

# **ALGUNOS TEMAS DE ILUMINACIÓN**

## **(NOTAS)**

Este material fue preparado dentro del Proyecto de fin de carrera de los estudiantes Diego Alvarez y Ricardo Mosquera, dirigido por los docentes Ing. Mario Vignolo e Ing. Gonzalo Casaravilla.

Setiembre 2000

# CONCEPTOS BÁSICOS

Este capítulo se refiere al conocimiento básico necesario para la comprensión adecuada del desarrollo teórico que se verá a continuación. Se pretende unificar conceptos y definir unidades de trabajo de las distintas magnitudes que se utilizarán en el presente trabajo.

## LA LUZ

La luz es una manifestación de energía que puede obtenerse calentando hasta la incandescencia sólidos o gases. Puede definirse como *la energía radiante que incide sobre la retina del ojo humano produciendo la sensación visual*.

En el siguiente desarrollo tendremos en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz, y las características particulares de percepción del ojo humano considerando que el mismo no es un observador objetivo de las radiaciones que percibe, sino que en unas circunstancias de luminosidad tiene preferencias por determinadas longitudes de onda, y en otras circunstancias por otras longitudes de onda (efecto Purkinje). La porción visible del espectro lumínico se extiende desde los 380 a 770 nm aproximadamente, encontrándose el máximo de percepción en los 550 nm.

## MAGNITUDES Y UNIDADES

### ÁNGULO SÓLIDO

Consideremos un elemento de área  $\Delta A$  sobre una superficie esférica. El *ángulo sólido*  $\Delta\Omega$  subtendido por  $\Delta A$  en el centro de la esfera se define como el cociente

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta A}{r^2}$$

siendo  $r$  el radio de la esfera. Como  $\Delta A$  y  $r^2$  tienen dimensiones de longitud al cuadrado, el ángulo sólido no tiene dimensión.

La unidad del ángulo sólido es el *estereorradián* ( $sr$ ). Puesto que el área total de una esfera es de  $4\pi r^2$ , el ángulo sólido total subtendido por una esfera es

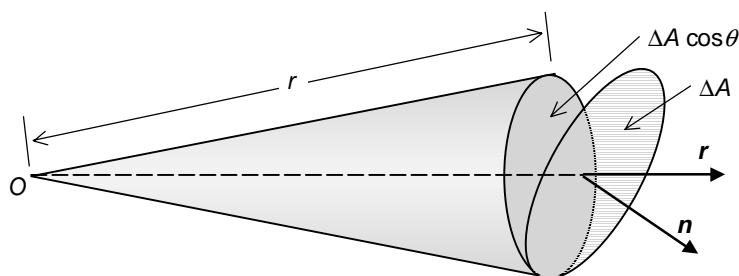
$$\frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ estereorradianes}$$

Existe una estrecha analogía entre el ángulo sólido y el ángulo plano ordinario, que se define como el cociente de un elemento de longitud de arco de circunferencia  $\Delta s$  dividido por el radio de la misma:

$$\theta = \frac{\Delta s}{r} \text{ radianes}$$

El ángulo plano total subtendido por una circunferencia es  $2\pi$  radianes.

En la siguiente figura el elemento de área  $\Delta A$  no es perpendicular a las líneas radiales que salen de  $O$ . El vector  $\vec{n}$  normal al elemento de área forma un ángulo  $\theta$  con el vector radial  $\vec{r}$ . En este caso el ángulo sólido subtendido por  $\Delta A$  es



$$\Delta\Omega = \frac{\Delta A \vec{n} \cdot \vec{r}}{r^2} = \frac{\Delta A \cos \theta}{r^2}$$

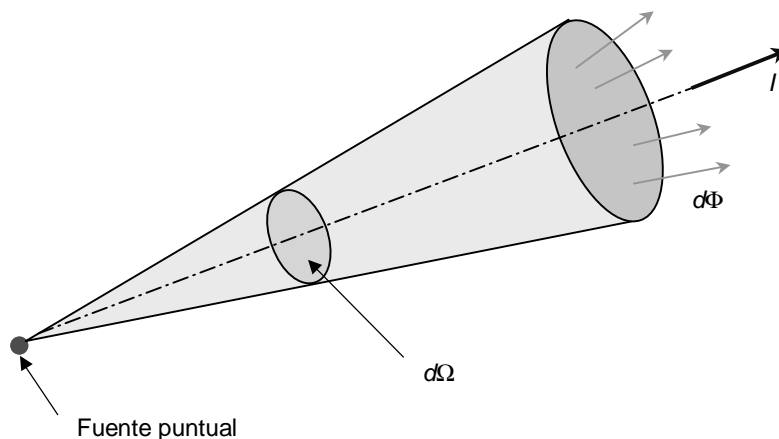
## FLUJO LUMINOSO

En los manantiales luminosos se produce la transformación de un tipo de energía en energía luminosa. Se define el *Flujo Radiante* como la *energía radiante emitida por una fuente luminosa por unidad de tiempo*.

El *Flujo luminoso* es la *parte del flujo radiante que sensibiliza al ojo humano*. Lo representaremos por el carácter  $\Phi$ . Su unidad es el *Lumen (lm)*, el cual se define como *el flujo luminoso emitido por una fuente puntual de intensidad luminosa uniforme de una candela, dentro de un ángulo sólido de un estereorradian*.

## INTENSIDAD LUMINOSA

La *Intensidad Luminosa (I)* de una fuente puntual de luz en una dirección determinada es *el cociente entre el flujo luminoso que abandona la fuente y se propaga en un elemento de ángulo sólido que contiene la dirección en cuestión, y dicho elemento de ángulo sólido*. Esto es:



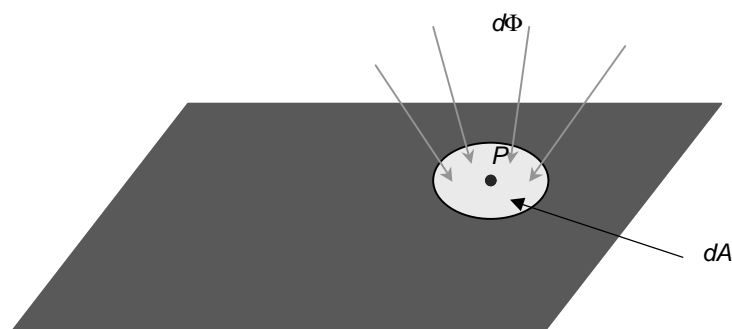
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Su unidad es la *Candela (cd)*, la cual se define como un sesentavo de parte de la intensidad luminosa de  $1 \text{ cm}^2$  de platino fundido a una temperatura de  $2046 \text{ }^\circ\text{K}$ .

Es importante observar que para una fuente puntual, la intensidad luminosa en una dirección determinada es independiente de la distancia a la fuente.

## ILUMINANCIA

Considérese un punto ( $P$ ) en una superficie y alrededor de ese punto un diferencial de área de la superficie en cuestión.



La *Iluminancia* en un punto de una superficie es *el flujo incidente por unidad de área de la superficie en dicho punto*. Esto es:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

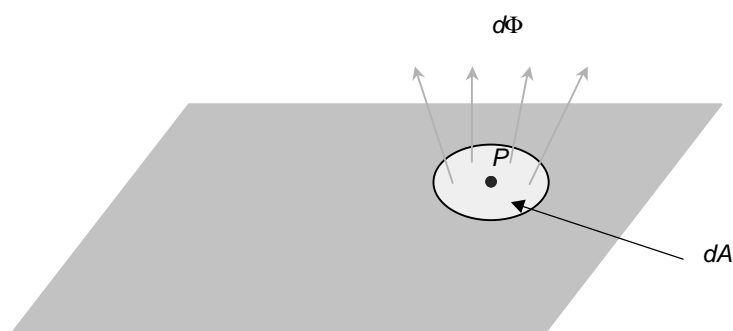
Su unidad es el *Lux (lx)*.

Obsérvese que no se trata de la radiación absorbida o reflejada por la superficie sino

sólo del flujo luminoso que llega o incide en la misma. De aquí que la iluminancia sea independiente del tipo de superficie sobre la cual incide el flujo luminoso y por lo tanto independiente de sus propiedades reflectoras, transmisoras o absorbentes.

## EXITANCIA

Es una medida del flujo luminoso que abandona una superficie. La *Exitancia* se define como el *cociente entre el flujo luminoso que abandona un elemento de superficie y el área de ese elemento*. Su expresión matemática es la siguiente:



$$M = \frac{d\Phi}{dA}$$

La unidad es la misma que la de iluminación (o iluminancia).

El flujo luminoso emitido puede originarse en la propia superficie como en el caso de un filamento de tungsteno a una determinada temperatura o en una reflexión o transmisión sobre o a través de la superficie.

Obsérvese que siempre se trata de un flujo que abandona la superficie. La exitancia es independiente del tipo y propiedades de la superficie emisora.

En el caso de reflexión son de interés los conceptos de *Reflectancia difusa* y *Reflexión difusa*, que se definen a continuación.

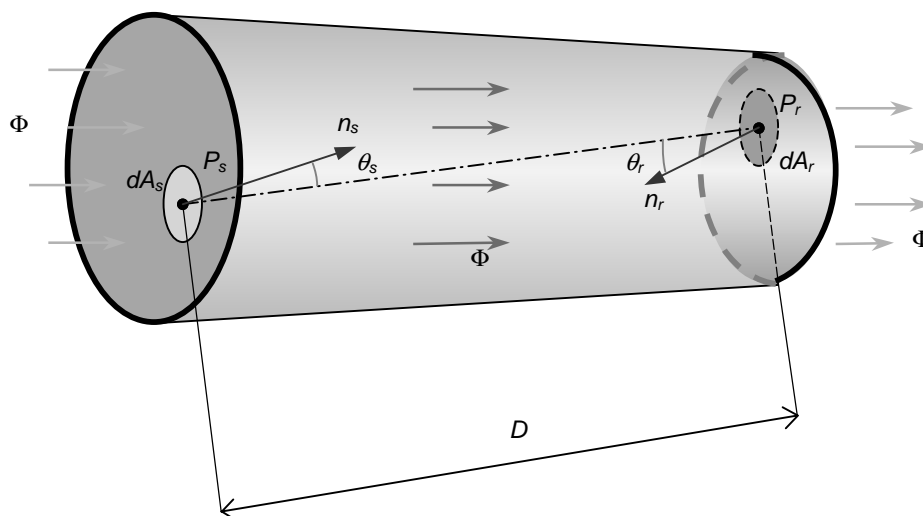
*Reflexión difusa* es el proceso por el cual el flujo incidente es redirigido en un rango de ángulos.

*Reflectancia difusa* es la razón entre el flujo luminoso que abandona una superficie o un medio por reflexión difusa del flujo incidente y el flujo incidente.

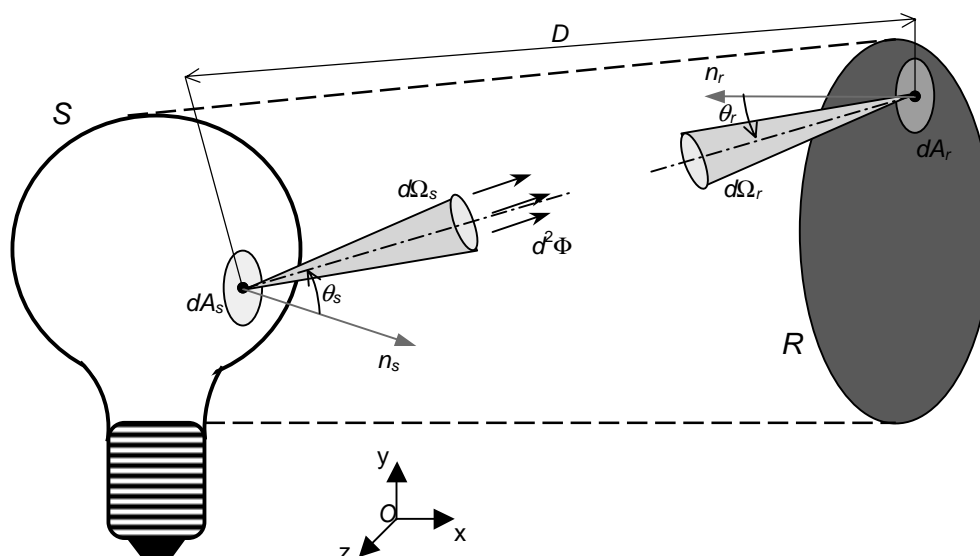
## LUMINANCIA

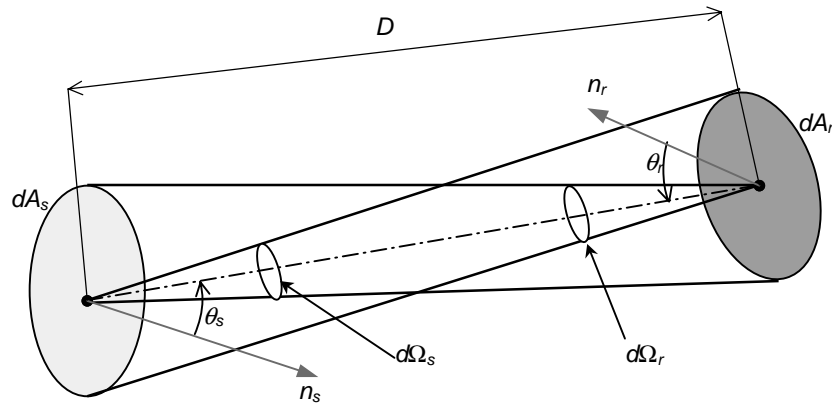
Previo a la definición de luminancia es necesario la introducción de una magnitud geométrica denominada *Extensión Geométrica del Haz*. Este concepto permite medir las dimensiones de un haz de rayos a diferencia del ángulo sólido que determina las dimensiones de un cono limitando los rayos que parten desde un punto o que llegan al

mismo. Dos diafragmas cualesquiera son suficientes para limitar un campo de radiación como se indica en la figura: un diafragma de entrada y otro de salida.



Ambos diafragmas determinan una extensión geométrica. Se trata de una especie de conducto de forma cualquiera delimitado por todas las rectas que se apoyan sobre los contornos de ambos diafragmas. En el interior de esta superficie reglada se hallan todos los rayos que unen cualquier punto de la superficie de entrada con cualquier punto de la superficie de salida. El flujo a la entrada es el mismo que el que aparece a la salida y será, por supuesto, el mismo en cualquier sección intermedia del conducto. Este haz contiene una doble multiplicidad de rayos ya que se tiene una multiplicidad de salidas y una multiplicidad de llegadas. Es decir que para un punto del diafragma de entrada se consideran todos los rayos que salen de este y llegan al diafragma de salida lo cual se repite para cada punto del diafragma de entrada. De aquí que se trabaje con diferenciales de segundo orden ya que la integración se realiza en dos pasos: el primero para todos los rayos que salen del diafragma de entrada (éste puede ser la superficie de una fuente) y llegan a todos los puntos del diafragma de salida (éste puede ser la superficie receptora); repetir esta operación tantas veces como puntos haya en el diafragma de entrada (o fuente). Para analizar el fenómeno, considérese por ejemplo como fuente una lámpara incandescente y una superficie receptora como en la siguiente figura.





La fuente  $S$  y el receptor  $R$  se hallan ubicados en un medio homogéneo, los rayos que salen de  $S$  hacia  $R$  son rectilíneos. Cada punto de  $S$  puede enviar flujo hacia toda la parte de  $R$  que esté orientada hacia dicho punto y, recíprocamente, cada punto de  $R$  puede recibir flujo de todas las zonas de  $S$  que se hallen orientadas hacia dicho punto. Todos los rayos del flujo que se dirigen desde  $S$  hacia  $R$  están comprendidos en el interior del conducto cuya superficie está delimitada por las rectas que unan el contorno de la fuente  $S$  y el contorno de la superficie receptora  $R$ . Considérese la contribución del flujo producido por una pequeña superficie  $dA_s$  de la fuente el cual es recibido por una pequeña superficie  $dA_r$  del receptor. Si  $D$  es la distancia que separa las dos superficies elementales  $dA_s$  y  $dA_r$  y si  $\theta_s$  y  $\theta_r$  son los ángulos comprendidos entre las normales  $n_s$  y  $n_r$  de dichas superficies con la recta que las une, se puede decir que el ángulo sólido  $d\Omega_s$  bajo el cual se ve  $dA_r$  desde el punto de la fuente vale:

$$d\Omega_s = \frac{dA_r \cos \theta_r}{D^2}$$

Recíprocamente, el ángulo sólido  $d\Omega_r$  bajo el cual se ve a  $dA_s$  desde el punto receptor vale:

$$d\Omega_r = \frac{dA_s \cos \theta_s}{D^2}$$

Se define como *extensión geométrica* a la relación:

$$d^2G = \frac{dA_r \cos \theta_r dA_s \cos \theta_s}{D^2}$$

O lo que es lo mismo

$$d^2G = dA_s \cos \theta_s d\Omega_s$$

$$d^2G = dA_r \cos \theta_r d\Omega_r$$

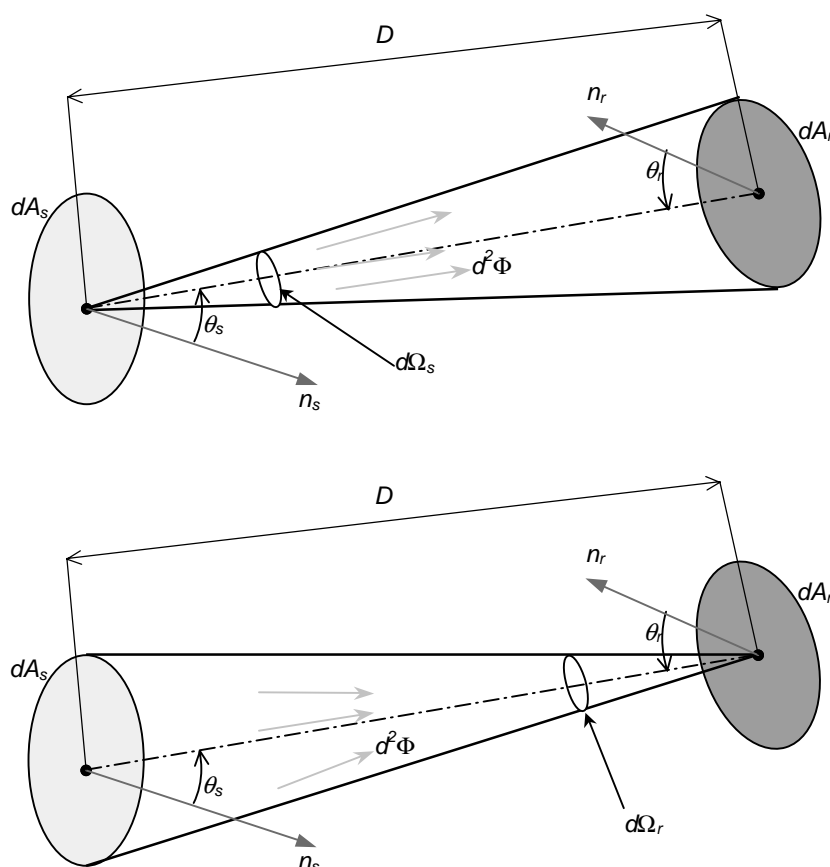
Como puede apreciarse, esta cantidad es proporcional al área aparente del elemento de superficie considerado ( $dA_s \cos \theta_s$  si es la fuente o  $dA_r \cos \theta_r$  si es el receptor) y el ángulo sólido que determina el otro elemento de superficie opuesto. Las relaciones que

definen la cantidad son simétricas con relación a la fuente y al receptor. La extensión geométrica es, por tanto, una magnitud puramente geométrica y su unidad es  $m^2sr$ . La extensión geométrica  $d^2G$  sirve para medir las dimensiones de un haz de rayos.

La *Luminancia* en una dirección, en un punto de la superficie de una fuente o de un receptor o en punto sobre la trayectoria de un haz, se define como el *cociente entre el flujo luminoso que abandona, alcanza o atraviesa un elemento de superficie en ese punto y que se propaga en las direcciones definidas por un cono elemental que contiene la dirección dada, y el producto del ángulo sólido del cono por el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie sobre un plano perpendicular a la dirección dada*.

La unidad correspondiente es  $cd/m^2$ .

Considérese un elemento  $dA_s$  de una fuente que envía un flujo  $d^2\Phi$  a un elemento  $dA_r$  de una superficie receptora la cual se halla a una distancia  $D$  como se ilustra en la figura siguiente.



Si el medio de propagación es homogéneo (no difunde ni absorbe), el flujo permanecerá constante y por lo tanto lo que sale de  $dA_s$  es lo mismo que llega a  $dA_r$ . Bajo la condición de que  $dA_s$  y  $dA_r$  sean lo suficientemente pequeños, se puede decir que  $d^2\Phi$  será proporcional a  $dA_s$  y  $dA_r$  o, más simplemente, que  $d^2\Phi$  será proporcional a la extensión geométrica  $d^2G$ . Se define la luminancia en un punto de la trayectoria de un haz como el cociente entre el flujo  $d^2\Phi$  que transporta el haz y la extensión geométrica del haz:



$$L = \frac{d^2\Phi}{d^2G}$$

Sustituyendo  $d^2G$  por su expresión,

$$L = \frac{d^2\Phi D^2}{dA_r \cos \theta_r dA_s \cos \theta_s}$$

Teniendo en cuenta que  $dA_r \cos \theta_r = d\Omega_s$ , resulta:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_s \cos \theta_s d\Omega_s}$$

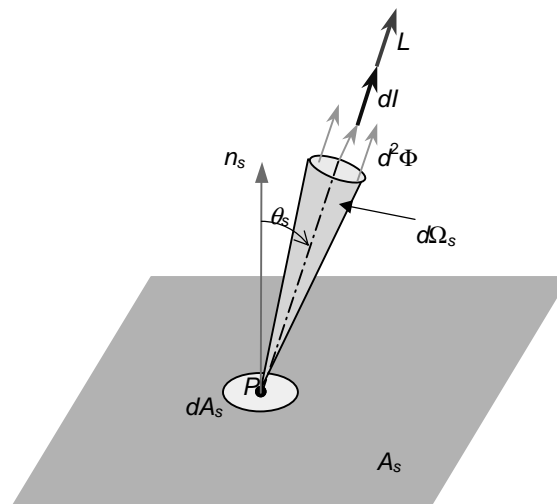
El ángulo sólido  $d\Omega_s$  es el del cono que contiene los rayos del haz considerado. También se cumple que  $dA_s \cos \theta_s = d\Omega_r$ , entonces,

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_r \cos \theta_r d\Omega_r}$$

Para el caso de una fuente, dado que por definición

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega_s}$$

se puede expresar la luminancia en función de la intensidad luminosa:



$$L = \frac{dI}{dA_s \cos \theta_s}$$

La luminancia, en un punto de la superficie de una fuente, en una dirección dada, es también el cociente entre la intensidad luminosa en la dirección considerada, de un

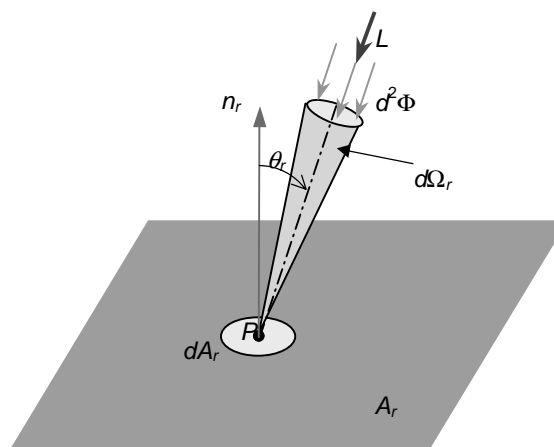
elemento  $dA_s$  de superficie en ese punto y el área aparente (proyección ortogonal de ese elemento sobre un plano perpendicular a esa dirección)  $dA_s \cos \theta_s$ .

Se puede extender esta noción puntual de luminancia a una superficie extensa haciendo la media aritmética de todos los valores puntuales, es decir la integración extendida a toda la superficie considerada. Se tiene:

$$L = \frac{I}{A_s \cos \theta_s}$$

donde  $I$  representa la intensidad luminosa de una fuente no puntual, es decir la que se puede medir a una distancia adecuada en la dirección considerada. Por otro lado,  $A_s \cos \theta_s$  es la superficie aparente de la fuente vista desde el receptor en la misma dirección. La fuente está definida sólo por su contorno pudiendo ser plana o no e incluso representando por ejemplo el cielo.

Siguiendo el mismo lineamiento, es posible considerar la dirección de la cual proviene el flujo luminoso incidente en una superficie receptora. En este caso, se puede expresar la luminancia en función de la iluminancia en la dirección considerada.



Recordando que por la definición de iluminancia

$$E = \frac{d\Phi}{dA_r}$$

y que

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_r \cos \theta_r d\Omega_r}$$

reemplazando resulta:

$$L = \frac{dE}{\cos \theta_r d\Omega_r}$$

La luminancia media si  $\Omega_r$  pequeño es:

$$L = \frac{E}{\Omega_r}$$

La diferencia con respecto a la iluminancia en la misma superficie es que se está considerando la dirección o la zona de donde proviene el flujo. Esta luminancia no debe confundirse con la de una fuente emisora (caso visto anteriormente). En este caso el fenómeno de reflexión sobre la superficie no se ha producido. Cuando se considere que el flujo se ha reflejado, esta superficie se convierte en emisora y la luminancia será la definida para una fuente.

Cuando un observador compara visualmente la luz que envían hacia él dos superficies tales como las páginas derecha e izquierda de un libro, puede constatar diferencias en el color y en la luminosidad. Supóngase, como es probable que ocurra, que el color de las páginas sea el mismo. Si el libro se halla solamente entreabierto e iluminado en forma asimétrica (luz procedente de un costado), la luminosidad de una de las páginas parecerá mayor que la otra. Cuando desea comparar estas luminosidades, el observador fija su vista alternativamente en una página y luego en la otra. Esta comparación la realiza con la misma región de su retina. La misma área de la retina recibe el flujo difundido por el papel a través de la misma abertura de la pupila y por lo tanto, la extensión geométrica es la misma para las dos observaciones.

Si el flujo recibido por el elemento de la superficie de la retina es mayor en el primer caso que en el segundo, el observador dirá que la página izquierda le parece más luminosa que la derecha. En este caso las dos superficies emisoras se hallan a la misma distancia del observador y en ese caso, las superficies conjugadas de la misma región de la retina tienen la misma superficie. Si el observador compara una de las páginas de libro con la pared que se halla en frente de él, al mismo elemento de superficie de la retina le corresponde el mismo ángulo sólido en el espacio objeto. Por lo tanto, para distancias de observación diferentes, le corresponde áreas emisoras proporcionales al cuadrado de la distancia pero en todos los casos la extensión geométrica permanece igual. Esto significa que sigue siendo válida la noción de comparación de luminancias.

**En la observación de superficies, el ojo compara luminancias.**

Cuando una superficie se halla iluminada, tiene una determinada iluminancia  $E$  que indica la densidad de flujo luminoso incidente en dicha superficie. Cuando se observa dicha superficie desde distintas direcciones, lo que se ve es la luminancia  $L$ , es decir la densidad espacial de flujo luminoso que esa superficie refleja en cada dirección de observación. Lo mismo se puede decir de la observación de una fuente de luz. En tal caso, la superficie de la fuente emite luz y debe considerarse la densidad de flujo emitido por la superficie, es decir la exitancia luminosa  $M$ . Pero nuevamente, lo que se ve desde distintas direcciones es la luminancia, es decir la densidad espacial de flujo luminoso que esa fuente emite en cada dirección de observación.

## MÉTODOS DE CÁLCULO

Los cálculos de iluminación se realizan durante el proceso de diseño para obtener información acerca del desempeño del sistema de iluminación. Un diseñador puede utilizar los resultados de los cálculos para elegir entre diferentes alternativas de diseño o para refinar un diseño en particular. Los cálculos de iluminación son modelos matemáticos de procesos físicos complejos que ocurren en un espacio iluminado. Dado que estos modelos nunca pueden ser correctos en todo detalle, los cálculos son aproximaciones de situaciones reales.

Los métodos de cálculo más simples pueden realizarse a mano, mientras que los métodos más avanzados solo pueden realizarse utilizando un ordenador. Los modelos más avanzados generalmente proveen información más exacta. Exactitud, para el propósito de esta discusión, se define como el grado al cual los cálculos coinciden con la realidad. En realidad, es muy difícil alcanzar una coincidencia perfecta, como se verá más adelante.

Los métodos de cálculo de iluminación son determinados por la aplicación. El tipo de información deseada de un sistema de iluminación y la complejidad de las condiciones de iluminación que se estén analizando determinan qué método de cálculo es el mejor para aplicar al problema. Los aspectos que deben evaluarse para determinar el modelo de análisis de iluminación a utilizar son los siguientes:

- Información deseada
- Equipamiento elegido
- Número de equipos y ubicación
- Características espaciales

## BIBLIOGRAFÍA

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 9]

TECHNICAL REPORT. CALCULATION AND MEASUREMENT OF LUMINANCE AND ILLUMINANCE IN ROAD LIGHTING - INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION .  
[Pub. nº CIE 30-2 (1982)]

FÍSICA - PAUL A. TIPLER.

MANUAL DE LUMINOTECNIA - ASOCIACIÓN ARGENTINA DE LUMINOTECNIA.

# CÁLCULOS BÁSICOS

Predecir el transporte radiante de flujo luminoso (transferencia de flujo) desde una fuente a una superficie receptora es fundamental para todos los cálculos de iluminación. Este transporte es a través del aire, el cual se asume no dispersivo ni absorbente.

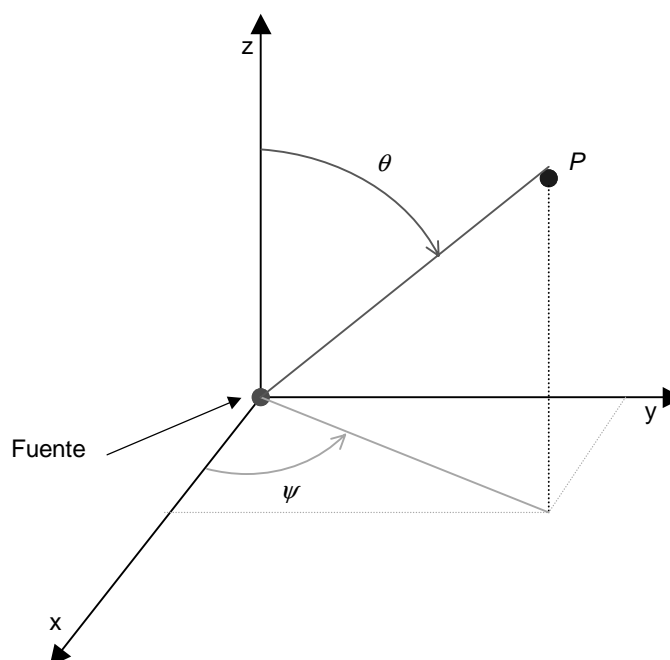
La transferencia de flujo se divide en seis tipos según la geometría y el tipo de emisor:

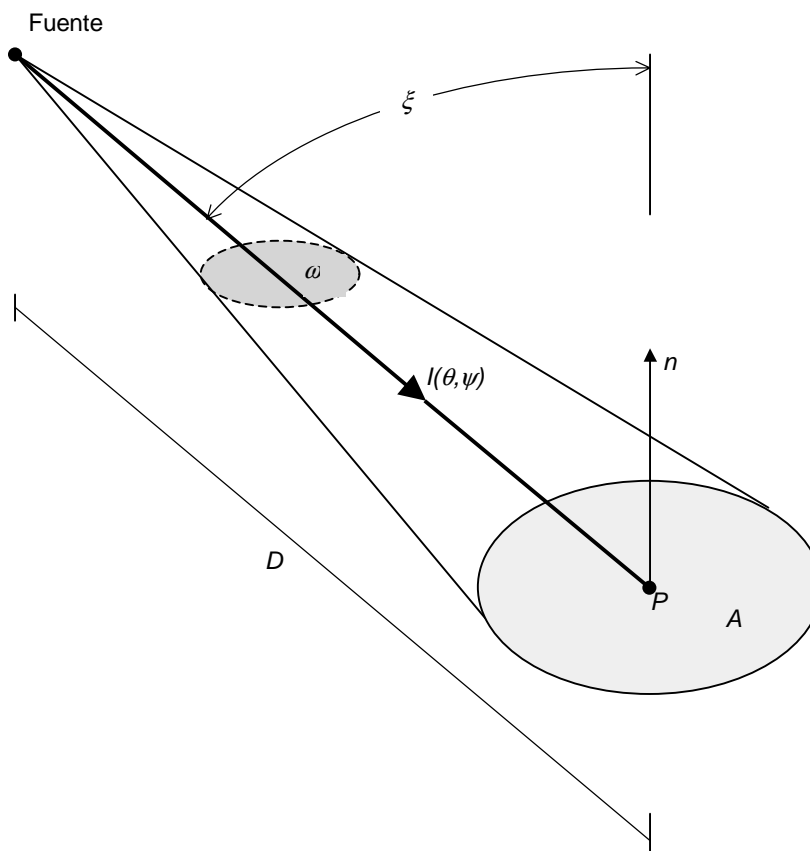
1. De fuente puntual a un punto o diferencial de área receptora.
2. De fuente puntual a un área receptora.
3. De fuente área difusa a un punto o diferencial de área receptora.
4. De fuente área difusa a un área receptora.
5. De fuente área no difusa a un punto o diferencial de área receptora.
6. De fuente área no difusa a un área receptora.

## TRANSFERENCIA DE FLUJO DIRECTA

### TRANSFERENCIA DE FLUJO TIPO 1, DE FUENTE PUNTUAL A UN PUNTO

La iluminancia  $E$  producida en un área  $A$  centrada en el punto  $P$  está relacionada con la intensidad luminosa,  $I(\theta, \psi)$ , como se muestra a continuación. Dada la distribución de intensidad de la fuente luminosa en coordenadas esféricas  $(\theta, \psi)$ , la geometría de la situación se ilustra en la figura.





La iluminancia  $E$  se define en términos del flujo  $\Phi$  incidente en el área  $A$ :

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

Ecuación 1

El flujo también puede ser analizado en términos del ángulo sólido  $\omega$ . Si el origen del sistema de coordenadas esféricas está en la fuente, y el área  $A$  es pequeña con respecto a la distancia  $D$ , entonces

$$\omega = \frac{A}{D^2} \cos \xi$$

Ecuación 2

donde

$D$  = distancia entre la fuente y el punto  $P$ ,

$\xi$  = ángulo entre la normal ( $n$ ) de la superficie  $A$  y la dirección de la distancia  $D$ .

La definición de intensidad luminosa desde la fuente relaciona las ecuaciones anteriores como se muestra.

$$I(\theta; \psi) = \frac{\Phi}{\omega}$$

Ecuación 3

o

$$\Phi = I(\theta, \psi)\omega$$

Ecuación 4

Sustituyendo en la Ecuación 1 la Ecuación 4 resulta,

$$E = \frac{I(\theta, \psi)\omega}{A}$$

Ecuación 5

Sustituyendo ahora la expresión de  $\omega$  de la Ecuación 2 en la Ecuación 5 resulta

$$E = \frac{I(\theta, \psi)\cos \xi}{D^2}$$

Ecuación 6

La Ecuación 6 es la ecuación fundamental de transferencia de flujo, llamada ley del coseno cuadrado inverso. Su validez asume en la Ecuación 2 que la intensidad luminosa es (aproximadamente) constante en un entorno de la dirección  $(\theta, \psi)$ .

Cuanto el área  $A$  (el entorno del punto  $P$ ) se hace más pequeña, el ángulo sólido  $\omega$  se hace más pequeño y la Ecuación 2 más precisa. En el límite de un diferencial de área,  $dA$ , el ángulo sólido se vuelve diferencial,  $d\omega$ , y la Ecuación 2 es exactamente correcta. La consecuencia computacional de esta consideración es que la Ecuación 6 describe la iluminancia en un entorno diferencial del punto  $P$ .

La Ecuación 2 expresa el ángulo sólido determinado por el área  $A$  y un punto; la fuente de luz se asume coincidente con este punto. La consecuencia computacional es que la Ecuación 6 describe la iluminancia desde una fuente puntual.

El valor de la intensidad usado en la Ecuación 6 es casi siempre obtenido por interpolación de valores de una tabla. La distribución de intensidad es casi siempre expresada usando los ángulos de coordenadas esféricas; así la interpolación necesaria se hace con estos ángulos. Splines bilineales, splines bicúbicas y series dobles de Fourier están entre los métodos utilizados.

## TRANSFERENCIA DE FLUJO TIPO 2, DE FUENTE PUNTUAL A UN ÁREA RECEPTORA

El flujo transferido desde una fuente puntual a un área diferencial puede ser expresado utilizando la Ecuación 6. Éste se integra en el área receptora para calcular el flujo total recibido por todo el área:

$$\begin{aligned}d\Phi &= EdA \\ \Phi &= \int EdA \\ \Phi &= \int \frac{I(\theta, \psi) \cos \xi}{D^2} dA\end{aligned}$$

Ecuación 7

La integral es en todo el área receptora  $A$ .

La integración analítica de la Ecuación 7 es posible sólo si la distribución de intensidad es una función simple y la geometría es simple. Si no es así, es necesario aproximar la integral en el área de la Ecuación 7 por una suma finita. En este caso la superficie receptora es dividida en pequeñas áreas, o discretizada, y la Ecuación 6 se aplica a cada una de éstas. Cuanto más pequeñas sean las áreas, más preciso será el resultado:

$$\Phi = \sum_i I(\theta_i, \psi_i) \cos \xi_i \frac{a_i}{D_i^2}$$

Ecuación 8

donde

$I(\theta_i, \psi_i)$  = intensidad de la fuente puntual en la dirección de la parte  $i$ -ésima del área  $A$ ,

$\xi_i$  = ángulo de incidencia en la parte  $i$ -ésima del área  $A$ ,

$a_i$  = área de la parte  $i$ -ésima del área  $A$ ,

$D_i$  = distancia entre la fuente y la parte  $i$ -ésima del área  $A$ .

La iluminancia promedio puede obtenerse de la Ecuación 7 o de la Ecuación 8:

$$\bar{E} = \frac{\Phi}{A}$$

Ecuación 9



## TRANSFERENCIA DE FLUJO TIPO 3, DE FUENTE ÁREA DIFUSA A UN PUNTO

En muchas aplicaciones la fuente de luz es demasiado grande, o el punto en el cual se va a calcular la iluminancia está demasiado cerca, para que las condiciones que validan la aplicación de la Ecuación 6 sean verificadas. Sin embargo, si la fuente es un emisor difuso, la Ecuación 6 puede aplicarse indirectamente.

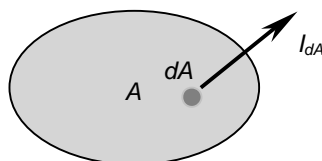
La distribución de intensidad de un emisor difuso, en coordenadas esféricas, está dada por

$$I(\theta, \psi) = I_n \cos \theta$$

Ecuación 10

La distribución es axialmente simétrica con respecto a la dirección (0,0), la cual es también la normal a la superficie.  $I_n$  es la intensidad luminosa en la dirección de la normal a la superficie.

Sea  $dA$  un elemento diferencial de área de la fuente, como  $dA$  también es un emisor difuso, la distribución de intensidad de tal elemento es



$$I_{dA} = I_{ndA} \cos \theta_{dA}$$

Ecuación 11

donde

$I_{ndA}$  = intensidad luminosa del elemento  $dA$  en la dirección de la normal a  $dA$ ,  
 $\theta_{dA}$  = ángulo entre  $I_{dA}$  y la normal a  $dA$ .

Por la definición de excitancia

$$M_{dA} = \frac{\Phi_{dA}}{dA}$$

Ecuación 12

donde  $\Phi_{dA}$  es el flujo que sale de  $dA$  y  $M_{dA}$  es la excitancia del elemento diferencial de área  $dA$ . Por la definición de intensidad luminosa

$$I_{dA} = \frac{d\Phi_{dA}}{d\omega_{dA}} \Rightarrow d\Phi_{dA} = I_{dA} d\omega_{dA}$$

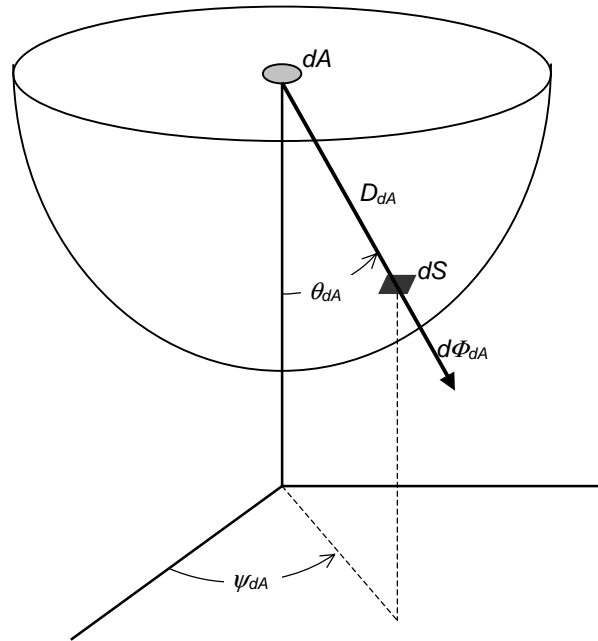
Ecuación 13

sustituyendo  $I_{dA}$  de la Ecuación 11 en la Ecuación 13 resulta

$$d\Phi_{dA} = I_{ndA} \cos \theta_{dA} d\omega_{dA}$$

Ecuación 14

Considerando una media esfera con centro en  $dA$  y radio  $D_{dA}$  sea  $dS$  un elemento de superficie diferencial de la misma expresado en coordenadas esféricas



$$dS = D_{dA}^2 \operatorname{sen} \theta_{dA} d\psi_{dA} d\theta_{dA}$$

Ecuación 15

El diferencial de ángulo sólido determinado por  $dS$  es

$$d\omega_{dA} = \frac{dS}{D_{dA}^2}$$

Ecuación 16

Sustituyendo  $dS$  de la Ecuación 15 en la Ecuación 16 resulta

$$d\omega_{dA} = \operatorname{sen} \theta_{dA} d\psi_{dA} d\theta_{dA}$$

Ecuación 17

y sustituyendo  $d\omega_{dA}$  de la Ecuación 17 en la Ecuación 14 se obtiene el flujo que sale de  $dA$  y pasa a través de  $dS$ ,

$$d\Phi_{dA} = I_{ndA} \cos \theta_{dA} \sin \theta_{dA} d\psi_{dA} d\theta_{dA}$$

Ecuación 18

Para calcular el flujo total que sale de  $dA$ , se integra  $d\Phi_{dA}$  en toda la superficie de la media esfera:

$$\begin{aligned} \Phi_{dA} &= \int d\Phi_{dA} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_{ndA} \cos \theta_{dA} \sin \theta_{dA} d\psi_{dA} d\theta_{dA} = I_{ndA} \int_0^{\pi/2} \sin \theta_{dA} \cos \theta_{dA} d\theta_{dA} \int_0^{2\pi} d\psi_{dA} = \\ &= 2\pi I_{ndA} \int_0^{\pi/2} \sin \theta_{dA} \cos \theta_{dA} d\theta_{dA} = 2\pi I_{ndA} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin(2\theta_{dA})}{2} d\theta_{dA} = -\pi I_{ndA} \frac{\cos(2\theta_{dA})}{2} \Big|_0^{\pi/2} = \pi I_{ndA} \\ &\Rightarrow \Phi_{dA} = \pi I_{ndA} \end{aligned}$$

Ecuación 19

Sustituyendo  $\Phi_{dA}$  de la Ecuación 19 en la Ecuación 12 resulta

$$I_{ndA} = \frac{M_{dA} dA}{\pi}$$

Ecuación 20

En consecuencia, sustituyendo  $I_{ndA}$  de la Ecuación 20 en la Ecuación 11, se tiene que un diferencial de área  $dA$  emite un diferencial de intensidad dado por la expresión

$$dI(\theta, \psi) = \frac{M_{dA} \cos \theta_{dA}}{\pi} dA$$

Ecuación 21

y la iluminancia producida en el punto  $P$  es

$$dE = \frac{M_{dA} \cos \theta_{dA} \cos \xi_{dA}}{\pi D_{dA}^2} dA$$

Ecuación 22

Para calcular la iluminancia en el punto  $P$  producida por toda la fuente, se integra  $dE$  en todo el área de la fuente:

$$E = \frac{1}{\pi} \int \frac{M_{dA} \cos \theta_{dA} \cos \xi_{dA}}{D_{dA}^2} dA$$

Ecuación 23

Si la fuente exhibe una exitancia  $M$  constante sobre toda su extensión, entonces

$$E = \frac{M}{\pi} \int \frac{\cos \theta_{dA} \cos \xi_{dA}}{D_{dA}^2} dA$$

Ecuación 24

La cantidad que multiplica la exitancia  $M$  depende solamente de la geometría y es llamada *factor de configuración* ( $C$ ). Así,

$$E = MC$$

Ecuación 25

donde

$$C = \frac{1}{\pi} \int \frac{\cos \theta_{dA} \cos \xi_{dA}}{\pi D_{dA}^2} dA$$

Ecuación 26

El factor de configuración relaciona la excitancia de un emisor área difusa con la iluminancia que produce en un punto. Está limitado al rango

$$0 \leq C \leq 1$$

La Ecuación 25 puede utilizarse para calcular la iluminancia en un punto producida por cualquier emisor difuso que tenga una forma tal que el factor de configuración sea conocido o pueda ser calculado. Obsérvese que se asume que el emisor tiene una exitancia difusa uniforme.

## TRANSFERENCIA DE FLUJO TIPO 4, DE FUENTE ÁREA DIFUSA A UN ÁREA RECEPTORA

Llamando  $A_1$  a la superficie emisora y  $A_2$  a la superficie receptora, el flujo enviado de  $A_1$  hacia  $A_2$ ,  $\Phi_2$ , es

$$\Phi_2 = \int E_{dA_2} dA_2$$

Ecuación 27

donde  $E_{dA_2}$  es la iluminancia en el elemento  $dA_2$  debida a toda la fuente  $A_1$ . Sustituyendo  $E_{dA_2}$  utilizando la Ecuación 23 resulta

$$\Phi_2 = \int \frac{1}{\pi} \int \frac{M_{1dA_1} \cos \theta \cos \xi}{D^2} dA_1 dA_2$$

Ecuación 28

Si la fuente exhibe una exitancia constante  $M_1$  sobre toda su extensión, entonces

$$\Phi_2 = \frac{M_1}{\pi} \iint \frac{\cos \theta \cos \xi}{D^2} dA_1 dA_2$$

Ecuación 29

La integral es en la extensión de la fuente y del área iluminada. La cantidad que multiplica la exitancia  $M_1$  depende solamente de la geometría. Es costumbre dividirla por el área  $A_1$ , así da la fracción de flujo que sale de  $A_1$  y alcanza  $A_2$ . A este factor se le llama *factor de forma* ( $F_{1 \rightarrow 2}$ ). Los subíndices en los factores de forma son necesarios para indicar la dirección en que es transmitido el flujo. Se tiene

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi A_1} \iint \frac{\cos \theta \cos \xi}{D^2} dA_1 dA_2$$

Ecuación 30

Con esta definición, la Ecuación 29 se puede escribir como

$$\Phi_2 = M_1 A_1 F_{1 \rightarrow 2}$$

Ecuación 31

La iluminancia promedio, producida en la superficie  $A_2$  es entonces

$$\begin{aligned} \overline{E}_2 &= \frac{\text{flujo emitido por } A_1 \text{ que alcanza } A_2}{A_2} \\ \overline{E}_2 &= \frac{M_1 A_1 F_{1 \rightarrow 2}}{A_2} \end{aligned}$$

Ecuación 32

Los factores de forma y las áreas relacionan la exitancia de un emisor área difusa con la iluminancia promedio producida en la superficie receptora. Los factores de forma tienen los valores límite

$$0 \leq F \leq 1$$

y exhiben *reciprocidad*:

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1}$$

La aplicación de la reciprocidad da

$$\overline{E}_2 = M_1 F_{2 \rightarrow 1}$$

Ecuación 33

La Ecuación 25 y la Ecuación 33 tienen amplia aplicación para el cálculo de iluminancia e iluminancia promedio producida por cualquier forma de emisor difuso. La mayoría de las grandes superficies arquitectónicas exhiben una reflectancia difusa y

por lo tanto son emisores difusos por reflexión. La iluminancia producida por tales superficies puede ser calculada utilizando la Ecuación 25 y la Ecuación 33. Esto incluye superficies hechas luminosas por interreflexión de la luz y superficies indirectamente iluminadas. Tragaluces y ventanas difusas son emisores difusos por el tipo de transmitancia que exhiben. La Ecuación 25 y la Ecuación 33 pueden ser utilizadas también en estos casos.

Si un emisor área difusa no tiene una excitancia uniforme, puede ser discretizado en pequeños elementos, cada uno de ellos con una excitancia aproximadamente uniforme. La iluminancia producida por cada elemento es entonces calculada por la aplicación repetida de la Ecuación 25 y la Ecuación 33. El efecto total se obtiene sumando las iluminancias individuales.

## TRANSFERENCIA DE FLUJO TIPO 5, DE FUENTE ÁREA NO DIFUSA A UN PUNTO

Los emisores de área no difusa son significativamente más difíciles de tratar que los emisores difusos. Si la distribución de intensidad de la luminaria para campo lejano está disponible, la Ecuación 6 puede utilizarse en ciertos casos. Si la distancia desde la luminaria al punto de cálculo es mayor que 5 veces la dimensión más grande de la luminaria, tratando la luminaria como una fuente puntual, utilizando la Ecuación 6 se tendrá un error de aproximadamente el 5% o mejor.

Para puntos más cercanos a la luminaria, puede hacerse una hipótesis sobre la homogeneidad (uniformidad en la superficie) lo cuál permite hacer una aproximación útil. Bajo esta hipótesis, la distribución de intensidad,  $dI(\theta, \psi)$ , de un elemento diferencial del emisor es proporcional a la distribución de intensidad,  $I(\theta, \psi)$ , de toda la luminaria. La constante de proporcionalidad es la relación del área  $dA$  del elemento diferencial con el área  $A$  de toda la luminaria. Esto es,

$$dI(\theta, \psi) = I(\theta, \psi) \frac{dA}{A}$$

Ecuación 34

El elemento diferencial es entonces tratado como una fuente puntual, y la Ecuación 6 se utiliza para expresar la iluminancia diferencial que el mismo produce:

$$dE = \frac{dI(\theta, \psi) \cos \xi}{D^2} = \frac{1}{A} \frac{I(\theta, \psi) \cos \xi}{D^2} dA$$

Ecuación 35

Integrando en la superficie de la luminaria resulta

$$E = \frac{1}{A} \int \frac{I(\theta, \psi) \cos \xi}{D^2} dA$$

Ecuación 36

La integración analítica de la Ecuación 36 es posible solamente si la distribución de intensidad es una función simple y la geometría también es simple. En otro caso, es necesario aproximar el área de la integral de la Ecuación 36 por una suma finita. En este caso, la luminaria se discretiza en pequeñas áreas. Cuanto más pequeñas sean las áreas, más preciso será el resultado:

$$E = \frac{1}{A} \sum_i I(\theta, \psi) \cos \xi_i \frac{a_i}{D_i^2}$$

Ecuación 37

donde la suma es en todos los elementos discretos de la luminaria, y

$I(\theta, \psi_i)$  = intensidad de la parte i-ésima de la superficie de la luminaria hacia el punto  $P$ ,  
 $\xi_i$  = ángulo de incidencia del flujo de la parte i-ésima de la superficie de la luminaria,  
 $a_i$  = área de la parte i-ésima de la superficie de la luminaria,  
 $D_i$  = distancia entre la parte i-ésima de la superficie de la luminaria y el punto  $P$ ,  
 $A$  = área de la superficie de la luminaria.

La Ecuación 37 tiene amplia aplicación para el cálculo de iluminancia producida por luminarias con distribuciones no difusas.

## TRANSFERENCIA DE FLUJO TIPO 6, DE FUENTE ÁREA NO DIFUSA A UN ÁREA RECEPTORA

Si la superficie emisora no difusa se especifica como  $A_1$  y la superficie receptora como  $A_2$ , entonces el flujo  $\Phi_2$  enviado desde  $A_1$  hacia  $A_2$  es

$$\Phi_2 = \int E_{dA_2} dA_2$$

Ecuación 38

donde  $E_{dA_2}$  es la iluminancia en el elemento  $dA_2$  debida a toda la fuente  $A_1$ .

Bajo las mismas hipótesis de homogeneidad de la luminaria descriptas en el caso anterior, la Ecuación 36 puede utilizarse para expresar  $E_2$ :

$$E_2 = \int \frac{1}{A_2} \int \frac{I(\theta, \psi) \cos \xi}{D^2} dA_1 dA_2$$

Ecuación 39

La doble área de integración usualmente no puede ser evaluada analíticamente, y una doble sumatoria se utiliza como aproximación. En este caso la luminaria y la superficie

receptora son discretizadas en pequeñas áreas. Cuanto más pequeñas sean éstas, más preciso será el resultado:

$$E_2 = \frac{1}{A_2} \sum_i \sum_j I(\theta_{ij}, \psi_{ij}) \cos \xi_{ij} \frac{a_{1i} a_{2j}}{D_{ij}^2}$$

Ecuación 40

donde la sumatoria es en todas las partes discretas de la luminaria y de la superficie receptora, y

$I(\theta_{ij}, \psi_{ij})$  = intensidad de la parte i-ésima de la superficie de la luminaria hacia la parte j-ésima de la superficie receptora,

$\xi_{ij}$  = ángulo de incidencia del flujo desde la parte i-ésima de la superficie de la luminaria,

$a_{1i}$  = área de la parte i-ésima de la superficie de la luminaria,

$a_{2j}$  = área de la parte j-ésima de la superficie receptora,

$D_{ij}$  = distancia entre la parte i-ésima de la superficie de la luminaria y la parte j-ésima de la superficie receptora,

$A_1$  = área de la superficie de la luminaria.

$A_2$  = área de la superficie receptora.

## **BIBLIOGRAFÍA**

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 9]



# FOTOMETRÍA

La fotometría determina la intensidad por cálculo, midiendo la iluminancia y la distancia de test. Si la fuente se asume como puntual, entonces la intensidad y la iluminancia están relacionadas por la ecuación para transferencia de flujo directa desde una fuente puntual a un punto. Si las mediciones de iluminancia son hechas con la normal de la superficie del instrumento de medida orientada hacia el centro fotométrico, entonces el coseno en la ecuación que da la iluminancia en un punto producida por una fuente puntual se transforma en 1 resultando

$$I = E_t D_t^2$$

donde

$I$  = intensidad luminosa,

$E_t$  = iluminancia medida,

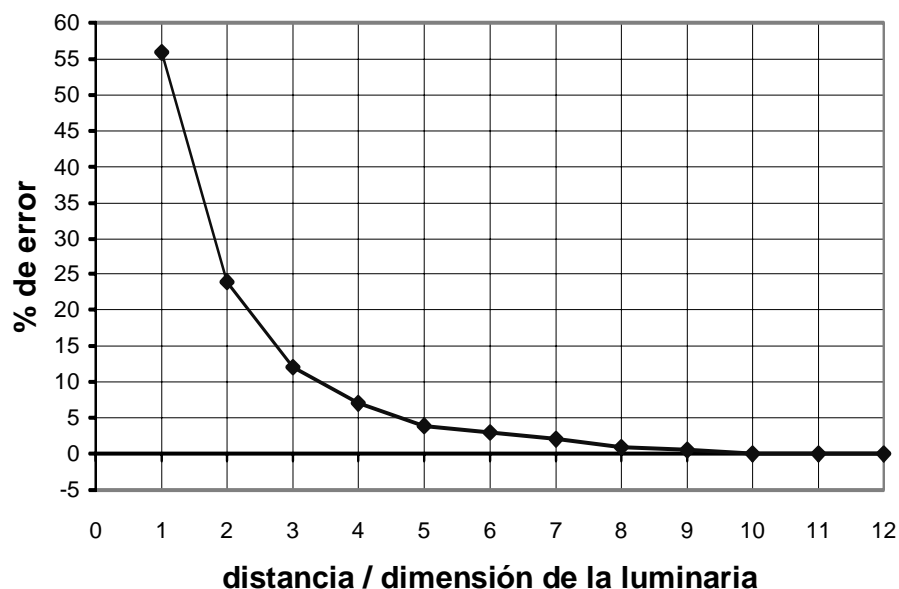
$D_t$  = distancia de medición (test).

## FOTOMETRÍA DE CAMPO LEJANO

Asumir que la luminaria es un punto permite que la iluminancia producida bajo cualquier circunstancia geométrica sea calculada. El valor computacional de las distribuciones de intensidad descansa en la hipótesis de que la iluminancia varía proporcionalmente al recíproco de la distancia al cuadrado y al coseno del ángulo de incidencia.

Sólo una fuente luminosa puntual produce iluminancias que siempre varían de acuerdo al inverso de la distancia al cuadrado. Sin embargo, sin tener en cuenta el tamaño de la luminaria, siempre es posible elegir una distancia,  $D_t$ , suficientemente grande para que las iluminancias producidas a distancias mayores que  $D_t$  varíen (aproximadamente) como el inverso del cuadrado de la distancia. Para los emisores difusos  $D_t$  es cinco veces la dimensión máxima del emisor. Esta regla de las "cinco veces" permite para emisores difusos una precisión de cálculo del 2% en el peor caso. En fotometría de campo lejano, una distancia de por lo menos  $D_t$  se utiliza para hacer las mediciones de iluminancia, de donde se calculan las intensidades luminosas. Estas intensidades pueden entonces ser utilizadas para calcular iluminancias en distancias mayores que  $D_t$ , tratando la luminaria como una fuente puntual. La mayoría de la fotometría comercial es fotometría de campo lejano.

Los cálculos de iluminancias a distancias menores que  $D_t$ , que asuman que la luminaria es una fuente puntual serán probablemente incorrectos. Como guía de las inexactitudes que pueden ocurrir, en la figura se muestra una curva de error de iluminancia para un emisor difuso cuadrado. El error, en por ciento del valor correcto, está dado como una función de la razón entre la distancia de cálculo  $D$  y la dimensión de la luminaria. La regla de las "cinco veces" requiere que esta razón sea 5 o más.



Comparaciones entre mediciones y predicciones utilizando luminarias reales dan resultados similares. Debería observarse que las distribuciones de intensidad de otra manera que las de un emisor difuso tienen diferentes valores de  $D_r$ . Sin embargo, es costumbre aplicar la regla de las "cinco veces" a toda la fotometría de luminarias.

## FOTOMETRÍA DE CAMPO CERCANO

La fotometría de campo cercano describe la distribución espacial del flujo de una luminaria de una manera que permita el cálculo de la iluminancia con precisión a distancias menores que  $D_r$ . La fotometría de campo cercano es particularmente importante para analizar sistemas de iluminación indirecta. Dos tipos de fotometría de campo cercano han sido desarrollados expresamente para mejorar la exactitud de los cálculos.

## FOTOMETRÍA DE DISTANCIA DE APLICACIÓN

La fotometría de distancia de aplicación utiliza distancias de test que sean iguales a las distancias a las cuales se harán los cálculos. No se hacen hipótesis sobre la invariancia con la distancia. En este caso la luminaria debe ser tratada como una fuente puntual para los cálculos. Debido a que los cálculos de iluminancia probablemente se realicen para muchas distancias, la fotometría de distancia de aplicación provee distribuciones de intensidad para varias distancias de test.

## FOTOMETRÍA DE CAMPO DE LUMINANCIA

La fotometría de campo de luminancia mide e informa la distribución de luminancia de la luminaria, como vista desde un conjunto de puntos alrededor de la luminaria. Todos los puntos están a la misma distancia desde el centro fotométrico de la luminaria. Precisamente indicados, los datos describen un campo escalar de cuatro dimensiones de la luminancia. Con estos datos de luminancia, la iluminancia puede ser calculada para cualquier condición geométrica.

### **BIBLIOGRAFÍA**

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 9]

# PÉRDIDAS DE LUZ

Los factores de pérdidas de luz ajustan los cálculos de iluminación del laboratorio controlado a las condiciones reales de campo. Representan diferencias en los lúmenes de salida de la lámpara y de la luminaria, y diferencias entre las reflectancias de las superficies entre las dos condiciones (laboratorio controlado y condiciones reales de campo). Los cálculos basados solamente en datos de laboratorio probablemente provean cotas superiores si no se modifican por los factores de pérdidas de luz.

Los factores de pérdidas de luz se dividen en dos grupos: recuperables y no recuperables. Los factores recuperables son aquellos que pueden ser cambiados por mantenimiento regular, como por ejemplo limpiando y cambiando las lámparas de las luminarias y limpiando o pintando las superficies del lugar. Los factores no recuperables son aquellos atribuidos al equipo y a las condiciones del lugar y que no pueden ser cambiados con mantenimiento regular.

## Factores de pérdidas de luz

### No recuperables:

- Factor de temperatura ambiente de la luminaria.
- Factor térmico de extracción de calor.
- Factor voltaje-luminaria.
- Factor de balasto.
- Factor fotométrico lámpara-balasto.
- Factor de operación del equipo.
- Factor de depreciación de la superficie de la luminaria.

### Recuperables:

- Factor de depreciación del flujo de la lámpara.
- Factor de depreciación por suciedad de la luminaria.
- Factor de depreciación por suciedad de las superficies del lugar.
- Factor de lámparas quemadas.

Se asume que los factores de pérdidas de luz representan efectos independientes y por lo tanto multiplicativos. El *factor de pérdidas de luz total* es el producto de todos los factores aplicables listados. Ningún factor debería ser ignorado (considerado igual a 1) hasta que las investigaciones lo justifiquen. Los cálculos de iluminación no deberían intentarse hasta que todos los factores de pérdidas de luz sean considerados.

## FACTORES NO RECUPERABLES

Los factores no recuperables usualmente no son controlados por procedimientos de mantenimiento de iluminación. Algunos existirán inicialmente y continuarán a lo largo de la vida de la instalación, siendo su efecto tan pequeño que una corrección sería innecesaria, o siendo demasiado costoso corregirlos. Sin embargo, todos deben ser estudiados porque pueden disminuir lo planeado en cuanto a luminosidad saliente del sistema de iluminación.

## FACTOR DE TEMPERATURA AMBIENTE DE LA LUMINARIA

El efecto de la temperatura ambiente en la luz que sale de algunas luminarias es considerable. Variaciones en la temperatura, en el rango que normalmente se encuentra en interiores, tiene un efecto reducido en la luz que sale de las luminarias con lámparas de incandescencia y de descarga de alta intensidad, pero afecta apreciablemente la luz que entregan las luminarias fluorescentes. El *factor de temperatura ambiente de la luminaria* es la fracción de pérdida de lúmenes de una luminaria fluorescente debido a temperaturas internas de la luminaria diferentes a las temperaturas a las cuales se realizó la fotometría. Este factor debería tener en cuenta cualquier variación de temperatura alrededor de la luminaria, los medios y condiciones de montaje de la luminaria, y el uso de cualquier aislación en conjunción con la aplicación de la luminaria.

## FACTOR TÉRMICO DE EXTRACCIÓN DE CALOR

Las luminarias fluorescentes con manejo de aire son integradas con el sistema HVAC como un medio de introducir o remover aire. Esto tiene un efecto en la temperatura de la lámpara y en consecuencia en los lúmenes de la lámpara. El *factor térmico de extracción de calor* es la fracción de pérdida o ganancia de lúmenes debido al flujo de aire. Generalmente, los fabricantes dan datos de test de la luminaria específicos para este factor para varios caudales de aire. Típicamente, este factor se aproxima a un valor constante para caudales de aire mayores que 10-20 ft<sup>3</sup>/min a través del compartimento de la lámpara de una luminaria.

## FACTOR VOLTAJE-LUMINARIA

El voltaje en servicio es difícil de predecir, pero altos o bajos voltajes en la luminaria afectan la salida luminosa de la mayoría de las luminarias. Para tener en cuenta este efecto se aplica un *factor voltaje-luminaria*. Para unidades incandescentes, pequeñas desviaciones en torno al voltaje nominal de la lámpara causan aproximadamente un 3% de cambio en los lúmenes por cada 1% de desviación en el voltaje. Para luminarias con lámparas de mercurio con balastos de alta reactancia el cambio en los lúmenes es aproximadamente 3% por cada 1% de desviación en el voltaje primario del balasto. Cuando se utilizan balastos de salida regulada, los lúmenes son relativamente independientes del voltaje primario en el rango de diseño. La salida luminosa de luminarias fluorescentes que utilizan balastos magnéticos convencionales cambia aproximadamente un 1% por cada 2.5% de cambio en el voltaje primario. Características diferentes se aplican a balastos electrónicos o magnéticos de ahorro de energía y dependen de parámetros de diseño específicos.

## FACTOR DE BALASTO

Los lúmenes que salen de una lámpara fluorescente dependen del balasto utilizado con la lámpara. Los lúmenes de salida de lámparas con balastos comerciales generalmente

difieren de los de las lámparas con balastos de referencia estándar utilizados para determinar los lúmenes nominales. Por esta razón, un *factor de balasto* multiplicativo se requiere para corregir los lúmenes nominales de la lámpara al desempeño real de la luminaria. El *factor de balasto* es el flujo en fracción de una lámpara fluorescente o de lámparas operadas con el balasto real dividido por el flujo cuando es operada con los balastos estándar (de referencia) especificados para los lúmenes nominales de la lámpara. Los factores de balasto se determinan de acuerdo con el American National Standard Methods of Measurement of Fluorescent Lamp Ballasts.

## FACTOR FOTOMÉTRICO LÁMPARA-BALASTO

Las variaciones en los lúmenes de las lámparas causan un cambio en la magnitud pero no en la distribución espacial de intensidad de luminarias fluorescentes (para una misma lámpara). Consecuentemente, todos los datos fotométricos pueden ser corregidos por un factor multiplicativo para tipos de balastos y lámparas que difieren de los utilizados en los tests fotométricos. Este factor es el *factor fotométrico lámpara-balasto*, y se mide para una combinación lámpara-balasto específica con relación a la usada en la fotometría de la luminaria.

## FACTOR DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

Los lúmenes de salida de las lámparas de descarga de alta intensidad (en inglés high-intensity discharge, HID) dependen del balasto, de la posición de operación de la lámpara y de la potencia reflejada desde la luminaria hacia la lámpara. Estos efectos son colectivamente incorporados en el *factor de operación del equipo*, el cual se define como la razón entre el flujo de una combinación lámpara-balasto-luminaria HID, en una posición de operación dada, y el flujo de la combinación lámpara luminaria operando en la misma posición para los lúmenes nominales de la lámpara y utilizando el balasto estándar (de referencia) especificado para lúmenes nominales de la lámpara. Los factores de operación de equipo se determinan de acuerdo con el IES Approved Method for Determining Luminaire-Lamp-Ballast Combination Operating Factors for High Intensity Discharge Luminaires.

Para lámparas HID, el *factor de posición de la lámpara* (en inglés *lamp position factor* o *tilt factor*) es la razón entre el flujo de una lámpara HID en una posición de operación dada y el flujo cuando la lámpara opera en una posición en la cual los lúmenes de la lámpara son los nominales. Este factor se determina a potencia de lámpara constante y constituye parte del factor de operación del equipo. El factor de posición de la lámpara es razonablemente consistente para tipos de lámparas de mercurio. Sin embargo, para lámparas de haluros metálicos varía de lámpara a lámpara y depende de la historia de operación; así, en realidad no es constante incluso para una lámpara dada.

## FACTOR DE DEPRECIACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA LUMINARIA

La depreciación de la superficie de la luminaria resulta de los cambios adversos en el metal, pintura y componentes plásticos lo cual resulta en una reducción de la luz de salida. Superficies de vidrio, porcelana o aluminio procesado tienen una depreciación

despreciable y puede ser restablecida la reflectancia original. Esmalte horneado y otras superficies pintadas tienen una depreciación permanente porque todas las pinturas son porosas en algún grado. Entre los plásticos, el acrílico es el menos susceptible de cambiar, pero su transmitancia puede ser reducida por uso en un período de 15-20 años en ciertas atmósferas. Para el mismo uso, el policarbonato tiene una transmitancia más baja y se deprecia más rápido.

## FACTORES RECUPERABLES

Los factores recuperables siempre necesitan ser considerados en la determinación del factor total de pérdidas de luz. La magnitud de cada uno depende de los procedimientos de mantenimiento que se utilicen además del ambiente físico y de las lámparas y luminarias a ser instaladas.

### FACTOR DE DEPRECIACIÓN DEL FLUJO DE LA LÁMPARA

Los lúmenes de salida de las lámparas cambian gradualmente y continuamente a lo largo de sus vidas de operación, incluso con condiciones de operación constantes. El *factor de depreciación del flujo de la lámpara* es la fracción de los lúmenes iniciales producidos en un tiempo específico durante la vida de la lámpara. La información acerca del factor de depreciación del flujo de la lámpara como una función de las horas de operación de la lámpara está disponible en las tablas y gráficas del fabricante para depreciación de lúmenes y mortalidad de la lámpara elegida.

### FACTOR DE DEPRECIACIÓN POR SUCIEDAD DE LA LUMINARIA

La acumulación de suciedad en las luminarias resulta en una pérdida en la salida de luz, y por lo tanto una pérdida en el plano de trabajo. Esta pérdida es conocida como *factor de depreciación por suciedad de la luminaria*.

### FACTOR DE DEPRECIACIÓN POR SUCIEDAD DE LAS SUPERFICIES DEL LUGAR

La acumulación de suciedad en las superficies del lugar reduce la cantidad de flujo luminoso reflejado e interreflejado hacia el plano de trabajo. Para tener en cuenta esto, se aplica un *factor de depreciación por suciedad de las superficies del lugar* para utilizar en el cálculo de niveles de iluminancia promedio mantenida.

### FACTOR DE LÁMPARAS QUEMADAS

Las lámparas quemadas contribuyen a las pérdidas de luz. Si las lámparas no son reemplazadas rápido después de quemarse, la iluminancia promedio disminuirá proporcionalmente. El *factor de lámparas quemadas* es la razón del número de lámparas que permanecen prendidas sobre el total, para el máximo número de lámparas quemadas permitido.

## FACTOR DE PERDIDAS DE LUZ TOTAL

El *factor de pérdidas de luz total* (en inglés *total light loss factor*, LLF) es simplemente el producto de todos los factores descritos anteriormente. Cuando los factores no son conocidos, o no son aplicables, se asumen iguales a la unidad. A esta altura, si se encuentra que el factor de pérdidas de luz total es excesivo, puede ser deseable para el diseñador reelegir las luminarias.

### **BIBLIOGRAFÍA**

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 9]



# CANTIDADES BÁSICAS

Las cantidades que se toman como básicas en los cálculos de iluminación son:

- Iluminancia,
- Luminancia,
- Excitancia.

## ILUMINANCIA

La iluminancia es una de las cantidades fundamentales que se utilizan para diseñar y evaluar sistemas de iluminación. Para determinar la iluminancia directa en un punto en un área, se debe determinar si es aplicable un método de fuente puntual o área según sea la situación. Para obtener la iluminancia total en cualquier punto de cualquier superficie, la componente interreflejada debe ser determinada apropiadamente y agregada a la componente directa.

## LUMINANCIA

Como estímulo visual primario, la luminancia es la cantidad calculada más importante y útil. Una de las situaciones más comunes en la cual la luminancia debe ser calculada es para la evaluación de tareas visuales. Los métodos para evaluar el desempeño visual o visibilidad de una tarea requieren un valor para el contraste, tamaño y luminancia de adaptación de la tarea. Las luminancias de la tarea ( $L_t$ ) y del segundo plano ( $L_b$ ) son necesarias para determinar el contraste de tarea. Las cantidades  $L_t$  y  $L_b$  son específicas de una ubicación de tarea particular, condición de iluminación y orientación del observador.

Los cálculos de luminancia se realizan cuando es necesario calcular la luminancia de una superficie que exhiba una reflectancia direccionalmente sensible. Un modelo de cálculo que compute luminancia debería permitir predecir la luminancia en cualquier punto. Mientras que no se requiere que cualquier método dado permita tener en cuenta todos los rangos posibles de los nueve parámetros siguientes, cualquier restricción que el método imponga debería observarse adecuadamente:

- Dimensiones y forma del lugar.
- Reflectancias de las superficies del lugar.
- Características de las luminarias.
- Cantidad y ubicación de las luminarias.
- Naturaleza de las superficies dadas.
- Ubicación del observador, línea de vista y ángulo de visión.
- Naturaleza y luminancia de todas las demás superficies en el ambiente.
- Efectos de sombra de los cuerpos.
- Efectos de polarización.

La luminancia en un ambiente luminoso particular en una ubicación particular está dada por

$$L = \int dE(\theta, \psi) f_r(\theta, \psi)$$

donde

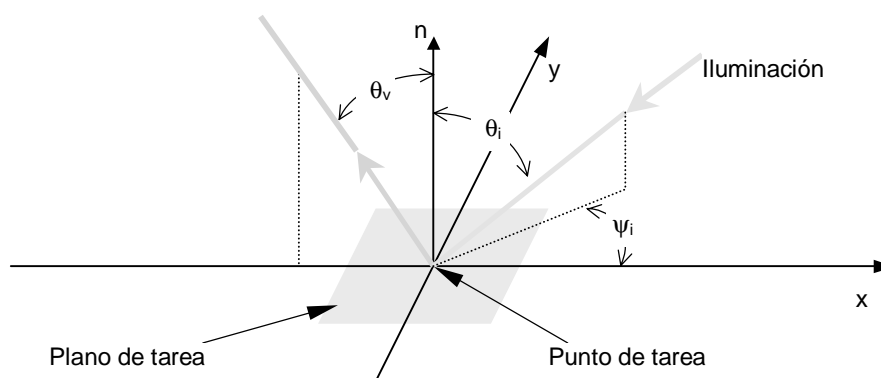
$L$  = luminancia en un punto de una superficie en una dirección de visión particular,

$\theta, \psi$  = coordenadas esféricas, declinación y acimut, respectivamente,

$dE(\theta, \psi)$  = cantidad diferencial de iluminancia en el punto en el plano de la superficie de una dirección indicada por  $(\theta, \psi)$ ,

$f_r(\theta, \psi)$  = función de distribución de reflectancia bidireccional del material de la superficie para una dirección de visión particular.

La figura siguiente indica las coordenadas necesarias.



Esta expresión representa el efecto total de todos los componentes de la iluminancia multiplicados por la función de distribución de reflectancia bidireccional apropiada, para dar la iluminancia de la superficie. La función de distribución de reflectancia bidireccional depende de las características de reflectancia de la superficie, del ángulo de visión y de las dimensiones de la fuente de luz utilizada en la medición.

Debería observarse que a diferencia de las reflectancias perfectamente difusas, la función de distribución de reflectancia bidireccional es sensible al ángulo de luz incidente y a las direcciones de visión. Esto puede expresarse como

$$f_r(\theta_v, \psi_v, \theta_i, \psi_i)$$

donde el subíndice  $i$  representa la dirección incidente y el subíndice  $v$  la dirección de visión. En muchos casos sólo se requiere la diferencia entre el ángulo de acimut de la dirección incidente y la de visión. Entonces la especificación de la función de distribución de reflectancia bidireccional queda

$$f_r(\theta_v; \theta_i, \psi_i)$$

donde  $\psi_i$  es la diferencia en el ángulo de acimut entre la dirección incidente y la dirección de visión. Esta simplificación no es posible con materiales no axialmente

isotrópicos como por ejemplo superficies de metal pulidas. En tales casos, el ángulo de acimut incidente y el de visión no pueden hacerse relativos, sino que debe haber una orientación fija con respecto de la superficie. Sin embargo, para muchas superficies la simplificación puede ser hecha y la ecuación de la luminancia queda

$$L(\theta_v) = \int dE(\theta_i, \psi_i) f_r(\theta_v; \theta_i, \psi_i)$$

El ángulo de visión  $\theta_v$  normalmente se mantiene constante.

Algunas superficies ofrecen sensibilidad a la polarización. Entonces es posible separar la función de distribución de reflectancia bidireccional en dos componentes ortogonales asociadas con planos ortogonales de polarización ( $p_1$  y  $p_2$ ). Las funciones de distribución de reflectancia bidireccional son

$$f_{rp1}(\theta_v; \theta_i, \psi_i)$$

$$f_{rp2}(\theta_v; \theta_i, \psi_i)$$

De forma complementaria, se pueden considerar separadamente dos componentes ortogonales de la iluminancia, indicadas como  $dE_{p1}$  y  $dE_{p2}$ . Esto da

$$L(\theta_v) = \int [dE_{p1}(\theta_i, \psi_i) f_{rp1}(\theta_v; \theta_i, \psi_i) + dE_{p2}(\theta_i, \psi_i) f_{rp2}(\theta_v; \theta_i, \psi_i)]$$

La expresión de  $L$  es general y aplicable a todas las situaciones. Dado que los valores de iluminancia y los factores de luminancia deben ser expresados como funciones analíticas para la integración de estas expresiones, pueden ser, en general, expresiones analíticas de forma no cerrada para  $L$ . La aproximación por el método de elementos finitos permite una evaluación de la ecuación. Ahora las funciones de distribución de reflectancia bidireccional toman la forma de un conjunto de valores discretos que muestrean la función continua. La aproximación resultante es

$$L(\theta_v) \approx \sum [\Delta E_{p1}(\theta_i, \psi_i) f_{rp1}(\theta_v; \theta_i, \psi_i) + \Delta E_{p2}(\theta_i, \psi_i) f_{rp2}(\theta_v; \theta_i, \psi_i)]$$

La sumatoria es en todos los valores discretos de iluminancia. La cantidad de pasos discretos determina la precisión de la aproximación. En estas aproximaciones el paso se determina por la necesidad de determinar altos gradientes de iluminancia o de las funciones de distribución de reflectancia bidireccional.

En caso de cálculos de luminancia para tareas visuales, se puede aplicar una modificación a la función de distribución de reflectancia bidireccional para tener en cuenta la sombra de un cuerpo.

## EXITANCIA

Si las superficies del lugar se consideran lambertianas, entonces se pueden encontrar las excitancias de elementos discretos utilizando el modelo de transferencia de flujo descrito anteriormente. Las distribuciones de exitancia a lo largo de las superficies de

un lugar pueden ser determinadas en un arreglo de puntos que las cubran, utilizando software de análisis de iluminación. Para lugares con sistema de iluminación uniforme, las exitancias promedio de las superficies del lugar pueden determinarse utilizando el método del lumen.

## **BIBLIOGRAFÍA**

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 9]

# CANTIDADES ESTADÍSTICAS

Cuando se requieren cálculos de iluminación y modelado de sistemas, es importante que un método apropiado sea aplicado para predecir el desempeño del sistema. Si se utiliza un modelo inapropiado, los resultados pueden ser inexactos. Por lo tanto, un diseñador debería tener conocimiento de las capacidades y limitaciones de las diferentes opciones de modelar y sus aplicaciones.

## PROMEDIOS

Un valor promedio es la forma más simple de especificar el desempeño de un sistema de iluminación. "Promedio" usualmente se refiere a la media de varios valores calculados o medidos. La iluminancia promedio (o un promedio de cualquier otra cantidad) debería utilizarse sólo cuando se espere que la distribución sea unimodal y normalmente distribuida (esto es, la distribución con forma de campana común). Cuando se desea un sistema de iluminación localizada, como por ejemplo para un escritorio en una recepción, resultará una distribución bimodal o multimodal, y un método de cálculo de iluminancia promedio no debería utilizarse. Un valor promedio puede utilizarse para diseñar el sistema para el espacio de circulación general, pero para el área de trabajo, cálculos de fuentes puntuales individuales deberían utilizarse para caracterizar la iluminación en este caso.

En general, un valor promedio solo no es suficiente para describir completamente o evaluar el desempeño de sistemas de iluminación. También es importante la información sobre la uniformidad de la iluminación.

## MÍNIMA Y MÁXIMA

Si para el cálculo se utiliza un número muy grande de puntos, entonces se puede evaluar la variabilidad de la iluminación y se pueden determinar y localizar los valores mínimo y máximo. La mínima y la máxima pueden ser indicadores importantes de la calidad del diseño, particularmente si se desvían significativamente del promedio deseado. En algunas situaciones de diseño, los valores de diseño mínima y máxima deben ser especificados. En la evaluación de si un diseño es o no aceptable, es importante fijarse en las áreas de trabajo críticas en un espacio. La mínima ocurre con frecuencia alrededor del perímetro de una habitación o área iluminada, donde probablemente no se localiza el trabajo. Niveles por debajo del nivel objetivo podrían ser aceptables si no están en la real ubicación del trabajo. En otras situaciones de diseño, el valor máximo puede ser crítico. Por ejemplo, podría no ser deseable tener luminancias de superficie de una habitación que excedan un valor particular. Este es el caso en las recomendaciones de iluminación para espacios con terminales de despliegue visual (VDTs).

La uniformidad se expresa frecuentemente en términos de una razón entre dos cantidades. Son ejemplos máxima/mínima, máxima/promedio, y promedio/mínimo.

Diferentes situaciones de diseño justifican usos diferentes de estas medidas.

## CRITERIOS DE VALORACIÓN

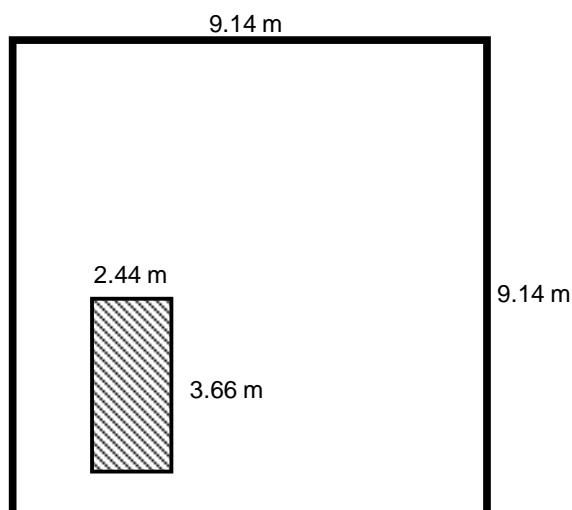
Los valores máxima y mínima proveen de poca información acerca de la distribución total de una cantidad particular fotométrica o derivada en un espacio. Los criterios de valoración son una forma más conveniente de obtener más detalles considerando la distribución de una cantidad en el espacio. El *criterio de valoración* es la probabilidad de que un criterio específico sea alcanzado o excedido en cualquier lugar de un área definida. Puede ser utilizado además de (o en vez de) conceptos como por ejemplo promedios o niveles mínimo y máximo. Los criterios de iluminación a los cuales se les puede aplicar esta técnica incluyen luminancia, iluminancia, probabilidad de confort visual (VCP), contraste, medidas de visibilidad y medidas de desempeño visual.

El criterio de valoración asume el nombre del criterio siendo valorado. Por ejemplo, el criterio de valoración para iluminancia es llamado valoración de iluminancia; para VCP, valoración de VCP. Así, por ejemplo, que una iluminación de 500 lx ha sido establecida como el criterio de diseño para un espacio. La valoración de iluminancia define la probabilidad de que en cualquier punto del plano de trabajo la iluminancia sea igual o mayor que 500 lx. Este criterio de valoración se determina evaluando las cantidades apropiadas (por cálculo o medida) en una grilla de puntos que cubren el área en cuestión. La distancia entre puntos de evaluación no debe exceder un quinto de la distancia desde cualquier luminaria al plano de evaluación. El porcentaje de puntos que cumplen con el criterio es el criterio de valoración:

$$\text{criterio de valoración} = \frac{(\text{número de puntos que satisfacen el criterio}) \times 100}{\text{número de puntos computados o medidos}}$$

Los criterios de valoración pueden ser expresados utilizando una notación la cual lista la valoración, en por ciento, seguida por el criterio, separados por el símbolo @. Por ejemplo, un sistema de iluminación que produce una luminancia de 20 cd/m<sup>2</sup> sobre 60% del área especificada puede tener su valoración de luminancia expresada como 60% @20 cd/m<sup>2</sup>. Para criterios adimensionados, como por ejemplo contraste y VCP, la letra para el criterio de valoración debe incluir el nombre y el valor del criterio; por ejemplo, 92% @70 VCP significa que el 92% del área tiene un VCP de 70 o mejor. El área de cubrimiento deseada para un valor de criterio particular la determina el diseñador.

Como ejemplo del uso de la técnica de criterios de valoración, considérese una habitación cuadrada de 9.14 m de lado, con una altura del techo de 2.44 m, un plano de trabajo a 0.91 m de altura y sin las luminarias, como se muestra en la siguiente figura.



258	301	377	484	560	603	657	646
258	312	409	538	571	592	646	678
248	301	409	538	571	592	646	678
248	301	388	517	549	560	581	592
258	312	398	549	571	592	624	635
237	291	366	474	517	549	581	592
248	301	377	517	549	581	614	624
258	301	409	560	571	624	635	646
258	312	431	592	592	624	667	689
248	269	398	538	560	581	603	614
215	248	344	474	527	506	538	581
194	237	323	398	452	484	517	527

Los valores tabulados en la figura son iluminancias calculadas en el área sombreada de  $2.44 \times 3.66$  m. La iluminancia requerida es 538 lux en el área sombreada. La distancia desde el plano de trabajo a las luminarias es 1.53 m ( $2.44 \text{ m} - 0.91 \text{ m}$ ). Así, la distancia entre filas y columnas de puntos de análisis no debe ser mayor que 0.31 m ( $1.53 \text{ m} / 5$ ). Para determinar el criterio de valoración, se examina si los valores calculados de iluminancia cumplen el criterio. Se encuentra que 47 de los 96 lugares reciben una iluminancia de 538 lux o más. La valoración de iluminancia de este sistema de iluminación para el área sombreada es entonces 48.9% ( $(47/96) \times 100$ ). Esto puede expresarse como 48.9% @538 lux.

## BIBLIOGRAFÍA

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 9]

# INTERREFLEXIÓN DE LA LUZ

Una parte de la luz que incide en una superficie arquitectónica es reflejada y otra absorbida. La porción reflejada se irradia hacia otras superficies, donde será absorbida y reflejada nuevamente. Esto puede pensarse como que ocurre un número infinito de veces. El fenómeno repetido de intercambio de luz por múltiples reflexiones es llamado *interreflexión*. Las superficies arquitectónicas se hacen luminosas por interreflexión, así como por la luz que las alcanza directamente desde fuentes como luminarias y ventanas. Las exitancias que estas superficies exhiben bajo estas circunstancias se dice que están en *equilibrio luminoso*. Esto es, las exitancias presentes cuando la luz que proviene de luminarias y la luz natural son balanceadas por la luz absorbida por las superficies. Estas exitancias se llaman *exitancias finales*, en contraste con las *exitancias iniciales*, que son las producidas directamente por la luz proveniente de las luminarias o la luz natural, antes del proceso de interreflexión.

Las superficies que se hacen luminosas por interreflexión se vuelven fuentes de luz adicionales que deberían ser consideradas cuando se determine la iluminancia. La iluminancia producida por luz reflejada es llamada la componente interreflejada. En la mayoría de los escenarios arquitectónicos usualmente se asume que las superficies involucradas exhiben una reflectancia difusa y por lo tanto son emisores difusos. Estos pueden ser tratados como fuentes área difusa, y la iluminancia se calcula utilizando las ecuaciones para una fuente área difusa, involucrando los factores de configuración y exitancia de superficie. La componente interreflejada total en un punto de análisis es

$$E_{\text{inter}} = \sum_{i=1}^N C_{i \rightarrow P} M_i$$

donde

$C_{i \rightarrow P}$  = factor de configuración de la superficie  $i$  al punto  $P$ ,  
 $M_i$  = exitancia difusa de la superficie  $i$ .

Así, el cálculo de la componente interreflejada de la iluminancia requiere la determinación de las exitancias finales de las superficies que sean luminosas por interreflexión.

El procedimiento de cálculo más útil para determinar las exitancias finales es el método de elementos finitos. Las superficies en el espacio se discretizan, y se asume que cada elemento tiene una exitancia diferente pero uniforme. En la mayoría de los casos también se puede asumir que las reflectancias son perfectamente difusas. La precisión del patrón de luminancia calculado depende del tamaño de las zonas y del grado en que las reflectancias sean difusas.

El modelar las superficies del lugar como elementos discretos no sólo permite una aproximación al patrón de exitancia real del lugar, sino que puede representar el efecto de puertas, ventanas, carteleras y pizarrones. Debido a que estas superficies difieren generalmente de las paredes en reflectancia, la exitancia también es diferente, y así mismo su efecto en la iluminancia en el espacio.



El grado al cual el patrón de exitancia en el recinto sea representado por el conjunto de exitancias de zonas discretas depende del tamaño de zona. Una componente direccional altamente variable, como por ejemplo la producida por un sistema de iluminación indirecta, puede requerir una discretización pequeña de las superficies. Esto permite un modelo preciso del gran gradiente de luminancia.

En modelos avanzados, obstrucciones interiores como por ejemplo tabiques y estantes también pueden ser considerados. Los tiempos de ejecución de programas de computador basados en estos modelos complejos pueden ser muy extensos por la necesidad de testear la sombra entre elementos.

Para obtener las ecuaciones para calcular la interreflexión, se escribe una ecuación de balance de flujo para cada elemento. Esta iguala el flujo total que deja un elemento al flujo incidente total multiplicado por la reflectancia del elemento. El flujo incidente total tiene una componente directa debido a las fuentes eléctrica y natural, y una componente interreflejada debida al flujo desde todos los otros elementos. La igualdad expresando el balance de flujo existe cuando todas las interreflexiones sean tenidas en cuenta. Para el  $i$ -ésimo elemento de un sistema de transferencia radiante la ecuación es

$$M_i = M_{0i} + \rho_i (F_{i \rightarrow 1} M_1 + F_{i \rightarrow 2} M_2 + \dots + F_{i \rightarrow m-1} M_{m-1} + F_{i \rightarrow m} M_m)$$

Esto puede ser escrito para cada elemento de superficie en el sistema, y resulta un conjunto de ecuaciones simultáneas linealmente independientes. Expresado en forma matricial, esto resulta

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{01} \\ M_{02} \\ \vdots \\ M_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 F_{1 \rightarrow 1} & \rho_1 F_{1 \rightarrow 2} & \dots & \rho_1 F_{1 \rightarrow m} \\ \rho_2 F_{2 \rightarrow 1} & \rho_2 F_{2 \rightarrow 2} & \dots & \rho_2 F_{2 \rightarrow m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_m F_{m \rightarrow 1} & \rho_m F_{m \rightarrow 2} & \dots & \rho_m F_{m \rightarrow m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix}$$

donde

$m$  = cantidad de zonas en el sistema,

$M_i$  = exitancia de la zona  $i$ -ésima, debido el flujo directo e interreflejado (la ecuación se resuelve para estos valores),

$\rho_i$  = reflectancia difusa de la zona  $i$ -ésima,

$M_{0i}$  = exitancia debida a la componente directa en la zona  $i$ -ésima (debido a las luminarias y a las fuentes de luz natural),

$F_{i \rightarrow j}$  = factor de forma de la zona  $i$  a la zona  $j$  (obsérvese que para zonas planas

$F_{i \rightarrow i} = 0$ ).

La ecuación matricial anterior puede escribirse en términos de la iluminancia en cada superficie. Esta forma es particularmente valiosa cuando a una o más de las reflectancias se les asigna el valor cero, debido a que en ese caso la iluminancia que llega a cada elemento es independiente de la reflectancia del elemento:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{01} \\ E_{02} \\ \vdots \\ E_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 F_{1 \rightarrow 1} & \rho_2 F_{1 \rightarrow 2} & \cdots & \rho_m F_{1 \rightarrow m} \\ \rho_1 F_{2 \rightarrow 1} & \rho_2 F_{2 \rightarrow 2} & \cdots & \rho_m F_{2 \rightarrow m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_1 F_{m \rightarrow 1} & \rho_2 F_{m \rightarrow 2} & \cdots & \rho_m F_{m \rightarrow m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix}$$

La forma más simple de resolver esta gran matriz de sistemas de elementos finitos es utilizando el método de iteración. La iteración comienza tomando el vector  $M$  igual al vector de exitancia  $M_0$  en el sistema de ecuaciones con las exitancias, utilizando éste como una estimación inicial de la solución. Esta estimación inicial de la solución se utiliza entonces en el lado derecho de la ecuación para generar otra estimación del vector solución en el lado izquierdo de la ecuación. La convergencia se alcanza rápidamente, siendo suficientes cinco iteraciones para la mayoría de las aplicaciones de iluminación. La convergencia está garantizada por la naturaleza de la matriz de convergencia como se demuestra a continuación.

$$\text{Sea } Q = \begin{bmatrix} \rho_1 F_{1 \rightarrow 1} & \rho_1 F_{1 \rightarrow 2} & \cdots & \rho_1 F_{1 \rightarrow m} \\ \rho_2 F_{2 \rightarrow 1} & \rho_2 F_{2 \rightarrow 2} & \cdots & \rho_2 F_{2 \rightarrow m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_m F_{m \rightarrow 1} & \rho_m F_{m \rightarrow 2} & \cdots & \rho_m F_{m \rightarrow m} \end{bmatrix}$$

Por definición, la norma infinito de  $Q$  es

$$\|Q\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^{j=m} |q_{ij}|$$

entonces

$$\|Q\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^{j=m} |\rho_i F_{i \rightarrow j}| = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^{j=m} \rho_i F_{i \rightarrow j}$$

como se cumple

$$\rho_i < 1 \quad \forall i, 1 \leq i \leq m$$

resulta

$$\sum_{j=1}^{j=m} \rho_i F_{i \rightarrow j} < \sum_{j=1}^{j=m} F_{i \rightarrow j} \quad \forall i, 1 \leq i \leq m$$

y dado que

$$\sum_{j=1}^{j=m} F_{i \rightarrow j} = 1 \quad \forall i, 1 \leq i \leq m$$

entonces

$$\sum_{j=1}^{j=m} \rho_i F_{i \rightarrow j} < 1 \quad \forall i, 1 \leq i \leq m$$

Por lo tanto existe una norma de matrices (la norma infinito), en la cual la norma de  $Q$  siempre es menor que 1. Entonces el método siempre converge a la solución.

Debería observarse que los valores mantenidos de las exitancias podrían diferir de los valores iniciales. Debería requerirse el cómputo de los valores mantenidos, las reflectancias de superficie utilizadas en el cómputo de la componente reflejada deberían ser las reflectancias esperadas bajo condiciones mantenidas en el ambiente. Además, un pequeño factor de pérdidas debería utilizarse en el cálculo de las exitancias iniciales.

## CARACTERIZACIÓN DE LA LUZ PARA LOS CÁLCULOS

Los cálculos de iluminación generalmente se dividen en dos componentes con el propósito de determinar la cantidad de luz que alcanza a un punto en el espacio. La *componente directa* es la luz que alcanza el punto directamente desde las luminarias o ventanas. La *componente interreflejada* es la luz que alcanza el punto desde las superficies debido a interreflexiones.

### COMPONENTE DIRECTA

La componente directa debe determinarse para puntos de interés en el plano de trabajo y cualquier superficie con propiedades de reflexión que esté siendo considerada en el análisis. La contribución a las superficies con propiedades de reflexión se utiliza para obtener la condición inicial para las interreflexiones. En el plano de trabajo, la componente directa puede tener especial importancia porque es la principal componente responsable de reflexiones deslumbrantes. Bajo un sistema típico de iluminación directa, dará la mayor parte de la iluminancia total en el plano de trabajo. En situaciones de iluminación exterior, la componente directa puede ser la única luz que reciba un punto. La componente directa puede determinarse utilizando la ley del cuadrado inverso o de fuente de área si las luminarias son grandes comparadas con las distancias involucradas.

### COMPONENTE INTERREFLEJADA

En la mayoría de los cálculos de iluminación, la componente interreflejada requiere el cálculo que consume más tiempo. La cantidad de trabajo involucrado en resolver el gran problema matricial es proporcional al cuadrado del número de elementos involucrados. Para determinar la componente interreflejada, primero debe determinarse la iluminancia inicial o componente directa en cada uno de los elementos discretos. En la mayoría de los casos, el valor en el centro de cada elemento se utiliza como aproximación de la iluminancia promedio en el elemento. Si los elementos son suficientemente pequeños, el error involucrado en esta hipótesis es minimal. Elementos grandes requieren determinaciones más cuidadosas de la exitancia inicial promedio, por ejemplo métodos de integración o cálculo en varios puntos para obtener un promedio.

La determinación de la componente interreflejada es crítica en situaciones en las cuales sea grande comparada con la componente directa, por ejemplo en aplicaciones de iluminación indirecta. Es importante que el esquema de discretización y el modelo de

cálculo que esté siendo utilizado para la componente directa sea capaz de proveer una distribución de luz la cual modele correctamente la que provee el sistema de iluminación. Podría requerirse fotometría de campo cercano para tales cálculos.

En algunos casos, un modelo de interreflexión mucho menos riguroso podría ser aplicado. Si la componente directa es ciertamente la dominante en el análisis de los puntos de interés, puede ser posible utilizar un método de cálculo de componente interreflejada simple que involucre menos elementos de superficie del lugar y más grandes. Cuando se utilizan elementos grandes, es importante recordar que el valor en el centro de una gran superficie no es necesariamente una aproximación al promedio en la misma. El flujo luminoso total que alcanza la superficie debería determinarse y luego dividirlo por el área para determinar la iluminancia promedio en la superficie.

En la aproximación más simple, el recinto es aproximado por tres superficies, y la componente interreflejada se calcula utilizando las tres exitancias de superficie que resultan de la aproximación del método del lumen.

## **BIBLIOGRAFÍA**

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 9]

# MÉTODO DEL LUMEN

El método del lumen se utiliza para calcular la iluminancia promedio en el plano de trabajo. Esta se define como

$$\bar{E} = \frac{\text{flujo total en el plano de trabajo}}{\text{área del plano de trabajo}}$$

Un coeficiente de utilización da la fracción de los lúmenes de la lámpara que alcanzan el plano de trabajo, directamente desde las fuentes y por interreflexiones. Así, el número de lúmenes producido por las lámparas, multiplicado por este coeficiente de utilización (CU), determina los lúmenes que alcanzan el plano de trabajo:

$$\bar{E}_{inicial} = \frac{(\text{total de lúmenes de lámparas}) \times \text{CU}}{\text{área del plano de trabajo}}$$

Dado que el objetivo de diseño usualmente es la iluminancia mantenida, se debe aplicar un factor de pérdidas de luz para permitir una estimación de la depreciación de los lúmenes de las lámparas en el tiempo, las pérdidas estimadas por suciedad en las superficies de la luminaria (incluyendo las lámparas) y otros factores que afectan los lúmenes de salida de la luminaria en el tiempo. La fórmula resulta

$$\bar{E}_{mantenida} = \frac{(\text{total de lúmenes de lámparas}) \times \text{CU} \times \text{LLF}}{\text{área del plano de trabajo}}$$

donde

CU = coeficiente de utilización,

LLF = factor de pérdidas de luz.

Los lúmenes de las lámparas en la fórmula se toman convenientemente como el total de lúmenes de las lámparas consideradas en las luminarias:

$$\bar{E}_{mantenida} = \frac{(\text{número de luminarias}) \times (\text{lámparas por luminaria}) \times (\text{lúmenes por lámpara})}{\text{área del plano de trabajo}} \times \text{CU} \times \text{LLF}$$

Si la iluminancia mantenida es conocida, esta ecuación se puede resolver para el número de luminarias total necesario:

$$\text{número de luminarias} = \frac{\bar{E}_{mantenida} \times (\text{área del plano de trabajo})}{(\text{lámparas por luminaria}) \times (\text{lúmenes por lámpara}) \times \text{CU} \times \text{LLF}}$$

## LIMITACIONES

La iluminancia calculada por el método del lumen es un promedio que será representativo sólo si las luminarias están espaciadas como para obtener una iluminancia razonablemente uniforme. El cálculo de los coeficientes de utilización está basado en interiores vacíos con superficies que exhiben reflectancias perfectamente difusas. La iluminancia promedio determinada por el método del lumen se define como los lúmenes totales que alcanzan el plano de trabajo, dividido por el área del plano de trabajo. El valor promedio determinado de esta forma puede variar considerablemente del que se obtiene de promediar valores discretos de iluminancia en varios puntos.

## CÁLCULOS PREVIOS

### RELACIONES DE CAVIDAD

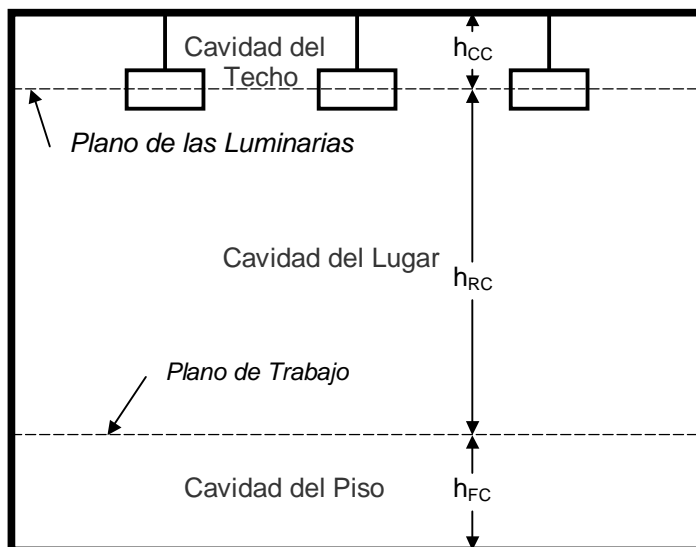
El intercambio radiactivo entre la parte superior y la base de un espacio rectangular es una función de las proporciones de su longitud, ancho y altura. Los valores de relaciones de cavidad aproximan este efecto combinando estas proporciones en una sola cantidad.

En el método de cavidad zonal, los efectos de las proporciones del lugar, longitud de la suspensión de las luminarias y altura del plano de trabajo en el coeficiente de utilización se representan por la relación de cavidad del lugar, relación de cavidad del techo y relación de cavidad del piso respectivamente. Estas relaciones se determinan dividiendo el lugar en tres cavidades, como se muestra en la figura siguiente y sustituyendo las dimensiones en la siguiente fórmula:

$$\text{relación de cavidad} = \frac{5h(\text{largo de la cavidad} + \text{ancho de la cavidad})}{\text{largo de la cavidad} \times \text{ancho de la cavidad}}$$

donde

$$h = \begin{cases} h_{RC} & \text{para la relación de cavidad del lugar (RCR)} \\ h_{CC} & \text{para la relación de cavidad del techo (CCR)} \\ h_{FC} & \text{para la relación de cavidad del piso (FCR)} \end{cases}$$



La iluminancia en recintos de forma irregular puede determinarse calculando la relación de cavidad del lugar utilizando la siguiente fórmula y resolviendo el problema de la manera usual:

$$\text{relación de cavidad} = \frac{2.5 \times (\text{altura de la cavidad}) \times (\text{perímetro de la cavidad})}{\text{área de la base de la cavidad}}$$

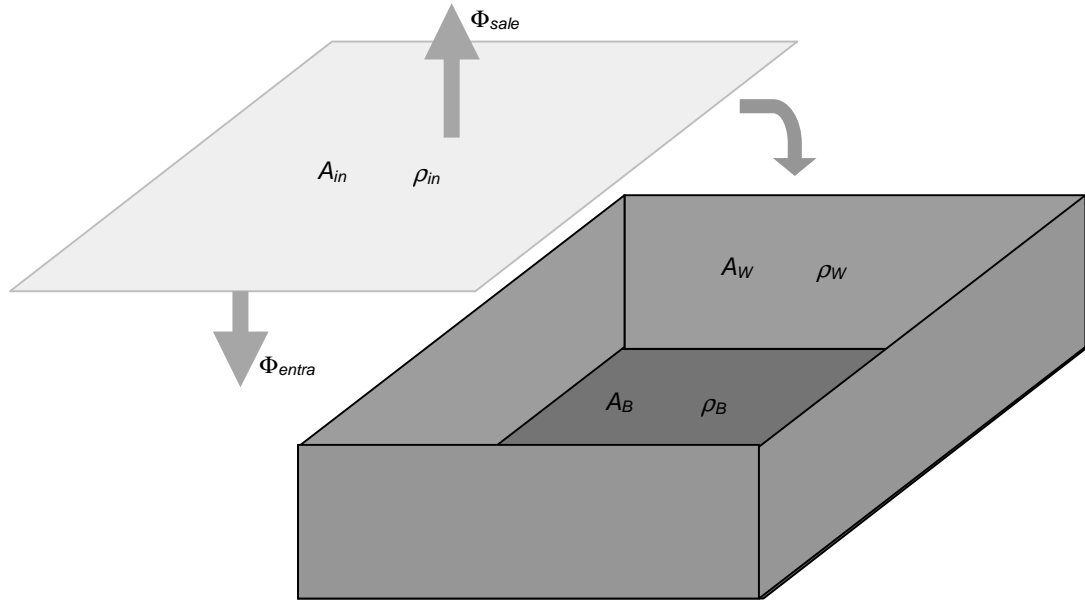
## REFLECTANCIAS DE CAVIDAD EFECTIVAS

En los cálculos del método del lumen, las reflectancias del techo, paredes y piso, deben ser valores iniciales. Obsérvese que para luminarias montadas en la superficie, la CCR vale cero y puede utilizarse la reflectancia real del techo para la reflectancia de cavidad del techo efectiva  $\rho_{CC}$ .

Una cavidad rectangular consiste en cuatro paredes, cada una con una reflectancia  $\rho_W$ , y una base con reflectancia  $\rho_B$  (reflectancia del techo o del piso). La reflectancia efectiva,  $\rho_{eff}$ , de esta cavidad es la razón entre el flujo reflejado hacia afuera y el flujo que entra a la cavidad a través de su abertura. Si las reflectancias se asumen perfectamente difusas y se asume que el flujo entra a la cavidad de forma perfectamente difusa, es posible calcular la reflectancia efectiva de la cavidad utilizando la teoría de transferencia de flujo como se muestra a continuación.

Dada una cavidad rectangular, sean:

- $A_B$  = área de la base de la cavidad,
- $A_W$  = área de las paredes de la cavidad,
- $\rho_B$  = reflectancia de la base de la cavidad,
- $\rho_W$  = reflectancia de las paredes de la cavidad.



Considérese una superficie imaginaria  $A_{in}$  como "tapa" de la cavidad. Esta superficie se toma como un emisor difuso que emite  $\Phi_{entra}$  hacia el interior de la cavidad y absorbe todo el flujo que le llega desde el interior de la cavidad ( $\Phi_{sale}$ ).

Por las ecuaciones de balance de flujo se tiene:

$$\begin{cases} E_B = E_{0B} + \rho_B F_{B \rightarrow B} E_B + \rho_W F_{B \rightarrow W} E_W + \rho_{in} F_{B \rightarrow in} E_{in} \\ E_W = E_{0W} + \rho_B F_{W \rightarrow B} E_B + \rho_W F_{W \rightarrow W} E_W + \rho_{in} F_{W \rightarrow in} E_{in} \\ E_{in} = E_{0in} + \rho_B F_{in \rightarrow B} E_B + \rho_W F_{in \rightarrow W} E_W + \rho_{in} F_{in \rightarrow in} E_{in} \end{cases}$$

Como la superficie  $A_{in}$  no refleja flujo hacia el interior,  $\rho_{in} = 0$ . La superficie  $A_{in}$ , que es el único emisor en la cavidad, no se irradia a sí mismo, entonces  $E_{0in} = 0$ . Además  $F_{B \rightarrow B} = F_{in \rightarrow in} = 0$ . Entonces el sistema de ecuaciones queda:

$$\begin{cases} E_B = E_{0B} + \rho_W F_{B \rightarrow W} E_W \\ E_W = E_{0W} + \rho_B F_{W \rightarrow B} E_B + \rho_W F_{W \rightarrow W} E_W \\ E_{in} = \rho_B F_{in \rightarrow B} E_B + \rho_W F_{in \rightarrow W} E_W \end{cases}$$

Resolviendo el sistema se obtiene:

$$E_{in} = \frac{\rho_B F_{in \rightarrow B} [E_{0B} (1 - \rho_W F_{W \rightarrow W}) + \rho_W F_{B \rightarrow W} E_{0W}] + \rho_W F_{in \rightarrow W} (E_{0W} + \rho_B F_{W \rightarrow B} E_{0B})}{1 - \rho_B F_{W \rightarrow B} \rho_W F_{B \rightarrow W} - \rho_W F_{W \rightarrow W}}$$

De acuerdo a lo visto en transferencia de flujo directa entre un emisor difuso y una superficie se tiene,



$$E_{0B} = M_{in} F_{B \rightarrow in} = \frac{\Phi_{in}}{A_{in}} F_{B \rightarrow in}$$

$$E_{0W} = M_{in} F_{W \rightarrow in} = \frac{\Phi_{in}}{A_{in}} F_{W \rightarrow in}$$

Sea  $F = F_{in \rightarrow B}$ . Recordando que la sumatoria en todos los  $j \sum F_{i \rightarrow j} = 1 \forall i$  y las propiedades vistas de los factores de forma, la geometría del problema implica:

$$F = F_{in \rightarrow B} = F_{B \rightarrow in}$$

$$F_{in \rightarrow W} = F_{B \rightarrow W} = 1 - F$$

$$F_{W \rightarrow B} = F_{W \rightarrow in} = \frac{A_B}{A_W} (1 - F)$$

$$F_{W \rightarrow W} = 1 - 2 \frac{A_B}{A_W} (1 - F)$$

Entonces, sustituyendo  $E_{0B}$ ,  $E_{0W}$ , y los factores de forma en la expresión de  $E_{in}$  resulta,

$$E_{in} = \frac{\Phi_{in}}{A_{in}} \times \frac{\rho_B \rho_W F \left[ 2 \frac{A_B}{A_W} (1 - F) - F \right] + \rho_B F^2 + \rho_W \frac{A_B}{A_W} (1 - F)^2}{1 - \rho_B \rho_W \frac{A_B}{A_W} (1 - F)^2 - \rho_W \left[ 1 - 2 \frac{A_B}{A_W} (1 - F) \right]}$$

Como por definición de iluminancia  $E_{in} = \Phi_{sale}/A_{in}$ , y por definición de reflectancia efectiva de la cavidad  $\rho_{eff} = \Phi_{sale}/\Phi_{entra}$ , entonces sustituyendo ambos valores en la ecuación anterior se obtiene:

$$\rho_{eff} = \frac{\rho_B \rho_W F \left[ 2 \frac{A_B}{A_W} (1 - F) - F \right] + \rho_B F^2 + \rho_W \frac{A_B}{A_W} (1 - F)^2}{1 - \rho_B \rho_W \frac{A_B}{A_W} (1 - F)^2 - \rho_W \left[ 1 - 2 \frac{A_B}{A_W} (1 - F) \right]}$$

donde el factor de forma  $F$  está dado por

$$F = \frac{2}{\pi xy} \ln \sqrt{\frac{(1+x^2)(1+y^2)}{1+x^2+y^2}} + \frac{2}{\pi x} \sqrt{1+x^2} \arctg\left(\frac{y}{\sqrt{1+x^2}}\right) + \frac{2}{\pi y} \sqrt{1+y^2} \arctg\left(\frac{x}{\sqrt{1+y^2}}\right) + \frac{2}{\pi x} \arctg y - \frac{2}{\pi y} \arctg x$$

donde  $x$  e  $y$  tienen los siguientes valores,

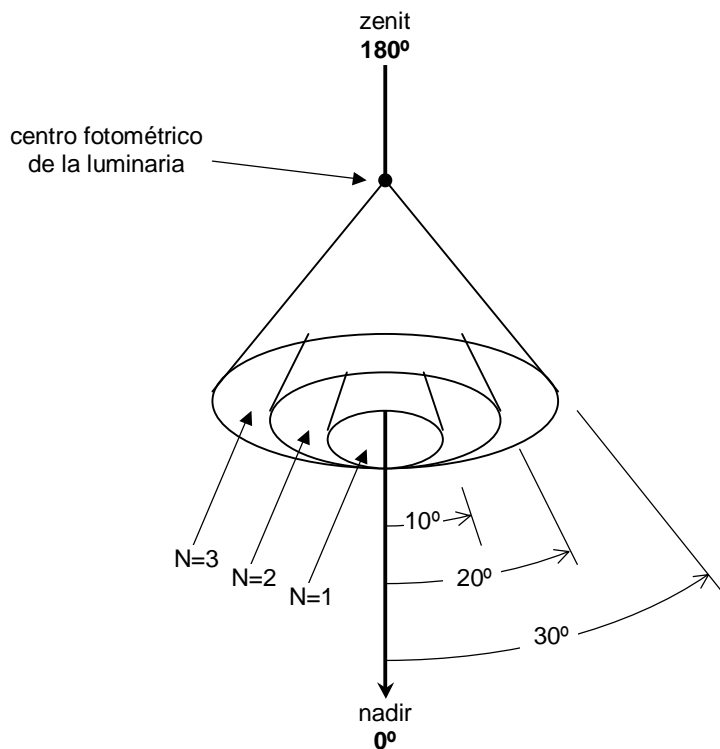
$$x = \frac{\text{largo de la cavidad}}{\text{profundidad de la cavidad}}$$

$$y = \frac{\text{ancho de la cavidad}}{\text{profundidad de la cavidad}}$$

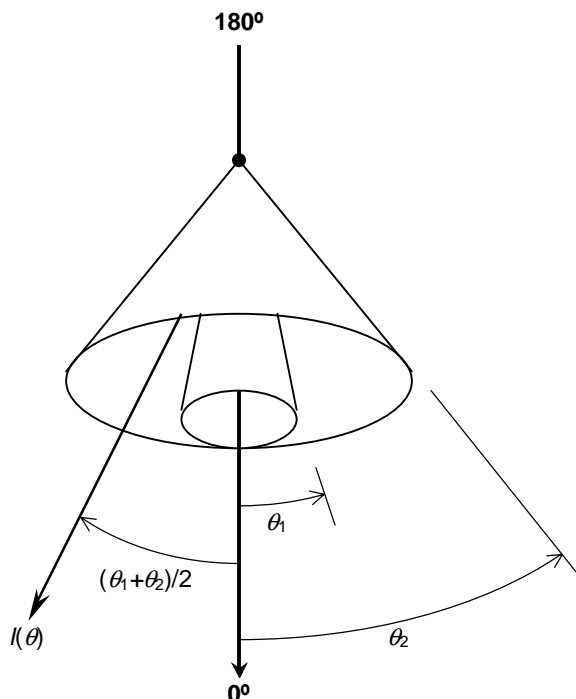
## COEFICIENTES DE UTILIZACIÓN

Cálculo del coeficiente de utilización para una luminaria:

- 1) Se definen 18 zonas que son ángulos sólidos cónicos de  $10^\circ$  de ancho desde el nadir hasta el zenit como se muestra en la figura, donde el índice de cada zona,  $N$ , es un entero entre 1 y 18 inclusive.



- 2) Se determinan los flujos  $\Phi_N$  (en lúmenes) que corresponden a las zonas:
  - a) El flujo en un ángulo sólido cónico está dado por



$$\Phi_N = 2\pi I_{\theta_N} (\cos \theta_N - \cos \theta_{N+1})$$

donde

$I_{\theta_N}$  = intensidad media de zona, en cd, para la  $N$ -ésima zona,

$\theta_N, \theta_{N+1}$  = ángulos de los límites de los conos.

- b) Si la intensidad no presenta simetría de revolución con respecto al eje vertical, se promedia la intensidad con respecto al eje vertical para cada ángulo vertical  $\theta$ . Obsérvese que la intensidad debe ser muestreada a intervalos angulares iguales con respecto al eje vertical. Por ejemplo, si la intensidad es conocida para tres planos verticales [ $I_{\theta, 90^\circ}$  (perpendicular),  $I_{\theta, 45^\circ}$  y  $I_{\theta, 0^\circ}$  (paralelo)], entonces

$$I_{\theta} = \frac{1}{4} (I_{\theta, 0^\circ} + 2I_{\theta, 45^\circ} + I_{\theta, 90^\circ})$$

Mientras que tres planos son suficientes para luminarias con simetría de revolución nominal, para luminarias sin esta simetría es preferible tomar datos fotométricos a incrementos de  $15^\circ$  o  $22.5^\circ$  con respecto al eje vertical.

Si la intensidad se toma a intervalos verticales de  $10^\circ$  ( $\theta = 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, \dots$ ), entonces el flujo  $\Phi_N$  está determinado por la aplicación de la ecuación de la parte (a) a la zona completa. Es preferible tener valores de intensidad a ángulos verticales cada  $5^\circ$  ( $\theta = 2.5^\circ, 7.5^\circ, 12.5^\circ, \dots$ ). Entonces la zona  $N$  se divide en dos partes, la ecuación se aplica a cada parte, y los flujos resultantes se suman.

- 3) Se determinan las funciones adicionales de flujo:

$$\Phi_{total} = \sum_{N=1}^{18} \Phi_N$$

$$\Phi_{abajo} = \frac{1}{\Phi_{total}} \sum_{N=1}^9 \Phi_N$$

$$\Phi_{arriba} = \frac{1}{\Phi_{total}} \sum_{N=10}^{18} \Phi_N$$

donde

$\Phi_{total}$  = flujo total de las lámparas en la luminaria,

$\Phi_{abajo}$  = proporción del flujo de las lámparas que sale de la luminaria hacia abajo,

$\Phi_{arriba}$  = proporción del flujo de las lámparas que sale de la luminaria hacia arriba.

- 4) Se determina la razón directa,  $D_G$ , relacionada con la fracción del flujo de la luminaria por debajo de la horizontal que incide directamente en el plano de trabajo:

$$D_G = \frac{1}{\Phi_{abajo} \Phi_{total}} \sum_{N=1}^9 K_{GN} \Phi_N$$

donde

$G$  = relación de cavidad del lugar (RCR), entre 1 y 10 inclusive,

$K_{GN}$  = multiplicadores zonales.

El multiplicador zonal es la fracción del flujo dirigido hacia abajo incidente en el plano de trabajo (la superficie más baja de la cavidad del lugar) para cada zona  $N$ . Los multiplicadores zonales son funciones de la RCR:

$$K_{GN} = e^{-AG^B}$$

donde  $A$  y  $B$  son constantes y están dadas en la tabla siguiente.

Zona (N)	A	B
1	0	0
2	0.041	0.98
3	0.070	1.05
4	0.100	1.12
5	0.136	1.16
6	0.190	1.25
7	0.315	1.25
8	0.640	1.25
9	2.10	0.80

- 5) Se determinan los parámetros  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , y  $C_0$  como paso intermedio. En las fórmulas siguientes,  $\rho_W$  es la reflectancia de las paredes,  $\rho_{CC}$  es la reflectancia de la cavidad del techo, y  $\rho_{FC}$  es la reflectancia de la cavidad del piso.  $F_{CC \rightarrow FC}$  es el factor de forma de la cavidad del techo a la cavidad del piso.

$$C_1 = \frac{(1 - \rho_w)(1 - F_{CC \rightarrow FC}^2)G}{2.5\rho_w(1 - F_{CC \rightarrow FC}^2) + GF_{CC \rightarrow FC}(1 - \rho_w)}$$

$$C_2 = \frac{(1 - \rho_{CC})(1 + F_{CC \rightarrow FC})}{1 + \rho_{CC}F_{CC \rightarrow FC}}$$

$$C_3 = \frac{(1 - \rho_{FC})(1 + F_{CC \rightarrow FC})}{1 + \rho_{FC}F_{CC \rightarrow FC}}$$

$$C_0 = C_1 + C_2 + C_3$$

- 6) Se determina el coeficiente de utilización (CU) para cada combinación aplicable de reflectancias y RCR:

$$CU = \frac{2.5\rho_w C_1 C_3 (1 - D_G) \Phi_{abajo}}{G(1 - \rho_w)(1 - \rho_{FC})C_0} + \frac{\rho_{CC} C_2 C_3 \Phi_{arriba}}{(1 - \rho_{CC})(1 - \rho_{FC})C_0} + \left(1 - \frac{\rho_{FC} C_3 (C_1 + C_2)}{(1 - \rho_{FC})C_0}\right) \frac{D_G \Phi_{abajo}}{(1 - \rho_{FC})}$$

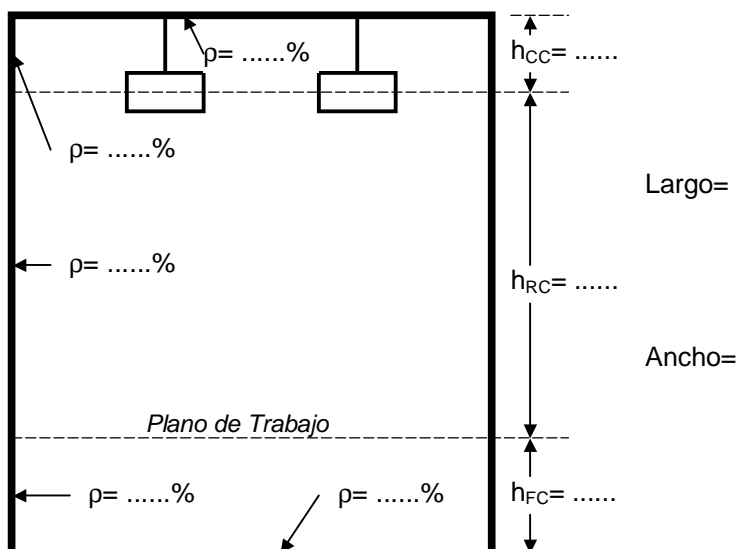
- 7) Cuando la RCR es igual a cero, se utiliza la siguiente fórmula:

$$CU_{G=0} = \frac{\Phi_{abajo} + \rho_{CC} \Phi_{arriba}}{1 - \rho_{CC} \rho_{FC}}$$

## PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

A continuación se muestra el procedimiento para calcular la iluminancia promedio mantenida utilizando el método de cavidad zonal.

- 1) Iluminancia promedio mantenida para el diseño: ..... lux
- 2) Lámpara:
  - a) Lúmenes por lámpara: .....
  - b) Cantidad por luminaria: .....
  - c) Lúmenes por luminaria totales: .....
- 3) Complétense los datos del dibujo:



- 4) Determinéense las relaciones de cavidad
  - a) Relación de Cavidad del Lugar, RCR = .....
  - b) Relación de Cavidad del Techo, CCR = .....
  - c) Relación de Cavidad del Piso, FCR = .....
- 5) Determinéense las reflectancias de cavidad efectivas
  - a) Reflectancia de Cavidad del Techo Efectiva  $\rho_{CC} = \dots\dots\dots$
  - b) Reflectancia de Cavidad del Piso Efectiva  $\rho_{FC} = \dots\dots\dots$
- 6) Obténgase el Coeficiente de Utilización CU = .....
- 7) Factor de Pérdidas de Luz Total (LLF) = .....
- 8) Número de Luminarias = 
$$\frac{(\text{Iluminancia}) \times (\text{Area})}{(\text{Lúmenes por Luminaria}) \times \text{CU} \times \text{LLF}}$$
- 9) Iluminancia = 
$$\frac{(\text{Número de Luminarias}) \times (\text{Lúmenes por Luminaria}) \times \text{CU} \times \text{LLF}}{(\text{Area})}$$

## BIBLIOGRAFÍA

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición. [Capítulo 9]

# ILUMINACIÓN EXTERIOR

Una instalación de alumbrado exterior es una instalación de fuentes luminosas destinada a proveer una percepción visual rápida y segura de objetos ubicados en lugares a cielo abierto. Según su aplicación, las instalaciones de alumbrado exterior pueden clasificarse en:

- Iluminación de grandes áreas y deportivas,
- Iluminación decorativa,
- Iluminación vial.

## ILUMINACIÓN DE GRANDES ÁREAS Y DEPORTIVAS

Se utiliza para iluminar plazas, paseos, playas de estacionamiento, de maniobras, etc. La iluminación deportiva es aquella destinada a la iluminación de eventos deportivos.

## ILUMINACIÓN DECORATIVA

Una instalación de iluminación decorativa consiste en una instalación de iluminación destinada a realzar aspectos estéticos de edificios, monumentos, parques, etc.

## ILUMINACIÓN VIAL

Su función es iluminar vías públicas, puentes, túneles, etc. proporcionando una iluminación tal que dé seguridad tanto para el tránsito rodado como el de peatones.

## CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de iluminación vial solían estar basados en la iluminancia horizontal. Sin embargo, la luminancia del pavimento y el criterio de luminancia de velo proveen una mejor correlación con la impresión visual de la calidad de la iluminación vial. Es posible satisfacer el criterio de iluminancia y pero estar lejos de satisfacer el criterio de luminancia. También es importante reconocer que el criterio de luminancia no constituye una medida directa de la visibilidad de las características de las rutas, como por ejemplo el tráfico y riesgos fijos en las mismas. Desafortunadamente, actualmente no hay suficientes datos disponibles para permitir el uso del criterio de visibilidad. Por esta razón y porque el criterio de luminancia se correlaciona con la impresión visual de la calidad de la iluminación vial, las recomendaciones de luminancia del pavimento y luminancia de velo son las más utilizadas para especificar la iluminación en vías de tránsito.

Es importante considerar el nivel medio de luminancia del pavimento y la uniformidad de iluminación de la vía de tránsito. La luminancia del pavimento se ve afectada por la ubicación del observador, la dirección de la luz que llega al pavimento, su incidencia relativa al observador, y las características de reflexión del pavimento.

El desempeño visual también es afectado por el deslumbramiento del sistema fijo de iluminación. La incapacidad de deslumbramiento puede ser cuantificada para dar información para identificar el efecto de velo del deslumbramiento como un porcentaje de la luminancia media total.

El criterio de iluminancia puede proveer un desempeño visual aceptable si se aplica cuidadosamente y con buen juicio de diseño. En consecuencia, a pesar de que el desempeño visual no puede ser controlado, el uso del criterio de iluminancia puede ser una alternativa efectiva al de luminancia.

## CLASIFICACIÓN DEL PAVIMENTO

El cálculo de la luminancia de un pavimento requiere información sobre las características de reflexión de la superficie. Los estudios muestran que los pavimentos más comunes pueden ser agrupados en un número limitado de superficies estándar especificadas por los datos de sus reflectancias que están dados en tablas de coeficientes de luminancia reducidos. Estas tablas están establecidas por la CIE.

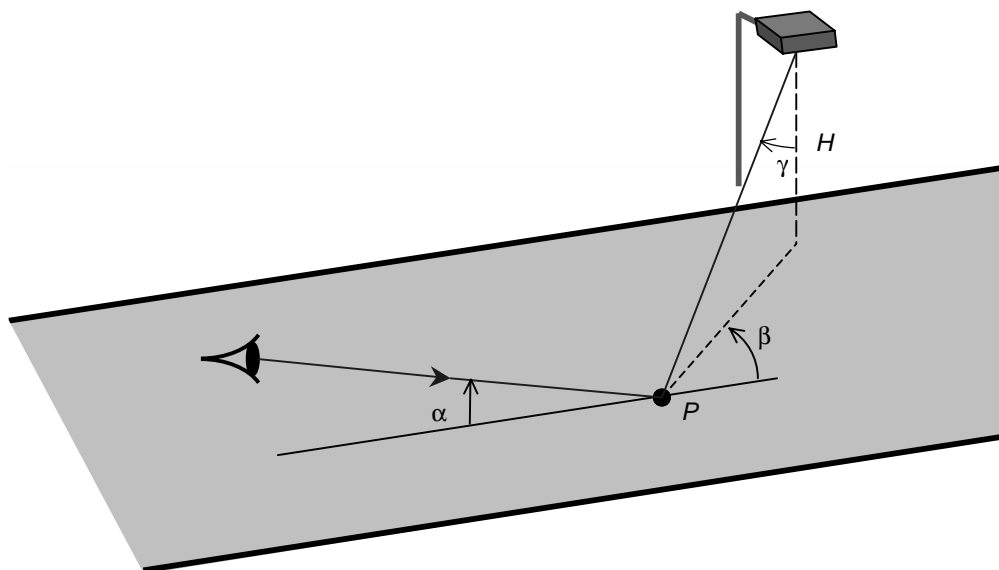
Los valores de luminancia del pavimento cambian por su uso, modificándose sus coeficientes de reflectancia. Existen modificaciones temporales (derrames, lluvias, etc.) y permanentes (desgaste). Por ejemplo, el asfalto tiende a aumentar su reflectancia al quedar al descubierto material abrillantador, mientras que el portland tiende a disminuir su reflectancia al aparecer depósitos de aceite o carbón.

Las propiedades de reflexión de una superficie de una vía de tránsito pueden ser descritas por medio del *coeficiente de luminancia* ( $q$ ). Dicho coeficiente se define como la relación entre la luminancia,  $L$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), y la iluminancia,  $E$  (lux), para una dirección de observación especificada y una dirección de incidencia de la luz especificada.

$$q = \frac{L}{E}$$

El ángulo de observación normalmente es  $89^\circ$ , es decir, el ángulo  $\alpha$  en la figura siguiente es  $1^\circ$ . La dirección de la luz incidente queda definida por los ángulos  $\beta$  y  $\gamma$ .





Para los cálculos de iluminancia resulta más práctico utilizar el *coeficiente de luminancia reducido* ( $r$ ), el cual se define como:

$$r = q \cos^3 \gamma$$

Las propiedades de reflexión de una superficie de una vía de tránsito son completamente descritas por la tabla de coeficientes de luminancia reducidos. Dicha tabla es un dato de entrada para el cálculo de luminancia pero no permite comparar fácilmente distintas superficies o dar una impresión general de las propiedades de reflexión.

Las investigaciones han llevado a concluir que un método basado en dos factores especulares y el coeficiente de luminancia promedio pueden dar una descripción con suficiente exactitud para el cálculo del desempeño de la instalación. Estas investigaciones muestran que el método es aplicable sólo a superficies secas. Las reflexiones de superficies no secas son más complicadas y pueden ser necesarias más características para describirlas. Por el momento, no hay método para describir correctamente las superficies no secas que pueda recomendarse.

Por lo tanto, se propone utilizar las tres características mencionadas anteriormente para dar una descripción general de las propiedades de reflexión de las superficies secas. Estas características también pueden ser utilizadas para superficies no secas pero debe tenerse en cuenta que la precisión es considerablemente reducida.

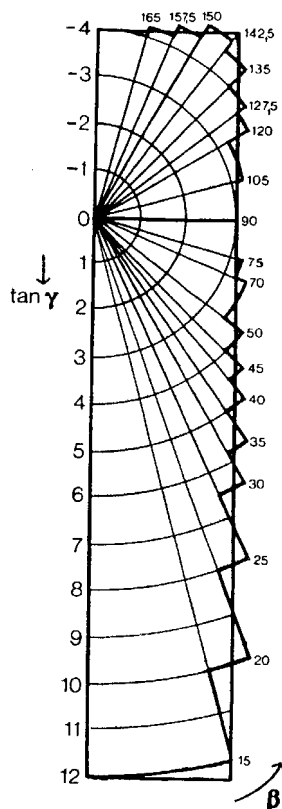
Las tres características, de acuerdo a lo expuesto anteriormente son:

- coeficiente de luminancia promedio ( $Q_0$ ),
- factor especular 1 ( $S_1$ ),
- factor especular 2 ( $S_2$ ).

donde:

$$Q0 = \frac{\int_{\Omega_e} q d\Omega}{\int_{\Omega_e} d\Omega}$$

donde el ángulo sólido  $\Omega_e$  está definido por los límites de integración dados en la siguiente figura.



$$S1 = \frac{r(0,2)}{r(0,0)} \quad (\text{esto es: } \beta = 0, \tan \gamma = 2)$$

$$S2 = \frac{Q0}{r(0,0)}$$

La clasificación utilizada es la siguiente:

Clase	Descripción	Modo de Reflectancia
R1	Cemento portland, superficies de concreto. Superficies asfálticas con un mínimo de 15% de agregados compuestos de abrillantador artificial y agregados .	Principalmente difusa
R2	Superficie asfáltica con un agregado compuesto de un mínimo de 60% de grava (de tamaño mayor que 10mm). Superficies asfálticas con 10% a 15% de abrillantador artificial en mezcla.	Mezcla de difuso y especular
R3	Superficie asfáltica con agregados oscuros; textura áspera después de algunos meses de uso.	Levemente especular
R4	Superficies asfálticas con textura muy lisa.	Principalmente especular

**Tabla-r para superficie estándar R1**

tg $\gamma$	$\beta$																			
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655
0.25	619	619	619	619	610	610	610	610	610	610	610	610	610	601	601	601	601	601	601	601
0.5	539	539	539	539	539	539	521	521	521	521	521	503	503	503	503	503	503	503	503	503
0.75	431	431	431	431	431	431	431	431	431	395	386	371	371	371	371	371	371	386	395	395
1	341	341	341	341	323	323	305	296	287	287	278	269	269	269	269	269	269	278	278	278
1.25	269	269	269	260	251	242	224	207	198	189	189	180	180	180	180	180	189	198	207	224
1.5	224	224	224	215	198	180	171	162	153	148	144	144	139	139	139	144	148	153	162	180
1.75	189	189	189	171	153	139	130	121	117	112	108	103	99	99	103	108	112	121	130	139
2	162	162	157	135	117	108	99	94	90	85	85	83	84	84	86	90	94	99	103	111
2.5	121	121	117	95	79	66	60	57	54	52	51	50	51	52	54	58	61	65	69	75
3	94	94	86	66	49	41	38	36	34	33	32	31	31	33	35	38	40	43	47	51
3.5	81	80	66	46	33	28	25	23	22	22	21	21	22	22	24	27	29	31	34	38
4	71	69	55	32	23	20	18	16	15	14	14	14	15	17	19	20	22	23	25	27
4.5	63	59	43	24	17	14	13	12	12	11	11	11	12	13	14	14	16	17	19	21
5	57	52	36	19	14	12	10	9	9	8.8	8.7	8.7	9	10	11	13	14	15	16	16
5.5	51	47	31	15	11	9	8.1	7.8	7.7	7.7										
6	47	42	25	12	8.5	7.2	6.5	6.3	6.2											
6.5	43	38	22	10	6.7	5.8	5.2	5												
7	40	34	18	8.1	5.6	4.8	4.4	4.2												
7.5	37	31	15	6.9	4.7	4	3.8													
8	35	28	14	5.7	4	3.6	3.2													
8.5	33	25	12	4.8	3.6	3.1	2.9													
9	31	23	10	4.1	3.2	2.8														
9.5	30	22	9	3.7	2.8	2.5														
10	29	20	8.2	3.2	2.4	2.2														
10.5	28	18	7.3	3	2.2	1.9														
11	27	16	6.6	2.7	1.9	1.7														
11.5	26	15	6.1	2.4	1.7															
12	25	14	5.6	2.2	1.6															

*Q<sub>0</sub> = 0.1; S<sub>1</sub> = 0.25; S<sub>2</sub> = 1.53*  
*todos los valores deben multiplicarse por 10000*

**Tabla-r para superficie estándar R2**

tg $\gamma$	$\beta$																			
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390
0.25	411	411	411	411	411	411	411	411	411	411	379	368	357	357	346	346	346	335	335	335
0.5	411	411	411	411	403	403	384	379	370	346	325	303	281	281	271	271	271	260	260	260
0.75	379	379	379	368	357	346	325	303	281	260	238	216	206	206	206	206	206	206	206	206
1	335	335	335	325	292	291	260	238	216	195	173	152	152	152	152	152	141	141	141	141
1.25	303	303	292	271	238	206	184	152	130	119	108	100	103	106	108	108	114	114	119	119
1.5	271	271	260	227	179	152	141	119	108	93	80	76	76	80	84	87	89	91	93	95
1.75	249	238	227	195	152	124	106	91	78	67	61	52	54	58	63	67	69	71	73	74
2	227	216	195	152	117	95	80	67	61	52	45	40	41	45	49	52	54	56	57	58
2.5	195	190	146	110	74	58	48	40	35	30	27	24	26	28	30	33	35	38	40	41
3	160	155	115	67	43	33	26	21	18	17	16	16	17	17	18	21	22	24	26	27
3.5	146	131	87	41	25	18	15	13	12	11	11	11	11	11	12	14	15	17	18	21
4	132	113	67	27	15	12	10	9.4	8.7	8.2	7.9	7.6	7.9	8.7	9.6	11	12	13	15	17
4.5	118	95	50	20	12	8.9	7.4	6.6	6.3	6.1	5.7	5.6	5.8	6.3	7.1	8.4	10	12	13	14
5	106	81	38	14	8.2	6.3	5.4	5	4.8	4.7	4.5	4.4	4.8	5.2	6.2	7.4	8.5	9.5	10	11
5.5	96	69	29	11	6.3	5.1	4.4	4.1	3.9	3.8										
6	87	58	22	8	5	3.9	3.5	3.4	3.2											
6.5	78	50	17	6.1	3.8	3.1	2.8	2.7												
7	71	43	14	4.9	3.1	2.5	2.3	2.2												
7.5	67	38	12	4.1	2.6	2.1	1.9													
8	63	33	10	3.4	2.2	1.8	1.7													
8.5	58	28	8.7	2.9	1.9	1.6	1.5													
9	55	25	7.4	2.5	1.7	1.4														
9.5	52	23	6.5	2.2	1.5	1.3														
10	49	21	5.6	1.9	1.4	1.2														
10.5	47	18	5	1.7	1.3	1.2														
11	44	16	4.4	1.6	1.2	1.1														
11.5	42	14	4	1.5	1.1															
12	41	13	3.6	1.4	1.1															

*Q<sub>0</sub> = 0.07; S<sub>1</sub> = 0.58; S<sub>2</sub> = 1.80*  
*todos los valores deben multiplicarse por 10000*

**Tabla-r para superficie estándar R3**

tg $\gamma$	$\beta$																			
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
0.25	326	326	321	321	317	312	308	308	303	298	294	280	271	262	258	253	249	244	240	240
0.5	344	344	339	339	326	317	308	298	289	276	262	235	217	204	199	199	199	199	194	194
0.75	357	353	353	339	321	303	285	267	244	222	204	176	158	149	149	149	149	136	136	140
1	362	362	352	326	276	249	226	204	181	158	140	118	104	100	100	100	100	100	100	100
1.25	357	357	348	298	244	208	176	154	136	118	104	83	73	70	71	74	77	77	77	78
1.5	353	348	326	267	217	176	145	117	100	86	78	72	60	57	58	60	60	60	61	62
1.75	339	335	303	231	172	127	104	89	79	70	62	51	45	44	45	46	45	45	46	47
2	326	321	280	190	136	100	82	71	62	54	48	39	34	34	34	35	36	36	37	38
2.5	289	280	222	127	86	65	54	44	38	34	25	23	22	23	24	24	24	24	24	25
3	253	235	163	85	53	38	31	25	23	20	18	15	15	14	15	15	16	16	17	17
3.5	217	194	122	60	35	25	22	19	16	15	13	9.9	9	9	9.9	11	11	12	12	13
4	190	163	90	43	26	20	16	14	12	9.9	9	7.4	7	7.1	7.5	8.3	8.7	9	9	9.9
4.5	163	136	73	31	20	15	12	9.9	9	8.3	7.7	5.4	4.8	4.9	5.4	6.1	7	7.7	8.3	8.5
5	145	109	60	24	16	12	9	8.2	7.7	6.8	6.1	4.3	3.2	3.3	3.7	4.3	5.2	6.5	6.9	7.1
5.5	127	94	47	18	14	9.9	7.7	6.9	6.1	5.7										
6	113	77	36	15	11	9	8	6.5	5.1											
6.5	104	68	30	11	8.3	6.4	5.1	4.3												
7	95	60	24	8.5	6.4	5.1	4.3	3.4												
7.5	87	53	21	7.1	5.3	4.4	3.6													
8	83	47	17	6.1	4.4	3.6	3.1													
8.5	78	42	15	5.2	3.7	3.1	2.6													
9	73	38	12	4.3	3.2	2.4														
9.5	69	34	9.9	3.8	3.5	2.2														
10	65	32	9	3.3	2.4	2														
10.5	62	29	8	3	2.1	1.9														
11	59	26	7.1	2.6	1.9	1.8														
11.5	56	24	6.3	2.4	1.8															
12	53	22	5.6	2.1	1.8															

*Q<sub>0</sub> = 0.07; S<sub>1</sub> = 1.11; S<sub>2</sub> = 2.38*  
*todos los valores deben multiplicarse por 10000*

**Tabla-r para superficie estándar R4**

tg $\gamma$	$\beta$																			
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264
0.25	297	317	317	317	317	310	304	290	284	277	271	244	231	224	224	218	218	211	211	211
0.5	330	343	343	343	330	310	297	284	277	264	251	218	198	185	178	172	172	165	165	165
0.75	376	383	370	350	330	304	277	251	231	211	198	165	139	132	132	125	125	125	119	119
1	396	396	396	330	290	251	218	198	185	165	145	112	86	86	86	86	87	87	87	87
1.25	403	409	370	310	251	211	178	152	132	115	103	77	66	65	65	63	65	66	67	68
1.5	409	396	356	284	218	172	139	115	100	88	79	61	50	50	50	52	55	55	55	55
1.75	409	396	343	251	178	139	108	88	75	66	59	44	37	37	37	38	40	41	42	45
2	409	383	317	224	145	106	86	71	59	53	45	33	29	29	29	30	32	33	34	37
2.5	396	356	264	152	100	73	55	45	37	32	28	21	20	20	20	21	22	24	25	26
3	370	304	211	95	63	44	30	25	21	17	16	13	12	12	13	13	15	16	17	19
3.5	343	271	165	63	40	26	19	15	13	12	11	9.8	9.1	8.8	8.8	9.4	11	12	13	15
4	317	238	132	45	24	16	13	11	9.6	9	8.4	7.5	7.4	7.4	7.5	7.9	8.6	9.4	11	12
4.5	297	211	106	33	17	11	9.2	7.9	7.3	6.6	6.3	6.1	6.1	6.2	6.5	6.7	7.1	7.7	8.7	9.6
5	277	185	79	24	13	8.1	7	6.3	5.7	5.1	5	5	5.1	5.4	5.5	5.8	6.1	6.3	6.9	7.7
5.5	257	161	59	19	9.9	7.1	5.7	5	4.6	4.2										
6	244	140	46	13	7.7	5.7	4.8	4.1	3.8											
6.5	231	122	37	11	5.9	4.6	3.7	3.2												
7	218	106	32	9	5	3.8	3.2	2.6												
7.5	205	94	26	7.5	4.4	3.3	2.8													
8	193	82	22	6.3	3.7	2.9	2.4													
8.5	184	74	19	5.3	3.2	2.5	2.1													
9	174	66	16	4.6	2.8	2.1														
9.5	169	59	13	4.1	2.5	2														
10	164	53	12	3.7	2.2	1.7														
10.5	158	49	11	3.3	2.1	1.7														
11	153	45	9.5	3	2	1.7														
11.5	149	41	8.4	2.6	1.7															
12	145	37	7.7	2.5	1.7															

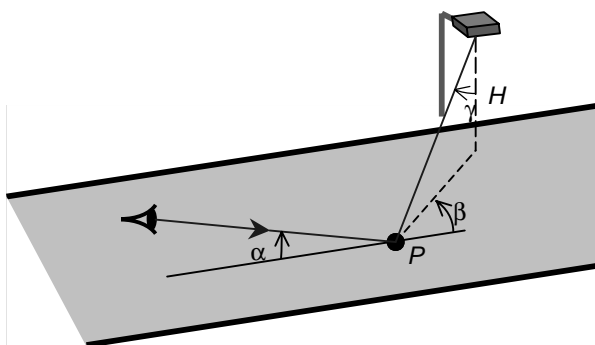
*Q<sub>0</sub> = 0.08; S<sub>1</sub> = 1.55; S<sub>2</sub> = 3.03*  
*todos los valores deben multiplicarse por 10000*

## CÁLCULOS DE LUMINANCIA

Cálculos de luminancia detallados y correctos sólo pueden realizarse por medio de una computadora. Sin embargo, los cálculos hechos con una computadora son solamente aproximaciones. Las intensidades luminosas de las luminarias y los coeficientes de luminancia reducidos de la superficie de una vía de tránsito sólo pueden determinarse con un cierto grado de exactitud. Además, dado que la luminancia se calcula en una cantidad limitada de puntos de la superficie, es posible que la luminancia máxima o mínima absoluta no sea encontrada. En consecuencia, los valores de las uniformidades calculadas a menudo difieren de los verdaderos.

Por la definición de coeficiente de luminancia reducido (ver clasificación del pavimento en este capítulo),

$$r = \frac{L}{E} \cos^3 \gamma$$



Entonces,

$$L = \frac{rE}{\cos^3 \gamma}$$

Como se vio al estudiar la transferencia de flujo de una fuente puntual a un punto, la iluminancia en un punto está dada por

$$E = \frac{I \cos \gamma}{D^2}$$

donde

$$D = \frac{H}{\cos \gamma}$$

entonces sustituyendo  $D$  se tiene la iluminancia en el punto  $P$  como

$$E = \frac{I \cos^3 \gamma}{H^2}$$

Sustituyendo ahora la iluminancia en la expresión de la luminancia resulta:

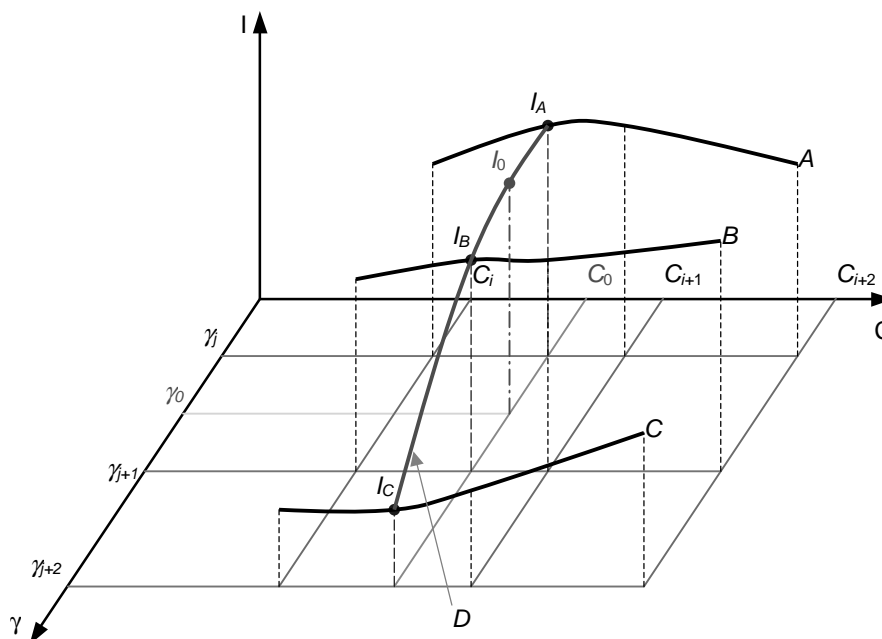
$$L = \frac{rI}{H^2}$$

Si hay más de una luminaria, entonces la expresión anterior se transforma en una sumatoria,

$$L = \sum \frac{rI}{H^2}$$

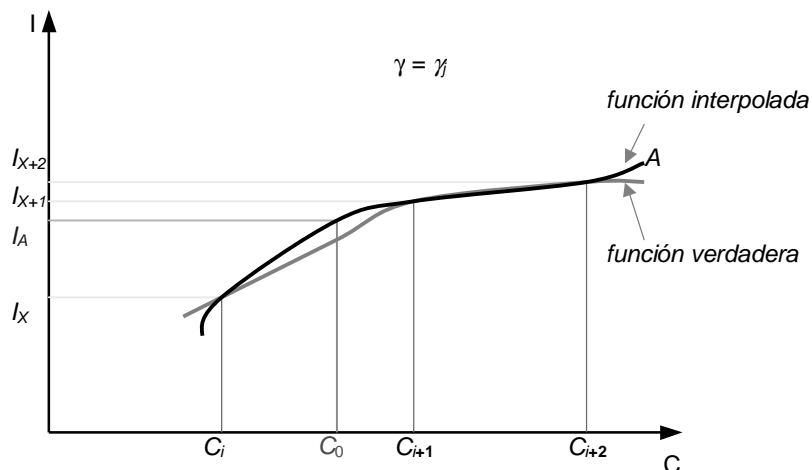
donde la suma en principio incluye todas las luminarias,  $H$  es la altura de la luminaria en cuestión y  $I$  es la intensidad luminosa de dicha luminaria en la dirección del punto  $P$ .

La intensidad luminosa ( $I$ ) y el coeficiente de luminancia reducido ( $r$ ) se obtienen por interpolación cuadrática. Dado que ambos son funciones de dos variables,  $(C, \gamma)$  y  $(\beta, \gamma)$  respectivamente, es necesario realizar interpolaciones en dos dimensiones. Esto puede hacerse por medio de cuatro interpolaciones como se muestra en la siguiente figura, donde cada interpolación es en una dimensión y en el orden indicado por las letras A a D.



Supóngase que se quiere  $I(C_0, \gamma_0)$ . Se halla  $I_A = I(C_0, \gamma_0)$  haciendo interpolación en  $C$  y manteniendo  $\gamma = \gamma_0$ . De la misma forma se hallan  $I_B$  y  $I_C$ , con  $\gamma = \gamma_{j+1}$  y  $\gamma = \gamma_{j+2}$  respectivamente. Por último, haciendo ahora interpolación en  $\gamma$  (y manteniendo  $C = C_0$ ) se calcula  $I(C_0, \gamma_0)$ . Con la interpolación cuadrática se obtiene el mismo resultado independientemente de cuál sea el ángulo que se tome para comenzar la interpolación.

La fórmula de interpolación por ejemplo para la curva A es la siguiente:



$$I_A = K_0 \cdot I_X + K_1 \cdot I_{X+1} + K_2 \cdot I_{X+2}$$

donde

$$K_0 = 1 - K_1 - K_2$$

$$K_1 = \frac{(C_0 - C_i) \cdot (C_{i+2} - C_0)}{(C_{i+2} - C_{i+1}) \cdot (C_{i+1} - C_i)}$$

$$K_2 = \frac{(C_0 - C_i) \cdot (C_{i+1} - C_0)}{(C_{i+2} - C_{i+1}) \cdot (C_{i+2} - C_i)}$$

Es posible utilizar dos tipos de interpolación cuadrática los cuales son llamados tipo 1 y tipo 2. Dos de los tres valores que son necesarios para realizar la interpolación cuadrática son siempre los valores medidos inmediatamente a la derecha y a la izquierda del ángulo en cuestión. Los dos procedimientos cuadráticos difieren en cómo se elige el tercer valor. En un procedimiento de tipo 1 este valor es invariablemente tomado a la derecha del ángulo. En un procedimiento tipo 2 el tercer valor se toma a la izquierda, si el ángulo es menor que el promedio de los dos primeros valores; si no, el tercer valor se toma a la derecha.

Los valores de  $r$  se obtienen por medio de un procedimiento tipo 1 debido a que las investigaciones han mostrado que este procedimiento resulta en los errores de interpolación más pequeños. Por la misma razón, el procedimiento tipo 2 es el que se utiliza para obtener los valores de  $I$ .

En la práctica la sumatoria de las luminancias incluirá sólo aquellas luminarias situadas dentro de los límites definidos por el ángulo sólido para el cual fueron hechas las mediciones de la indicatiz de reflexión. No hay datos disponibles para el cálculo de luminancias para luminarias fuera de estos límites. Las contribuciones a la luminancia total de dichas luminarias usualmente puede despreciarse porque el coeficiente de luminancia de la superficie o la intensidad luminosa de la luminaria son muy pequeños.

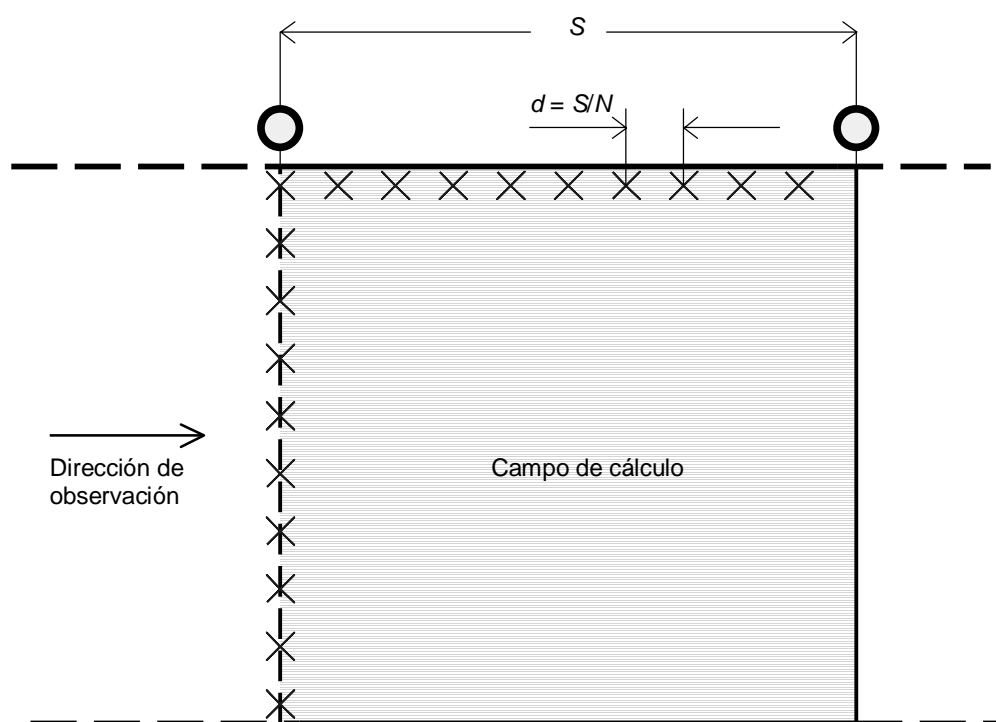
### *Campo de Cálculo*

Las siguientes especificaciones se aplican a secciones con una imagen de luminancia que se repite periódicamente en vías de tránsito que consistan en secciones rectas o circulares o ambas y con carriles de igual ancho. En otros casos las especificaciones deben estipularse en cada caso particular. El radio en las secciones circulares no debería ser menor que aproximadamente 200m, dado que la uniformidad longitudinal (como se verá más adelante) apenas sería relevante en curvas más pronunciadas.

El campo de cálculo debería ser típico del área de la vía de tránsito que sea de interés de un conductor, esto es, debería cubrir una sección entre dos luminarias en la misma fila en la dirección del largo. En la dirección transversal el campo de cálculo debería cubrir todo el ancho en vías de tránsito sin reservación central, y el ancho de una calzada en vías de tránsito con reservación central.

En el caso de una arreglo de luminarias alternadas, los límites transversales del campo de cálculo deberían ubicarse bajo luminarias en el lado izquierdo de la vía de tránsito, como visto desde el punto de observación.

Los puntos de cálculo deberían estar igualmente espaciados en el campo de cálculo y ubicados como se muestra en la siguiente figura.



$S$  = espaciamiento entre luminarias,

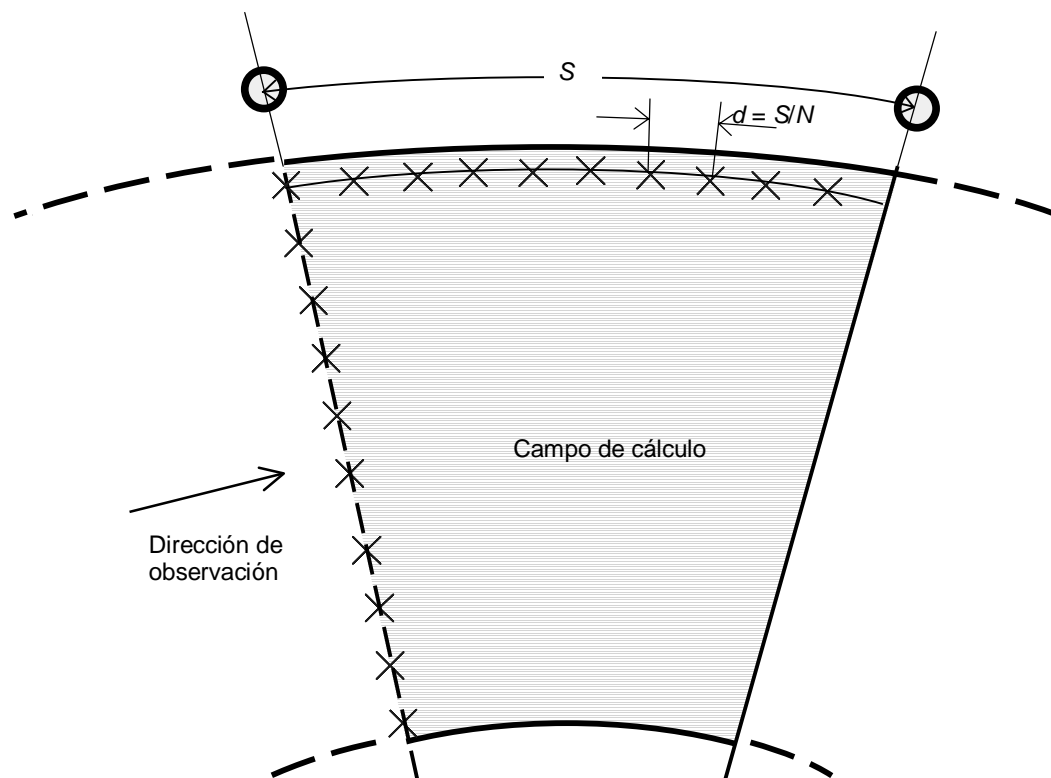


$d$  = distancia longitudinal entre puntos de cálculo,

$N$  = entero con el siguiente valor:

para  $S \leq 50\text{m} \Rightarrow N = 10$ ,

para  $S > 50\text{m} \Rightarrow N =$  menor entero que verifique  $d \leq 5\text{m}$ .



$S$  = espaciamiento entre luminarias, medido en un círculo que pasa por la fila de luminarias,

$d$  = distancia longitudinal entre puntos de cálculo, medida en el mismo círculo que  $S$ ,

$N$  = entero con el siguiente valor:

para  $S \leq 50\text{m} \Rightarrow N = 10$ ,

para  $S > 50\text{m} \Rightarrow N =$  menor entero que verifique  $d \leq 5\text{m}$ .

La cantidad de puntos de cálculo en la dirección longitudinal debería ser 10 para una separación entre luminarias (en una fila de luminarias) de hasta 50m. Para espaciamientos entre luminarias mayores que 50m la cantidad de puntos de cálculo debe ser elegida tal que la distancia longitudinal no exceda 5m.

Se recomienda que se utilicen 5 puntos de cálculo en cada carril en la dirección transversal con un punto posicionado en la línea central de cada carril. Los dos puntos más hacia afuera son ubicados a 1/10 del ancho del carril desde los bordes del carril.

### Puntos de observación.

Los puntos de observación siempre deberían ser ubicados 60m delante de la primera fila transversal de puntos de cálculo y 1.5m sobre el pavimento. La ubicación tansversal a la calzada del punto de observación debería ser la siguiente:

Para el cálculo de luminancia promedio y uniformidad general:

Un cuarto del ancho de la calzada desde el lado derecho de la calzada.

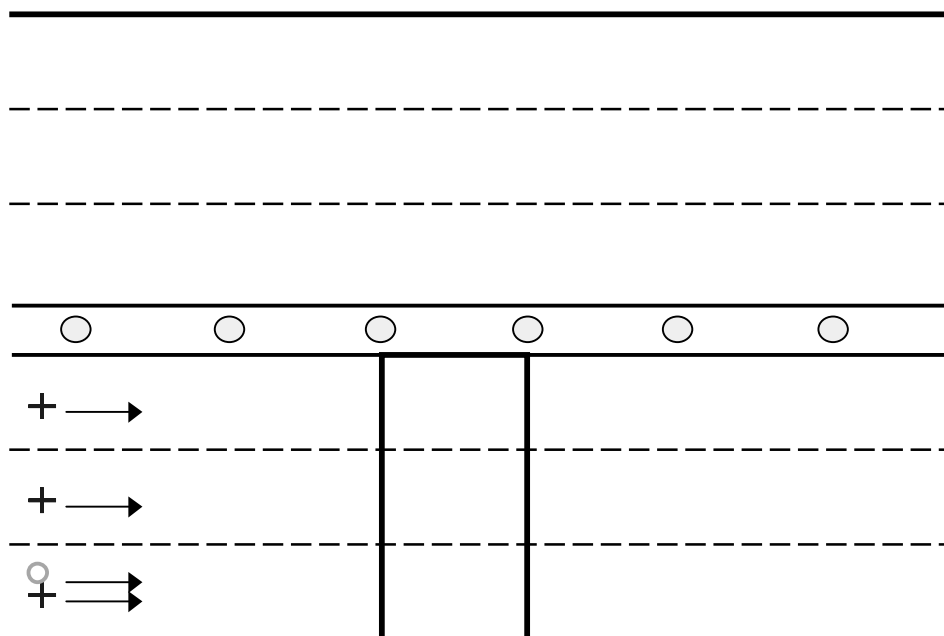
Para el cálculo de la uniformidad longitudinal en el carril que se considere:

En la línea central de cada carril donde donde el tránsito en la dirección de observación sea permitido.

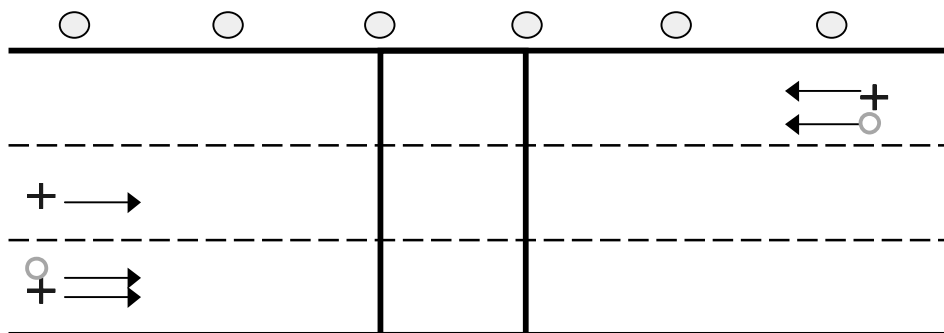
Ejemplos:

○ Para el cálculo de luminancia media y uniformidad global

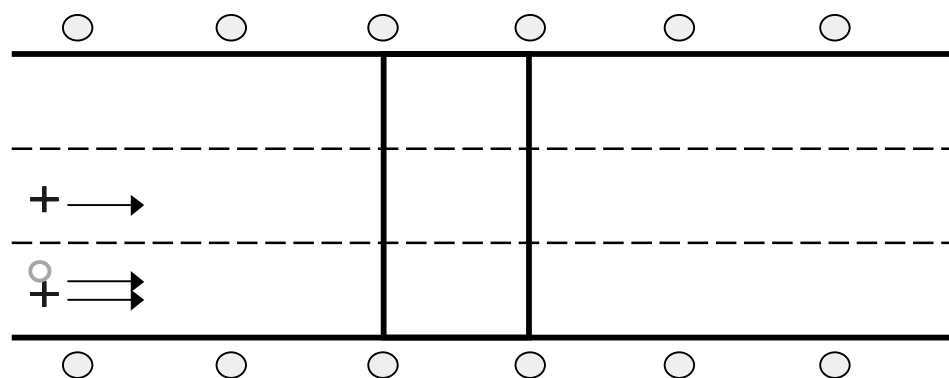
⊕ Para el cálculo de la uniformidad longitudinal



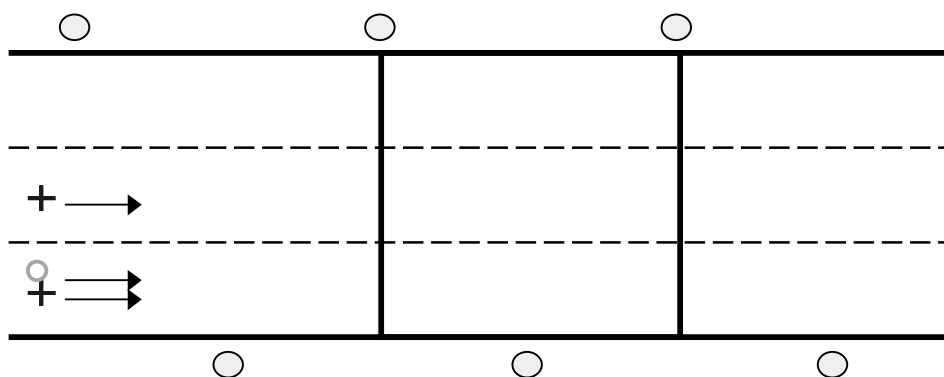
Seis carriles de circulación con reserva central.



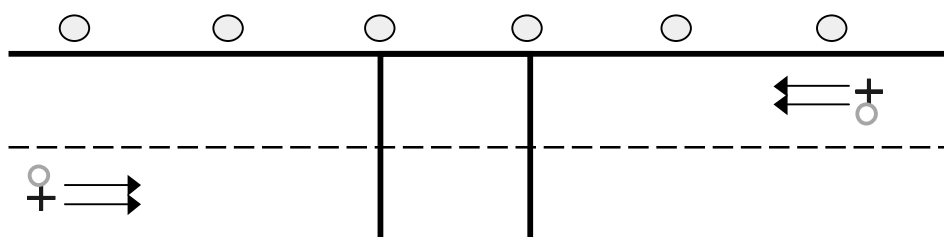
Tres carriles de calzada. Disposición unilateral de luminarias.



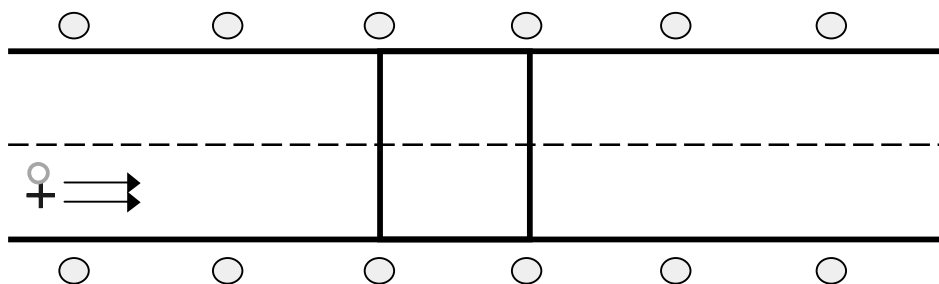
Tres carriles de calzada. Disposición de luminarias enfrentadas.



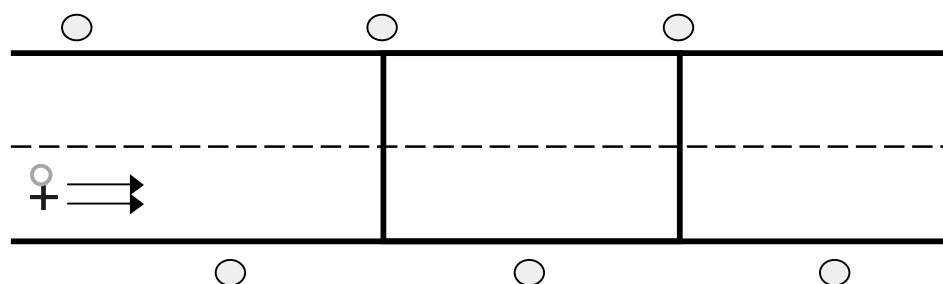
Tres carriles de calzada. Disposición de luminarias alternadas.



Dos carriles de calzada. Disposición de luminarias unilarteral.



Dos carriles de calzada. Disposición de luminarias enfrentadas.



Dos carriles de calzada. Disposición de luminarias alternadas.

### Cantidad de luminarias.

La cantidad de luminarias que contribuyen a la luminancia en un punto de cálculo debería restringirse a sólo aquellas situadas entre cinco veces la altura de montaje hacia adelante, doce veces hacia atrás, y hasta cinco veces hacia cualquier lado del punto de cálculo.

### Luminancia promedio ( $\bar{L}$ ).

La luminancia promedio debería calcularse como el valor promedio de las luminancias calculadas en los puntos de cálculo especificados.

### Uniformidad general ( $U_0$ ).

La uniformidad general es la razón entre la menor de las luminancias calculadas y la luminancia promedio.

### Uniformidad longitudinal ( $U_l$ ).

La uniformidad longitudinal se considera para cada carril y es la razón  $L_{\text{mín}}/L_{\text{máx}}$  a lo largo de la línea central de cada carril, asumiendo que el punto de observación está ubicado en la línea central.

## CÁLCULOS DE DESLUMBRAMIENTO

Es generalmente aceptado que tanto el *deslumbramiento molesto* y el *deslumbramiento fisiológico* deberían estar restringidos en una instalación de iluminación fija de una vía de tránsito. Dado que actualmente no se conoce una relación funcional entre los dos deslumbramientos, lo más conveniente es tratar los dos tipos de deslumbramiento de forma separada.

### Deslumbramiento molesto.

El deslumbramiento molesto se describe por una *marca de control de deslumbramiento* ( $G$ ), la cual expresa la evaluación subjetiva del grado de molestia experimentado. El valor de  $G$  asociado a diferentes sensaciones se da en la siguiente tabla.

$G$	deslumbramiento
1	insoportable
3	molesto
5	admisible
7	satisfactorio
9	imperceptible

Obsérvese que valores de  $G$  menores que 1 o mayores que 9 no tienen significado práctico.

La evaluación subjetiva del deslumbramiento y el valor asociado de la marca del control del deslumbramiento se encuentra que dependen de las siguientes cantidades geométricas y fotométricas de las instalaciones de iluminación:

- $I_{80}$ ,  $I_{88}$ : las intensidades luminosas emitidas por las luminarias en las direcciones que forman un ángulo de  $80^\circ$  y  $88^\circ$  respectivamente con la vertical hacia abajo (en cd).  $I_{80}$  es el valor de la intensidad luminosa emitido bajo un ángulo de  $80^\circ$  con la vertical hacia abajo en el plano meridiano paralelo con el eje de la vía de tránsito (el plano  $C_0$  de acuerdo a la publicación CIE n° 27 (TC 2.4), 1973).  $I_{88}$  tiene que ser determinada en el mismo plano meridiano.
- $h'$ : la altura de montaje reducida expresada en m de la luminaria sobre el nivel del ojo del observador;  $h' = h - 1.5$  donde  $h$  es la altura de montaje de la luminaria en m.
- $F$ : área luminosa de la luminaria (en  $m^2$ ) proyectada en la dirección de  $76^\circ$  con la vertical hacia abajo en el eje de la vía de tránsito en el plano meridiano paralelo al eje de la vía de tránsito.
- $\bar{L}$ : luminancia promedio de la vía de tránsito en  $cd/m^2$ .
- $P$ : cantidad de luminarias o luminarias múltiples por kilómetro del largo de la vía de tránsito.

Obsérvese que  $G$  no es significativamente afectado por la uniformidad de la luminancia de la superficie siempre y cuando se encuentre en el orden de los valores recomendados. No se ha encontrado que dependa del ancho de la vía de tránsito ni de si las luminarias tienen una distribución unilateral, bilateral enfrentada o de dos por postación.

La siguiente relación empírica es la que se utiliza para el cálculo de  $G$ :

$$G = 13,84 - 3,31 * \log I_{80} + 1,3 * \left(\log \frac{I_{80}}{I_{88}}\right)^{0,5} - 0,08 * \log \frac{I_{80}}{I_{88}} + 1,29 * \log F + 0,97 * \log \bar{L} + 4,41 * \log h - 1,46 \log p$$

La relación entre  $G$  y la evaluación subjetiva de deslumbramiento está basada en experimentos de laboratorio que involucraron un gran número de instalaciones experimentales, y es validado en un grado razonable en un gran número de instalaciones prácticas.

### **Deslumbramiento fisiológico.**

Se entiende como deslumbramiento fisiológico al efecto producido por una inadecuada distribución luminosa o la existencia en el campo visual de contrastes excesivos o la presencia de luminancias muy diferentes en coincidencia temporal o no, que reducen las funciones básicas del ojo.

No existe duda en la actualidad de que la causa del deslumbramiento fisiológico es el efecto físico de la dispersión de la luz en las superficies internas del ojo y la difusión o enturbamiento en los medios traslúcidos del mismo.

El método para evaluar el deslumbramiento fisiológico está basado en la fórmula de Holladay. De acuerdo a esta fórmula, el efecto del deslumbramiento es descrito por una luminancia uniforme equivalente que resulta de la luz dispersa en el ojo que se superpone en la ubicación de la imagen de la retina disminuyendo así el contraste. La luminancia de velo equivalente ( $L_v$ ) es:

$$L_v = 3 * 10^{-3} \frac{E_{G1}}{\theta^2} \left( \frac{lx}{rd} \right)$$

donde

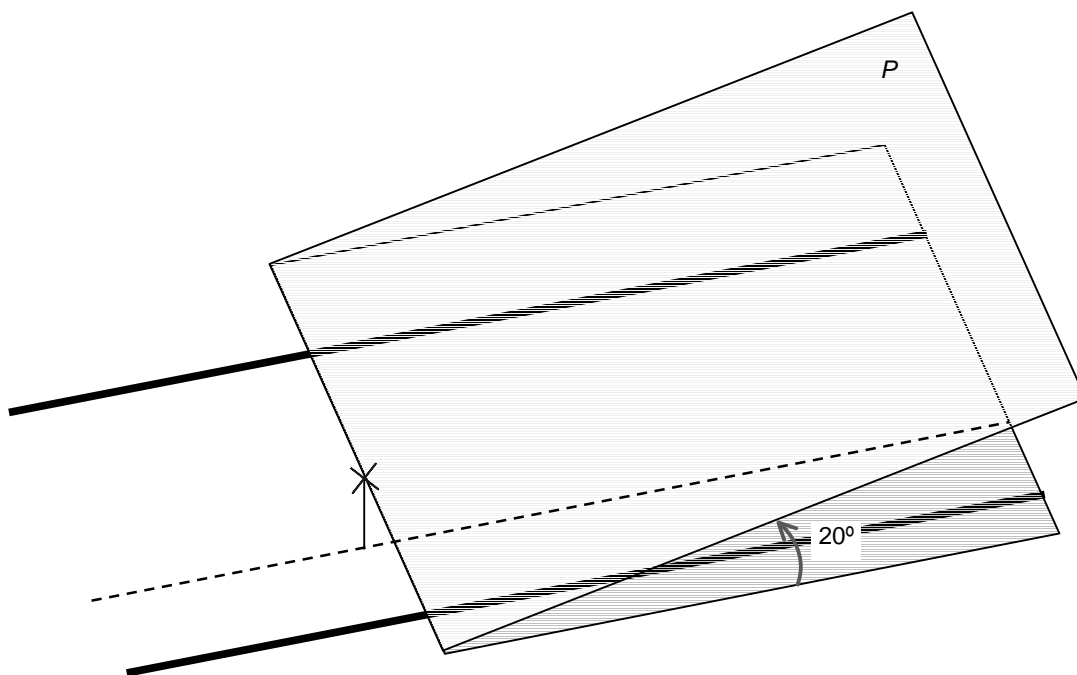
$E_{G1}$  = iluminancia en el ojo del observador producida por la fuente de deslumbramiento en el plano perpendicular a la línea de visión,

$\theta$  = ángulo entre el centro de la fuente de deslumbramiento y la línea de visión.

Para toda una instalación, la luminancias de velo equivalente ( $L_{vi}$ ) de cada luminaria se suman para dar:

$$L_{v\text{total}} = \sum L_{vi}$$

Todos los cálculos de deslumbramiento se hacen con el punto de observación ubicado a un cuarto del ancho de la vía de tránsito desde la derecha de la vía. Se asume que el ángulo de visión del conductor es 20° (ubicación según figura), por encima del cual se supone apantallamiento del techo del vehículo. También se asume que el observador siempre mira hacia un punto de la vía de tránsito 90m hacia adelante de él y ubicado a la misma distancia desde el borde de la vía.



El cálculo de la luminancia de velo es en cada fila comenzando con la primer luminaria que esté situada bajo el plano  $P$  de la figura. La integración continúa hacia adelante hasta una distancia de 500m (luminaria por luminaria) a lo largo de la fila, y se detiene cuando una luminaria da una contribución a la luminancia de velo que sea menor que 2% de la luminancia de velo total de las luminarias precedentes en la fila. El mismo procedimiento se sigue con las otras filas.

Habiendo obtenido la  $L_V$  total de la instalación el valor de deslumbramiento fisiológico puede hallarse calculando el incremento de umbral  $TI$  de un objeto que significa la tarea visual de un conductor en la vía de tránsito. Esto corresponde a un objeto de 8' en medida angular. Su umbral está determinado por la luminancia de adaptación en la ubicación en la cual tiene que ser percibido. Con la excepción de áreas urbanas con iluminaciones ambiente extensas la iluminancia de adaptación corresponde aproximadamente a la luminancia del entorno del objeto. Con uniformidades de luminancia de la superficie de la vía razonables esta puede ser aproximada por la luminancia promedio  $\bar{L}$ .

El incremento relativo de umbral  $TI$  es la diferencia entre el umbral  $\Delta L_{G1}$  bajo condiciones de deslumbramiento y su valor sin deslumbramiento  $\Delta L_0$  sobre  $L_0$ ,

$$TI = \frac{\Delta L_{G1} - \Delta L_0}{\Delta L_0} * 100 \quad (\%)$$

El incremento relativo puede también ser computado en buena aproximación por la fórmula:

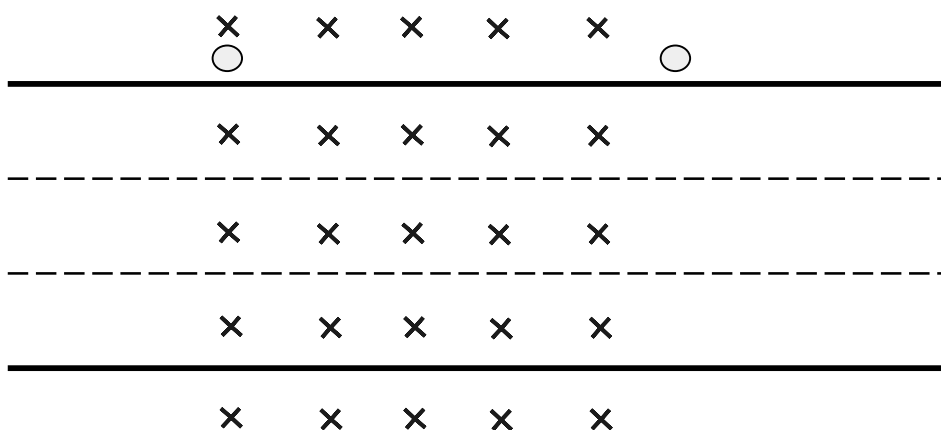
$$TI = 65 * \frac{L_V}{\bar{L}^{0.8}} \quad (\%)$$

con  $L_V$  y  $\bar{L}$  en  $\text{cd}/\text{m}^2$  y en un rango  $0.05 < \bar{L} < 5$ .

## CÁLCULOS DE ILUMINANCIA

La iluminancia horizontal  $E_h$  en un punto es la iluminancia en el punto en un plano horizontal al nivel de la superficie de la vía de tránsito. El campo de cálculo en la dirección longitudinal debería cubrir un espacio entre dos luminarias en la misma fila. En la dirección transversal el campo de cálculo puede ser el ancho de la vía o puede incluir una sección de 1 ½ el ancho de carril a cada lado de la vía.

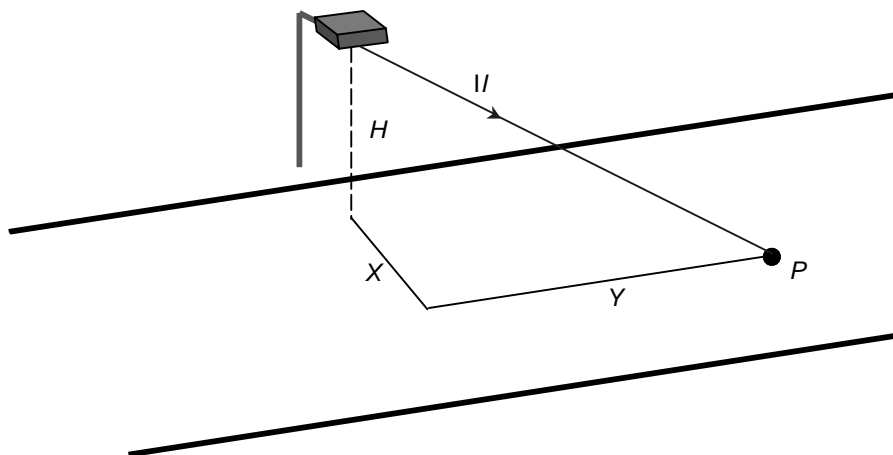
En la dirección longitudinal deberían utilizarse cinco puntos de cálculo cuando el espaciamiento de las luminarias es regular. En la dirección transversal los puntos de cálculo deberían ubicarse en la línea central de cada carril y, si son ubicados fuera de la vía en líneas con una separación de ancho de la vía.



En casos donde sea necesaria más información sobre la distribución de iluminancia, la misma grilla de puntos de cálculo especificada para cálculos de luminancia posiblemente extendida a 1 ½ carril a cada lado de la vía puede ser usada.

Para los cálculos numéricos de iluminancia horizontal puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$E_h = \frac{I * H}{(\sqrt{H^2 + X^2 + Y^2})^3}$$





## **BIBLIOGRAFÍA**

LIGHTING HANDBOOK. Reference and Application - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. 8ª Edición.  
[Capítulo 24]

TECHNICAL REPORT. GLARE AND UNIFORMITY IN ROAD LIGHTING INSTALLATIONS - INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION .  
[Pub. nº CIE 31 (1976)]

TECHNICAL REPORT. CALCULATION AND MEASUREMENT OF LUMINANCE AND ILLUMINANCE IN ROAD LIGHTING - INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION .  
[Pub. nº CIE 30-2 (1982)]

MANUAL DE LUMINOTECNIA - ASOCIACIÓN ARGENTINA DE LUMINOTECNIA.

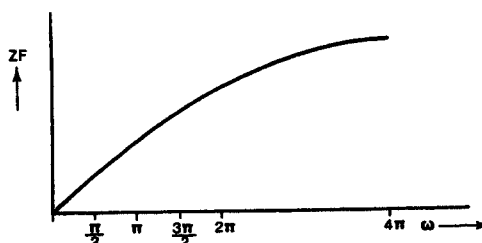
# ILUMINACIÓN DE INTERIORES

## INTRODUCCIÓN

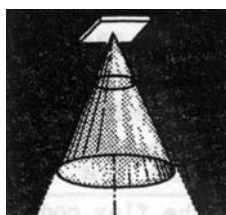
En este capítulo se presenta un método básico para el cálculo de iluminación en interiores que no requiere distribuciones estándar de luminarias y no está restringido a arreglos regulares de luminarias.

## DATOS FOTOMÉTRICOS DE LUMINARIAS

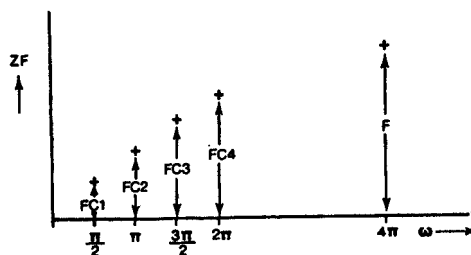
La distribución de flujo luminoso de una luminaria puede representarse en un diagrama zonal de flujo luminoso, como se muestra en la siguiente figura.



Un diagrama zonal de flujo es la representación gráfica del flujo total emitido en un cono de eje vertical como una función del ángulo sólido definido por dicho cono.



El flujo luminoso zonal  $ZF$  irradiado por una luminaria es acumulativo cuando se lo grafica como una función del ángulo sólido  $\omega$ . De hecho el flujo crece suavemente al incrementar el ángulo sólido y sólo cuatro puntos, además del punto ( $\omega=0$ ,  $ZF=0$ ) son necesarios para definir adecuadamente la forma de la curva sobre el hemisferio de abajo (de  $\omega=0$  a  $\omega=2\pi$ ). Estos puntos, dados por los valores del flujo luminoso  $FC1$ ,  $FC2$ ,  $FC3$  y  $FC4$  en los ángulos sólidos equidistantes  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  y  $2\pi$  se muestran en la siguiente figura.



Dado que el flujo irradiado hacia el hemisferio superior no alcanza al plano de trabajo directamente, la forma de la curva desde  $\omega=2\pi$  a  $\omega=4\pi$  no tiene consecuencias cuando se calcula el flujo directo que alcanza el plano de trabajo.

El único punto adicional necesario es el que define el flujo total irradiado por la luminaria, esto es, el valor de  $ZF$  en  $\omega=4\pi$ , teniendo así cinco puntos en total:

- $FC1 = ZF(\omega=\pi/2)$ ,
- $FC2 = ZF(\omega=\pi)$ ,
- $FC3 = ZF(\omega=3\pi/2)$ ,
- $FC4 = ZF(\omega=2\pi)$  y
- $F = ZF(\omega=4\pi)$ .

Se recomienda no usar los valores absolutos de flujo, sino los siguientes valores relativos

- $FC1/FC4 = .N1$ ,
- $FC2/FC4 = .N2$ ,
- $FC3/FC4 = .N3$ ,
- $FC4/F = .N4$  y
- $F/PHIS = .N5$

donde PHIS es la suma de los flujos de las lámparas individuales de la luminaria.

El código de flujo es la combinación de estos valores relativos, cada uno con dos lugares decimales: N1 N2 N3 N4 N5. Representa todas las características de una luminaria necesarias para calcular las iluminancias promedio en las superficies interiores de un lugar.

## VALIDEZ DEL MÉTODO

Este método puede utilizarse en situaciones donde:

- el interior es un paralelepípedo regular,
- el plano de trabajo puede asumirse como materializado por una superficie, que se considerará como una de las superficies del lugar,

- las superficies del lugar reflejan uniformemente y de acuerdo a la ley de Lambert, con reflectancias R1 para el techo, R2 para el friso (definido como las partes de las superficies verticales que quedan entre el techo y el plano de las luminarias), R3 para las paredes (definidas como las partes de las superficies verticales que quedan entre el plano de trabajo y el plano de las luminarias) y R4 para el plano de trabajo, y
- el flujo directo sobre el plano de trabajo no varía significativamente si las luminarias son rotadas respecto de su eje vertical. (Esto se cumple para la mayoría de las luminarias fluorescentes).

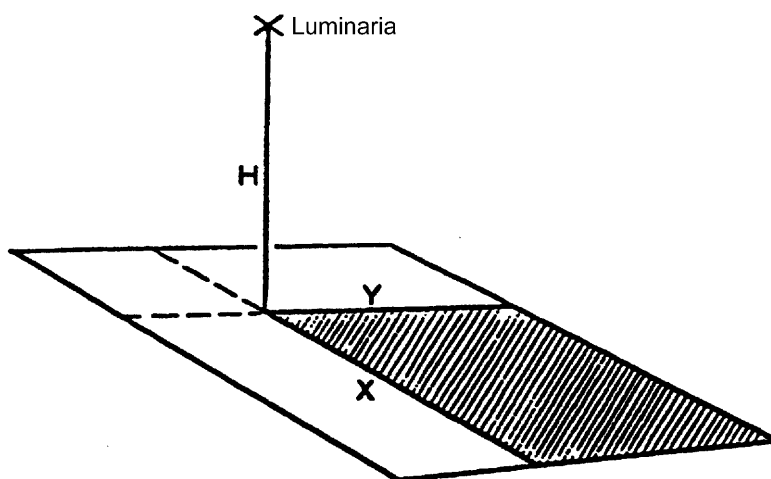
## CÁLCULOS

### FLUJO DIRECTO SOBRE EL PLANO DE TRABAJO

Para determinar el flujo directo sobre el plano de trabajo, al cual denominaremos F4, se asume que el flujo emitido por las luminarias en un cono que tenga como eje el eje vertical de las luminarias, puede ser representado como una función del ángulo sólido de dicho cono, por un polinomio de cuarto grado sin término independiente.

Los coeficientes del polinomio correspondiente a una luminaria particular son elegidos de tal forma que coincida exactamente con los flujos zonales acumulativos para las cuatro zonas del ángulo sólido total  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ ,  $2\pi$ .

En estas condiciones el flujo ( $f_u$ ) recibido en un rectángulo desde una fuente puntual simétrica ubicada verticalmente sobre un vértice del rectángulo, es una función lineal de los flujos FC1, FC2, FC3, FC4.



Los pesos GM1, GM2, GM3, GM4 son funciones de las relaciones X/H y Y/H de cada uno de los lados del rectángulo con la altura de suspensión H. Tablas de estos factores multiplicados por 1000 pueden encontrarse en la publicación CIE 40-1978.



Aplicando cuatro veces las operaciones descritas, se puede obtener, para una instalación dada en un lugar, el flujo directo ( $F_u$ ) recibido en el plano de trabajo desde una luminaria dada.

$$F_u = \Sigma GM1.FC1 + \Sigma GM2.FC2 + \Sigma GM3.FC3 + \Sigma GM4.FC4$$

Ejemplo:

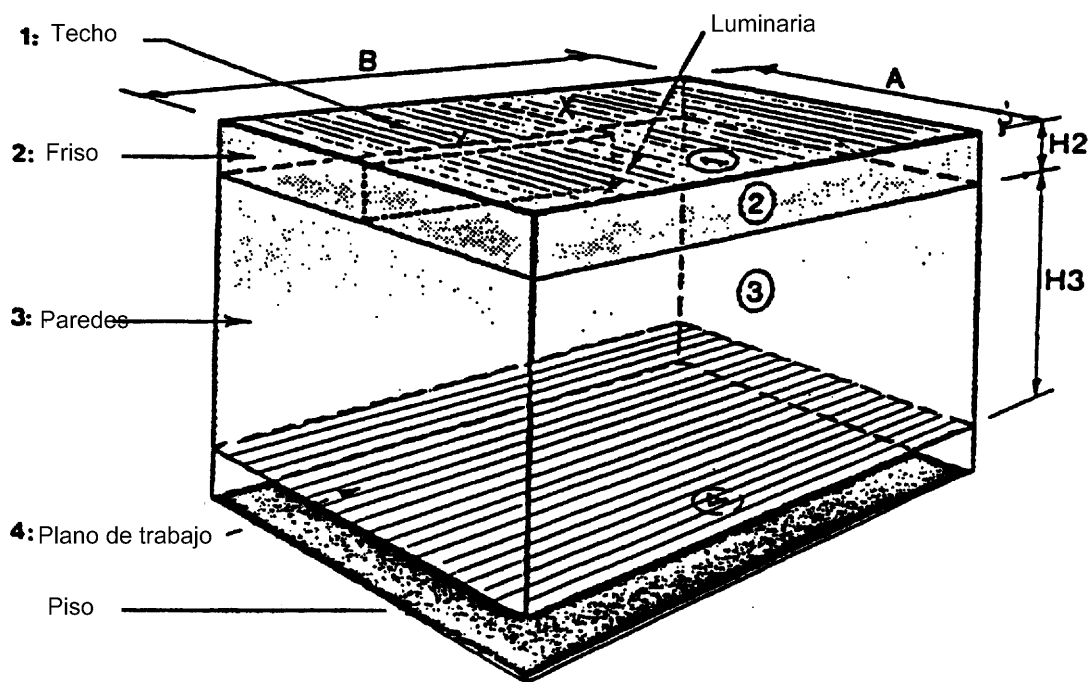
Para un lugar con  $A = 3$  m,  $B = 4.5$  m y  $H = 1.5$  m, una luminaria montada en el techo está ubicada a una distancia:

$X = 2.25$  m desde la pared larga y a una distancia

$Y = 3.30$  m desde la pared corta.

Los pares  $(X/H, Y/H)$  a ser considerados para los cuatro rectángulos son:

$(1.5, 2.2)$ ,  $(0.5, 2.2)$ ,  $(0.8, 1.5)$ ,  $(0.5, 0.8)$ .



De la tabla anterior y las siguientes:

Y / H																			
↓																			
0.05	GM1	6																	
	GM2	-5																	
	GM3	2																	
	GM4	0																	
0.10	GM1	12	24																
	GM2	-9	-18																
	GM3	4	8																
	GM4	-1	-2																
0.15	GM1	14	36	53															
	GM2	-13	-26	-34															
	GM3	6	12	17															
	GM4	-1	-2	-3															
0.20	GM1	23	46	64	88														
	GM2	-17	-34	-49	-62														
	GM3	4	8	11	14														
	GM4	-1	-2	-3	-4														
0.25	GM1	28	56	81	105	126													
	GM2	-20	-40	-58	-73	-88													
	GM3	9	17	23	29	34													
	GM4	-2	-3	-5	-6	-7													
0.30	GM1	32	64	93	120	144	164												
	GM2	-23	-45	-65	-82	-97	-108												
	GM3	10	19	26	32	36	41												
	GM4	-2	-4	-5	-7	-8	-9												
0.35	GM1	36	70	103	132	159	181	200											
	GM2	-25	-48	-70	-89	-104	-116	-125											
	GM3	11	21	30	36	41	44	46											
	GM4	-2	-4	-6	-8	-9	-10	-10											
0.40	GM1	38	75	110	142	171	195	215	231										
	GM2	-26	-51	-73	-93	-109	-121	-130	-135										
	GM3	11	22	31	38	44	48	51	54										
	GM4	-2	-4	-6	-8	-9	-10	-10	-10										
0.45	GM1	40	80	116	150	180	205	220	242	255									
	GM2	-26	-52	-75	-95	-111	-124	-132	-136	-137									
	GM3	11	22	32	40	47	52	54	56	56									
	GM4	-2	-4	-6	-7	-9	-9	-10	-10	-10									
0.50	GM1	42	82	121	156	186	212	234	251	263	271								
	GM2	-27	-52	-75	-95	-111	-123	-131	-135	-135	-132								
	GM3	11	22	32	40	47	51	54	56	56	53								
	GM4	-2	-4	-6	-7	-8	-9	-9	-10	-10	-9								
0.55	GM1	43	84	124	159	190	217	239	256	264	276	281							
	GM2	-26	-52	-75	-94	-110	-121	-128	-131	-130	-126	-114							
	GM3	11	22	31	39	46	50	52	53	52	50	47							
	GM4	-2	-4	-6	-7	-8	-9	-9	-9	-9	-9	-8							
0.60	GM1	43	86	125	161	193	220	241	258	270	278	282	283						
	GM2	-26	-51	-73	-92	-107	-117	-123	-125	-123	-114	-110	-101						
	GM3	11	21	31	38	44	48	50	50	49	46	43	38						
	GM4	-2	-4	-6	-7	-8	-9	-9	-9	-9	-8	-8	-7						
0.65	GM1	44	86	126	162	193	220	242	258	270	278	281	282	280					
	GM2	-25	-49	-71	-89	-103	-112	-117	-118	-115	-109	-100	-90	-77					
	GM3	11	21	29	37	42	46	47	46	45	42	39	34	24					
	GM4	-2	-4	-5	-7	-8	-8	-9	-8	-8	-7	-7	-6	-5					
0.70	GM1	44	86	126	162	193	219	241	257	264	275	274	274	274	274	271			
	GM2	-24	-47	-68	-85	-98	-107	-111	-110	-106	-99	-89	-77	-64	-50				
	GM3	10	20	28	35	40	43	45	44	42	38	34	29	24	19				
	GM4	-2	-4	-5	-6	-7	-8	-8	-8	-7	-7	-6	-5	-4	-3				
0.75	GM1	43	85	125	160	192	218	234	254	265	271	274	273	270	265	258			
	GM2	-23	-45	-65	-81	-93	-100	-103	-102	-97	-89	-78	-65	-51	-36	-22			
	GM3	10	19	27	34	38	41	42	41	38	35	30	25	19	14	8			
	GM4	-2	-3	-5	-6	-7	-7	-8	-7	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1			
0.80	GM1	43	85	124	159	189	215	235	251	261	267	269	267	264	258	251	242		
	GM2	-22	-43	-62	-77	-88	-94	-96	-94	-88	-78	-67	-53	-38	-23	-7	0		
	GM3	9	18	26	32	36	39	39	38	35	31	26	20	15	9	4	-1		
	GM4	-2	-3	-5	-6	-7	-7	-7	-7	-6	-5	-5	-4	-3	-2	-1	0		
0.85	GM1	43	84	122	157	187	212	232	246	256	261	263	261	256	250	242	233	224	
	GM2	-21	-41	-58	-72	-82	-88	-89	-86	-79	-68	-54	-41	-25	-9	7	23	38	
	GM3	9	17	25	31	34	36	37	35	32	27	22	17	11	5	-1	-6	-10	
	GM4	-2	-3	-5	-6	-6	-7	-7	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	

GEOMETRIC MULTIPLIERS FOR A SINGLE LUMINAIRE VERTICALLY ABOVE A CORNER OF  
A RECTANGLE WITH SIDES X / H AND Y / H  
THE VALUES ARE IN 1 / 1000  
TABLE I. 1

Y / H	1	V	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
0.90	0M1	42	43	120	155	184	209	228	242	251	255	254	249	242	234	224	215	208	202	197	192	188	184	180	177	174	171	168	165	162	159	156	153	150	147	144	141	138	135	132	129	126	123	120	117	114	111	108	105	102	99	96	93	90	87	84	81	78	75	72	69	66	63	60	57	54	51	48	45	42	39	36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	0	-3	-6	-9	-12	-15	-18	-21	-24	-27	-30	-33	-36	-39	-42	-45	-48	-51	-54	-57	-60	-63	-66	-69	-72	-75	-78	-81	-84	-87	-90	-93	-96	-99	-102	-105	-108	-111	-114	-117	-120	-123	-126	-129	-132	-135	-138	-141	-144	-147	-150	-153	-156	-159	-162	-165	-168	-171	-174	-177	-180	-183	-186	-189	-192	-195	-198	-201	-204	-207	-210	-213	-216	-219	-222	-225	-228	-231	-234	-237	-240	-243	-246	-249	-252	-255	-258	-261	-264	-267	-270	-273	-276	-279	-282	-285	-288	-291	-294	-297	-300	-303	-306	-309	-312	-315	-318	-321	-324	-327	-330	-333	-336	-339	-342	-345	-348	-351	-354	-357	-360	-363	-366	-369	-372	-375	-378	-381	-384	-387	-390	-393	-396	-399	-402	-405	-408	-411	-414	-417	-420	-423	-426	-429	-432	-435	-438	-441	-444	-447	-450	-453	-456	-459	-462	-465	-468	-471	-474	-477	-480	-483	-486	-489	-492	-495	-498	-501	-504	-507	-510	-513	-516	-519	-522	-525	-528	-531	-534	-537	-540	-543	-546	-549	-552	-555	-558	-561	-564	-567	-570	-573	-576	-579	-582	-585	-588	-591	-594	-597	-600	-603	-606	-609	-612	-615	-618	-621	-624	-627	-630	-633	-636	-639	-642	-645	-648	-651	-654	-657	-660	-663	-666	-669	-672	-675	-678	-681	-684	-687	-690	-693	-696	-699	-702	-705	-708	-711	-714	-717	-720	-723	-726	-729	-732	-735	-738	-741	-744	-747	-750	-753	-756	-759	-762	-765	-768	-771	-774	-777	-780	-783	-786	-789	-792	-795	-798	-801	-804	-807	-810	-813	-816	-819	-822	-825	-828	-831	-834	-837	-840	-843	-846	-849	-852	-855	-858	-861	-864	-867	-870	-873	-876	-879	-882	-885	-888	-891	-894	-897	-900	-903	-906	-909	-912	-915	-918	-921	-924	-927	-930	-933	-936	-939	-942	-945	-948	-951	-954	-957	-960	-963	-966	-969	-972	-975	-978	-981	-984	-987	-990	-993	-996	-999

GEOMETRIC MULTIPLIERS FOR A SINGLE LUMINAIRE VERTICALLY ABOVE A CORNER OF A RECTANGLE WITH SIDES X / H AND Y / H  
 THE VALUES ARE IN 1 / 1000  
 TABLE 1. 2



X/H	Y/H	GM1	GM2	GM3	GM4
1.5	2.2	-12	218	47	-4
0.5	2.2	189	-4	36	-6
0.8	1.5	147	117	-13	2
0.5	0.8	267	-78	31	-5
		$\Sigma GM1=591$	$\Sigma GM2=253$	$\Sigma GM3=101$	$\Sigma GM4=-13$

de donde:

$$Fu = (591FC1 + 253FC2 + 101FC3 - 13FC4)/1000$$

El flujo directo F4 es la suma de los flujos así obtenidos para cada luminaria de la instalación.

## INTERREFLEXIONES

Las interreflexiones se calculan asumiendo que la iluminancia total (iluminancia directa más iluminancia reflejada) se distribuye uniformemente respectivamente en el techo-friso, en las paredes y en el plano de trabajo.

En estas condiciones y para las dimensiones usuales de interiores las reflexiones mutuas en la práctica sólo dependen de la relación del factor de suspensión J de las luminarias y del índice del lugar K definidos como:

$$J = \frac{H2}{H2 + H3}$$

$$K = \frac{A.B}{H3.(A + B)}$$

A y B son los lados de la habitación, H3 la distancia entre el plano de las luminarias y el plano de trabajo, y H2 la altura del friso (distancia entre el techo y el plano de las luminarias).

## CÁLCULO DE ILUMINANCIAS

Sean:

(NM) el número de luminarias en el lugar,

F la luz total que sale de una luminaria (hacia arriba y abajo),

FC4 el flujo hacia abajo de una luminaria,

F4 el flujo que incide directamente en el plano de trabajo desde todas las luminarias y

A y B los lados del lugar.

Las iluminancias medias E1 en el techo, E3 en las paredes y E4 en el plano de trabajo se calculan por medio de las siguientes funciones lineales de F, FC4, F4:

$$E1 = RM11.(NM).F/AB + RM12.(NM).FC4/AB + RM13.F4/AB$$

$$E3 = RM31.(NM).F/AB + RM32.(NM).FC4/AB + RM33.F4/AB$$

$$E4 = RM41.(NM).F/AB + RM42.(NM).FC4/AB + RM43.F4/AB$$

donde los factores de peso RM (interreflexiones) se dan en tablas que pueden encontrarse en la publicación CIE 40-1978.

Ejemplo:

para  $J = 0$ ,  $K = 0.6$  y  $R1, R3, R4 = 873$   
de la tabla II.1 de la mencionada publicación, primera línea:

TABLES OF COEFFICIENTS FOR THE COMPUTATION OF ILLUMINANCES E1 E3 E4

TABLE II - 1 SUSPENSION RATIO : .0 ROOM INDEX : 0.60

REFLEC- TANCES	CEILING ILLUMINANCE E1			WALL ILLUMINANCE E3			ILLUMINANCE AT WORKING PLANE: E4		
	RM11	RM12	RM13	RM31	RM32	RM33	RM41	RM42	RM43
073	1255	-089	-189	418	222	-465	473	-64	719
071	1203	-082	-207	367	229	-543	436	-59	642
773	1216	-061	-102	388	267	-486	401	-13	729
771	1178	-060	-200	314	269	-531	372	-12	676
753	1124	-030	-65	271	295	-349	300	-08	680
751	1100	-023	-134	247	218	-418	287	-04	620
731	1052	-064	-54	204	175	-345	232	-131	913
711	1010	-093	3	174	149	-294	193	-165	979
551	1009	-098	-132	172	275	-489	199	-11	831
531	1036	-050	-53	144	238	-342	163	-69	917
511	1019	-088	3	123	198	-294	137	-110	976
331	1023	-037	-53	85	284	-339	97	-7	920
311	1008	-083	3	74	246	-294	82	-86	978
111	1003	-078	3	24	294	-294	27	-3	978
000	1000	-1000	0	0	300	-300	0	0	1000

$$RM11 = 1.255 \quad RM12 = -0.889 \quad RM13 = -0.189$$

$$RM31 = 0.418 \quad RM32 = 0.222 \quad RM33 = -0.465$$

$$RM41 = 0.473 \quad RM42 = -0.064 \quad RM43 = 0.719$$

si A y B están en metros, las iluminancias están en lux.

## CÁLCULO DE LOS FLUJOS DE LA INSTALACIÓN

Sean:

E1 la iluminancia media en el techo y el friso,  
E3 la iluminancia media en las paredes,  
E4 la iluminancia media en el plano de trabajo,

AB el área del plano de trabajo,  
 (NM).F el flujo total,  
 (NM).FC4 el flujo en el hemisferio inferior y  
 F4 el flujo emitido directamente por la instalación hacia el plano de trabajo.

Las últimas tres cantidades se calculan por medio de las siguientes expresiones lineales:

$$\begin{aligned} (NM).F/AB &= MR11.E1 + MR13.E3 + MR14.E4 \\ (NM).FC4/AB &= MR21.E1 + MR23.E3 + MR24.E4 \\ F4/AB &= MR31.E1 + MR33.E3 + MR34.E4 \end{aligned}$$

Los coeficientes MR están en las tablas III.1 - III.24.

Ejemplo:

para  $J = 0$ ,  $K = 0.6$  y  $R1, R3, R4 = 873$   
 los siguientes coeficientes se leen de la primera línea de la tabla III.1:

TABLES OF COEFFICIENTS FOR THE COMPUTATION OF FLUX VALUES (MGT/AB) (MGT/FC4/AB) (F4/AB)

TABLE III - 1 SUSPENSION RATIO : 0.6 ROOM INDEX : 0.60

REFLEC- TANCES	TOTAL FLUX (MGT/AB)			DOWNWARD FLUX (MGT/FC4/AB)			DIRECT UTILE FLUX F4/AB		
	MR11	MR13	MR14	MR21	MR23	MR24	MR31	MR33	MR34
873	200	1000	700	-800	1523	776	-202	-523	1000
871	200	1000	900	-800	1523	925	-202	-523	1000
773	300	1000	700	-700	1523	776	-177	-523	1000
771	300	1000	900	-700	1523	925	-177	-523	1000
753	300	1667	700	-700	2040	776	-177	-376	1000
751	300	1667	900	-700	2040	925	-177	-376	1000
731	300	2333	900	-700	2557	925	-177	-224	1000
711	300	3000	900	-700	3075	925	-177	-75	1000
551	500	1667	900	-500	2040	925	-126	-376	1000
531	500	2333	900	-500	2557	925	-126	-224	1000
511	500	3000	900	-500	3075	925	-126	-75	1000
331	700	2333	900	-300	2557	925	-76	-224	1000
311	700	3000	900	-300	3075	925	-76	-75	1000
111	900	3000	900	-100	3075	925	-25	-75	1000
000	1000	3333	1000	0	3337	1000	0	0	1000

$$\begin{aligned} MR11 &= 0.200 & MR13 &= 1.000 & MR14 &= 0.700 \\ MR21 &= -0.800 & MR23 &= 1.523 & MR24 &= 0.776 \\ MR31 &= -0.202 & MR33 &= -0.523 & MR34 &= 1.000 \end{aligned}$$

## ECUACIONES PARA LOS CÁLCULOS CON COMPUTADOR

### CÁLCULO DEL FLUJO DIRECTO EN EL PLANO DE TRABAJO

$$(1) \quad F4 = \Sigma fu, \text{ con}$$

$$(1') \quad fu = \mathbf{GM.FC}, \text{ donde:}$$

$$(2) \quad FC = \begin{bmatrix} FC1 \\ FC2 \\ FC3 \\ FC4 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad GM = [Y1 \ Y2 \ Y3 \ Y4] D.S^{-1} \quad (2') \quad \text{con}$$

$$(2'') \quad D = \frac{1}{2\pi} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & -2 & -6 & -12 \\ 0 & 0 & 3 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & -4 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{16} & \frac{1}{64} & \frac{1}{256} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{9} & \frac{1}{27} & \frac{1}{81} \\ \frac{4}{3} & \frac{16}{9} & \frac{64}{27} & \frac{256}{81} \\ \frac{4}{4} & \frac{16}{16} & \frac{64}{64} & \frac{256}{256} \end{bmatrix} \quad (2''')$$

$$(3) \quad Y1 = \arctan \frac{xy}{(1+x^2+y^2)^{1/2}}$$

$$x = X/H \quad \text{y} \quad y = Y/H$$

$$(3') \quad Y2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{x}{(1+x^2)^{1/2}} \arctan \frac{y}{(1+x^2)^{1/2}} + \frac{y}{(1+y^2)^{1/2}} \arctan \frac{x}{(1+y^2)^{1/2}} \right\}$$

$$(3'') \quad Y3 = \frac{1}{3} \left\{ Y1 + \left( \frac{1}{1+x^2} + \frac{1}{1+y^2} \right) \frac{xy}{(1+x^2+y^2)^{1/2}} \right\}$$

$$(3''') \quad Y4 = \frac{1}{4} \left\{ 2Y2 + \frac{x}{2(1+x^2)^{3/2}} \arctan \frac{y}{(1+x^2)^{1/2}} + \frac{y}{2(1+y^2)^{3/2}} \arctan \frac{x}{(1+y^2)^{1/2}} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(1+x^2)} + \frac{1}{(1+y^2)} \right) \frac{xy}{1+x^2+y^2} \right\}$$

## CÁLCULO DE LAS ILUMINANCIAS PROMEDIO E1, E3, E4

Siendo  $J$  la relación de suspensión:  $J = H_2/(H_2 + H_3)$ , se distinguen dos casos:  $J \neq 0$  y  $J = 0$ .

### $J \neq 0$

(4)  $\mathbf{E} = \mathbf{RM.FD}$  donde

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E1 \\ E3 \\ E4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{FD} = \begin{bmatrix} (NM).F/AB \\ (NM).FC4/AB \\ F4/AB \end{bmatrix} \quad \text{y}$$

(5)  $\mathbf{RM} = \mathbf{MR}^{-1}$  con

$$(6) \quad \mathbf{MR} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left[ \mathbf{C} - \frac{\mathbf{g.R}}{AB} \right] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2J}{(1-J)K} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{K} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R4 \end{bmatrix}$$

la matriz de coeficientes  $g_{ij}$  está dada más adelante.

### $J = 0$

Puede usarse la misma fórmula (4), pero la matriz  $\mathbf{MR}$  se puede escribir en forma más simple

$$(7) \quad \mathbf{MR} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left[ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{K} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{AB} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{13} & g_{14} \\ g_{31} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{43} & g_{44} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} R1 & 0 & 0 \\ 0 & R3 & 0 \\ 0 & 0 & R4 \end{bmatrix}$$

## CÁLCULO DE LOS FLUJOS DIRECTOS

Las expresiones de cálculo de iluminancia promedio dadas anteriormente pueden usarse para  $\mathbf{FD}$ ,  $\mathbf{MR}$ , y  $\mathbf{E}$ .

## CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE INTERCAMBIO

Los coeficientes de intercambio  $g_{ij}$  entre dos superficies paralelas de un paralelepípedo rectangular con lados A y B y a una distancia H están dados por la siguiente expresión:

$$(8) \quad g_{ij} = \frac{2AB}{\pi} \left[ \frac{(B^2 + H^2)^{1/2}}{B} \arctan \frac{A}{(B^2 + H^2)^{1/2}} + \frac{(A^2 + H^2)^{1/2}}{A} \arctan \frac{B}{(A^2 + H^2)^{1/2}} + \right. \\ \left. - \frac{H}{B} \arctan \frac{A}{H} - \frac{H}{A} \arctan \frac{B}{H} + \frac{H^2}{2AB} \ln \frac{(A^2 + H^2)(B^2 + H^2)}{(A^2 + B^2 + H^2)H^2} \right]$$

Introduciendo una superficie auxiliar (5), siendo el plano de las luminarias:

$$\begin{aligned} g_{45} &= g_{ij} \quad \text{con } H = H3 \\ g_{15} &= g_{ij} \quad \text{con } H = H2 \\ g_{14} &= g_{41} = g_{ij} \quad \text{con } H = H2 + H3 \\ g_{11} &= g_{44} = 0 \\ g_{12} &= g_{21} = AB - g_{15} \\ g_{13} &= g_{31} = g_{15} - g_{14} \\ g_{22} &= 2 \left( \frac{J}{(1-J)K} AB - AB + g_{15} \right) \\ g_{23} &= g_{32} = AB + g_{14} - g_{15} - g_{45} \\ g_{24} &= g_{42} = g_{45} - g_{14} \\ g_{33} &= 2 \left( \frac{AB}{K} - AB + g_{45} \right) \\ g_{34} &= g_{43} = AB - g_{45} \end{aligned}$$

Para  $J = 0$ :

$$\begin{aligned} g_{14} &= g_{41} = g_{ij} \quad \text{con } H = H3 \\ g_{11} &= g_{44} = 0 \\ g_{13} &= g_{31} = AB - g_{14} = g_{34} = g_{43} \\ g_{33} &= 2 \left( \frac{AB}{K} - AB + g_{14} \right) \end{aligned}$$

## BIBLIOGRAFÍA

TECHNICAL REPORT. CALCULATIONS FOR INTERIOR LIGHTING -  
INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION.  
[Pub. nº CIE 40 (1978)]