oregon, para una superficie con la misma inclinación y orientada al Ecuador. El uso de un modelo fenomenológico (localmente ajustado e insesgado) para separar las componentes directa y difusa tiene, como era de esperar, impacto despreciable

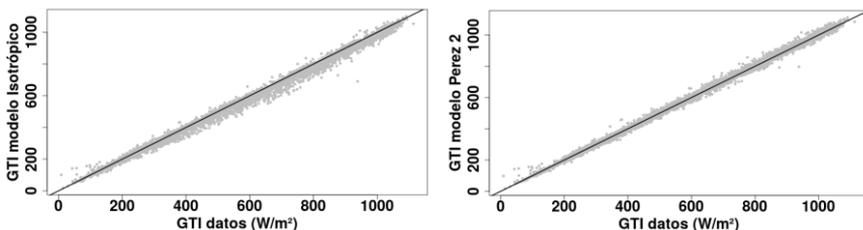
Tabla 3. Indicadores rMBE y rRMSD quinceminutales y horarios para los modelos considerados, a escala PX-15 y PX-60 sin separación y con separación directa-difusa.

Modelo	PX - 15		PX - 60			
	rMBE(%)	rRMSD(%)	Sin separación		Con separación	
			rMBE(%)	rRMSD(%)	rMBE(%)	rRMSD(%)
Iso	-3.2	5.0	-2.6	4.5	-3.5	9.5
Klu	-0.2	3.0	0.2	2.8	-0.9	8.8
HD1	-1.4	3.3	-1.2	2.9	-2.3	8.9
HD2	-1.5	3.3	-1.2	2.9	-2.3	8.9
Ska	-1.5	3.4	-1.3	3.0	-2.4	9.0
Rei	-1.3	3.2	-1.1	2.9	-2.1	8.9
Gue	-1.1	3.2	-0.8	2.9	-1.8	8.9
Per1	0.6	2.6	0.8	2.6	-0.2	9.0
Per2	-0.1	2.6	0.2	2.5	-0.9	8.9
Mun	-1.5	3.4	-1.3	3.0	-2.4	9.0

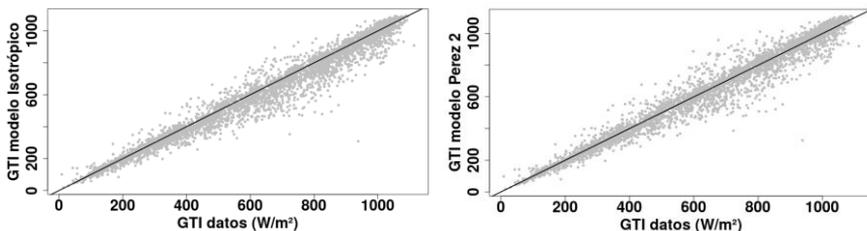
en los sesgos que continúan siendo bajos. Sin embargo, se observa un impacto importante en la dispersión (rRMSD) que aumenta en promedio de 3% a 9%. En este caso, todos los modelos presentan un desempeño similar, siendo el isotrópico quien presenta mayor desvío, y la decisión de uso se debe basar en la simplicidad de implementación. Para el clima y las condiciones de reflectividad consideradas, la mayor contribución a la incertidumbre asociada a la trasposición de plano horizontal a plano inclinado proviene del método de separación de las componentes directa y difusa.



1.a.



1.b.



1.c.

Fig. 1. Comparación entre GTI calculada y observada para los modelos Iso y Per2, con a. datos quinceminutales, b. datos horarios sin separación y c. datos horarios con separación directa-difusa.

REFERENCIAS

- Abal G., Aicardi D., Alonso Suárez R., Laguarda A. (2017). Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. *Solar Energy*. 141, 166-181.
- Duffie J.A. and Beckman W.A. (2006) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. Wiley Interscience, New York.
- Gueymard C. (1987). An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy*. 38, 367-386.
- Hay J.E. (1993). Calculating solar radiation for inclined surfaces: practical approaches. *Renew. Energy*. 3, 373-380. Solar radiation, environment and climate change.
- Hay J.E., Davies J.A. (1980). Calculation of the solar irradiance incident on an inclined surface. *First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Toronto, Ontario, Canada (1980), Hay J.E., Won T.K.(Eds.)pp. 59-72.
- Klucher T. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*. 23, 111-114.
- Liu B.Y.H., Jordan R.C. (1961). Daily insolation on surfaces tilted towards the equator *ASHRAE Trans*. 67, 526-54.
- Muneer T., Gueymard C., and Kambezidis H. (2004). *Solar radiation and daylight models*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier.
- Skartveit A., Olseth J.A. (1986). Modelling slope irradiance at high latitudes. *Solar Energy*. 36, 333-344.
- Steven M.D., Unsworth M.H. (1979) The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 105, 593-602
- Yang D. (2016). Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks. *Solar Energy*. 136, 288-302.