

EFICACIA LUMINOSA EN SUPERFICIES HORIZONTALES EN LA ESTACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR E ILUMINACIÓN DE ALTA CALIDAD DEL IDMP EN MADRID

M. GONZÁLEZ REDONDO^A, A. SOLER^A, C. MORÓN^B Y A. GARCÍA^B

Grupo de Sensores y Actuadores, Universidad Politécnica de Madrid

a) Dpto. de Física e Instalaciones Aplicadas a la Edificación. ETS Arquitectura; mer.gonzalez@upm.es†

b) Dpto. de Tecnología de la Edificación. EU Arquitectura Técnica

†autor para la correspondencia

En la estación de radiación solar e iluminación de alta calidad del International Daylight Measurement Program (IDMP) en Madrid, ubicada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (40° 25' N, 3° 41' W) se ha realizado un estudio detallado sobre la eficacia luminosa de la radiación global, difusa y directa en superficies horizontales para todo tipo de cielos (despejados, cubiertos y parcialmente cubiertos). La parte experimental ha consistido en tomar medidas durante 5 segundos cada 15 minutos, diariamente, de iluminancias e irradiancias globales y difusas durante 15 meses, a partir de las cuales se han deducido modelos para determinar iluminancias, irradiancias y eficacias luminosas de la radiación solar para todo tipo de cielos en función de la altitud solar, considerando pequeños intervalos de 2,5°. El principal resultado obtenido es constatar que es posible deducir un modelo de eficacia luminosa a partir de modelos de iluminancia e irradiancia obtenidos previamente, muy útiles para estimar los niveles de iluminación en la edificación.

At the solar radiation and daylighting Spanish station of the International Daylight Measurement Program (IDMP) located at the Technical School of Architecture in Madrid (40° 25' N, 3° 41' W) we have studied the luminous efficacy of global, diffuse and direct solar radiation on a horizontal surface for all sky conditions (clear, overcast and intermediate). The experimental data used are mean hourly values of global and diffuse illuminances and irradiances measured on a horizontal surface during 15 months. We have used these data to develop the empirical models for illuminance, irradiance and luminous efficacy of global, diffuse and direct solar radiation, for all sky conditions as a function of the solar altitude α at every 2,5° interval. The main result is verify that is possible to develop a luminous efficacy model from illuminance and irradiance models developed previously, that is very useful to estimate daylighting levels in building.

Palabras Clave. Eficacia luminosa 88.05.Tg, iluminación natural 88.40. mx , radiación solar 88.40.fc.

INTRODUCCIÓN

El proyecto del Internacional Daylight Measurement Program (IDMP) de la Comisión Internacional de la Iluminación con sede en Viena (Austria) comenzó en el año 1991 y dispone actualmente de 48 estaciones especializadas en todo el mundo en medidas de radiación solar e iluminación de alta calidad, lo que le hace ser una buena fuente de información climática para muchos campos de investigación distintos. Una de ellas es la estación española de Madrid, ubicada en la terraza de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (40° 25' N, 3° 41' W) que entró en este programa IDMP en el año 1993. Dentro de la clasificación de los climas de Köppen el símbolo para la parte central de España donde está localizada esta estación es Csb, que corresponde a clima lluvioso con estación seca en verano.

Desde entonces en esta estación se han realizado medidas con los distintos tipos de cielo (despejados, cubiertos y parcialmente cubiertos): de iluminancias globales y difusas, irradiancias globales y

difusas, luminancias y luminancias cenitales, obteniéndose a partir de éstas muchos trabajos y resultados, algunos de los cuales se exponen a continuación.

Conocer el flujo luminoso incidente en una superficie exterior es necesario para diferentes objetivos entre los que destacan poder estimar los niveles de iluminación en recintos y obtener distribuciones de iluminancias para cuantificar ahorros energéticos con el uso adecuado de controles fotoeléctricos.

EFICACIAS LUMINOSAS DE RADIACIÓN SOLAR EN SUPERFICIES HORIZONTALES

La magnitud física que mide la parte de energía electromagnética de la radiación solar que se usa para iluminar se denomina eficacia luminosa (K) y se obtiene dividiendo la iluminancia L (lux = lm/m²) entre la irradiancia E (W/m²).

$$K = \frac{L}{E} \text{ (lm/W)} \quad (1)$$

Tanto la iluminancia como la irradiancia son magnitudes que se pueden medir directamente en nuestra estación IDMP en Madrid. Para este estudio se han tomado medidas durante 5 segundos cada 15 minutos, diariamente, de iluminancias global (Lg) y difusa (Ld) y de irradiancias global (Eg) y difusa (Ed) en superficies horizontales, durante 15 meses, en función de la altitud solar (α) considerando pequeños intervalos de 2,5°.

A partir de estas medidas se han obtenido modelos empíricos para determinar iluminancias e irradiancias globales y difusas en función de la altitud solar (α) para los distintos tipos de cielo, que posteriormente se han utilizado para deducir los valores de las eficacias luminosas correspondientes.

El modelo general propuesto para la iluminancia y la irradiancia, así como la posterior eficacia luminosa de la radiación solar en superficies horizontales es de la forma:

$$K = A (\text{sen } \alpha)^B e^{-C\alpha} \Delta^{-D} \quad (2)$$

siendo A, B, C y D coeficientes empíricos locales relativos a las condiciones de cielo. Para cielos despejados, por ejemplo, el término Δ desaparece dado que D es aproximadamente nulo, pero cuando aumenta la nubosidad D empieza a ser más relevante.

EFICACIA LUMINOSA GLOBAL

A partir de los datos experimentales registrados de iluminancias globales (Lg) e irradiancias globales (Eg) para distintos valores de la altitud solar (α) con cielos despejados y utilizando la ecuación (1) para la eficacia luminosa global (Kg):

$$K_g = \frac{L_g}{E_g} \quad (3)$$

se calculan los valores de ésta en función de la altitud solar cada 2,5°.

De las medidas de iluminancias e irradiancias globales para cielos despejados se han deducido los modelos con las expresiones siguientes[1,2,3]:

$$L_g = 150,07 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{1,301} e^{-0,005\alpha} \text{ (lux)} \quad (4)$$

$$E_g = 1159,24 (\text{sen } \alpha)^{1,179} e^{-0,0019\alpha} \text{ (W / m}^2\text{)} \quad (5)$$

que tras introducirlas en la ecuación (3) se deduce el modelo para calcular la eficacia luminosa de la radiación solar global en cielos despejados en función de la altitud solar:

$$K_g = 129,46 (\text{sen } \alpha)^{0,122} e^{-0,0029\alpha} \text{ (lm/W)} \quad (6)$$

Para comprobar la exactitud del modelo se han calculado los valores de eficacia luminosa a partir de los datos experimentales registrados de iluminancias e irradiancias para distintos valores de α y se han representado en la figura 1, donde también se representa la curva que responde al modelo propuesto.

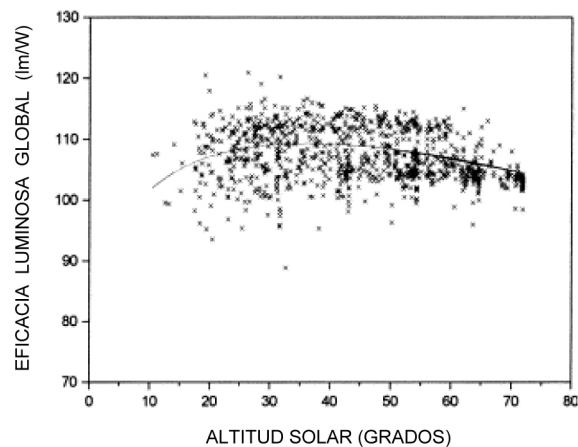


Figura 1. Eficacia luminosa global para cielos despejados: datos experimentales y resultado del modelo.

Para cielos cubiertos o parcialmente cubiertos[4] hay que añadir en la ecuación (6) el factor $\varphi_L(\Delta)$ correspondiente al índice de brillo.

De los datos experimentales de iluminancias para todo tipo de cielos se obtiene el factor $\varphi_L(\Delta)$ como el cociente entre la iluminancia global en cielos cubiertos (Lgc) y la iluminancia global en cielos despejados (Lg) [4]:

$$\varphi_L(\Delta) = \frac{L_{gc}}{L_g} = 1,620 \Delta^{0,930} \quad (7)$$

Análogamente para los valores de irradiancias globales se obtiene $\varphi_E(\Delta)$ como el cociente entre la irradiancia global con cielos cubiertos y la correspondiente a cielos despejados:

$$\varphi_E(\Delta) = \frac{E_{gc}}{E_g} = 1,636 \Delta^{1,035} \quad (8)$$

De donde se deduce el factor correspondiente al índice de brillo de la eficacia luminosa global, $\varphi_K(\Delta)$:

$$\varphi_K(\Delta) = \frac{\varphi_L(\Delta)}{\varphi_E(\Delta)} = 0,990 \Delta^{-0,105} \quad (9)$$

Por tanto, el modelo para determinar la eficacia luminosa global en cielos cubiertos, utilizando las ecuaciones (6) y (9) es:

$$K_{gc} = K_g \cdot \varphi_K(\Delta)$$

$$K_{gc} = [129,46 (\text{sen } \alpha)^{0,122} e^{-0,0029\alpha}] 0,990 \Delta^{-0,105}$$

$$K_{gc} = 128,16 (\text{sen } \alpha)^{0,122} e^{-0,0029\alpha} \Delta^{-0,105} \quad (\text{lm/W}) \quad (10)$$

EFICACIA LUMINOSA DIFUSA

Los estudios de eficacia luminosa de radiación difusa son menos usuales que los de radiación global pero su cálculo es similar al anterior.

A partir de los datos experimentales de iluminancias e irradiancias difusas en superficies horizontales para cielos despejados y aplicando la ecuación (1) se han calculado los valores de la eficacia luminosa difusa en función de la altitud solar, α , que se representa en la figura 2.

Para cielos despejados se considera como única variable la altitud solar (α), y partiendo de las medidas experimentales se obtienen, en función de $\alpha^{4,5,6}$, los modelos matemáticos siguientes para determinar la iluminancia difusa (L_d):

$$L_d = 16,48 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{0,578} \quad (\text{lux}) \quad (11)$$

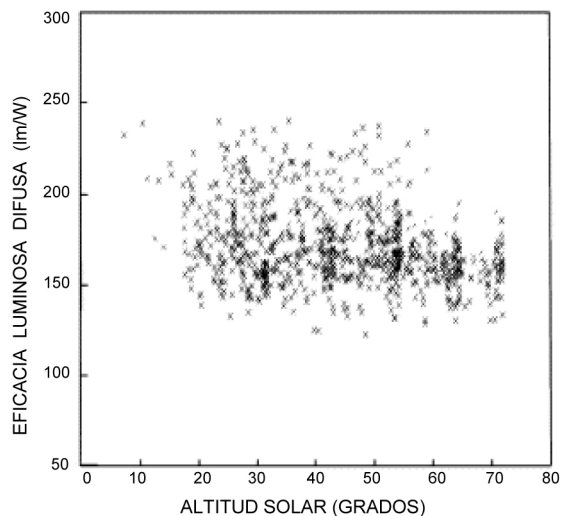


Figura 2. Eficacia luminosa difusa en función de la altitud solar para cielos despejados.

Y la irradiancia difusa (E_d):

$$E_d = 102,57 (\text{sen } \alpha)^{0,692} \quad (\text{W/m}^2) \quad (12)$$

Aplicando la ecuación (1) a la radiación solar difusa:

$$K_d = \frac{L_d}{E_d} \quad (13)$$

se deduce el modelo para determinar la eficacia luminosa de la radiación solar difusa para cielos despejados:

$$K_d = 160,67 (\text{sen } \alpha)^{-0,114} \quad (\text{lm/W}) \quad (14)$$

Para los otros tipos de cielo se introduce una segunda variable independiente, el índice de brillo (Δ), obteniendo para el mejor ajuste las expresiones siguientes:

$$L_d = 117,09 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{0,942} \Delta^{0,733} \quad (\text{lux}) \quad (15)$$

$$E_d = 1350,79 (\text{sen } \alpha)^{0,976} \Delta^{0,999} \quad (\text{W/m}^2) \quad (16)$$

A partir de estas expresiones se deduce el modelo para calcular la eficacia luminosa de la radiación solar difusa para todo tipo de cielos:

$$K_d = \frac{L_d}{E_d} = 86,68 (\text{sen } \alpha)^{-0,034} \Delta^{-0,266} \quad (\text{lm/W}) \quad (17)$$

EFICACIA LUMINOSA DIRECTA

En la estación IDMP de Madrid se miden iluminancias e irradiancias globales y difusas pero no directas. Las iluminancias directas (L_b) y las irradiancias directas (E_b) se obtienen con las diferencias entre los valores globales y difusos [8].

$$L_b = L_g - L_d \quad (18)$$

$$E_b = E_g - E_d \quad (19)$$

A partir de los valores obtenidos de L_b y de E_b , con cielos despejados, se deducen los modelos [8] para calcular estas magnitudes en función de la elevación sol α :

$$L_b = 161,38 \cdot 10^3 (\text{sen } \alpha)^{1,615} e^{-0,0086\alpha} \quad (\text{lux}) \quad (20)$$

$$E_b = 1201,87 (\text{sen } \alpha)^{1,346} e^{-0,0041\alpha} \quad (\text{W/m}^2) \quad (21)$$

Una vez conocidas las iluminancias e irradiancias directas, utilizando la ecuación (1) para la radiación solar directa:

$$K_b = \frac{L_b}{E_b} \quad (22)$$

y las ecuaciones (20) y (21) se puede deducir el modelo para determinar la eficacia luminosa directa para cielos despejados en función de la altitud solar α , con valores medios calculados para intervalos de 2,5°:

$$K_b = 134,27 (\text{sen } \alpha)^{0,269} e^{-0,0045\alpha} \quad (\text{lm/W}) \quad (23)$$

Los valores medios de K_b obtenidos a partir de los datos experimentales y los dados por el modelo (23) se representan en la gráfica de la figura 3, ambos en función de la altitud solar considerando intervalos de $2,5^\circ$.

Para otro tipo de cielos[9] las expresiones de los modelos de iluminancia y de irradiancia directas se pueden obtener multiplicando las expresiones anteriores por un factor de atenuación $\varphi(\Delta)$, correspondiente al índice de brillo. Para los valores de iluminancias directas se obtiene como el cociente entre la iluminancia directa (L_b) para cualquier tipo de cielo y la iluminancia directa en cielos despejados ($L_{b\text{ desp.}}$):

$$\varphi_L(\Delta) = \frac{L_b}{L_{b\text{ desp.}}} = 1,101 e^{-12,266\Delta^2} \quad (24)$$

Y, análogamente, para las irradiancias directas:

$$\varphi_E(\Delta) = \frac{E_b}{E_{b\text{ desp.}}} = 1,087 e^{-11,053\Delta^2} \quad (25)$$

Una ecuación similar se obtiene para $\varphi_K(\Delta)$:

$$\varphi_K(\Delta) = \frac{\varphi_L(\Delta)}{\varphi_E(\Delta)} = 1,013 e^{-1,213\Delta^2} \quad (26)$$

Por tanto:

$$K_b = 136,02 (\text{sen } \alpha)^{0,269} e^{-0,0045\alpha - 1,213\Delta^2} \quad (\text{lm} / \text{W}) \quad (27)$$

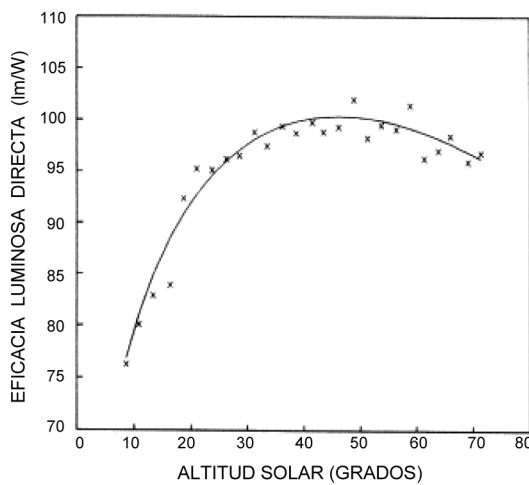


Figura 3. Eficacia luminosa directa con cielos despejados en función de la altitud solar.

CONCLUSIONES

Utilizando los datos experimentales obtenidos en la estación española de la IDMP en Madrid se ha realizado un estudio muy completo en el cual se han deducido varios modelos matemáticos para calcular iluminancias, irradiancias y eficiencias luminosas en superficies horizontales. El principal resultado obtenido es constatar que es posible deducir un modelo de eficacia luminosa a partir de modelos de iluminancia e irradiancia obtenidos previamente. Además, actualmente se dispone de mucha información sobre iluminación en Madrid que se puede aplicar en la edificación: evaluando los sistemas de iluminación, estimando los niveles de iluminancia en recintos con finalidades de diseño y, también, comparándola con el software existente, con la finalidad de obtener un máximo confort visual a partir de iluminación natural, con el consiguiente ahorro energético.

- [1] L. Robledo y A. Soler, "Luminous efficacy of global solar radiation for clear skies." *Energy Conversion & Management*. 41 (2000), 1769-1779.
- [2] A. Soler and L. Robledo, "Global luminous efficacy on vertical surfaces for all sky types." *Renew. Energy* 19 (2000), 61-64.
- [3] A. Soler, "The dependence on solar elevation of the correlation between monthly average hourly diffuse and global radiation." *Solar Energy* 41 (1988), 335-340.
- [4] L. Robledo, A. Soler y E. Ruiz, "Luminous efficacy of global solar radiation on a horizontal surface". *Theoretical and Applied Climatology*. 69 (2001), 123-134.
- [5] L. Robledo y A. Soler, "On the luminous efficacy of diffuse solar radiation". *Energy Conversion & Management*. 42 (2001), 1181-1190.
- [6] A. Soler, "Dependence on solar elevation and the daily sunshine fraction of the correlation between monthly average hourly diffuse and global radiation". *Solar Energy* 48 (1992), 221-225.
- [7] L. Robledo and A. Soler, "Estimation of direct illuminance on a horizontal surface for clear and intermediate skies". *Renew. Energy* 19 (2000), 55-60.
- [8] L. Robledo y A. Soler, "Luminous efficacy of direct solar radiation for clear skies". *Energy* 25 (2000), 689-701.
- [9] L. Robledo y A. Soler, "Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types". *Energy* 26 (2001), 669-67.