

# TRANSMITANCIA SOLAR DE COBERTURAS VIDRIADAS: ROL DE LA RADIACIÓN DIFUSA

Gerardo Vitale<sup>1</sup> – [gvitale@unorte.edu.uy](mailto:gvitale@unorte.edu.uy)

Italo Bove<sup>2</sup> – [italo@fing.edu.uy](mailto:italo@fing.edu.uy)

Gonzalo Abal<sup>1,2</sup> – [gonzalo.abal@gmail.com](mailto:gonzalo.abal@gmail.com)

<sup>1</sup>Laboratorio de Energía Solar (LES), CENUR LN, Universidad de la República, Salto, Uruguay

<sup>2</sup>Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

## Resumen

Existen diferentes formas de modelar la irradiancia solar transmitida por una cobertura vidriada. Mediante datos experimentales de irradiancia solar incidente (global y difusa) y transmitida por un vidrio incoloro horizontal se evalúan algunos de los modelos de transmitancia más usados en la literatura. Aquellos modelos con parámetros ajustables tienen mejor desempeño que los modelos genéricos, que no requieren información detallada del acristalamiento. El error introducido por el modelado de la radiación difusa incidente es evaluado y no resulta ser significativo, por lo que es posible usar esta separación para mejorar el desempeño de los modelos genéricos. La diferencia entre los diferentes modelos, en términos de la energía acumulada transmitida en plano horizontal en un año típico, es del orden de 1.5%.

**Palabras-claves:** transmitancia, irradiación difusa, balance térmico

## 1. INTRODUCCIÓN

El modelado de la irradiancia solar transmitida a través de un panel de vidrio transparente es de interés para lograr un balance energético adecuado. La transmitancia de una cubierta transparente es función de las propiedades direccionales de la radiación incidente, del espesor, índice de refracción y coeficiente de extinción del material, de la longitud de onda y la polarización de la radiación incidente, por lo que no es sencilla de determinar a partir de fundamentos teóricos y en la práctica se utilizan modelos con componentes fenomenológicas. En el caso de la radiación solar, importa además la separación de la radiación global en sus componentes directa y difusa, ya que las transmitancias para ambos tipos de radiación son diferentes. Los modelos de transmitancia suelen estar basados en la componente directa, para la cual un análisis de rayos es relativamente sencillo, con el argumento es que la mayor parte de la energía solar llega en forma directa. No obstante, en climas con alta variabilidad como el de Uruguay, las condiciones más frecuentes son las de nubosidad parcial, para las cuales la radiación difusa es importante y debe ser tratada adecuadamente.

En este trabajo se consideran tres modelos de uso común para evaluar la transmitancia solar de coberturas transparentes y examinamos su desempeño para el caso del vidrio incoloro, contra datos registrados en la plataforma de calibración del Laboratorio de Energía Solar, Salto, Uruguay. Algunas características de la cobertura vidriada se determinan a partir de medidas de irradiancia solar minimizando el desvío cuadrático medio entre modelo y medida. Finalmente, se evalúa la importancia de conocer la fracción difusa y el impacto en la estimación de transmitancia debido al uso de un modelo de fracción difusa cuando la misma es desconocida. La radiación difusa incidente en una superficie inclinada proviene en parte de la atmósfera (ángulo sólido subtendido por la bóveda celeste) y en parte de la reflexión del suelo y superficies vecinas. Un tratamiento adecuado de la irradiancia reflejada es complejo, ya que implica suposiciones sobre los detalles de las superficies reflejantes (reflectividad, rugosidad, forma, etc). A efectos de evitar estas variables, en este primer estudio se restringe el tratamiento a la transmitancia de una superficie transparente horizontal, en ausencia de estructuras reflectivas cercanas. En este caso especial, la radiación difusa proviene exclusivamente de la bóveda celeste. Dejamos el modelado detallado de la radiación reflejada, que puede ser importante para superficies verticales, para un trabajo posterior.

### 1.1 Modelos de Transmitancia

En la literatura se proponen diversos modelos para estimar la transmitancia en cubiertas vidriadas y estos pueden ser físicos, empíricos o semi-empíricos (Karlsson y Roos, 2000, Song y Haberl 2017, Duffie y Beckman 2013, Brandemuehl and Beckman 1980). En general, el tratamiento es diferente para la radiación directa y la radiación difusa. En estos casos, los modelos toman la forma

$$G_t = G_{bi} \tau_b + G_{di} \tau_d \quad (1)$$

donde  $G_t$  es la irradiancia global transmitida por la cubierta plana transparente (en un plano paralelo a la cubierta),  $G_{bi}$  y  $G_{di}$  son las irradiancias directa y difusa incidentes en el plano de la cubierta respectivamente, y  $\tau_b$  y  $\tau_d$  son las transmitancias para radiación directa ( $\tau_b = G_{bt}/G_{bi}$ ) y radiación difusa ( $\tau_d = G_{dt}/G_{di}$ ). Ver glosario en el Apéndice A.

En la práctica, interesa la transmitancia global  $\tau_g = G_t/G_i$ , donde usamos  $G_i$  para indicar la irradiancia global incidente sobre la superficie. Es posible vincular en forma exacta a la transmitancia global con las transmitancias directa y difusa,

$$\tau_g = (1 - f_d) \tau_b + f_d \tau_d \quad (2)$$

a través de la fracción difusa  $f_d = G_{di}/G_i$  en el plano de interés. Esta relación permite un tratamiento diferenciado de ambas componentes de radiación y es la base de la mayoría de los modelos físicos de transmitancia.

### Modelo físico (DB)

En Duffie y Beckman 2013, se presenta un modelo predominantemente físico, con la transmitancia directa dada por

$$\tau_b^{DB}(\theta) = \frac{\tau_a}{2} \cdot \left[ \frac{(1 - r_{\perp})^2}{1 - (r_{\perp} \tau_a)^2} + \frac{(1 - r_{\parallel})^2}{1 - (r_{\parallel} \tau_a)^2} \right] \quad (3)$$

donde  $r_{\perp}$  y  $r_{\parallel}$  son las reflectividades de las componentes de radiación con polarización perpendicular y paralela al plano de incidencia, dadas por las relaciones de Fresnel en términos del ángulo de incidencia  $\theta$ ,

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta' - \theta)}{\sin^2(\theta' + \theta)} \quad r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta' - \theta)}{\tan^2(\theta' + \theta)} \quad (4)$$

En incidencia normal ambas expresiones se reducen a  $r_n = (n-1)^2/(n+1)^2$ . La ec. (3) asume que la luz incidente es no polarizada (promedia ambas componentes) y que existe una absorción  $1 - \tau_a$  en la lámina de vidrio, donde  $\tau_a = \exp(-KL/\cos\theta')$ ,  $K$  es el coeficiente de extinción y  $L$  el espesor de la placa vidriada. El ángulo del haz refractado,  $\theta'$ , satisface la relación de Snell para una interfaz aire-vidrio,  $\sin(\theta) = n \sin(\theta')$ , donde  $n$  es el índice de refracción del vidrio, por lo que la transmitancia directa dada por la ec. (3) es función del ángulo de incidencia  $\theta$  y de dos parámetros adimensionados:  $KL$  (espesor óptico en incidencia normal) y  $n$  (índice de refracción).

Para la transmitancia difusa, este modelo asume isotropía y promedia angularmente la transmitancia directa en el ángulo sólido relevanten (Brandemuehl y Beckmann, 1980). De este modo se obtienen la transmitancia efectiva para radiación difusa adecuadas para el caso de una superficie inclinada orientada al ecuador. Este resultado se expresa adecuadamente en la forma de un ángulo de incidencia efectivo  $\theta_d$  para el cual la ec. (2) da la transmitancia adecuada a la radiación difusa. Es decir que  $\tau_d^{DB} = \tau_b(\theta_d)$ . Para una superficie horizontal,  $\theta_d \approx 60^\circ$  (Brandemuehl y Beckmann, 1980).

### Modelo fenomenológico 1 (ISO)

La norma ISO 9806-2013 para medidas de eficiencia térmica de colectores solares plantea el uso de un modelo semi-empírico, en el cual la transmitancia directa se parametriza en la forma,

$$\tau_b^{ISO}(\theta) = \tau_n \left[ 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

donde  $b_0$  es un parámetro de ajuste.  $\tau_n$  es la transmitancia directa de la cubierta en incidencia normal que se puede obtener tomando del límite  $\theta \rightarrow 0$  en las ecs. (3) y (4),

$$\tau_n = \tau_a \cdot \left[ \frac{(1 - r_n)^2}{1 - (r_n \tau_a)^2} \right] \approx e^{-KL} \cdot \left[ \frac{1 - r_n}{1 + r_n} \right] = e^{-KL} \cdot \left[ \frac{2n}{n^2 + 1} \right] \quad (6)$$

donde la aproximación se basa en que  $r_n$  es pequeño en relación a 1. La transmitancia difusa  $\tau_d^{ISO}$  se estima del mismo modo que en el modelo DB (asumiendo isotropía) o, si se cuenta con datos para cielo cubierto, se toma como un segundo parámetro ajustable.

## Modelo fenomenológico 2 (SS)

Schultz y Svendsen, 1998 utilizan un modelo empírico para la transmitancia global de una placa transparente sin separar las componentes directa y difusa,

$$\tau_g^{SS}(\theta) = \tau_n \left[ 1 - \tan^p(\theta/2) \right] \quad (7)$$

donde  $\tau_n$  es la transmitancia en incidencia normal y  $p$  es un parámetro ajustable, con valor cercano a 4 para la mayoría de los vidrios. Este modelo tiene como principal virtud su simplicidad y se puede esperar que de mejores resultados en condiciones de cielo claro, en las cuales domina la transmitancia directa, que en condiciones de cielo nublado.

En todos los modelos el tratamiento de la transmitancia difusa es genérico o esta ausente. Considerando que, como se verá, en nuestro clima la mayor parte de los días presenta condiciones con nubosidad parcial o total, es importante prestar atención a este aspecto de los modelos.

## 2. MEDIDAS Y RESULTADOS

Todas las experiencias se realizaron en la mesa de calibración del Laboratorio de Energía Solar (LES), en Salto, Uruguay (Latitud = 31.28° S, Longitud = 57.92° W, Altitud = 65 m snm). El clima predominante en esta ubicación es templado, con irradiación solar global típica de 4.7 kWh/m<sup>2</sup>/día (Alonso Suárez et al., 2016). En este punto se cuenta con medidas simultáneas permanentes de irradiancia solar global y difusa sobre plano horizontal y de irradiancia directa en incidencia normal. Se registran los promedios de tres medidas en cada minuto usando un adquisidor Fisher Scientific (Datataker DT85). Las medidas provienen de tres piranómetros Kipp & Zonen modelo CMP10, dos de los cuales miden irradiancia global y el tercero, con el Sol bloqueado por una esfera sujeta al seguidor, mide irradiancia difusa. El desvío medio entre las dos medidas de GHI en el período considerado es de 3.1 %, consistente con la incertidumbre asociada a estas medidas. Dos pirheliómetros Kipp & Zonen CHP1 miden la radiación directa en incidencia normal con un desvío cuadrático medio de 1.7 % entre ambos durante el período considerado. Los piranómetros fueron calibrados el 06/2016 contra el estándar secundario del laboratorio (KZ CMP22 calibrado en el World Radiation Center con trazabilidad a la referencia radiométrica mundial) siguiendo la norma ISO 9847:1992(E) “Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer”. Los pirheliómetros tienen su calibración de fábrica, con plazo menor a dos años a la fecha de las medidas. El seguidor solar es un SOLYS2 de Kipp & Zonen, equipado con un fotodiodo de ajuste fino (Fig. 1). Las medidas de piranómetro son ventiladas por aire caliente con ventiladores Kipp & Zonen CVF4. Los equipos reciben supervisión y mantenimiento diario por el personal del laboratorio. Estas medidas conforman un conjunto con calidad similar a la exigida por la red BSRN. Se cuenta además con las medidas auxiliares de temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa, y dirección y velocidad de viento de la estación meteorológica del LES.

### 2.1 Coeficiente de extinción de la muestra de vidrio

A efectos de medir el coeficiente de extinción  $K$  del vidrio se fijó un pequeño trozo sobre la entrada de uno de los pirheliómetros montados en el seguidor SOLYS2 (Fig. 1) y se midió la transmitancia en incidencia normal  $\tau_n$  a través del cociente entre las señales de ambos pirheliómetros. La determinación de  $\tau_n$  se realiza a través de una regresión lineal entre ambas medidas. El vidrio utilizado es vidrio claro de ventana con  $n=1.6 \pm 0.1$  y espesor uniforme  $L=6.15 \pm 0.05$  mm. Midiendo  $\tau_n$  se determina el espesor óptico  $KL$  usando la ec. (6).

Se realizaron medidas continuas de irradiancia directa a intervalos de 1 minuto durante dos semanas (entre los días 21/07 – 07/08 de 2017), abarcando todas las condiciones de cielo. En la Fig. 2 (panel superior) se muestra la irradiancia directa normal incidente y transmitida para tres días de la serie. En el panel inferior se muestra la medida con vidrio vs la directa incidente. Para determinar la transmitancia normal se seleccionan los valores con  $G_b > 300$  W/m<sup>2</sup> y se determina la pendiente a través de un ajuste robusto de mínimos cuadrados como se muestra en la Fig. 2 (panel inferior). Se utilizó el paquete MASS del software estadístico R, basado en la mediana de forma de ser menos sensible a outliers. El resultado para la transmitancia es  $\tau_n = 0.79 \pm 0.02$ . A partir de la ec. (7) se obtiene  $KL = 0.132 \pm 0.011$  y un coeficiente de extinción  $K = 20.9 \pm 1.7$  m<sup>-1</sup>. Los valores típicos del coeficiente de extinción del vidrio varían entre unos 4 m<sup>-1</sup> para el vidrio muy transparente y aproximadamente 32 m<sup>-1</sup> para un vidrio con alto contenido de óxido de hierro u otras impurezas (Duffie y Beckman, 2013).

### 2.2 Medidas de transmitancia global

El dispositivo para medir transmitancia global en plano horizontal se muestra en la Fig. 1. Consiste en un marco de madera, con las superficies internas pintadas en negro mate y una muestra de vidrio claro ajustada a su cara superior. Las dimensiones de la abertura son 790 x 500 x 120 mm. Un piranómetro Kipp & Zonen modelo CMP10 y un radiómetro fotovoltaico Licor 200 (redundante) miden la irradiancia global transmitida a través del vidrio. Las medidas

se toman cada 20 seg y su promedio se registra a cada minuto en un adquisidor Fischer Scientific Datataker DT80. A unos 2 m de distancia del dispositivo, el seguidor solar SOLYS2, con los equipos descritos anteriormente mide las tres componentes de irradiancia sobre plano horizontal.



Figura 1: Izq. Seguidor solar SOLIS2 con dos pirheliómetros, uno de ellos ajustado con una muestra del vidrio para medida de transmitancia directa normal y caja con vidrio para medida de transmitancia global sobre plano horizontal. Der. Interior de la caja con piranómetro y cobertura vidriada.

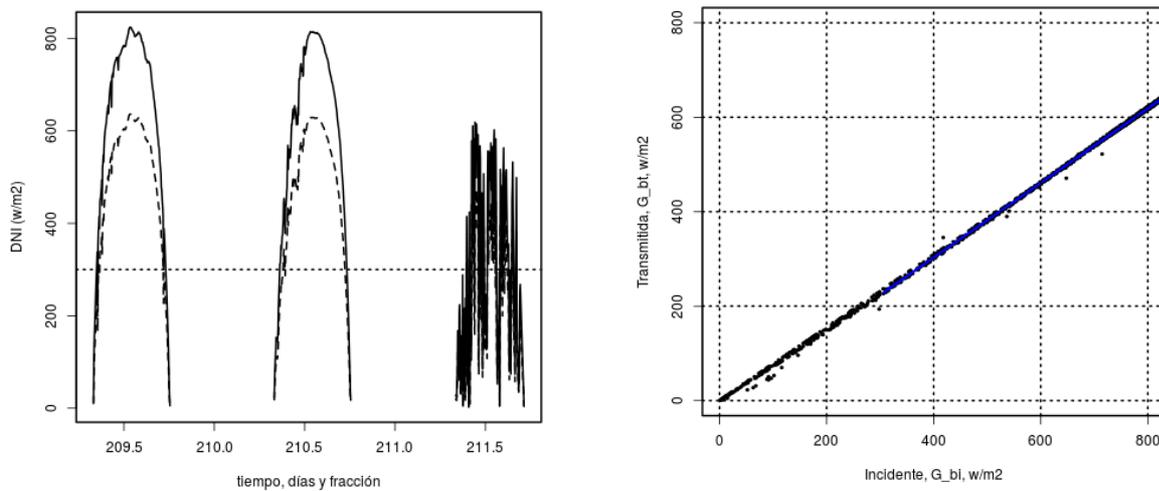


Figura 2: Izq. Irradiancia en incidencia normal incidente (línea llena) y transmitida (línea a trazos) en función del tiempo (días). Der. Irradiancia transmitida en función de la incidente (puntos) y su correspondiente ajuste lineal robusto (línea azul, versión en línea).

El dispositivo midió en forma continua en dos períodos: del 16/12/2016 al 21/12/2016 y del 29/04/2017 al 05/06/2017, para captar datos con ángulos de incidencia variados en diferentes momentos del año. En la Fig. 3 (panel superior) se muestra una serie de tres días de medidas de irradiancia global (GHI) incidente y transmitida, a modo de ejemplo. Los datos se integran a intervalos de 3 minutos para reducir fluctuaciones y luego se filtran para excluir condiciones con sol bajo ( $\cos \theta_z < 0.15$ ) cuyas medidas son afectadas por alta incertidumbre debido al error coseno. Finalmente, se utilizan datos de la tarde para evitar distorsiones debidas a posibles gotas de rocío matinal sobre el panel de vidrio. Hay 2847 datos que pasan este filtrado básico.

A efectos de estudiar sistemáticamente el comportamiento de los modelos para las diferentes condiciones de cielo, se dividen los datos en tres categorías basadas en índice de claridad ( $k_t = G_t/G_{0h}$ ) y en la fracción difusa ( $f_d = G_{dh}/G_h$ ), como se indica en la Tabla 1.

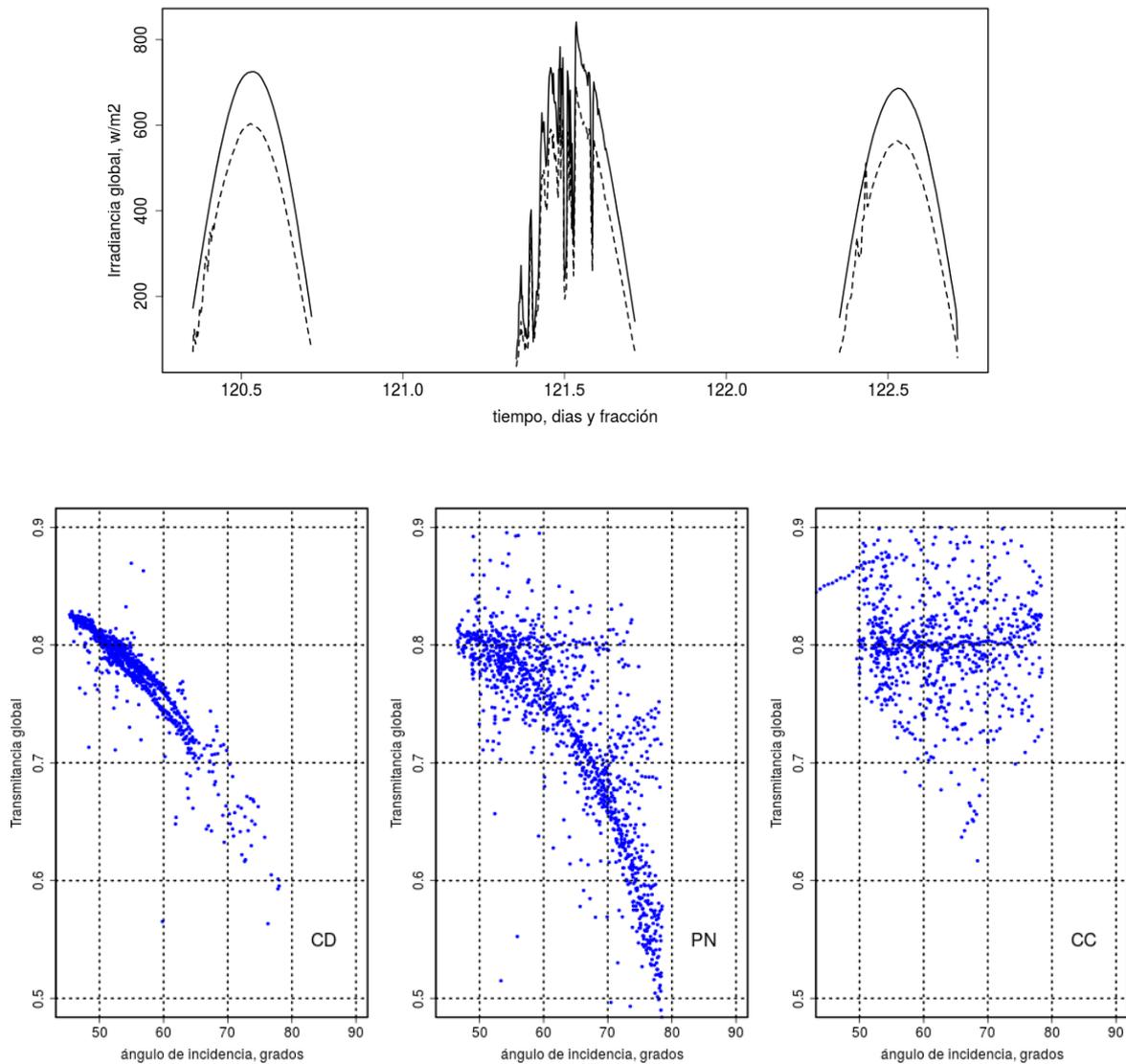


Figura 3: Arriba: Irradiancia global en plano horizontal incidente y transmitida por el vidrio (se muestran tres días como ejemplo) y. Abajo: Transmitancia global para cielo despejado (CD), parcialmente nublado (PN) y cubierto (CC).

En condiciones de cielo despejado (CD) y parcialmente nublado (PN), la transmitancia global está dominada por la radiación directa y depende marcadamente del ángulo de incidencia, como se indica en el panel inferior de la Fig. 3. La dispersión en las medidas aumenta con la nubosidad. Para cielo cubierto (CC), predomina la transmitancia asociada a la radiación difusa que es esencialmente constante y en torno a 0.80 para la muestra de vidrio considerada en este trabajo. Para este caso, la dispersión es máxima.

Tabla 1 – Categorización de los datos 3-minutales de irradiación (global y difusa) sobre plano horizontal basada en las condiciones de cielo.

| Categoría | condición cielo      | criterio                | datos (3-min) | %     |
|-----------|----------------------|-------------------------|---------------|-------|
| CD        | cielo despejado      | $k_t > 0.7, f_d < 0.5$  | 808           | 28.4  |
| PN        | parcialmente nublado | $0.3 \leq k_t \leq 0.7$ | 1246          | 43.8  |
| CC        | cielo cubierto       | $k_t < 0.3, f_d > 0.5$  | 793           | 27.8  |
|           |                      | totales                 | 2847          | 100.0 |

Es relevante determinar que tan frecuentes son las diferentes condiciones de cielo para el clima templado considerado. El mismo se caracteriza a través de un Año Meteorológico Típico para Salto (Alonso-Suárez et al., 2016) basado en 15 años de estimativos satelitales de irradiación solar global horaria y medidas de tierra para las otras variables meteorológicas. Este es un producto específicamente desarrollado por el LES para aplicaciones en energía solar y esta disponible en línea (<http://les.edu.uy/productos/amtues-2/>). De acuerdo al mismo, como se indica en la Tabla 2, aproximadamente un 25 % de las horas corresponden a condiciones de cielo despejado (CD), un 54 % a condiciones parcialmente nubladas y el restante 21 % a horas con cielo cubierto. Estos valores típicos son compatibles con los de la Tabla 1, basados en 2 semanas de medidas concretas. Para este clima, las condiciones de cielo despejado no son las mas frecuentes, alcanzando el 28 % de los datos usados para el análisis de transmitancia global. El restante 72 % corresponde a períodos con nubosidad parcial o total. Esto hace relevante analizar el desempeño de los modelos de transmitancia en cuanto a su capacidad predictiva en condiciones de nubosidad parcial o total. Como se verá en la siguiente subsección, el desempeño de los modelos de transmitancia puede ser bastante pobre en las condiciones de cielo cubierto predominantes en el clima templado considerado.

Tabla 2 – Categorización de los datos horarios de irradiación (global y difusa) sobre plano horizontal del Año Meteorológico Típico para Salto basada en las condiciones de cielo.

| Categoría | condición cielo      | criterio                | horas | %     |
|-----------|----------------------|-------------------------|-------|-------|
| CD        | despejado            | $k_t > 0.7, f_d < 0.5$  | 1101  | 25.4  |
| PN        | parcialmente nublado | $0.3 \leq k_t \leq 0.7$ | 2320  | 53.7  |
| CC        | cubierto             | $k_t < 0.3, f_d > 0.5$  | 900   | 20.9  |
|           |                      | totales                 | 4321  | 100.0 |

## 2.2 Ajuste y desempeño de los modelos

Para modelar la transmitancia de una cubierta transparente a partir del modelo DB, ecs. (3) y (4), es necesario conocer dos parámetros adimensionados del material, el índice de refracción y el producto KL. Para la muestra considerada en este trabajo, (Subsección 2.1) estos valores son  $n=1.6$  y  $KL=0.132$ , respectivamente. Un tercer parámetro  $\tau_d^{DB} = 0.74 \pm 0.02$  corresponde a la transmitancia directa con ángulo de incidencia efectivo  $\theta_d \approx 60^\circ$  (Brandemuehl y Beckman, 1980). Para el modelo ISO es necesario ajustar el parámetro  $b_o$ , y  $\tau_d$ . Esto se lleva a cabo a través de un ajuste multi- lineal basado en las ecs. (5) y (6) y utilizando el 50 % del total de datos seleccionados en forma aleatoria. Obteniéndose valores de  $b_o = 0.118$  y  $\tau_d^{ISO} = 0.93$ . El 50% restante de los datos se usa para evaluar el modelo. Para el modelo SS, ec. (7), se necesita la transmitancia en incidencia normal  $\tau_n$  y el parámetro  $p$ . Para este trabajo se utiliza el valor medido (Subsección 2.1) de  $\tau_n = 0.79$  y  $p=4$ , como sugiere Karlsson y Roos, 2000.

En la Fig. 4 se muestra la transmitancia global medida (puntos azules) y la predicción de los diferentes modelos considerados. Se desglosan los resultados por condición de cielo (CD, PN, CC) y por modelo. En esta figura se consideran ángulos de incidencia menores a  $60^\circ$ . La Fig. 5 muestra la misma información para ángulos de incidencia mayores a  $60^\circ$ . Se excluyen los ángulos mayores a  $80^\circ$  por ser la medida muy incierta en estas condiciones.

Los datos indicados en la Tabla 1 se utilizan para evaluar los tres modelos. Para ello se calcula el desvío cuadrático medio (RMSD) y el sesgo promedio (MBD), definidos en la forma usual

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) \quad (8)$$

donde  $y_i$  representa la medida de transmitancia e  $\hat{y}_i$  el correspondiente estimativo del modelo. Estos indicadores se expresan en términos relativos, como % de la media de las medidas.

En la Tabla 2 se muestran los indicadores para cada modelo desglosados por tipo de cielo y por rango de ángulo de incidencia. Se incluyen también los indicadores correspondientes a usar un valor de transmitancia constante igual a la de incidencia normal. Se consideran por separado los ángulos de incidencia menores y mayores a  $60^\circ$ . Para incidencia menor a  $60^\circ$  se incluyen los indicadores globales para cada modelo, que resultan del promedio ponderado para todas las condiciones de cielo. Para cielo claro, todos los modelos (salvo transmitancia constante) son buenos, con sesgos menores a 2% y desvíos menores a 3 %. Para cielo cubierto, donde la transmitancia es independiente del ángulo de

incidencia, los modelo DB e ISO son adecuados, con sesgos < 1% y desvíos entre 6 y 7 %. En condiciones intermedias (PN), los tres modelos tienen desempeños similares, con cierta ventaja para el DB. El indicador global muestra que el DB es el mejor modelo, seguido de cerca por ISO. Para ángulos de incidencia mayores a 60°, la situación es similar con indicadores algo mayores. Es interesante destacar que el mejor modelo en condiciones CC es la transmitancia constante.

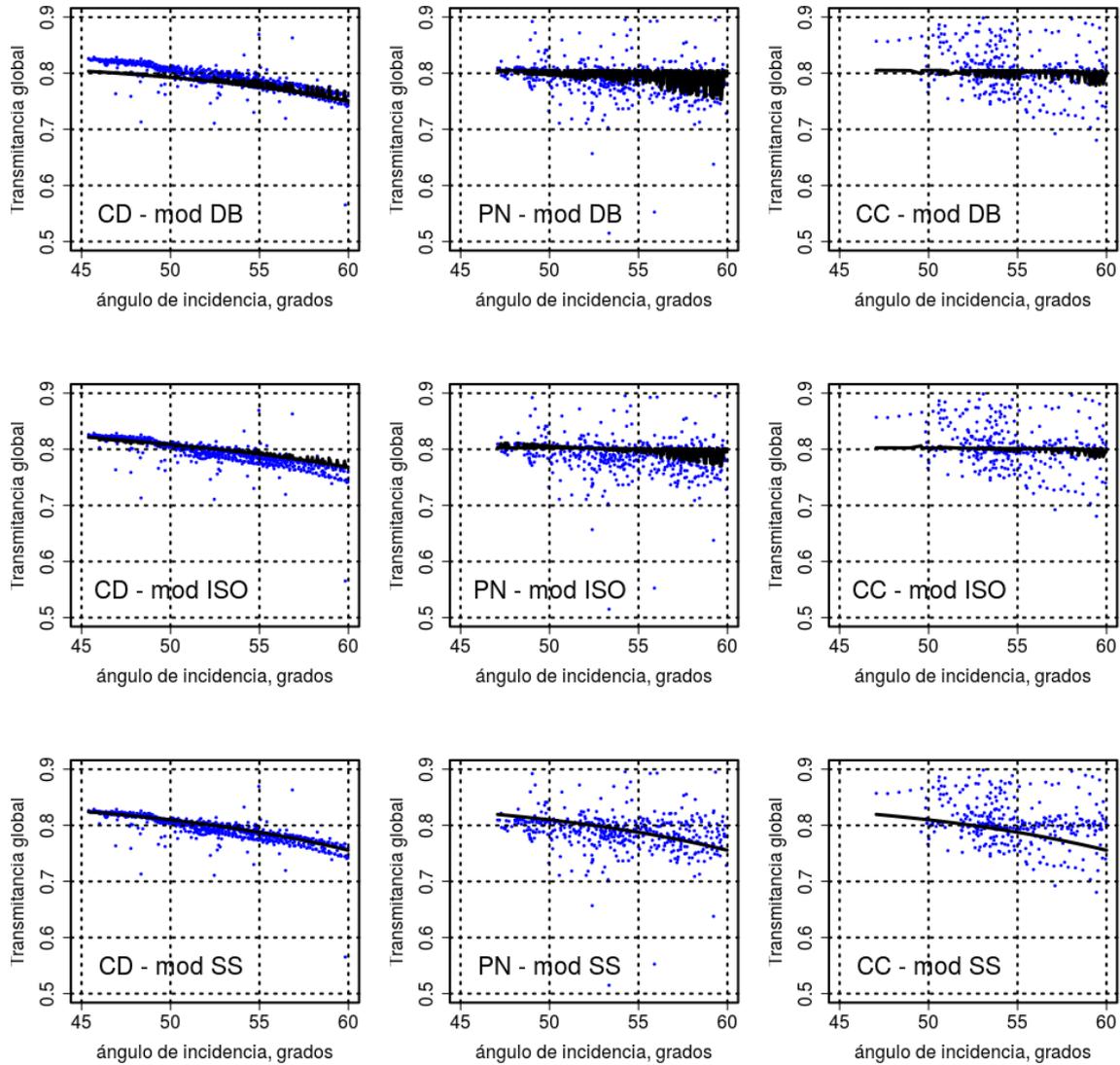


Figura 4: Transmitancia experimental (puntos azules) y modelos para cada condición de cielo y para ángulos de incidencia menores a 60°. Los modelos se organizan por filas, las condiciones de cielo (CD, PN, CC) por columna.

TABLA 2: Indicadores (relativos a la media de las medidas) para cada modelo y tipo de cielo.

| rMBD (%) para $\theta < 60^\circ$ |      |      |       |             |
|-----------------------------------|------|------|-------|-------------|
| MODELO                            | CD   | PN   | CC    | Global      |
| DB                                | -0.7 | 1.6  | -0.8  | <b>0.7</b>  |
| ISO                               | 1.4  | 3.1  | -0.9  | <b>1.8</b>  |
| SS                                | 0.1  | -3.4 | -10.5 | <b>-5.3</b> |
| CTE                               | 2.0  | 9.2  | -1.1  | <b>6.9</b>  |

| rMBD (%) para $\theta > 60^\circ$ |      |      |       |
|-----------------------------------|------|------|-------|
| MODELO                            | CD   | PN   | CC    |
| DB                                | 1.3  | 2.2  | -1.1  |
| ISO                               | 4.0  | 4.7  | -1.0  |
| SS                                | -1.5 | -6.6 | -17.2 |
| CTE                               | 11.3 | 16.6 | -0.4  |

| rRMSD (%) para $\theta < 60^\circ$ |      |      |      |             |
|------------------------------------|------|------|------|-------------|
| MODELO                             | CD   | PN   | CC   | Global      |
| DB                                 | 2.5  | 4.9  | 6.7  | <b>6.2</b>  |
| ISO                                | 2.8  | 5.9  | 6.2  | <b>6.9</b>  |
| SS                                 | 2.7  | 8.4  | 16.0 | <b>11.4</b> |
| CTE                                | 6.0  | 15.0 | 5.6  | <b>14.3</b> |
| $\tau_{med}$                       | 0.78 | 0.72 | 0.80 | <b>0.75</b> |

| rRMSD (%) para $\theta > 60^\circ$ |      |      |      |
|------------------------------------|------|------|------|
| MODELO                             | CD   | PN   | CC   |
| DB                                 | 3.4  | 5.8  | 8.4  |
| ISO                                | 5.1  | 7.1  | 7.2  |
| SS                                 | 4.8  | 10.8 | 21.0 |
| CTE                                | 12.8 | 20.3 | 5.9  |
| $\tau_{med}$                       | 0.71 | 0.68 | 0.79 |

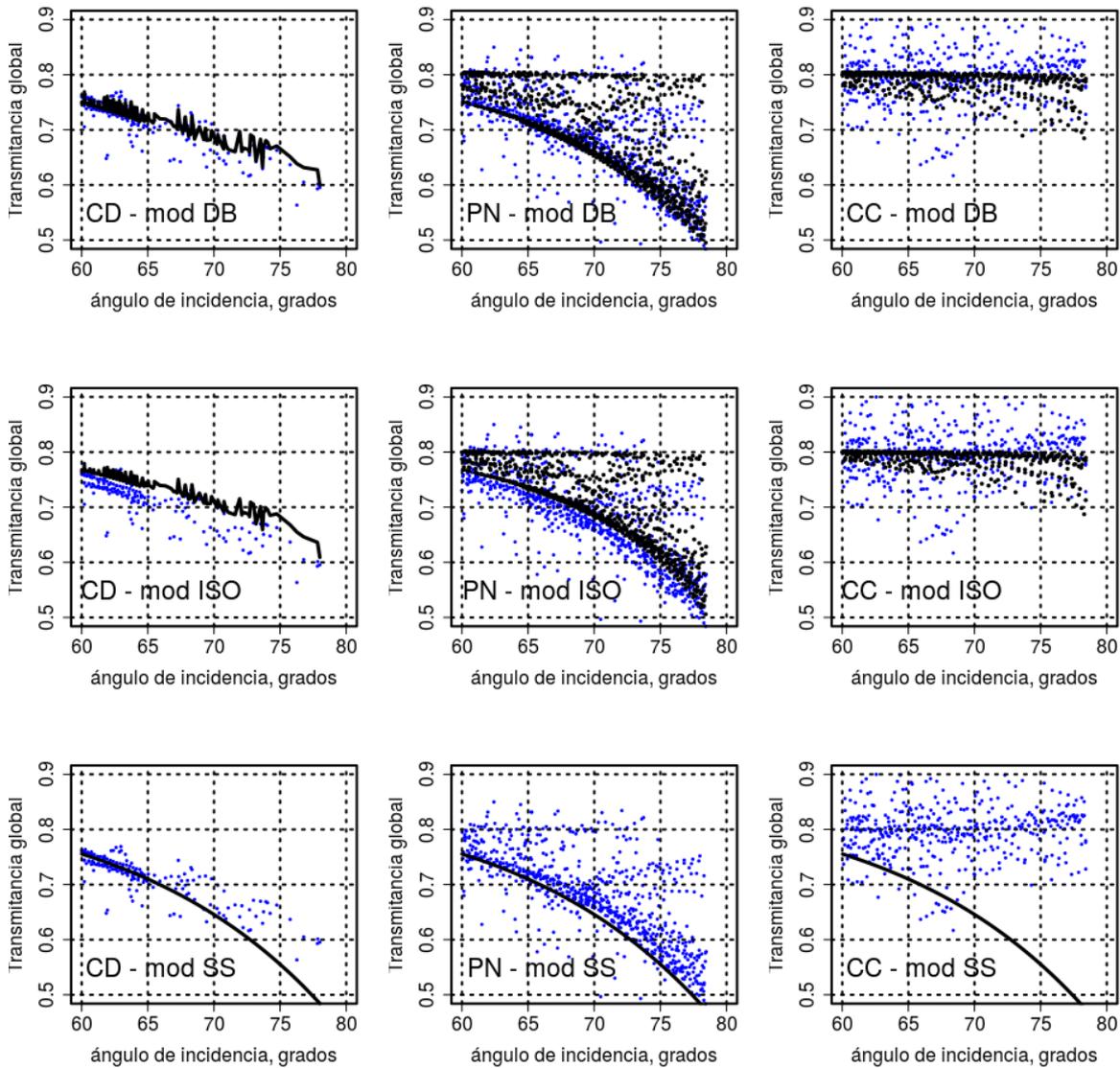


Figura 5: Transmitancia experimental (puntos azules) y modelos para cada condición de cielo y para ángulos de incidencia mayores a 60°. Los modelos se organizan por filas, las condiciones de cielo (CD, PN, CC) por columna.

### 2.3 Modelos de transmitancia con modelado de fracción difusa

Los mejores modelos en las condiciones predominantes de nubosidad, son aquellos que tratan por separado la irradiancia directa y la difusa, pero requieren un conocimiento a-priori de la fracción difusa. Es poco frecuente que un usuario típico cuente con medidas de irradiancia difusa para poder utilizar los modelos que tratan por separado ambas componentes de radiación. No obstante, es posible estimar la fracción difusa a partir del índice de claridad y algunas variables auxiliares como la masa de aire (Abal et al. 2017). Esto implica un aumento en la incertidumbre en la estimación de la transmitancia global, debido al error en la estimación de la fracción difusa.

Uno de los modelos de fracción difusa de mejor desempeño para el clima considerado en este trabajo es debido a (Ruiz Arias y Gueymard, 2015). Parametriza la fracción difusa con una doble exponencial en términos del índice de claridad  $k_t$  y la masa de aire  $m$ ,

$$f_d = a_0 + a_1 e^{(-\exp(a_2 + a_3 k_t + a_4 k_t^2 + a_5 m + a_6 m^2))} \quad (9)$$

A estos efectos, la masa de aire se calcula usando la parametrización de (Kasten y Young, 1982) que incluye efectos de refracción en la atmósfera. Los coeficientes de este modelo se han ajustado específicamente para el territorio del Uruguay y el mismo estima la fracción difusa con una incertidumbre de 20% de la media (Abal et al, 2017). Usando la ec. (9) es posible estimar la transmitancia global con los modelos DB e ISO que tratando en forma separada las componentes directa y difusa. El desempeño de estos modelos en estas condiciones se muestra en la Tabla 3.

TABLA 3: indicadores (relativos a la media de las medidas) de los modelos DB e ISO con modelado de fracción difusa, ec. (9), desglosados por ángulo de incidencia y tipo de cielo.

| rMBD para $\theta < 60^\circ$ |      |      |      |        |
|-------------------------------|------|------|------|--------|
| MODELO                        | CD   | PN   | CC   | Global |
| DB                            | 1.5  | 2.2  | -3.6 | 1.1    |
| ISO                           | 0.8  | 3.2  | 0.1  | 1.9    |
| $\tau_{med}$                  | 0.78 | 0.72 | 0.80 | 0.75   |

| rMBD para $\theta > 60^\circ$ |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|
| MODELO                        | CD   | PN   | CC   |
| DB                            | 2.5  | 4.8  | -3.3 |
| ISO                           | 1.1  | 4.8  | 0.6  |
| $\tau_{med}$                  | 0.71 | 0.68 | 0.79 |

| rRMSD (%) para $\theta < 60^\circ$ |     |     |     |        |
|------------------------------------|-----|-----|-----|--------|
| MODELO                             | CD  | PN  | CC  | Global |
| DB                                 | 3.0 | 6.5 | 6.7 | 7.5    |
| ISO                                | 3.0 | 6.5 | 5.5 | 7.2    |

| rRMSD para $\theta > 60^\circ$ |     |     |     |
|--------------------------------|-----|-----|-----|
| MODELO                         | CD  | PN  | CC  |
| DB                             | 4.9 | 8.1 | 7.4 |
| ISO                            | 5.5 | 8.0 | 6.0 |

Comparando estos indicadores con sus correspondientes en la Tabla 1 (en la cual la fracción difusa es medida) se puede concluir que el efecto de estimar la fracción difusa no es muy significativo, elevando los indicadores globales menos de 1 punto %.

El hecho de que frecuentemente no se cuente con información detallada sobre el acristalamiento, ni sobre la separación directa-difusa, obliga al uso de modelos genéricos, como el SS o el constante. Es posible combinar ambos modelos en uno, con la fracción difusa calculada a partir de la Ec. (9) para obtener mejor desempeño.

## 2.4 Aspectos energéticos

Una de las razones por las cuales es importante conocer la transmitancia de una cubierta transparente para realizar un balance energético de largo plazo para el sistema. A partir del Año Meteorológico Típico para la ciudad de Salto, es posible conocer la cantidad de energía solar por metro cuadrado que se puede esperar anualmente en una superficie horizontal. En la primera fila de la Tabla 4 se muestran los valores en GJ/m<sup>2</sup> de irradiación solar anual (para horas claras, parcialmente nubladas y nubladas) incidente, Hin. En las filas siguientes se muestran los valores que deberían transmitirse a partir de cada modelo considerado, incluyendo el uso de un valor constante de transmitancia en incidencia normal.

Tabla 4: Irradiación solar global horizontal anualizada (GJ/m<sup>2</sup>) incidente y transmitida bajo los diferentes modelos considerados desglosada por condición de cielo.

|          | CD   | PN   | CC   | TOTAL |
|----------|------|------|------|-------|
| Hin      | 3.10 | 2.89 | 0.33 | 6.31  |
| Ht (DB)  | 2.56 | 2.21 | 0.26 | 5.03  |
| Ht (ISO) | 2.57 | 2.24 | 0.26 | 5.07  |
| Ht (SS)  | 2.58 | 2.18 | 0.25 | 5.00  |
| Ht (CTE) | 2.45 | 2.28 | 0.26 | 4.99  |

Los diferentes modelos dan predicciones diferentes respecto a la radiación difusa transmitida y, para el clima analizado, la cantidad de horas con algún tipo de nubosidad es una fracción importante del total. No obstante, al analizar la energía total transmitida a través de una cubierta de vidrio transparente horizontal, las diferencias entre los modelos no resultan determinantes. Todos dan un total anual transmitido de aproximadamente 5.0 GJ/m<sup>2</sup> con desvíos inferiores a 2 % de esta cantidad. Esta robustez del total anualizado se debe a que la energía transmitida en el total de horas nubladas es baja (del orden del 0,5 %) respecto al total. Las horas parcialmente nubladas duplican a las horas despejadas (Tabla 2), pero sin embargo la energía transmitida en total para cada una de esas categorías es casi equivalente. Si se toma como referencia el modelo DB (es el que presenta menor desviación respecto a los datos medidos), se observa que los otros modelos presentan desvíos entre 1 a 2% en la energía total transmitida a lo largo de un año.

## 3. CONCLUSIONES

Se han considerado y evaluado cuatro modelos para transmitancia solar de coberturas vidriadas. Se ha utilizado un vidrio transparente sobre plano horizontal, para descartar efectos de reflectividad de superficies circundantes. A efectos de evaluar el desempeño en las condiciones climáticas más habituales, se realizó un análisis por ángulo de incidencia y por condición de cielo.

La transmitancia solar global de una cubierta transparente debe ser modelada teniendo en cuenta la dirección de incidencia y modelando por separado las componentes directa y difusa de la radiación incidente, ya que la transmitancia difusa es independiente de la dirección de incidencia. Bajo cielo con nubosidad (parcial o total) los modelos como (DB

e ISO) que separan las componentes directa y difusa tienen desempeños significativamente superior al de modelos que solo consideran la irradiancia global incidente. Las condiciones predominantes en el clima del Uruguay son las de cielo parcialmente nublado, por lo que es importante modelar la transmitancia difusa por separado. El uso de modelos de estimación de la fracción difusa afecta poco el desempeño de los modelos de transmitancia, por lo que es una alternativa válida si no se cuenta con medidas de radiación difusa.

Los modelos con separación, (DB e ISO) estiman la transmitancia con desvíos entre 6 y 7% para ángulos de incidencia menores a 60° y teniendo en cuenta todas las condiciones de cielo. Los modelos genéricos (SS o constante) no requieren información sobre el acristalamiento, ni la fracción difusa, pero presentan desvíos mayores, entre 11 y 14%. Es por lo tanto recomendable separar previamente la irradiancia difusa incidente y usar modelos de transmitancia que traten en forma diferenciada ambas componentes de la irradiancia solar. El hecho de que frecuentemente no se cuente con información detallada sobre el acristalamiento, ni sobre la separación directa-difusa, obliga al uso de modelos genéricos, como el SS o el constante. El primero tiene desempeño aceptable en condiciones despejadas y el segundo en condiciones de cielo cubierto. Este trabajo muestra que es posible combinarlos para obtener un modelo genérico con mejor desempeño que cada modelo por separado. En términos de la energía anual transmitida por un acristalamiento horizontal, el modelado de la transmitancia solar no es determinante.

## REFERENCIAS

- Abal, G., Alonso-Suárez, R., Aicardi, D., Laguarda, A., 2017. Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay, *Solar Energy* 141 (2017) 166–181.
- Alonso-Suárez R., Bidegain, M., Abal, G., Modernell, P., 2016. Año Meteorológico Típico para Aplicaciones de Energía Solar (AMTUES): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay. Memoria Técnica del LES/UdelaR, versión 2.4, (junio de 2016). Disponible en [http://les.edu.uy/wp-content/uploads/2016/06/MT\\_1-2\\_AMTUES\\_final.pdf](http://les.edu.uy/wp-content/uploads/2016/06/MT_1-2_AMTUES_final.pdf)
- Brandemuehl, M.J. and Beckman, W.A. 1980. Transmission of diffuse radiation through CPC and flat-plate collector glazings, *Solar Energy*, 24, pp. 511-513.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th edition, John Wiley & Sons.
- ISO9806, 2013. Solar test methods for solar thermal collectors, Norm ISO 9806-2013(E), Ed. International Organization for Standardization (ISO), p. 71.
- Karlsson, J. and Roos, A. 2000. Modelling the angular behaviour of the total solar energy transmittance of windows, *Solar Energy* 69, 321–329.
- Kasten F. and Young A.T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl. Opt.* 28(22), 4735–4738.
- J. Ruiz-Arias et al., Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 881.
- Schultz, J.M. and Svendsen, S. 1998. Winsim: A simple simulation program for evaluating the influence of windows on heating demand and risk of overheating. *Solar Energy* 63, pp. 251-258.
- Song, S. and Haberl, J.S. 2017. Simplified field measurement and verification of global solar transmittance for glazing samples under natural clear-sky conditions, *Solar Energy*, 155, 706-714.

## APÉNDICE A: Glosario

Las magnitudes espectrales están referidas al ancho de banda de la radiación solar (300 – 3000 nm)

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| $G_t, G_{bt}, G_{dt}$            | irradiancia (global, directa, difusa) transmitida por la cubierta plana transparente ( $w/m^2$ ) |
| $G_i, G_{bi}, G_{di}$            | irradiancia solar (global, directa, difusa) incidente sobre una superficie plana ( $w/m^2$ )     |
| $\tau_g = G_t/G_i$               | transmitancia global   |
| $\tau_b = G_{bt}/G_{bi}$         | transmitancia directa  |
| $\tau_d = G_{dt}/G_{di}$         | transmitancia difusa   |
| $f_d = G_{di}/G_i$               | fracción difusa  |
| $r_{\perp}$ y $r_{//}$           | reflectividad de radiación polarizada perpendicular o paralelo al plano de incidencia            |
| $\theta$                         | ángulo de incidencia de la irradiancia directa sobre una superficie transparente (grados)        |
| $\theta'$                        | ángulo de incidencia de la irradiancia directa refractada en el material transparente (grados)   |
| $\tau_a = \exp(-KL/\cos\theta')$ | fracción de la irradiancia que llega al material que no es absorbida                             |
| L                                | espesor de la cobertura transparente, supuesto uniforme (m)                                      |
| K                                | coeficiente de extinción del material ( $m^{-1}$ )   |
| n                                | índice de refracción del material transparente   |
| $KL/\cos\theta'$                 | espesor óptico   |
| $\theta_{di}$                    | ángulo de incidencia efectivo para el cual la transmitancia directa coincide con la difusa       |
| $G_h, G_{dh}$                    | Irradiancia solar global (o difusa) sobre plano horizontal                                       |
| $G_{0h}$                         | irradiancia solar extraterrestre incidente sobre plano horizontal                                |
| $k_t = G_h/G_{0h}$               | índice de claridad   |
| $f_d = G_{dh}/G_h$               | fracción difusa  |
| m                                | masa de aire (se usa la formulación de Kasten, 1984)   |

**Abstract.** *Different models for the solar transmittance of glazings are considered. Experimental data for the global and diffuse solar irradiance incident and transmitted by a transparent horizontal glazing is used to evaluate the performance of several transmittance models under different conditions. As expected, models with adjustable parameters perform significantly better than generic models. However, it is possible to use separation models for diffuse fraction to improve the performance of generic models. In terms of transmitted energy over a typical year, all transmittance models perform similarly.*

**Key words:** transmittance, diffuse irradiance, thermal balance