

CAPÍTULO 1

ILUMINACIÓN DE ESTADIOS

1.1. ANTECEDENTES.

Un estadio deportivo puede tener diferentes utilidades tales como la realización de partidos de fútbol, básquetbol, béisbol, fútbol americano, encuentros de box, deportes olímpicos, espectáculos musicales, espectáculos masivos u otros tipos de eventos, de manera que para cada uno de ellos se debe contemplar una iluminación especial. Una cancha de fútbol tiene dimensiones muy amplias y en todos los sectores, incluso en el plano vertical, debe cumplir con niveles de iluminación que permitan el mejor espectáculo.

El objetivo de iluminar instalaciones deportivas, como los estadios de Fútbol, es ofrecer un ambiente adecuado para la práctica y disfrute de actividades deportivas por parte de jugadores y público. Lógicamente, las exigencias variarán según el tipo de instalación que se requiera (recreo, entrenamiento o competición) y el nivel de actividad (amateur, profesional y/o transmisión por televisión).

Contar con una buena iluminación en este tipo de instalaciones permite que los jugadores y demás objetos en movimiento sean perfectamente visibles independientemente de su tamaño, posición en el campo, velocidad y trayectoria. Para ello, son importantes los niveles de iluminación tanto horizontal como vertical. Esto es debido a que debe pensarse en una iluminación que cumpla en ambos planos, es decir, que alumbre al jugador en un ángulo de 360 grados. Y, todo esto, es con el fin de que el jugador pueda ver bien al frente, atrás y hacia arriba para los balones en alto. De este modo, se asegura que jugadores, árbitros y cámaras de televisión desempeñen mejor su trabajo.

La iluminancia horizontal (E_H) es una medida de iluminación que está referida al plano horizontal; en este caso son las medidas registradas sobre la cancha. Estos niveles de iluminación determinan el estado de adaptación de ojo del observador y constituye el fondo visual sobre el cual se desarrollan las acciones, en este plano horizontal es necesario alcanzar un nivel de iluminación uniforme óptimo, así como un valor de Iluminancia Media (E_M). Para medir este tipo de iluminancia se requiere trazar una rejilla de 10m x 10m sobre el terreno de juego, dicha rejilla es distribuida uniformemente como base para recopilar estas mediciones (i) y calcular la iluminación máxima/mínima/media del campo de juego¹.

La iluminancia vertical (E_V) a nivel de campo es la cantidad de iluminación que recibe la superficie vertical de los jugadores a una altura de 1.5m sobre la superficie del terreno de juego. Ésta iluminación ayuda a presentar detalles del primer plano de los jugadores (particularmente sus rostros), por lo que los valores de iluminación en los planos verticales influyen mucho en la calidad de las transmisiones de TV. Dichos valores también influyen en la correcta visión del balón cuando este alcanza diferentes alturas en el terreno de juego; Las iluminancias verticales se consideran únicamente cuando se tiene una participación de los medios de comunicación audiovisuales.

La iluminación en la cancha debe asegurar una buena uniformidad en los niveles de iluminancia horizontal y vertical con el propósito de evitar que tanto los espectadores, como los medios de comunicación, se vean forzados a realizar ajustes de imagen. El **coeficiente de uniformidad** se expresa como la relación entre el valor de iluminancia mínima y máxima (U_1), o una relación entre el valor de iluminancia mínima y media (U_2). Esto es:

$$U_1 = \frac{E_{mínima}}{E_{máxima}}, \quad U_2 = \frac{E_{mínima}}{E_{media}} \quad (1.1)$$

¹ De acuerdo a la publicación oficial de la FIFA, Estadios de Fútbol, Recomendaciones técnicas y requisitos, Cuarta Edición, 2007.

Al iluminar un espacio deportivo en el cual se desarrollan actividades de alto desempeño físico, se corre el riesgo que ocurra un deslumbramiento a causa de la iluminación artificial, por lo que se requiere que los proyectores se encuentren correctamente direccionados para que éstos no interfieran en el desempeño del deportista.

Para evitar dichos problemas de deslumbramiento, se deben tomar medidas como instalar luminarias apantalladas, reducir el número de puntos de luz agrupando los proyectores, o, evitar colocarlos perpendicularmente a la línea de visión principal. Es conveniente montar las fuentes de luz a una altura adecuada. Para el caso de instalaciones exteriores y visto desde el centro del campo, el ángulo formado por el plano horizontal y el eje de cualquier proyector de la batería debe ser superior a 25° . Tal como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1 Altura de montaje de luminarias

Las lámparas a utilizar dependerán de la finalidad de la instalación. En espacios deportivos, se usan lámparas de HID², pero por sus características de luz fría (3600 - 4900°K), excelente rendimiento del color y alta eficiencia, se emplean lámparas de aditivos metálicos.

Las luminarias, en instalaciones para la iluminación de estadios, se disponen normalmente en torres colocadas en los laterales, esquinas del campo o en una combinación de ambas. En el primer caso, se emplean proyectores rectangulares cuya proyección sobre el terreno tiene forma trapezoidal obteniendo como valor

² HID (High Intensity Discharge) Lámparas de Alta Intensidad de Descarga.

añadido un buen modelado de los cuerpos. En el segundo caso, se emplean los circulares que dan una proyección en forma elíptica. Ver figura 1.2.

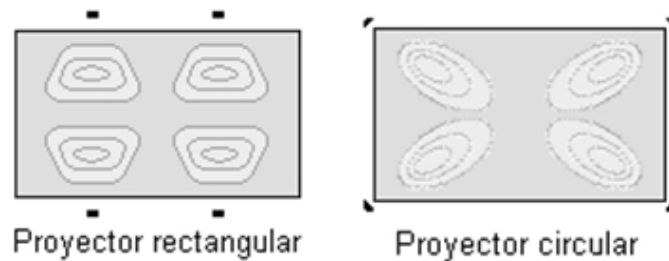


Figura 1.2 Tipos de proyecciones.

A continuación, en la figura 1.3, se pueden observar algunos ejemplos de disposiciones típicas de proyectores en instalaciones de campo de fútbol.

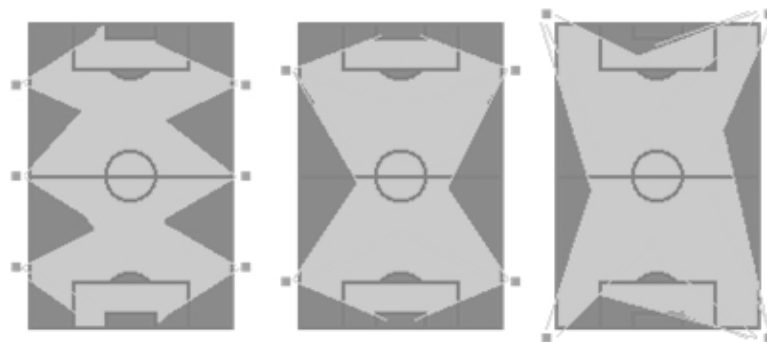


Figura 1.3 Disposiciones de proyectores.

Para garantizar que espectadores y medios de transmisión audiovisual tengan una buena apreciación de lo que sucede en el terreno de juego, es necesario que se tenga una buena percepción del color. Esto se lleva a cabo teniendo buenos parámetros de temperatura y rendimiento del color. La **temperatura del color** describe la sensación de caliente (rojo) y frío (azul) de acuerdo al tipo de iluminación y se mide en grados Kelvin (K), mientras que el **rendimiento del color** (R_a), es la capacidad de una fuente de iluminación artificial de reproducir iluminación natural y se mide en una escala de 0 a 100.

1.2. NORMAS Y PARÁMETROS DE ILUMINACIÓN

La Federación Internacional de Fútbol Asociado (**FIFA**)³ estableció para la Copa Mundial jugada en Alemania en 2006 que el nivel promedio de iluminación en cancha debería ser de 2500 luxes y, para el de Sudáfrica 2010, de 3500 luxes. El organismo deportivo establece este tipo de exigencias porque se respalda en los avances tecnológicos que se suceden frecuentemente, pero también porque así lo piden las transmisiones televisivas en Alta Definición y de la misma manera, los jugadores y árbitros. Sin embargo, también incluye criterios para eventos que no son transmitidos en alta definición.

En la tabla 1.1 se muestran los niveles de iluminación necesarios para realizar un evento transmitido en alta definición. En ella, se incluyen los valores de las iluminancias verticales, horizontales, los coeficientes de uniformidad y propiedades de las lámparas. Todo esto de acuerdo a las normas de la FIFA.

Actividad		Iluminancia Vertical			Iluminancia Horizontal			Propiedades de la lámpara	
		Lux	U_1	U_2	Lux	U_1	U_2	Temperatura del color [°K]	Rendimiento del color [R_a]
Inter-nacional	Cámara fija	2,400	0.5	0.7	3,500	0.6	0.8	> 4,000	≥ 65
	Cámara a nivel campo	1,800	0.4	0.65					
Nacional	Cámara fija	2,000	0.5	0.65	2,500	0.6	0.8	> 4,000	≥ 65
	Cámara a nivel campo	1,400	0.35	0.6					

Tabla 1.1 Niveles de iluminación para transmisiones en HD. Fuente FIFA

³ Fédération Internationale de Football Association (Federación Internacional de Fútbol Asociación).

Para eventos que no son transmitidos en alta definición se tienen niveles de iluminación diferentes a los mostrados en la tabla 1.1 pues, para este caso, las exigencias de iluminación son menores. En la tabla 1.2 se muestran los niveles de iluminación, de acuerdo a normas de la FIFA.

Actividad	Iluminancia [lux]	Coeficiente de uniformidad		Propiedades de la lámpara	
	E_H media	U_1	U_2	Temperatura del color [$^{\circ}K$]	Rendimiento del color [R_a]
Nacionales	750	0.5	0.7	> 4,000	≥ 65
Ligas y clubes	500	0.4	0.6	> 4,000	≥ 65
Entrenamientos	200	0.3	0.5	> 4,000	≥ 65

Tabla 1.2 Niveles de iluminación no transmitidos en HD. Fuente FIFA

Otras entidades que rigen el deporte en el mundo igualmente evalúan sus lineamientos en iluminación y establecen las normas a seguir en sus respectivos eventos por las mismas razones que lo hacen en el Fútbol.

Para iluminar un estadio de fútbol hay que tener en cuenta a quiénes participan en el espectáculo; desde los 22 jugadores y los tres árbitros en una cancha de 100 metros por 70, hasta a los espectadores de sitio y de televisión y, para todos ellos, hay que tomar en cuenta los niveles de iluminación para que el juego sea correctamente apreciado.

En cuanto a las normas nacionales aplicables a este tipo de iluminación, se encuentra la Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2004 en la cual se indica un valor de Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA) medido en [W/m^2] para establecer niveles de eficiencia energética que se deben cumplir en edificios no residenciales.

Para el caso de espacios deportivos, ésta norma indica un DPEA de 46.2 $[W/m^2]$ para una cancha deportiva⁴. La forma de calcular el DPEA se expresa de la siguiente manera:

$$DPEA = \frac{CARGA\ TOTAL\ CONECTADA\ PARA\ EL\ ALUMBRADO}{AREA\ TOTAL\ ILUMINADA} \quad (1.2)$$

Finalmente, se deben conocer las necesidades presentes y futuras del estadio para dar una solución. La **FIFA** puede recomendar a quién ha realizado la mejor iluminación de estadios en el mundo, pero ella no certifica como diseñador porque no es una entidad experta en la materia; el certificado sobre el conocimiento de uno o varios temas lo otorgan instituciones de renombre mundial que congregan a los expertos como **IESNA**⁵, **IALD**⁶, **PLDA**⁷ aunque estas organizaciones no te avalan como iluminador de estadios, pero si, en que tienes el conocimiento para llevar a cabo una obra de este tipo.

1.3. PROYECTORES

Un proyector es una luminaria que concentra la luz en un determinado ángulo sólido mediante un sistema óptico (espejos o lentes) para conseguir una intensidad luminosa elevada en alguna zona.

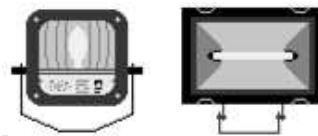


Figura 1.4 Tipos de proyectores.

⁴ El valor mencionado de DPEA para canchas deportivas se incluyó en la NOM-007-ENER-2004 con el único fin de orientar en este tipo de espacio de acuerdo a su uso, y se está analizando considerarlo incluirlo a futuro en la norma (Ver Anexo 2).

⁵ Illuminating Engineering Society of North America (Sociedad de Ingeniería en Iluminación de Norteamérica).

⁶ International Association of Lighting Designers (Asociación Internacional de Diseñadores en Iluminación).

⁷ Professional Lighting Designers' Association (Asociación Profesional de Diseñadores en Iluminación).

Los proyectores se clasifican según la apertura o dispersión del haz de luz que se define como el ángulo comprendido entre las dos direcciones en que la intensidad luminosa cae en un determinado porcentaje (usualmente el 10% o el 50%) del valor máximo que hay en el centro del haz donde la intensidad es máxima, tal como se observa en la figura 1.5.

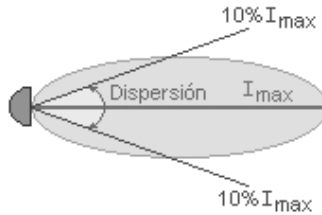


Figura 1.5 Dispersión del haz de luz.

En la tabla 1.3 se muestra la clasificación de las luminarias según la apertura del haz de luz.

Tipo de apertura	Apertura del haz en grados (50% <i>Intensidad máx</i>)
Pequeña	< 20
Mediana	Entre 20 y 40
Grande	> 40

Tabla 1.3 Clasificación de las luminarias de acuerdo a la apertura del haz de luz.

La forma de la distribución del haz de luz depende del tipo de proyector. Así, en los proyectores circulares puede ser cónico o cónico ligeramente asimétrico, obteniéndose una proyección elíptica sobre las superficies iluminadas. Mientras, en los rectangulares suele ser simétrica en los planos horizontal y vertical. Aunque en éste último plano también puede ser asimétrica y la proyección obtenida tiene entonces forma trapezoidal. Ver figura 1.6.

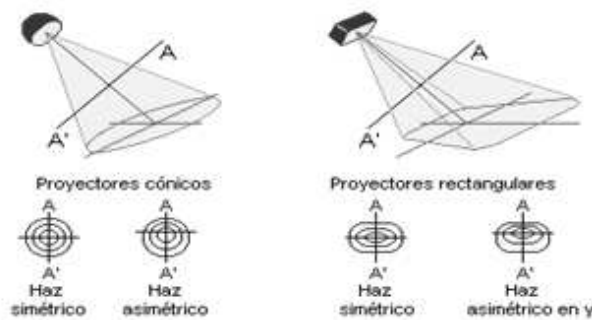


Figura 1.6 Forma de distribución del haz dependiendo el tipo de proyector.

Para la denominación de un proyector basta indicar los ángulos de apertura en sus planos de simetría (vertical y horizontal normalmente). Por ejemplo, 10°/40° indica un proyector que tiene en el plano vertical 5° a cada lado del eje central y 20° en cada lado en el plano horizontal, tal y como se muestra en la figura 1.7.

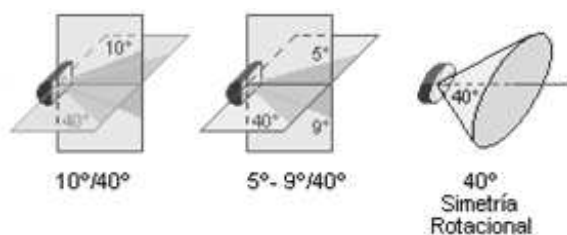


Figura 1.7 Ángulos de apertura.

Finalmente, la eficacia del haz en porcentaje se puede determinar como la relación entre los lúmenes contenidos dentro de la apertura del haz (lúmenes del haz) y los lúmenes de la lámpara en tanto por ciento.

$$Eficacia\ del\ haz\ [\%] = \frac{Lumenes\ del\ haz}{Lumenes\ de\ la\ lampara} \quad (1.3)$$

El cálculo del número de proyectores necesarios es sencillo y se realiza con el método de los lúmenes. Si se requiere más precisión, como en transmisiones deportivas por TV, se puede recurrir al método del punto por punto. Sin embargo, para grandes instalaciones, tales como estadios deportivos u otras análogas, existen programas mediante los cuales los cálculos resultan ser de menor complejidad.

1.4. MÉTODO DE LOS LUMENES

Este método es el más sencillo de utilizar para calcular el número de luminarias en una instalación, y está expresado con la fórmula 1.4:

$$N = \frac{E_m \cdot S}{\Phi \cdot CBU \cdot f_m} \quad (1.4)$$

Donde:

N número de proyectores necesarios.

E_m iluminancia media recomendada para cada aplicación.

S superficie a iluminar en m^2 .

Φ flujo luminoso de un proyector en lúmenes⁸

CBU Coeficiente de Utilización del Haz (*Coefficient of Beam Utilization*) que se define como la relación entre los lúmenes que llegan a la superficie iluminada y los lúmenes del haz. Su valor oscila entre 0.6 y 0.9.

f_m factor de mantenimiento cuyo valor está entre 0.65 y 0.80. Sirve para cuantificar la disminución del flujo luminoso por el envejecimiento de las lámparas y por la suciedad acumulada en éstas y el proyector.

Una vez realizados los cálculos conviene hacer una comprobación de los resultados para verificar la validez de los resultados. Para ello, se recurre a comparar el valor obtenido de la iluminancia media con el valor de iluminancia media recomendado. Otros parámetros de calidad que se acostumbran a utilizar son la iluminancia media (E_m) de la instalación y el coeficiente de uniformidad medio (E_{min}/E_m).

$$E_m = \frac{n \cdot \Phi_L \cdot \eta \cdot f_m}{S} \quad (1.5)$$

Donde:

n número de lámparas por luminaria.

Φ_L flujo luminoso de una lámpara.

η factor de utilización.

⁸ El lumen es una unidad de medición de flujo luminoso, cuando se habla de lúmenes en una superficie equivale a emplear lux; 1[lux]=1[lm/m²].

1.5. MÉTODO DEL PUNTO POR PUNTO

El método de los lúmenes es una forma muy práctica y sencilla de calcular el nivel medio de la iluminancia en una instalación de alumbrado general. Pero ¿Qué pasa si se quiere conocer cómo es la distribución de la iluminación en donde la luz no se distribuye uniformemente? En estos casos se emplea el método del punto por punto que permite conocer valores de la iluminancia en puntos específicos.

Considerando que la iluminancia en un punto es la suma de los componentes de la luz provenientes de dos fuentes (una componente directa, producida por la luz que llega al plano de trabajo directamente de las luminarias, y otra indirecta o reflejada procedente de la reflexión de la luz de las luminarias en el techo, paredes y demás superficies del local)

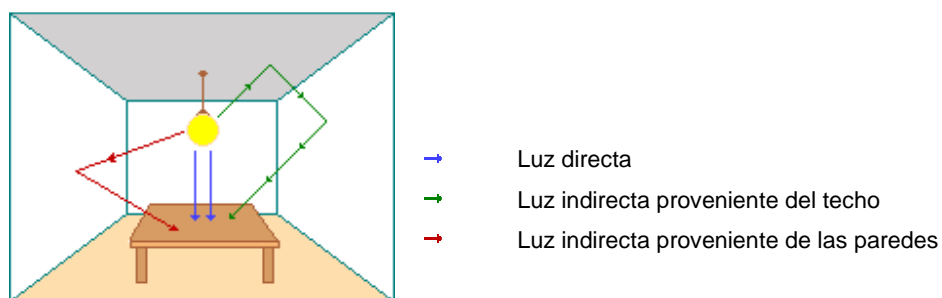


Figura 1.8 Componentes de la luz.

Como se observa en la figura 1.8, sólo unos pocos rayos de luz serán perpendiculares al plano de trabajo mientras que el resto serán oblicuos. Esto quiere decir que de la luz incidente sobre un punto sólo una parte servirá para iluminar el plano de trabajo y el resto iluminará el plano vertical a la dirección incidente en dicho punto.

Ahora bien, para utilizar el método del punto por punto, necesitamos conocer previamente las características fotométricas de las lámparas y luminarias empleadas, la disposición de las mismas, así como también la altura de estas

sobre el plano de trabajo. Una vez conocidos todos estos elementos podemos empezar a calcular las iluminancias.

Se pueden considerar como fuentes de luz puntuales a las lámparas incandescentes y de descarga que no sean los tubos fluorescentes. Mientras se tenga una mayor cantidad de puntos calculados sobre la superficie a iluminar más información se tiene sobre la distribución de la luz. Esto es particularmente importante si trazamos las curvas isolux⁹ de la instalación.

Como ya se ha mencionado, la iluminancia horizontal en un punto se calcula como la suma de la componente de la iluminación directa más la de la iluminación indirecta. Por lo tanto:

$$E_H = E_d + E_i \quad (1.6)$$

Donde:

- E_H iluminancia horizontal.
- E_d componente de iluminación directa.
- E_i componente de iluminación indirecta.

$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}, \quad E_V = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2} \quad (1.7)$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2} \quad (1.8)$$

Donde:

- E_V iluminancia vertical.
- I intensidad luminosa.
- α ángulo de incidencia.
- h altura de la lámpara.

⁹ Las curvas isolux se obtienen a partir de las características de la fuente luminosa y brindan información sobre la forma y magnitud de la emisión de esta.

En la figura 1.10 se puede observar los componentes necesarios para calcular las iluminancias verticales y horizontales a partir de la ubicación de la fuente de iluminación.

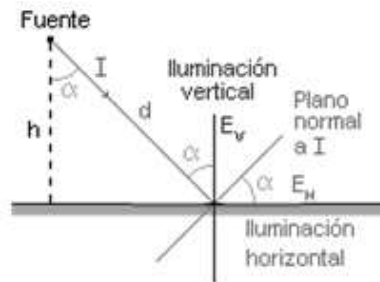


Figura 1.9 Componentes de las iluminancias verticales y horizontales.

En general, si un punto está iluminado, por más de una lámpara, su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas. Tal como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^3 \alpha_i}{h_i^2}, \quad E_V = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \sin \alpha_i}{h_i^2} \quad (1.9)$$

El valor de la intensidad luminosa se puede obtener a partir del diagrama de intensidad luminosa de la luminaria referido a un metro de longitud de la fuente de luz. En el caso de un tubo fluorescente desnudo, la intensidad luminosa puede calcularse a partir del flujo luminoso por metro según la fórmula 1.10:

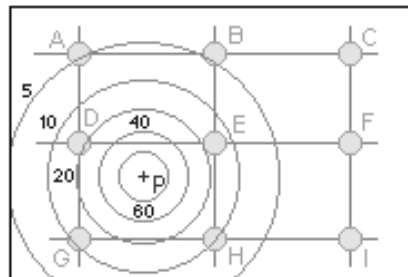
$$I = \frac{\Phi}{9.25} \quad (1.10)$$

El cálculo de las iluminancias horizontales empleando las curvas isolux permite obtener las iluminancias horizontales en cualquier punto del plano de trabajo de forma rápida y directa. Para ello se necesita:

1. Las curvas isolux de la luminaria suministradas por el fabricante.

2. La planta del local con la disposición de las luminarias dibujada con la misma escala que la curva isolux.

El procedimiento de cálculo se realiza de la siguiente manera: Sobre el plano de la planta se sitúa el punto o los puntos en los que se quiere calcular la iluminancia, después, se coloca el diagrama isolux sobre el plano de tal manera que el centro coincida con el punto y se suman los valores relativos de las iluminancias debidas a cada una de las luminarias que se han obtenido a partir de la intersección de las curvas isolux con las luminarias. En la figura 1.10 se muestra un ejemplo para un sistema de iluminación con 9 luminarias.



Luminaria	A	B	C	D	E	F	G	H	I	TOTAL
Iluminancia [Lux]	4	4	0	19	19	0	12	10	0	$E_T = 68[lux]$

Figura 1.10 Cálculo de iluminancias usando curvas isolux.

Finalmente, los valores reales de las iluminancias en cada punto se calculan a partir de los relativos obtenidos de las curvas aplicando la fórmula 1.11:

$$E_{H\ real} = E_{curvas} \cdot \frac{\Phi_{L\ real}}{1000 \cdot h^2} \quad (1.11)$$

También puede expresarse en valores relativos a la iluminancia máxima (100%) para cada altura de montaje. Los valores reales de la iluminancia se calculan entonces como:

$$E_{real} = E_{curvas} \cdot E_{m\acute{a}x}, \text{ donde } E_{m\acute{a}x} = a \cdot \frac{\Phi_{L\ real}}{h^2} \quad (1.12)$$

Donde 'a' es un parámetro que se obtiene a través de las graficas.

Para calcular la componente indirecta o reflejada en un punto, se conjetura que la distribución luminosa de la luz reflejada es uniforme en todas las superficies del local incluido el plano de trabajo. De esta manera, la componente indirecta de la iluminación de una fuente de luz, para un punto cualquiera de las superficies que forman el local, se calcula como:

$$E_{indirecta} = E_{ind\ H} = E_{ind\ V} = \frac{\Phi}{F_T} \cdot \frac{\rho_m}{1 - \rho_m} \quad (1.13)$$

Donde:

F_T es la suma de las áreas de todas las superficies del local.

ρ_m es la reflectancia media de las superficies del local.

El valor de la reflectancia media se determina mediante la siguiente expresión:

$$\rho_m = \frac{\sum_n \rho_i \cdot F_i}{\sum_n F_i} \quad (1.14)$$

Donde:

ρ_i es el valor de reflectancia en la superficie F_i .

De esta manera, se ha hablado ya de dos métodos para el cálculo de nuestra instalación. En éste estudio se empleará el método de los lúmenes para determinar la cantidad de luminarias para cada una de las cuatro torres con las que cuenta el EOU¹⁰. En el capítulo 4 se muestra el cálculo para el método del punto por punto, así como los niveles de iluminación requeridos cumpliendo con las normas Mexicanas y de la FIFA para espacios deportivos.

¹⁰ Abreviatura de Estadio Olímpico Universitario.