

CAPÍTULO 4

ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN EN LAS TORRES DEL ESTADIO OLIMPICO UNIVERSITARIO

4.1. CARACTERÍSTICAS

Como se menciona anteriormente y por el análisis mostrado, la iluminación de la cancha del EOU resulta ser costosa y de alto consumo de energía eléctrica, tal y como se muestra en los cálculos del análisis económico del capítulo 2 de esta tesis. Esta es una de las razones por las que se pensó actualizar éste sistema para que con el diseño adecuado consuma menor energía y tenga los mejores niveles de iluminación para la realización de eventos deportivos.

Para esto se realizaron estudios a partir de los niveles de iluminación y consumo de energía y así poder determinar la cantidad de luminarias requeridas por torre, respaldando estos resultados a través de una corrida en el programa de iluminación Visual.

El estudio se encuentra basado en las siguientes normas:

- Fédération Internationale de Football Association (FIFA)
- Illuminating International Society of North America (IESNA)
- NOM-007-ENER-2004 Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales.

Con el fin de utilizar los niveles de iluminación adecuados para los cálculos, en éste estudio empleamos las especificaciones de iluminación para eventos televisados de las normas de la FIFA e IESNA. La Norma Oficial Mexicana la

utilizamos para determinar el valor de DPEA, requerido para Edificios Deportivos en áreas de deportes.

Para el estudio se encuentran las siguientes necesidades para una iluminación satisfactoria:

- Niveles de iluminación horizontal y vertical acordes a las normas.
- Valores del coeficiente de uniformidad de iluminación (vertical y horizontal).
- La Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA) requerida.
- Índice de rendimiento de color.
- Temperatura de color.

En la tabla 4.1 se presentan los parámetros requeridos de iluminación de los puntos anteriores.

Parámetros	
Niveles de iluminación	$E_{h_{media}} = 750 [Lux]$
Coeficiente de uniformidad	$U_1 = 0.5$ y $U_2 = 0.7$
DPEA's	$46.2 [W/m^2]$
Rendimiento del color	≥ 65
Temperatura del color	$> 4,000 [K]$

Tabla 4.1 Especificaciones de iluminación.

Una vez establecidos los requerimientos de iluminación y las necesidades visuales del espectador y el deportista, se procederá a la elección de la luminaria de acuerdo a los criterios antes vistos.

4.2 SELECCIÓN DE LA LUMINARIA

Como se menciona en el capítulo 1, para la iluminación de exteriores y para áreas deportivas, se utilizan lámparas tipo HID; partiendo de esto se realizará la selección de la luminaria que se adecue a los criterios previamente establecidos comparando tipos de luminarias de distintas marcas, para, finalmente, seleccionar la luminaria que mejor convenga y más se adecue a los requerimientos de nuestro estudio además de que cumpla con lo establecido con las normas antes mencionadas.

Para la selección del equipo se tomarán en cuenta diferentes factores tales como:

- La potencia de la luminaria.
- Flujo luminoso.
- Temperatura del color.
- Índice del rendimiento del color.
- Vida media útil del equipo.

En la tabla 4.2 se presentan algunas luminarias que podrían emplearse en el estudio. Para tener un mejor detalle de las especificaciones de las luminarias presentadas (Ver anexo 3).

Marca	Modelo	Potencia [W]	Voltaje [V]	Flujo luminoso ϕ [lm]	Temperatura del color [K]	Rendimiento del color	Vida media [hrs]
G.E.	MVR1500/H BD	1500	480	119,000	3,600	65	3000
Lithonia	TV1500M GP/HD6	1500	480	155,000	4,000	65	NA
Phillips	MVF/404 Arena Vision	2000	400	202,000	5,600	90	5,000

Tabla 4.2 Comparativa de luminarias.

A partir de la tabla 4.2 se puede observar que la luminaria que presenta mayor cantidad de lúmenes, así como temperatura, rendimiento del color y vida útil mayores, es la luminaria de Phillips Arena Vision. Se consideró también que ésta luminaria está especialmente diseñada para estadios deportivos. Sin embargo, se presenta a continuación el cálculo del número de proyectores para cada uno de los distintos tipos de luminaria para tener una visión más profunda acerca de la diferencia en cuanto a consumo y número de proyectores necesarios para cumplir con las normas anteriores para cada una de las marcas seleccionadas.

Para la realización de éstos cálculos se utilizará el método de lúmenes, también conocido, en el caso de iluminación de exteriores con proyectores, como el método del lumen del haz. Retomando lo expuesto en el capítulo 1, el método de lúmenes se expondrá siguiendo los siguientes pasos.

Paso 1: Obtención del coeficiente de utilización del haz (CBU). Este factor depende de distintas variables como la altura de las lámparas, las características fotométricas, el sistema seleccionado, las alturas de los postes y las distancias. Esto ya lo tenemos predeterminado por el diseño y colocación de cada una de las torres del estadio el cual es un sistema de 4 torres con las siguientes distancias:

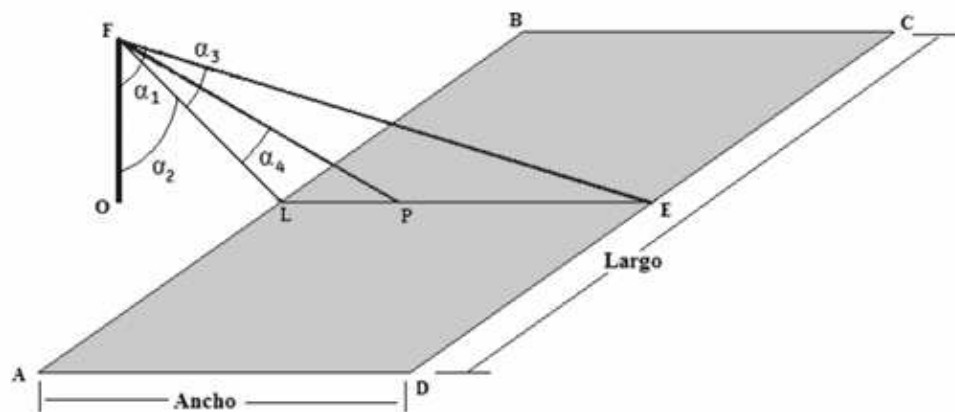


Figura 4.1 Distancias para el cálculo del CBU.

Para el cálculo del CBU son necesarios los siguientes parámetros de acuerdo a la figura 4.1.

- Distancia de la base de la torre a una esquina de la cancha: $OL(SB) = 40$ m
- Ancho de la cancha: $LE = 69$ m
- Altura del montaje de la luminaria: $OF = 55$ metros

Para simplificar los cálculos se puede asumir que la luminaria colocada en el poste sólo derrama luz por su eje vertical y no por su horizontal en el área. Por lo tanto, se debe hallar el ángulo respectivo que determina los lúmenes útiles derramados en el área (α_3) donde:

$$\alpha_1 = \text{Arctan} \left(\frac{OE}{FO} \right) = \text{Arctan} \left(\frac{SB + \text{Ancho cancha}}{H} \right) \quad (4.1)$$

$$\alpha_2 = \text{Arctan} \left(\frac{OL}{FO} \right) = \text{Arctan} \left(\frac{SB}{H} \right) \quad (4.2)$$

$$\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4.3)$$

Una vez calculado α_3 , podemos asumir que el haz central del proyector estará apuntado en un punto del área (P) de tal manera que el ángulo que entregue α_3 sea dividido en dos. Esto genera el ángulo α_4 y así podremos determinar la totalidad de lúmenes útiles derramados por encima ($+\alpha_4$) y por debajo ($-\alpha_4$) del haz central del proyector.

$$\alpha_4 = \left(\alpha_3 / 2 \right) \quad (4.4)$$

Por medio de la distribución lumínica del proyector (dato de fabricantes) se procede a realizar una tabla especificando la acumulación de los lúmenes por encima y por debajo del haz; siendo el centro del haz el punto P (0°).

Posteriormente se procede a elaborar una grafica que indique la relación entre los lúmenes acumulativos y los totales de la lámpara en función de los ángulos. Dicha relación expresa el *coeficiente de utilización*, sin olvidar que anteriormente se asumió que los lúmenes solo se derraman por el eje vertical y no por el horizontal. Por lo tanto dicha relación define lo que se llama coeficiente de utilización.

Afortunadamente para éste estudio se cuenta con valores estándar de coeficientes de utilización basados en la experiencia y ya que este tipo de procedimientos manuales son un poco complejos, dichos valores pueden variar de 0.6 hasta 0.9 tipo según el tipo de actividad a realizar en el área. A continuación se presentan estos valores estándar dependiendo del tipo de deporte que se realiza en cada caso (figura 4.3).

Actividad deportiva	Valor típico de CBU
Beisbol	0.65
Futbol	0.60
Tenis	0.75

Tabla 4.3 Valores estándar de CBU.

Paso 2: Obtención del factor de mantenimiento, el cuál se expresa de la siguiente manera:

$$F_m = FDF * FDS \quad (4.5)$$

Donde

FDF Depreciación del flujo de la lámpara; el cuál se define como la relación de los lúmenes iniciales entre los lúmenes medios.

$$FDF = \frac{\text{lúmenes iniciales}}{\text{lúmenes medios}} \quad (4.6)$$

FDS Depreciación de la luminaria; este factor se determina según las características de las lámparas y la siguiente tabla.

Tipo de luminaria	Muy limpio	Limpio	Medio	Sucio	Muy sucio
Abierta no ventilada	0.90	0.8	0.71	0.64	0.56
Abierta ventilada	0.95	0.89	0.83	0.78	0.72
Cerrada	0.97	0.93	0.88	0.83	0.78
Vidrio refractor o Cerrada y filtrada	0.98	0.95	0.93	0.89	0.86

Tabla 4.4 Valores del Factor de depreciación de la luminaria. Fuente Manual de Iluminación.

En el caso de las luminarias a utilizar, todas son del tipo cerradas y el medio en donde se instalarán se considera medio ya que estará expuesto a las condiciones del medio ambiente. Por lo tanto de la tabla 4.4 tomaremos el valor de 0.88.

Con lo anterior se determina el factor de mantenimiento:

$$Fm = 0.72$$

PASO 3: Cálculo del numero de proyectores.

Finalmente, teniendo los parámetros requeridos se procede a realizar el cálculo para la cantidad de proyectores a utilizar mediante la siguiente formula.

$$N = \frac{E_m * S}{\phi * CBU * F_M} \quad (4.7)$$

Donde:

N número de proyectores.

E_m Iluminancia media; para este análisis se tomara el valor de 2500 lumen de iluminación horizontal, basándonos en el valor propuesto por la FIFA para transmisiones televisivas en HD a nivel nacional (tabla 1.1 capítulo 1 de esta tesis).

S Área de la cancha. Con un valor de $7590m^2$

Φ Flujo luminoso; esto se obtiene de las hoja de especificaciones de la luminaria.

CBU Coeficiente de utilización del haz.

F_m Factor de mantenimiento.

Ahora, teniendo los siguientes datos se pueden calcular el número de proyectores para cualquier tipo de luminaria. A continuación se presenta la tabla 4.5 que contiene los datos necesarios y los resultados obtenidos para cada uno de los equipos elegidos previamente. Esto con el objetivo de evaluar cual de las 3 marcas nos ofrece menor cantidad de proyectores con una mayor eficiencia.

MARCA	Φ [Lm]	CBU	F_m	E_m [Lux]	N	CARGA TOTAL [kW]
GE	119,000	0.6	0.9	2500	364	261
Lithonia	155,000	0.6	0.85	2500	279	201
Phillips	202,000	0.6	0.8	2500	216	216

Tabla 4.5. Resultados para cada tipo de proyector.

Ahora bien, a partir de los resultados obtenidos se puede determinar que la luminaria más adecuada y conveniente para este estudio es el modelo MVF/404 Arena Visión de Phillips. En los siguientes apartados los cálculos se enfocan a la luminaria que se seleccionó por los criterios antes mencionados.

Considerando que la luminaria elegida es tipo HID requiere de un balastro con las características mostradas en la tabla 4.6, para mayores detalles acerca del balastro consultar el anexo 3.

Tipo	HID para lámpara de aditivos metálicos de 1800 [W]
Tensión [V]	220
Frecuencia [Hz]	60
Factor de potencia	.9%
Regulación	+/- 5%
Corriente [A]	10
Temperatura máx.[°C]	120

Tabla 4.6 Especificadores técnicas del balastro utilizado.

4.3 ESTUDIO DE LOS NIVELES DE ILUMINACIÓN

En este apartado se realizará una corrida en el programa Visual® a partir de la luminaria ya seleccionada (Phillips, Arena Vision MVF/404) para observar que la cantidad de lux emitidos a lo largo de toda la cancha cumplan con lo requerido por la norma. Además, se analizarán, de acuerdo a los resultados reales tomados por el PAE, que cumplan con los valores mínimos para cada uno de los parámetros de iluminación; reafirmando así los resultados teóricos obtenidos y confirmando la selección de la luminaria.

En la tabla 4.7 se observan los resultados de la corrida (para ver los resultados de la corrida completa realizada en el programa Visual; ir al anexo 4.

Descripción	Símbolo	E Max [Lux]	E Min [lux]	E Prom [Lux]	1/U ₁	1/U ₂
Cancha derecha	+	1546.9	1089.4	1241.8	1.4:1	1.1:1
Cancha izquierda	+	1738.5	952.2	1216.5	1.8:1	1.3:1
Córner inferior derecho	+	1444.9	727.7	1117.6	2.0:1	1.5:1
Córner inferior izquierdo	+	1443.1	655.6	1086.1	2.2:1	1.7:1
Córner superior derecho	+	1447.0	792.7	1128.8	1.8:1	1.4:1
Córner superior izquierdo	+	1433.0	739.1	1121.3	1.9:1	1.5:1
Niveles de iluminación horizontales	+	1776.2	1149.3	1462.7	1.5:1	1.2:1
Zona media	+	1498.5	732.7	1139.3	2.0:1	1.6:1

Tabla 4.7 Corrida en Visual.

Se puede observar que los resultados obtenidos con la ayuda del programa Visual, cumplen con las normas de calidad de iluminación antes citadas. En lo que destacan los valores mínimos para $U_1 \geq 0.6$ y para $U_2 \geq 0.8$. Además de saber que la lámpara cumple con la temperatura e índice de rendimiento del color.

Otro factor que debe de calcularse es el DPEA, cuyo valor mínimo debe ser de $46.2 \frac{W}{m^2}$, como se menciono anteriormente, según la Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2004.

$$DPEA_{visual} = \frac{2250 * 216}{7590} = \frac{486000}{7590} = 64.03 \frac{W}{m^2} > 46.2 \frac{W}{m^2}$$

De esta manera se verifica que el estudio realizado para la actualización del sistema de iluminación de la cancha del EOU cumple con los parámetros requeridos por las normas antes mencionadas.

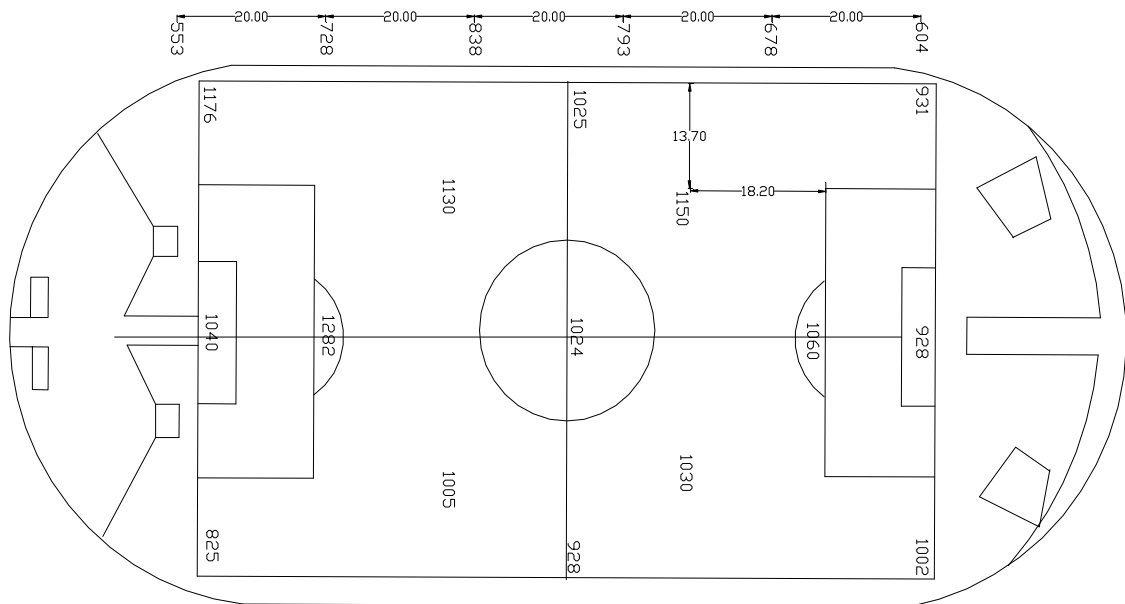
Cabe mencionar que la Dirección General de Obras y Conservación de la Universidad Nacional Autónoma de México, realizó una evaluación para actualizar el sistema de iluminación de las torres del Estadio Olímpico Universitario. En la cual se instalaron 54 luminarias Arena Vision MVF/404 por torre. Por lo que, a continuación, se presentan los resultados de las mediciones de iluminancias obtenidas por el Programa de Ahorro de Energía de la Facultad de Ingeniería. A continuación se muestran estos resultados:

Niveles de iluminación en forma horizontal

Mediciones en luxes (lx)

Fecha 10-feb-2010

19:30 hrs.



Iluminación máxima: **1282 lx**

Iluminación mínima: **825 lx**

Promedio: **1035.7 lx**

Capacidad

No. de lámparas: **54 cada torre**

Cantidad total de lámparas: **216**

Potencia de lámpara: **1800 W**

Potencia total (lámp / balastro): **218.0kW**

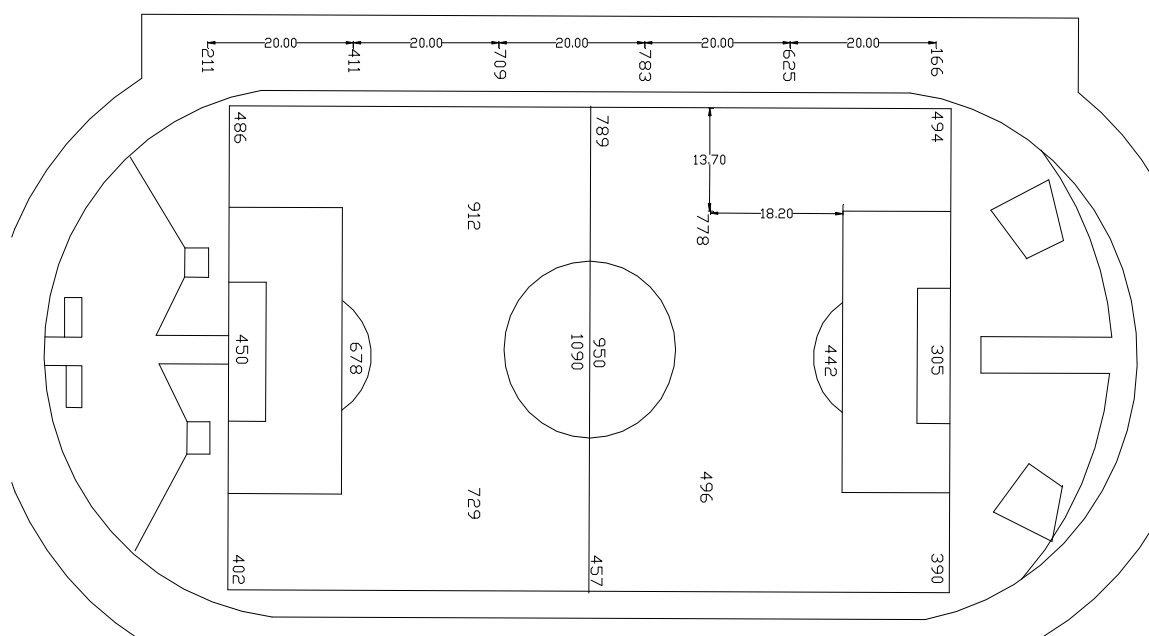
Figura 4.2 Niveles de iluminación horizontales actuales. Fuente PAE.

En la figura 4.2 se pueden apreciar los resultados del sistema de iluminación actualmente instalado en las torres del Estadio Olímpico Universitario. Éstos resultados incluyen los niveles de iluminación horizontales y se observa que el nivel más alto de iluminancia horizontal es de 1282 [lx] ubicado en la media luna de la portería sur, mientras que el más bajo es de 825 [lx] ubicado en el córner sur derecho, en la figura 4.2 está localizado en la esquina inferior izquierda.

Niveles de iluminación en forma vertical

Mediciones en luxes (lx)
19:30 hrs

Fecha 10-feb-2010



Iluminación máxima: **1090 lx**

Iluminación mínima: **305 lx**

Promedio: **615.12 lx**

Capacidad

No. de lámparas: **54 cada torre**

Potencia de lámpara: **1800 W**

Cantidad total de lámparas: **216**

Potencia total (lámp / balastro): **2.5kW**

Figura 4.3 Niveles de iluminación verticales actuales. Fuente PAE.

En la figura 4.3 se pueden observar los resultados del sistema de iluminación actualmente instalado en las torres del Estadio Olímpico Universitario. Éstos resultados incluyen los niveles de iluminación verticales y se aprecia que el nivel

más alto de iluminancia horizontal es de 1090 [lx] ubicado en el centro del campo, mientras que el más bajo es de 305 [lx] ubicado en la portería norte.

Estos resultados fueron tomados en la fecha y hora indicada por parte del PAE. Ahora, se analizará si estas mediciones cumplen con los valores de uniformidad según la FIFA y con los DEPA para la NOM-007-ENER-2004.

Cabe anticipar que el cálculo de los coeficientes de uniformidad sólo se obtendrá para los niveles de iluminación horizontal, ya que la corrida mostrada anteriormente simplemente arrojó resultados de iluminancia horizontales puesto que éste cálculo es solamente teórico.

$$U1 = \frac{825}{1282} = 0.64 \geq 0.6 \text{ por lo tanto cumple}$$

$$U2 = \frac{825}{1035.7} = 0.8 \geq 0.8 \text{ Por lo tanto cumple}$$

Para los DPEA el cálculo y el resultado es el mismo que en la parte de visual ya que, como se menciona, la cantidad de luminarias instaladas fue la misma que en la parte real, utilizando así los mismos valores del equipo.

$$DPEAreal = \frac{2250 * 216}{7590} = \frac{486000}{7590} = 64.03 \frac{W}{m^2} > 46.2 \frac{W}{m^2}$$

Concluyendo así que el sistema instalado en el Estadio de CU cumple con los lineamientos requeridos por las normatividades de la Federación Internacional de Fútbol Asociación y con la NOM-007-ENER-2004.

Una vez obtenidos los resultados esperados, se presenta una tabla comparativa entre; los niveles de iluminación reales contra los obtenidos en la corrida con el fin de evaluar la diferencia existente entre ambos.

Mediciones	Niveles máximos [lux]	Niveles mínimos [lux]	Promedio [lux]	U ₁	U ₂
Corrida en Visual	1776.2	1149.3	1462.7	0.66	0.83
PAE	1282	825	1035.7	0.64	0.79

Tabla 4.8. Comparativa de los niveles de iluminación horizontales.

Como se observa en la tabla 4.8, los niveles de iluminación varían en un 30% aproximadamente; esto se debe a que el programa se realizó en un medio ideal, lo que quiere decir que no se tomaron en cuenta las pérdidas de flujo luminoso de una lámpara, ni tampoco la distancia que existe entre el punto de instalación y la superficie de la cancha, así como las condiciones del medio ambiente en las que viaja el flujo.

De esta manera se puede establecer que aunque se esperaban cantidades más elevadas de los niveles de iluminación en ciertos puntos de la cancha, cabe resaltar que los resultados, en cuanto a los parámetros de calidad, son muy parecidos y que cumplen con las especificaciones de las normas utilizadas.

4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO.

Para la realización de éste estudio se tomó en cuenta la comparación de la carga empleada para la iluminación en eventos nocturnos en el Estadio Olímpico Universitario. Cuando se tenían lámparas de tipo yodo-cuarzo como se mencionó en el capítulo 2, apartado 2.1, se tenían empleadas solamente el 62.5% de la carga total instalada para iluminación en las torres de EOU, esto es un total de 260 lámparas con un consumo de 2,000[W] cada una de ellas, esto es:

$$260 \text{ lámparas} \times 2,000 [W] = 520,000 [W] \text{ por torre.}$$

Multiplicándolas ahora por las cuatro torres, resulta un consumo total de:

$$520,000 [W] \times 4 \text{ torres} = 2,080,000 [W]$$

Éste valor es el consumo total del Estadio con las lámparas de tipo yodo cuarzo. Considerando únicamente la iluminación destinada para la iluminación de la cancha. Ahora, de la misma manera, el consumo total del estadio con la nueva luminaria, recordando que se tienen 54 luminarias por torre y que estas tienen un consumo de 2,250 [W] incluyendo balastro, resulta:

$$54 \text{ luminarias} \times 2,250 [W] = 121,500 [W] \text{ por torre}$$

Considerando ahora las cuatro torres:

$$121,500 [W] \times 4 \text{ torres} = 486,000 [W]$$

Al comparar ambas cargas se puede determinar el porcentaje de ahorro, el cual resulta del 76.63%, por lo que, si consideramos que el gasto por consumo de energía eléctrica con las lámparas de yodo-cuarzo es de **\$294,062.56** por hora, aplicando el ahorro resulta que el costo por consumo de energía eléctrica con la luminaria Arena Vision MVF/404 es de **\$68,722.42** por hora.

Ahora bien, para determinar el ahorro que se tiene al realizar el cambio de luminaria, considerando únicamente la carga destinada para la iluminación de la cancha del EOU, basta con restar ambas cantidades de costo, resultando un ahorro de **\$225,340.14**. Al realizar este cálculo se puede observar que el ahorro es bastante considerable, sin embargo, hay que recordar que los resultados de este cálculo son totalmente teóricos.