

Anexos

- I. Conceptos básicos sobre magnitudes Luminotécnicas, Flujo luminoso, Intensidad luminosa, Iluminancia y Luminancia
- II. Encuesta a gestores del alumbrado
- III. Análisis estadístico de datos históricos
- VI. Grado de protección mecánica de luminarias
- V. Relaciones Beneficio/Costo en el diseño de instalaciones, tablas de análisis de datos
- VI. Trabajos publicados por el autor con referencia en la tesis
 - VI.1 San Martín R., Manzano E.R. (1997) Gestión y explotación de instalaciones: aspectos a considerar en la elaboración de proyectos, Actas del XIII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, Volumen II, pág. 919 a 925. ISBN : 84-88783-30-2. Sevilla, España.
 - VI.2 San Martín R., Manzano E.R. (1998) A study of indirect energy cost due to reduced urban lighting maintenance, Proceedings of the National Lighting Conference 1998, Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), page 219 to 223, University of Lancaster, UK.
 - VI.3 Manzano E.R., San Martín R. (1999) Procedure for continue urban lighting management evaluation. Proceeding 24th Session de la CIE, Commission Internacionale de Léclairage , page 234 to 238, Warsaw, Polonia.
 - VI.4 San Martín S., Manzano E.R., Albert V. (1998) Gestión y explotación de instalaciones de alumbrado. Actas de las Jornades Tècniques sobre Energia, pag. 299 a 310. Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya, Barcelona, España.
 - VI.5 Manzano E.R., Cabello A.J. (2000) Visibility measurements with CCD in road lighting. Journal Ingineria Iluminatului, Tempus-Phare Program, pag 59 a 63. ISBN 1454-5837. Editorial Mediamira. Cluj-Napoca, Rumania.

I.1.1 Sensibilidad espectral del ojo humano

La sensibilidad del ojo humano no es uniforme para todas las radiaciones. Varía con la longitud de onda en la forma que se muestra en la figura 1.2. La curva corresponde al ojo adaptado a condiciones claras (visión fotópica o diurna). Con el fin de proporcionar una base estándar para la comparación de radiaciones con diferentes longitudes de onda, la CIE ha adoptado dos funciones particulares de eficiencia luminosa espectral que están definidas por valores tabulados. Estas son la función $V(\lambda)$ referida a la visión fotópica (diurna) y que se muestra en la figura 1.2, y la función $V'(\lambda)$ referida a visión escotópica (nocturna). Los valores de la función $V(\lambda)$ se encuentran tabulados a intervalos de longitudes de onda de 1nm sobre el rango de 360 hasta 830nm^[13]. Esta función tiene su valor máximo (unitario) en $\lambda = 555\text{nm}$.

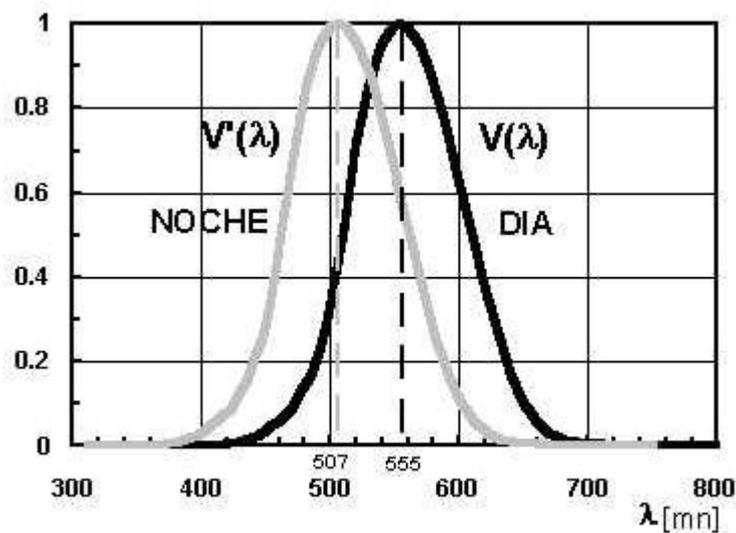


Figura I.2.- Sensibilidad espectral relativa del ojo humano, para el observador estándar de la CIE.

I.2 Magnitudes fundamentales de la iluminación

I.2.1 Flujo radiante o Potencia Radiante

Se entiende por flujo radiante ϕ_e a la potencia total en vatios emitida o recibida de radiación electromagnética. Abarca todo el espectro electromagnético, puede incluir tanto componentes visibles como no visibles. El flujo espectral radiante $\phi_e(\lambda)$ es el flujo radiante por unidad de intervalo de longitud de onda, considerado usualmente como 1 nm, de manera que es expresado como vatios por 10^{-9} metros (W nm^{-1}). El flujo radiante se determina integrando $\phi_e(\lambda)$ sobre el espectro total.

$$Fe = \int_0^{\infty} Fe(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{I.2-1}$$

I.2.2 Flujo Luminoso

En el rango visible del espectro electromagnético, $360\text{nm} \leq \lambda \leq 830\text{nm}$, se considera que el flujo radiante tiene asociado un flujo luminoso Φ_v el cual es una medida de la respuesta visual. La unidad de flujo luminoso es el lumen expresado como [lm].

El lumen se puede definir como el flujo luminoso asociado con un flujo radiante de $1/683\text{W}$ para $\lambda = 555\text{nm}$ en aire; para cualquier otra longitud de onda el flujo luminoso asociado es $V(\lambda)[\text{lm}]$. Para encontrar el flujo luminoso dF_v asociado con el flujo radiante espectral $F_e(\lambda)$ sobre un rango $d\lambda$, el procedimiento es el siguiente. Por definición:

$$dF_v = 683 \cdot V(\lambda) \cdot F_e(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{I.2.2-1}$$

integrando sobre el rango visible:

$$F_v = \int_{380}^{780} V(\lambda) F_e(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{I.2.2-2}$$

Como ejemplo una lámpara incandescente de 100W emite un flujo luminoso promedio de 1350 lm .

I.2.3 Eficacia luminosa

El término *eficacia luminosa* K de la radiación, es una medida de la capacidad de la radiación para producir sensación visual. Se la define como el cociente del flujo luminoso en [lm] y el flujo radiante en [W]: $K = F_v / F_e$

La *máxima eficacia luminosa espectral de radiación para visión fotópica* se conoce como K_m , cuyo valor es 683 [lm/W] . Para visión escotópica será $K'_m = 1700\text{ [lm/W]}$. Para cualquier otra distribución de flujo radiante la eficacia luminosa K será menor que K_m y el cociente K/K_m se conoce como la *eficiencia luminosa* de la radiación, denominada V . De esta definición surge el concepto de la función $V(\lambda)$ o *eficiencia luminosa espectral relativa* la cual, para $K_m = 683$ será: $V(\lambda) = K(\lambda)/683$.

I.2.4 Irradiancia e iluminancia

La irradiancia es el flujo radiante por unidad de área que incide sobre una superficie; la unidad de irradiancia es el vatio por metro cuadrado [W/m^2]

La iluminancia, simbolizada E , esta definida en forma similar que la irradiancia; la unidad es el lumen por metro cuadrado [lm/m^2] y se denomina lux [lx]. Si un elemento de área dA es iluminado por un flujo luminoso dF entonces

$$E = dF / dA \quad \text{I.2.4}$$

En el pasado las palabras "nivel de iluminación" o simplemente "iluminación" han sido utilizadas con el mismo significado que iluminancia. Se debe enfatizar que la iluminancia, como se la ha definido arriba, esta siempre referida a un plano determinado; por ello a veces se utiliza el termino iluminancia plana. El plano horizontal de referencia es usualmente uno horizontal, pero no es necesariamente así. Si la orientación del plano es modificada la iluminancia puede también cambiar.

I.2.5 Angulo sólido

Cuando se considera la radiación emitida desde una fuente puntual es útil la noción de tubos cónicos de flujo radiados desde un punto. Esto está asociado con el concepto de ángulo sólido. En la figura I.2.5-1 se presenta la medida en radianes de un ángulo sólido.

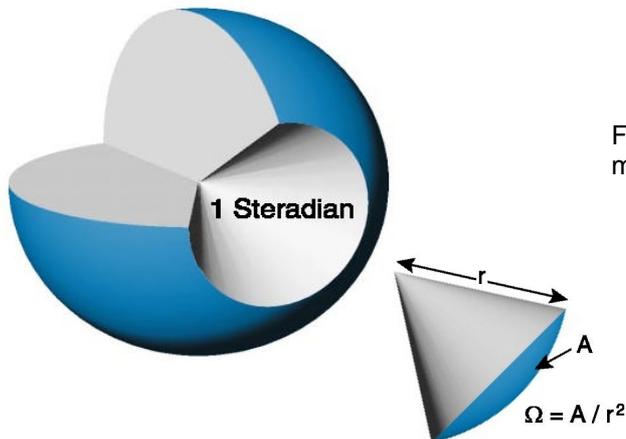


Figura I.2.5-1: Angulo sólido medido en estereoradianes

Cuando el área interceptada sobre la esfera (A) es igual a r^2 , donde r es el radio de la esfera, Ω , que es denominado un ángulo sólido, es un estereoradian [str]. Decimos que el área A subtende un ángulo sólido de 1 str al centro de la esfera. El área de la superficie de la esfera es $4\pi r^2$, por lo tanto existen 4π str rodeando a un punto en el espacio.

I.2.6 Intensidad luminosa de una fuente puntual

El flujo dF interceptado por un elemento de área dA en el punto P es el flujo emitido dentro de un ángulo sólido dW subtendido entre la fuente y el elemento dA ; se ha asumido que no se produce absorción de luz en el espacio entre la fuente y la superficie.

El cociente dF / dW se denomina intensidad luminosa I de la fuente en la dirección particular considerada; por lo tanto:

$$I = dF / dW \quad \text{I.2.6-1}$$

La unidad de I es el lumen por estereoradian [lm/str] o candela [cd]. La intensidad luminosa es entonces el flujo luminoso por estereoradian emitido en una dirección particular. La Intensidad radiante es definida en forma similar, como flujo radiante por estereoradian. Una lámpara incandescente de 100 W posee aproximadamente 100 cd, un faro para auto 50.000 cd.

Generalmente I varía con la dirección de la luz emitida. En el caso donde la intensidad luminosa es la misma para todas las direcciones se dice que la fuente es uniforme. Para una fuente uniforme puntual de intensidad luminosa de 1cd el flujo total emitido es 4π lm (ver figura I.2.6-1); este es el flujo emitido por la ahora obsoleta candela patrón. En la 16^{ava} Conferencia General sobre Pesas y Medidas, París 1979, se decidió que:

- La candela es la intensidad luminosa, en una dada dirección, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540.10^{12} y cuya intensidad radiante en esa dirección es 1/683 vatios por estereoradian.
- La candela así definida es la unidad básica aplicable a cantidades fotópicas (niveles de luz diurnos).

La frecuencia de $540 \cdot 10^{12}$ Hz corresponde a una longitud de onda de 555 nm en aire y entonces la definición anterior conduce a la definición del lumen dada anteriormente.

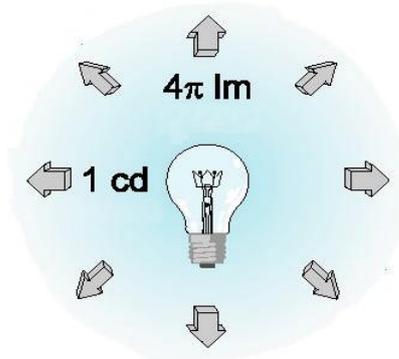


Figura I.2.6-1: Intensidad luminosa de 1cd para un flujo luminoso de 4π lm dentro de una esfera cuyo ángulo sólido es 4π

Cuando la distribución de intensidades luminosas en el espacio no es uniforme, se utiliza un sistema de representación espacial en coordenadas polares. La distribución de intensidades luminosas de las luminarias se indican en diagramas polares que suministran una descripción tridimensional de la distribución espacial de la luz. Cada valor de intensidad luminosa (en candelas cada 1000 Lm de la lámpara empleada) esta representado por tres valores, su magnitud, y dos ángulos: γ (gama) y C. El ángulo de elevación γ se mide respecto de la vertical por el centro de la luminaria. Los ángulos o planos C se originan en el centro de la luminaria. El plano $C_0 - C_{180}$ coincide con la dirección del camino, el plano $C_{90} - C_{270}$ es transversal al camino. El plano C_{90} siempre se ubica sobre el lado de la carretera y C_{270} sobre la acera.

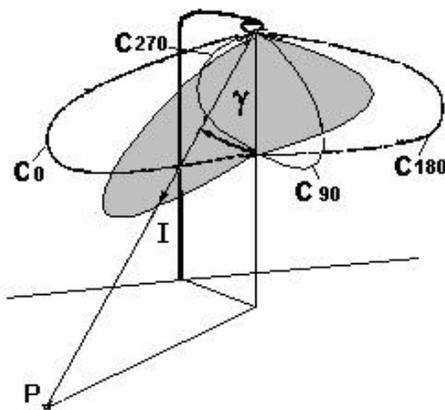


Figura I.2.6-2: Intensidad luminosa de la luminaria proyectada sobre el punto P

I.2.7 Iluminancia en términos de Intensidad luminosa

La iluminancia producida por una fuente sobre una superficie se define como:

$$E = dF / dA \quad \text{I.2.6-1}$$

El símbolo para la iluminancia es E , y la unidad el lux [lx] o lm/m^2 . En figura I.2.7-1 se representa el concepto de iluminancia sobre una superficie. Una superficie de 1m^2 sobre una esfera de radio 1m subtende un ángulo sólido de 1sr con la fuente ubicada en el centro si el flujo emitido dentro del ángulo sólido es de 1lm sobre una superficie de 1m^2 se producirá 1lx. Ejemplos para la iluminancia sobre la calzada durante la noche, la luz de la luna produce 0,2 lx, el alumbrado público de 20 a 40 lx. Durante el día un cielo de invierno hasta 20.000 lx, un cielo de verano hasta 100.000 lx.

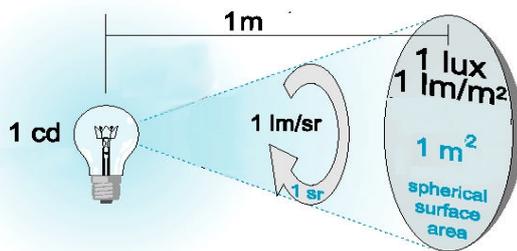


Figura I.2.7-1: Iluminancia sobre una superficie

Remplazando el flujo en términos de intensidad luminosa:

$$E = I \cdot dW / dA \quad 1.2.7-1$$

Para una superficie dA de un punto P que subtiende un ángulo γ con una fuente puntual a una distancia d la superficie proyectada por el ángulo sólido es $dA \cdot \cos \gamma$ con lo cual:

$$dW = dA \cos \gamma / d^2 \quad 1.2.7-2$$

sustituyendo en I.2.7-1 queda:

$$E = I \cdot \cos \gamma / d^2 \quad 1.2.7-5$$

La ecuación expresa la ley de la inversa del cuadrado y del coseno, de la iluminación de una fuente puntual.

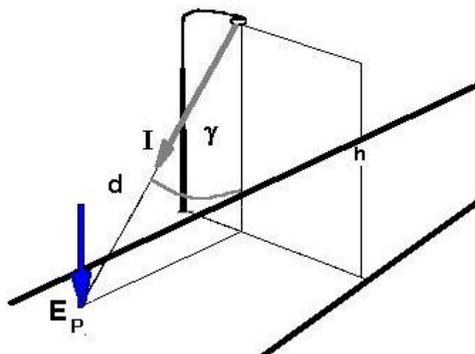


Figura I.2.7-2: Iluminancia Intensidad luminosa de la luminaria proyectada sobre el punto P

I.2.8 Iluminancia horizontal

La iluminancia horizontal se emplea como una forma de caracterizar el alumbrado para vías de circulación vehicular, donde la superficie a iluminar corresponde al plano horizontal de la calzada.

Para una luminaria ubicada a una altura h , ver figura I.2.7-5.2.10,

$$d = h / \cos \gamma \quad 1.2.8-1$$

remplazando en I.2.7-5, la iluminancia sobre un punto P de la calzada resulta:

$$E_p = I \cdot \cos^3 \gamma / h^2 \quad 1.2.7-5$$

donde:

E_p : iluminancia en el punto P sobre la calzada [lux].

I : intensidad del haz luminoso de la luminaria en la dirección al punto considerado [cd].

h : altura de montaje [m].

γ : ángulo de la proyección de la intensidad luminosa sobre la vertical al punto considerado

Como criterio de calidad del alumbrado se recomiendan valores medios sobre la calzada, promedio sobre una grilla definida de puntos, juntamente con regularidades, es decir relaciones entre el valor mínimo con el medio y mínimo con el máximo.

I.2.9 Luminancia

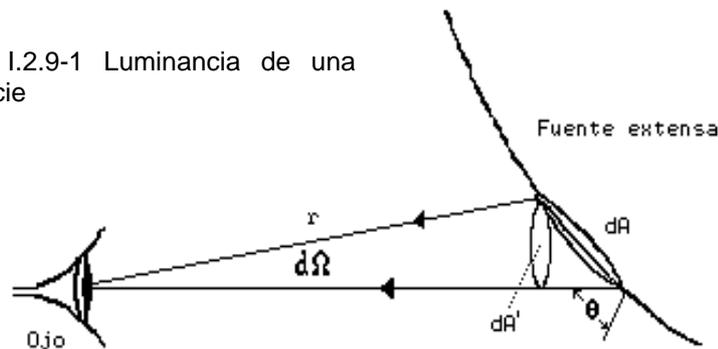
Para una fuente extendida, que no es pequeña comparada con su distancia desde el punto de observación, el concepto de intensidad luminosa no es directamente aplicable. Sin embargo una fuente extensa puede considerarse como un ensamble de pequeños elementos de superficie luminosos de área dA , cada uno de los cuales puede ser considerado como una fuente puntual.

La intensidad luminosa dI de cada elemento de superficie dA , visto desde una dirección particular, es proporcional al área proyectada dA' en esta dirección ver figura I.2.9-1 siendo la constante de proporcionalidad simbolizada con L ; por lo tanto

$$dI = L dA' \quad \text{I.2.9-1}$$

L es denominada la luminancia de la superficie y representa la intensidad luminosa por unidad de área proyectada (dA').

Figura I.2.9-1 Luminancia de una superficie



La luminancia está relacionada con la sensación visual de claridad, a pesar de las dos no son directamente equivalentes. La unidad de la luminancia es la candela por metro cuadrado [cd/m^2] que también puede expresarse como lúmenes por estereorradian por metro cuadrado [$\text{lm}/(\text{str}.\text{m}^2)$].

El concepto de luminancia se puede aplicar a cualquier superficie que está emitiendo luz por ejemplo, una lámpara incandescente de 100 W produce una $I = 100 \text{ cd}$. El bulbo opalino de la lámpara irradia en toda su superficie. La superficie es de 100 cm^2 . La luminancia de la superficie es $100 \text{ cd}/100 \text{ cm}^2 = 1 \text{ cd}/\text{cm}^2$ o $10.000 \text{ cd}/\text{m}^2$. o reflejando luz. Si el bulbo de la lámpara es claro, la luminancia es mucho más grande, por ejemplo: $100 \text{ cd}/0.1 \text{ cm}^2 = 1000 \text{ cd}/\text{cm}^2$ o $10.000.000 \text{ cd}/\text{m}^2$. Porque en este caso como superficie debe considerarse la del filamento que es de 0.1 cm^2 .

El concepto también se puede aplicar a una superficie que refleja la luz. La luz de una instalación de alumbrado ilumina la calle, pero es la luz reflejada por la superficie de la calle que llega a los ojos del observador lo que percibe como claridad. Esta es la luminancia de la calle.

La capacidad para conducir durante la noche esta relacionada con la claridad de la calzada vista por el conductor de un automóvil la cual encuentra su correlato con la luminancia. La luminancia de la calzada puede evaluarse a partir de la información de como distribuye la luz la instalación de alumbrado y de como es reflejada por la superficie de la calzada hacia el conductor.

La luminancia de un punto sobre la calzada puede calcularse a partir de la intensidad luminosa de la luminaria, la altura de montaje, la geometría de la misma respecto del punto y las características reflectivas de la superficie de la calzada. En una superficie difusora la luminancia puede calcularse como:

$$L_p = \frac{\mathbf{r} \times E_p}{\mathbf{p}} \quad 1.2.9-2$$

donde E_p es la iluminancia horizontal en el punto P y \mathbf{r} es el coeficiente de reflexión difusa de la superficie. El pavimento no se comporta como tal, teniendo cierto grado de direccionalidad la reflexión dependiente de los ángulos de incidencia de la luz, β y γ , ver figura I.2.9-2, por tanto:

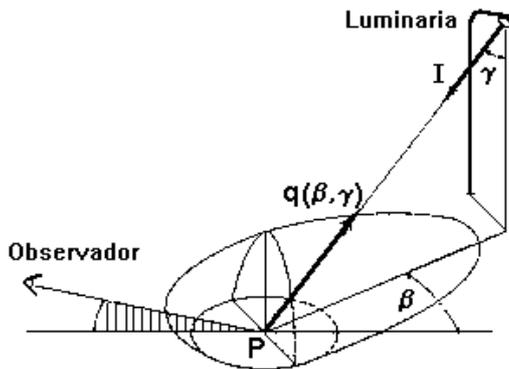


Figura I.2.7-2: Reflexión de un punto sobre el pavimento visto por el observador

$$L_p = \frac{q(\mathbf{g}, \mathbf{b}) \times E_p}{\mathbf{p}} \quad 1.2.9-3$$

Reemplazando la iluminancia horizontal en el punto P , E_p :

$$E_p = \frac{I(C, \mathbf{g}) \times \cos^3 \mathbf{g}}{h^2} \quad 1.2.9-4$$

donde $I(C, \mathbf{g})$ es la intensidad luminosa de la luminaria proyectada en el punto P , en ecuación 1.2.9-3 obtenemos:

$$L_p = \frac{I(C, \mathbf{g}) \times q(\mathbf{g}, \mathbf{b}) \times \cos^3 \mathbf{g}}{h^2} \quad 1.2.9-5$$

Para facilitar los cálculos se agrupa el producto $q(\mathbf{g}, \mathbf{b}) \times \cos^3 \mathbf{g}$ en :

$$\mathbf{r}(\mathbf{g}, \mathbf{b}) = q(\mathbf{g}, \mathbf{b}) \times \cos^3 \mathbf{g} \quad 1.2.9-6$$

Al sustituir la ecuación 1.2.9-6 en 5, la luminancia resulta dependiente de la distribución luminosa de la luminaria, la altura de montaje y las características reflectivas del pavimento englobadas en $\mathbf{r}(\mathbf{g}, \mathbf{b})$:

$$L_p = \frac{I(C, \mathbf{g})}{h^2} \times \mathbf{r}(\mathbf{g}, \mathbf{b}) \quad 1.2.9-7$$

Con el fin de poder simplificar el cálculo, partiendo de un gran número de mediciones, se han clasificado las características reflectivas de pavimentos en cuatro grupos, $R1, R2, R3$ y $R4$, de acuerdo a su especularidad. El criterio de clasificación se basa en tres parámetros:

q_0 : Coeficiente de luminancia medio (relacionado con la claridad)

$S1, S2$: factores de especularidad

Se dispone de este modo de cuatro conjuntos de datos de pavimentos standard, alguno de los cuales puede ser asociado al pavimento considerado.

La medición de una muestra representativa del pavimento empleado permite clasificarlo a un grupo R y establecer el valor de q_0 . Con estos datos sumados a la fotometría de la luminaria puede calcularse la Luminancia de la calzada para una geometría dada de la instalación. La determinación de la indicatriz de las propiedades de reflexión de pavimentos $r(\mathbf{g}, \mathbf{b})$ se realiza tradicionalmente mediante un dispositivo experimental donde como instrumento medidor se emplea un luminancímetro provisto de un detector de silicio con filtro de corrección $V(\lambda)$ y una mascarilla para limitar el campo de medición sobre la muestra de pavimento.

Como criterio de calidad del alumbrado se recomiendan valores medios de luminancia de la calzada L_{med} , promedio sobre una grilla definida de puntos, juntamente con las regularidades:

$U_0 = L_{min}/L_{med}$

$U_L = L_{min}/L_{máx}$ en el carril mas desfavorable.

12.10 Deslumbramiento

El deslumbramiento se puede manifestar de una de las siguientes formas.

- deslumbramiento perturbador - deslumbramiento que impide la visión
- deslumbramiento molesto - deslumbramiento que provoca una sensación incómoda

El Incremento Umbral mide el grado de deslumbramiento perturbador mientras que el factor de Control del Deslumbramiento, G , mide el grado de deslumbramiento molesto.

1.2.10.1 Incremento Umbral (TI)

Es la medida de la pérdida de visibilidad causada por el deslumbramiento perturbador producido por las luminarias de alumbrado viario. El Incremento Umbral, TI , se expresa siempre en porcentaje y se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$TI = \frac{65 \cdot L_{vl}}{(L_{med} / FM)^{0,8}} \quad 1.2.10.1$$

donde:

L_{vl} : luminancia de velo producida directamente por las luminarias. (El valor siempre se calcula en condiciones iniciales).

L_{med} : luminancia de la calzada media en servicio.

FM : factor de mantenimiento utilizado para calcular la luminancia media

El Incremento Umbral variará continuamente debido al cambio de posición relativa del conductor con respecto a las luminarias de la instalación de alumbrado público.

Esta variación no será muy grande, por lo que es suficiente con especificar el valor máximo del Incremento Umbral.

La posición longitudinal del observador a la que el Incremento Umbral alcanzará el valor máximo depende del ángulo de apantallamiento del techo del vehículo. Este ángulo está normalizado por la CIE, para la evaluación del deslumbramiento en alumbrado viario, en 20 grados sobre la horizontal.

El Incremento Umbral será generalmente el mayor para la posición de un observador en la que la luminaria aparece justo dentro de éste ángulo. La posición transversal del observador es la misma que la del usado para el cálculo de la luminancia media. Se considera el efecto de cada luminaria que aparece delante del observador y contribuye con más del 2% de la suma de todas las anteriores. Cuanto menor es el valor del Incremento Umbral mejor es la visibilidad. La siguiente escala proporciona una idea del significado de los diferentes valores del Incremento Umbral.

Incremento Umbral (%)	Valoración
>20	Malo
10	Moderado
<10	Bueno