

TRABAJO FIN DE GRADO

ILUMINACIÓN FUNCIONAL Y ESPECTACULAR EN ESPACIOS DE OCIO

Autor:

Elías Lacasta Casterad

Directores:

Ana Isabel Sánchez Cano y Justiniano Aporta Alonso

Facultad de Ciencias

Universidad de Zaragoza

2020/2021

Resumen

La iluminación de los espacios interiores es crucial para el correcto desarrollo de las actividades que se desarrollan en ellos y puede llegar a condicionar el estado de ánimo y el comportamiento de los ocupantes. Por tanto, disponer de una buena iluminación es un factor importante a tener en cuenta sin descuidar con esto la eficiencia energética de la instalación.

Así mismo, el tipo de luminaria empleada influye en gran medida tanto en las características de la luz emitida como en su eficiencia. Actualmente se observan grandes diferencias entre las luminarias tradicionales como pueden ser las lámparas de filamento o las de descarga, con la creciente tecnología LED, que además de ser más eficiente presenta una mayor flexibilidad a la hora de aplicarse.

Este trabajo busca analizar la iluminación de los espacios de ocio basándose en el cine del C.M.U. Pedro Cerbuna. Para ello se va a comprobar si en sus distintos espacios se cumple la normativa vigente para los parámetros luminotécnicos establecidos así como la eficiencia energética de la instalación.

En primer lugar se miden experimentalmente los espectros de las luminarias existentes así como la distribución de la iluminación en el espacio. Se realiza una simulación de los espacios a estudiar para calcular los parámetros que establece la normativa y se comprueba que los resultados de la simulación concuerdan con lo medido experimentalmente.

Una vez verificado que no se cumple la normativa, se realiza una propuesta de mejora de estos espacios cambiando el tipo de luminarias existentes por otras LED más modernas y modificando su distribución espacial. Estas nuevas propuestas se simulan y se comprueba como en este caso se cumple la normativa actual.

Con este se observa como mejora la eficiencia energética de la instalación, permitiendo así el aumento del número de luminarias utilizadas, así como una nueva distribución que permita mejorar los niveles de iluminación y uniformidad.

Índice

1. Introducción	3
1.1. Objetivos	5
1.2. Espacio de estudio	5
2. Normativa actual	6
3. Material y métodos	8
4. Situación actual	8
4.1. Medidas experimentales	9
4.2. Simulación del espacio	10
4.3. Cumplimiento de la normativa	11
5. Propuesta de mejora	14
5.1. Elementos a mejorar	14
5.2. Comparación luminarias	16
5.3. Nueva simulación	19
5.4. Cumplimiento de la normativa	19
6. Análisis de resultados	23
7. Conclusiones	24
Referencias	25
Anexo I. Medidas experimentales y simulación	27
Anexo II. Distribución de luminarias	30
Anexo III. Planos isolux propuesta de mejora	32

1. Introducción

Cerca del 90 % de las actividades que hoy llevan a cabo los humanos precisan de la luz para su correcta realización, y el gasto energético que conlleva la iluminación interior en los edificios del sector terciario representa entorno al 21-40 % del total [1]. En cualquier espacio interior por tanto, tener una luz apropiada es fundamental. Pero, ¿cómo se consigue una luz apropiada? Mediante un buen proyecto de iluminación, que se centre en conseguir una distribución de luminarias y fuentes de luz capaces de crear ambientes únicos y cumpliendo, además, con las normativas vigentes sobre niveles de iluminancias, uniformidades, deslumbramientos y ahorro energético.

Se requiere por tanto que el diseñador de la iluminación tenga conocimientos amplios sobre el estado del arte de la luminotecnia, la luz, las respuestas del ojo y de los materiales cuando interaccionan con ella y las diferentes lámparas y luminarias que puede utilizar en sus proyectos así como de las normativas de aplicación [2, 3].

Desde que en 1880, Thomas Edison, lanzó el primer modelo de bombilla comercial, de la lámpara incandescente, el desarrollo de los proyectos de iluminación ha sido paralelo al desarrollo de la luminotecnia, las fuentes de luz y las luminancias.

El desarrollo de la luminotecnia se ha basado únicamente hasta hace uno 20 años en el conocimiento de la respuesta del ojo como sistema formador de imagen, lo que se ha venido a llamar la vía óptica, poniendo especial hincapié en la agudeza y confort visual. En este siglo ha adquirido también gran importancia la vía no óptica, la NIF (No Formadora de Imagen) que contempla los aspectos biológicos de la luz con especial incidencia en el bienestar personal, la concentración, el rendimiento, creatividad y otros aspectos emocionales, muy relacionados con el espectro de la luz y los fotoperiodos que intentan simular, en lo posible la luz natural.

En cuanto a las fuentes de luz y las luminarias se refiere, la tecnología se ha encargado, variando el principio físico con el que se obtiene la luz, de proporcionar fuentes de luz cada vez más eficientes y con mejores características de reproducción del color y luminarias más duraderas, de mayor rendimiento y capaces de distribuir la luz de todas las formas posibles para adaptarse a múltiples entornos arquitectónicos y funcionalidades concretas en los diferentes espacios.

Aparecen en primer lugar las lámparas incandescentes que presentan una baja eficiencia debido al principio físico en el que se basan, el efecto Joule. Se consigue la emisión de radiación electromagnética aumentando la temperatura del filamento mediante la circulación de corriente eléctrica. Una gran parte de la energía emitida pertenece al infrarrojo, por lo que no es detectada por el ojo. Con el objetivo de poder aumentar la temperatura del filamento y así desplazar el espectro de emisión hacia el visible surgen las lámparas halógenas en las que el filamento, generalmente de tungsteno, se introduce en una cámara con moléculas de un gas halógeno. De esta forma, cuando las moléculas del filamento lo abandonan debido al calentamiento, se combinan con las del halógeno y al llegar al cristal de la lámpara que está más frío el compuesto se rompe devolviendo el tungsteno al filamento, lo que se conoce como el ciclo del halógeno. Así se pueden alcanzar temperaturas superiores y eficiencias notablemente mayores.

Posteriormente surgieron las lámparas de descarga que se basan en la ionización de un gas al hacer circular corriente a través de él. Son las moléculas de este gas ionizado las que al volver a su estado fundamental emiten radiación electromagnética. Las lámparas de descarga son mucho más eficientes que las de filamento y podemos encontrar de varios tipos: fluorescentes, donde la radiación emitida es principalmente ultravioleta y se transforma en luz visible mediante un compuesto fluorescente en la superficie del cristal; lámparas de gas de sodio a alta o baja presión, lámparas de haluro metálico (halogenuros), etc. donde la diferencia entre unas y otras depende de los gases empleados y la presión a la que se encuentran, variando así los espectros de emisión [4].

Por último, recientemente se han desarrollado las lámparas LED (Light Emitting Diode), también llamadas fuentes de estado sólido basadas en la emisión de luz por parte de diodos que se genera al aplicar un voltaje entre la unión PN de dos cristales semiconductores. La emisión LED es monocromática y sus bandas de emisión y eficiencias depende de los materiales semiconductores y de los dopantes utilizados. Para conseguir luz blanca se pueden utilizar tres LED RGB que emitan en el rojo, verde y azul respectivamente, lo que no es muy eficiente ni aconsejable, o utilizando LED de longitud de onda muy corta (azul o ultravioleta) en combinación con fósforos, de forma similar a las lámparas fluorescentes. Las eficiencias actuales ya se acercan a las de la luz de sodio, pero con una buena reproducción del color.

Estas luminarias LED poseen numerosas ventajas además de la eficiencia energética, su larga vida útil, el funcionamiento con muy bajo voltaje, así como la flexibilidad y versatilidad en el control de la iluminación comparadas con las fuentes de luz tradicionales. Es por esto que las luminarias LED son ampliamente usadas actualmente para todo tipo de iluminación, no solo en nuevas instalaciones, sino también en mejoras de las ya existentes. De acuerdo con algunos estudios, el reemplazamiento de una bombilla incandescente por una LED, es la mejor aportación que el sector de la iluminación puede hacer para la reducción de los gases de efecto invernadero [1].

Además, este tipo de luminarias pueden integrarse fácilmente en sistemas de iluminación inteligente, controlando la intensidad y el espectro automáticamente, ajustando las intensidades de las diferentes componentes, con el objetivo principal de ahorrar energía y aumentar el confort visual, biológico y emocional de los ocupantes [5].

Debido a esta importancia de la iluminación adecuada para cada espacio y actividad, existen numerosos estudios sobre el tema: estudios en centros de enseñanza [6], oficinas [7], hospitales, residencias, espacios subterráneos [8], etc.

Pero en el ámbito de los cines o teatros, los principales trabajos realizados se centran principalmente en la iluminación espectacular [9] dejando de lado la iluminación funcional.

En el caso de los teatros o cines, debemos tener en cuenta que el sistema visual del ser humano tarda cierto tiempo en adaptarse a los cambios de luminosidad. Su adaptación a la oscuridad depende de los niveles de iluminación tanto de la pantalla como de los entornos. Cuanto más cercanas están las áreas brillantes a la dirección de la mirada, mayor será el tiempo de adaptación [10].

Además, hay que tener en cuenta las características del espacio de proyección, donde los elementos brillantes de la imagen pueden contaminar la percepción de la audiencia a través de las reflexiones en las paredes, techos, suelos y asientos [11].

1.1. Objetivos

El objetivo principal será mejorar la iluminación, a nuestro entender obsoleta, de unos espacios reales multiusos en el C.M.U Pedro Cerbuna.

Como es aconsejable en cualquier reforma de iluminación, se planteará realizar una auditoría inicial para conocer el estado de partida. Mediante el análisis de los resultados de la auditoría podremos:

- Comprobar el cumplimiento de la normativa propia correspondiente a este tipo de espacios.
- Simular los espacios en la situación actual para comprobar su grado de concordancia con la iluminación real.
- Plantear nuevos proyectos de iluminación para cada uno de los espacios intentando mejorar la eficiencia energética del espacio y estudiar formas para reducir su consumo.
- Optimizar la iluminación funcional y emocional de todos los espacios.
- Modernizar el sistema de iluminación del espacio e integrarlo con la arquitectura del mismo mejorando la estética actual.
- Simular de nuevo todos los espacios con las nuevas luminarias y distribuciones propuestas para comprobar el nivel de mejora tanto en los parámetros que caracterizan el diseño y el cumplimiento de normas: niveles, uniformidades, deslumbramiento y consumo, como en la apariencia visual y emocional de los mismos.

1.2. Espacio de estudio

El espacio a estudiar se utiliza como cineclub los fines de semana, mientras que el resto de la semana se le pueden dar otros usos como sala de conferencias o zona de paso para acceder a otros espacios del Colegio. Consta de tres partes (Figura 1):

1. **Pasillo de exposiciones:** Lugar de acceso al cine en el que se muestra la cartelera del trimestre y se realiza la venta de entradas. Comunica a su vez la zona de habitaciones con las salas de estudio, empleándose habitualmente como zona de paso. Dimensiones: $14,3 \times 3,3 \times 3,5m$
2. **Hall del cine:** Lugar de tránsito entre el pasillo y la propia sala de cine. Dimensiones: $9,7 \times 10,4 \times 4,0m$
3. **Sala de cine:** Lugar de proyección de películas así como de realización de charlas o conferencias. Dimensiones: $17,5 \times 12,4 \times 7,0m$



(a) Pasillo de exposiciones

(b) Hall

(c) Cine

Figura 1: Espacios a estudiar

2. Normativa actual

Los requisitos que debe cumplir la iluminación de un espacio interior para realizar en el mismo una actividad concreta de modo eficiente y preciso, viene establecido por normativas a nivel comunitario (EN) y estatal (UNE). En nuestro caso tendremos en cuenta dos:

- La *Norma Española para la iluminación de los espacios de trabajo, parte 1 (lugares de trabajo en interiores)* UNE-EN 12464-1 [12], que especifica para distintos espacios la calidad y cantidad de iluminación mediante los siguientes parámetros (Tabla 1):
 - La **iluminancia media mantenida** (\bar{E}_m): valor por debajo del cual no se permite que caiga la iluminancia media en la superficie especificada.

$$\bar{E}_m = \frac{F}{S} \quad (1)$$

donde F es el flujo luminoso incidente y S la superficie del plano de trabajo.

- La **uniformidad de iluminancia** (U_o): cociente entre la iluminancia mínima y la media sobre una superficie. Debe ser $\geq 0,7$ en las áreas de tarea y $\geq 0,5$ en las áreas circundantes inmediatas.
- El **Índice de Deslumbramiento Unificado** (UGR_L) de las luminarias de la instalación.

$$UGR_L = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right) \quad (2)$$

donde L_b es la iluminancia de fondo en $cd \cdot m^{-2}$, L la luminancia de las partes luminosas de cada luminaria en la dirección del ojo del observador, ω el ángulo sólido de las partes luminosas de cada luminaria en el ojo del observador, y p el índice de posición de Guth para cada luminaria individual.

- La **apariencia de color**, cuantificada mediante la temperatura de color correlacionada (T_{CC}): es una cuestión psicológica y estética. Para la luz artificial distinguimos 3 grupos, que vienen reflejados en la tabla 2.
- El **índice de rendimiento de colores** (R_a) o **Índice de Reproducción Cromática** (ICR): que determina la capacidad de una fuente luminosa de reproducir colores, tomando como referencia 100 el valor del iluminante D65, correspondiente a una fase de la luz día, o el iluminante A, dependiendo de las fuentes de luz de las que se trate.

Espacio interior	E_m [lux]	UGR _L	U_o	R_a
Taquillas	300	22	0,6	80
Pasillos	100	25	0,4	80
Área de asientos	200	22	0,5	80
Sala conferencias	500	19	0,6	80

Tabla 1: Valores establecidos UNE 12464

Apariencia de color	T_{CC}
Cálida	< 3300K
Neutra	3300K a 5300K
Fría	> a 5300K

Tabla 2: Apariencia de color

- *El Código Técnico de la Edificación para alumbrado interior, Sección HE 3.*

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios en lo que se refiere a materias de seguridad (estructural, contra incendios, utilización) y habilidad (salubridad, protección frente al ruido y ahorro de energía).

Se encarga de enunciar los criterios que deben cumplir los edificios pero deja abierta la forma en que deben cumplirse estas reglas, lo que permite la configuración de un entorno normativo más flexible.

En nuestro caso, nos centraremos en el articulado del "Documento Básico HE ahorro de energía: HE3-Condiciones de las instalaciones de la iluminación" [13] que especifica la potencia máxima instalada así como la eficiencia energética de la instalación:

- El **Valor de la Eficiencia Energética de la Instalación** (VEEI): mide la eficiencia energética de una instalación de iluminación de un espacio con un determinado uso. No se incluyen las luminarias de zonas expositivas o alumbrado de emergencia, ni en cines ni en teatros, la iluminación con fines de espectáculo. Se expresa en W/m^2 por cada 100lux:

$$VEEI = 100 \cdot \frac{P}{S \cdot E_m} \quad (3)$$

donde P es la potencia de la lámpara más el equipo auxiliar, S la superficie iluminada, y E la iluminancia media horizontal mantenida.

El VEEI no podrá superar los valores límites establecidos en la tabla 3.

Uso del recinto	VEEI límite
Zonas comunes en edificios no residenciales	6.0
Salones de actos, salas de usos múltiples y conferencias...	8.0

Tabla 3: Valor límite de la eficiencia energética de la Instalación

- La **potencia máxima suministrada**: potencia total de las lámparas y equipos auxiliares por unidad de superficie iluminada, no superará el máximo de $10Wm^{-2}$ en los lugares en los que la iluminación media en el plano horizontal sea $\leq 600lux$ y $15Wm^{-2}$ para iluminaciones medias mayores.

3. Material y métodos

Para empezar se caracteriza el espacio de trabajo determinando experimentalmente por un lado las curvas espectrales de las diferentes lámparas de cada luminaria tomando las medidas de irradiancia espectral ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) en el rango 380-780 nm. Estas medidas se realizaron con un espectrorradiómetro calibrado (Avaspec-1024, Avantes, Apeldoorn, Países Bajos, calibración NPL E01110063/DDK y trazabilidad NIST). Por otro lado, se determina la iluminancia (lux) horizontal, vertical o ambas, en los distintos puntos de interés con ayuda de un luxómetro calibrado (C.A. 813, Chauvin-Arnoux, Paris, Francia, calibración trazable ENAC).

Con el objetivo de realizar los cálculos de los distintos parámetros para comprobar si se cumple la normativa, se ha realizado una simulación del espacio de trabajo mediante el software DIALUX EVO 10.0. Para ello, se han ubicado luminarias con espectros y potencias similares a las actuales y se ha comprobado que las iluminaciones medidas experimentalmente concuerdan con las simuladas en los mismos puntos para verificar el modelo.

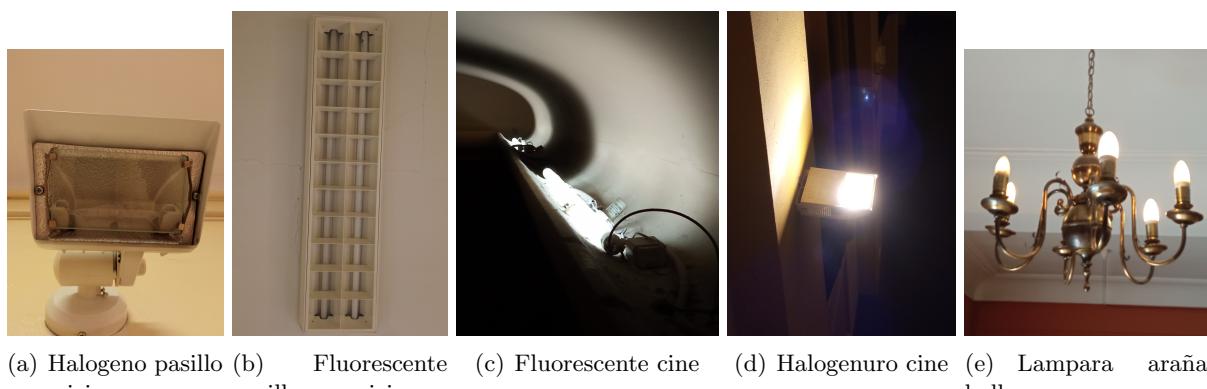
Dada la antigüedad de la instalación, la mayor parte de las luminarias se encuentran descatalogadas y por tanto no caracterizadas para poder introducirlas en el software de simulación. Ha sido por tanto preciso rediseñar alguna de ellas para poder realizar las simulaciones de la situación actual.

Finalmente, con el mismo software se ha realizado la simulación de la propuesta de mejora, para la cual se han modificado los tipos de luminarias así como su distribución en el espacio, lo que se indicará en el apartado 5 para cada una de las zonas.

4. Situación actual

En cada espacio hallamos luminarias de distintos tamaños y características (Figura 2):

- 1. Pasillo de exposiciones:** 3 luminarias de lámparas fluorescentes formadas por dos tubos, uno cálido y otro frío, *TND 36W/54* a lo largo del pasillo; 12 luminarias de halógenos *PRISMA 01033021 Skipper R7S 300W* en las paredes alumbrando a los posters expuestos.
- 2. Hall del cine:** 3 lámparas de araña con 6 lámparas *Philips 12W, 610lm, 2700K* cada una.
- 3. Sala de cine:** 6 lámparas fluorescentes *TND 36W/54*, 3 encima y 3 debajo del anfiteatro; y 6 halogenuros *HIT-DE-(CE), Rx7s, 70W* en las columnas para iluminar la sala.



(a) Halogeno pasillo exposiciones (b) Fluorescente pasillo exposiciones (c) Fluorescente cine (d) Halogenuro cine (e) Lampara araña hall

Figura 2: Luminarias actuales

4.1. Medidas experimentales

En primer lugar, se han determinado las curvas espetrales de los fluorescentes tanto del pasillo de exposiciones como del cine, así como las de los focos halógenos del pasillo y los halogenuros de la sala de cine, (Figura 3).

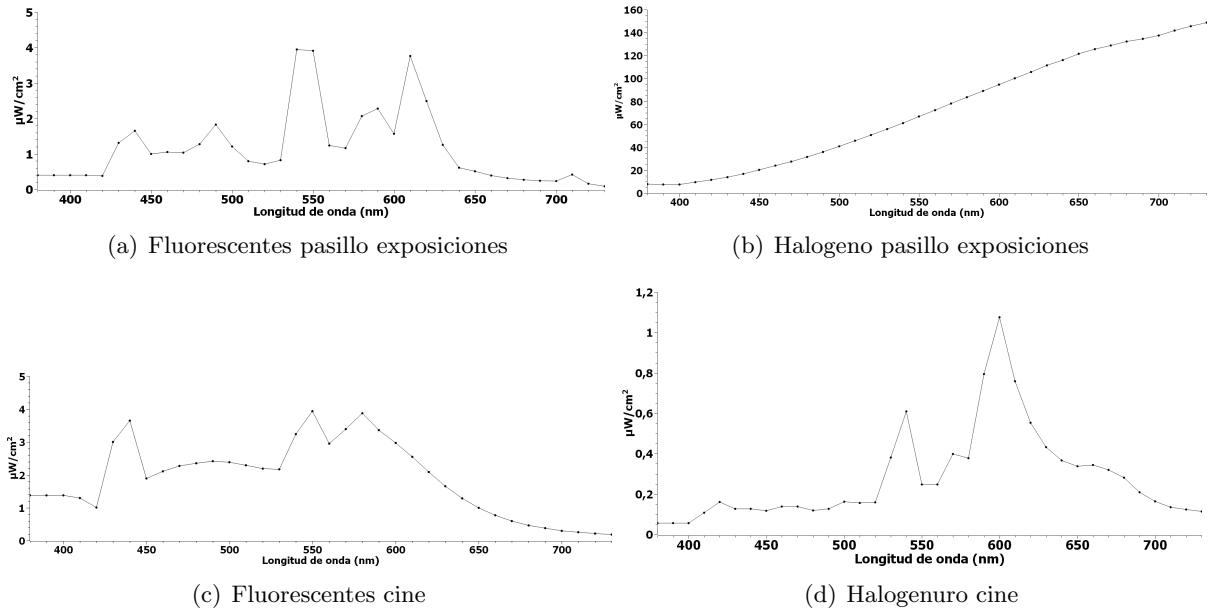


Figura 3: Curvas espetrales medidas

Por otro lado, se han medido con el luxómetro en cada espacio la iluminancia en distintos puntos para las distintas configuraciones de luminarias que poseen. La elección de los puntos de medida se determina en función de las características del espacio, teniendo en cuenta las superficies que precisan una iluminación más uniforme. De este modo, para el pasillo de exposiciones se elige una malla 3×7 para la iluminancia horizontal E_{mh} a la altura de las mesas existentes (80 cm). También se determina la iluminación perpendicular E_{mv} en los posters colgados en las paredes, 2×7 .

Para el hall del teatro se miden la iluminación horizontal en dos líneas de 5 puntos en el suelo, tanto en la parte de abajo a nivel del pasillo de exposiciones, como en la parte de arriba tras subir las escaleras a nivel del cine, así como en 3 puntos distintos de los escalones primero, tercero y último. Al igual que en el pasillo de exposiciones se determina la iluminación perpendicular en los posters y la iluminación horizontal sobre las dos mesas existentes.

Por último, en el cine se realizan medidas solo en la mitad del espacio debido a la simetría, tanto en el anfiteatro en una malla 4×5 como en el patio de butacas en una malla 6×8 (pasillo central, 4 butacas y pasillo lateral). En las butacas se toman dos medidas de iluminación: la vertical, que sería la que nos llegaría al plano corneal en posición de sedestación; y la horizontal, que correspondería con la luz que llegaría a la mesa de la butaca.

4.2. Simulación del espacio

Se simulan los distintos espacios a analizar con el programa DIALUX EVO 10.0, el cual permite el cálculo de proyectos fotópicos, determinando la distribución luminosa en las distintas superficies así como los distintos parámetros de interés para determinar el cumplimiento de la normativa. Las simulaciones se realizan con las mismas dimensiones que tienen realmente las salas, y adecuando el color, grado de reflexión y textura de los diferentes objetos y paredes de forma que la simulación se parezca en la mayor medida al espacio real.

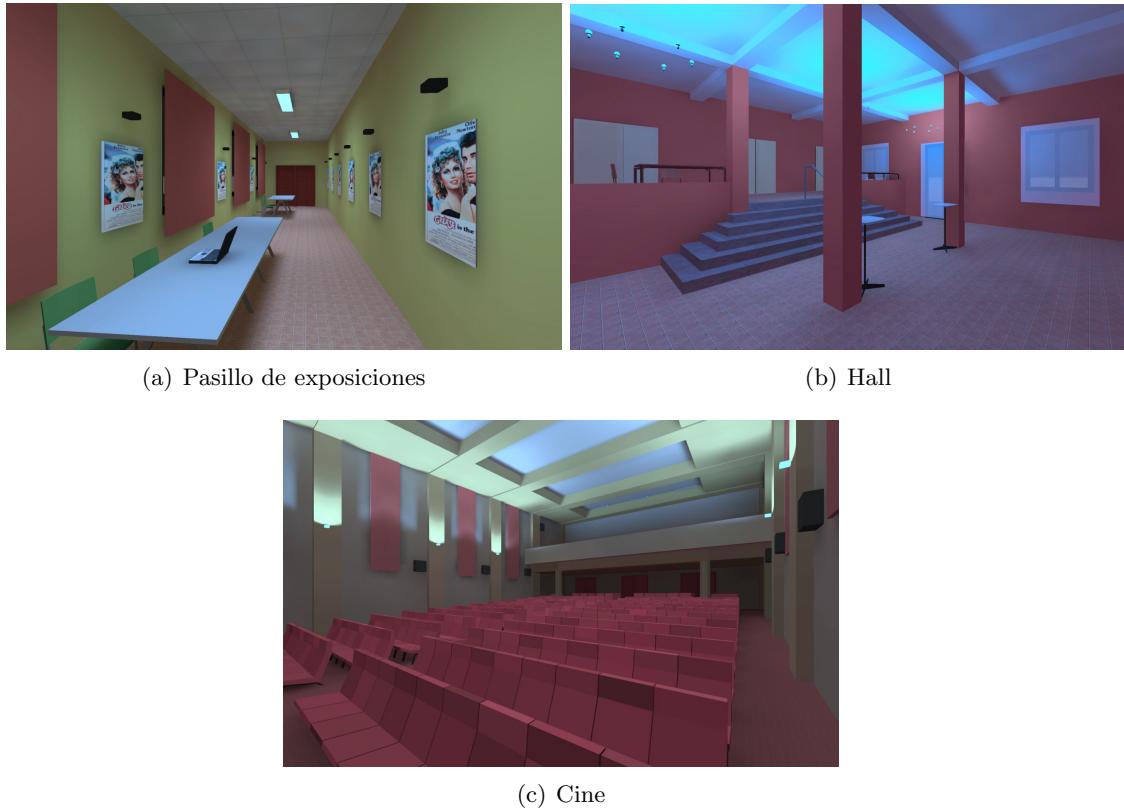


Figura 4: Simulaciones espacios actuales

En primer lugar, calculamos con la simulación la iluminancia en los puntos medidos experimentalmente para comprobar su concordancia con las medidas experimentales. Para ello se localizan estos puntos en el espacio simulado y se determina la iluminancia en ellos. Así mismo, pueden calcularse la distribución de la iluminancia en el espacio y las curvas isolux para distintas superficies.

En la tabla 4 se muestra como ejemplo los valores de la iluminancia medidos experimentalmente y simulados para el cine con los halogenuros. Se observa que la tendencia de los valores coincide con una mayor o menor desviación (del 6 al 20%). Esta diferencia puede deberse por un lado a que la luminaria de la simulación no es exactamente la misma que en la realidad; por otro lado, a la dificultad de establecer en la simulación el punto exacto en el que se midió experimentalmente; y por último, el factor de depreciación tomado para las luminarias existentes.

Por otro lado, en la figura 5 se muestra el plano isolux del patio de butacas. Para su cálculo se ha medido la iluminación en el suelo, eliminando las butacas, por lo que los valores que muestra son ligeramente mayores que los que se muestran en la tabla 4 para la misma situación.

Iluminancia experimental [lux]						
	Pasillo central	butaca 2	butaca 4	butaca 6	butaca 8	pasillo ventana
detrás	1,61	0,86	1,05	1,26	1,69	0,88
fila 14	3,90	2,73	2,65	2,14	1,43	3,09
fila 12	10,72	9,75	9,89	9,50	8,62	8,61
fila 10	17,62	17,31	18,31	18,25	17,63	12,92
fila 7	20,80	22,20	22,60	22,90	21,30	15,95
fila 4	20,70	21,80	22,30	21,20	20,90	15,02
fila 2	19,26	19,70	18,76	19,91	18,25	13,66
suelo	17,36	15,73	15,98	15,50	14,40	12,82

Iluminancia simulación [lux]						
	Pasillo central	butaca 2	butaca 4	butaca 6	butaca 8	pasillo ventana
detrás	1,57	0,52	0,96	1,34	1,76	1,41
fila 14	3,60	2,50	2,40	1,90	1,00	3,10
fila 12	10,10	9,20	9,20	9,00	8,50	9,20
fila 10	16,40	16,20	15,80	16,20	15,90	11,60
fila 7	17,90	18,30	19,10	19,20	18,30	13,40
fila 4	18,50	19,30	19,50	19,20	18,80	12,80
fila 2	15,30	18,20	17,60	18,10	17,60	11,80
suelo	14,90	14,50	13,70	12,10	11,00	10,60

Tabla 4: Iluminancia medida y simulada para los halogenuros del cine.

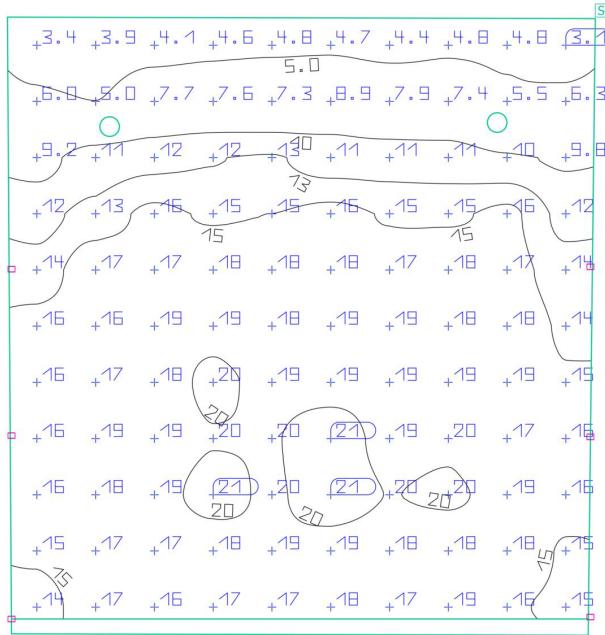


Figura 5: Plano isolux patio de butacas actual. Iluminación halogenuros.

Las medidas y planos isolux obtenidos para el resto de espacios se muestran en el Anexo I.

4.3. Cumplimiento de la normativa

Una vez realizadas todas las simulaciones y determinados los parámetros de interés procedemos comprobar el cumplimiento de la normativa. Primero podemos ver en la tabla 5 que tan solo se cumple el Código Técnico de la Edificación para alumbrado interior [13] en el caso del hall del cine. Cabe destacar el elevado valor tanto del VEEI como de la potencia máxima suministrada por metro cuadrado en el caso del pasillo de exposiciones (Tabla 5), debido principalmente a los 12 bañadores halógenos de 300W cada uno.

	VEEI [W/m ² /100lux]	P _{max} [W/m ²]
Máximo	6 o 8	10
Pasillo exposiciones	25,96	85,44
Hall cine	3,05	0,89
Cine	13,22	2,64

Tabla 5: Valores actuales VEEI y potencia máxima

Por otro lado, comprobamos los valores de los parámetros que indica la norma UNE-12464 [12] para cada espacio:

En el caso del pasillo de exposiciones, vamos a analizar la iluminancia vertical en las superficies en las que se encuentran los posters colgados (pared ventanas y pared posters) así como la horizontal en el plano que ocupa todo el pasillo a la altura de la mesa (80cm). Además, se verá con más detalle la iluminancia horizontal en una de las mesas en las que se venden entradas.

Teniendo en cuenta la norma UNE-12464 [12] para zona de taquillas que aplicaremos en las mesas ($E_{mh} = 300$, $UGR_L < 22$ y $U_O > 0,6$), y para las zonas de paso ($E_{mh} = 100$, $UGR_L < 25$ y $U_O > 0,4$) que aplicaremos al resto, podemos observar en la tabla 6 como la zona de paso si que cumpliría la normativa solo con los halógenos y casi también con los fluorescentes. En el espacio de taquillas, solo se cumpliría en el caso de utilizar la combinación de los fluorescentes con los halógenos, caso en el que no se cumple el Código Técnico de la Edificación para alumbrado interior [13]. Por separado, la iluminancia requerida no llega al mínimo en ningún caso.

	Plano mesa	Mesa entradas	Pared ventanas	Pared posters
Fluorescentes				
E_m [lux]	96,2	123	60,2	59,9
UGR_L	14	10,6	18,6	17,6
U_O	0,47	0,77	0,49	0,46
Halógenos				
E_m [lux]	232	181	99,2	110
UGR_L	24,1	23,1	>30	>30
U_O	0,48	0,86	0,54	0,51
Fluorescentes y halógenos				
E_m [lux]	328	304	159	169
UGR_L	22,9	21,5	>30	>30
U_O	0,53	0,89	0,65	0,52

Tabla 6: Valores actuales iluminancia media, deslumbramiento y uniformidad en el pasillo.

En el caso del hall del cine, podemos observar (Tabla 7) que está muy lejos de cumplirse la norma UNE-12464 [12] para zonas de paso. La iluminancia media mínima deberían ser 100 lux y las obtenidas se encuentran en torno a los 20 lux. Además, en todas las superficies analizadas hay un gran deslumbramiento (> 30), destacando la parte de arriba pues las lumiarias se encuentran en la dirección de la mirada. En el suelo observamos que la uniformidad también es deficiente, sobre todo en la parte de arriba, donde encontramos sombras debidas a la arquitectura del espacio.

	Normativa	Suelo abajo	Suelo arriba	Mesa cristal	Mesa arriba	Posters
E_m [lux]	100	23,2	15,8	33,2	27,4	20,7
UGR_L	< 25	26,7	≥ 30	27,2	≥ 30	≥ 30
U_O	> 0,4	0,43	0,23	0,72	0,84	0,7

Tabla 7: Valores actuales iluminancia media, deslumbramiento y uniformidad en el hall del cine.

Por último, en el cine, realizamos los cálculos tanto de la iluminación horizontal en el plano a 80cm del suelo (E_{mh}), que correspondería con el plano de trabajo de las mesas de las butacas, como de la iluminación vertical a una altura de 120cm (E_{mv}), que correspondería con iluminación que llega a la cara de los espectadores, a la altura de los ojos.

Podemos observar en la tabla 8 que no se cumple en ningún caso la iluminancia mínima ni para áreas de asientos (200 lux) ni para salas de conferencias (500 lux). Si que se cumple como norma general en todos los casos el límite en el deslumbramiento (< 19 para salas de conferencias) excepto en el anfiteatro donde los halógenos producen un alto grado de deslumbramiento. Finalmente en cuanto a la uniformidad se observan también grandes deficiencias. Debería tener valores de 0,5 o 0,6 para áreas de asientos o salas de conferencias y observamos que en el patio de butacas la mayor uniformidad que se obtiene con los fluorescentes y los halógenos es de 0,26, llegando a 0,06 en la zona de atrás del patio de butacas.

	Anfiteatro	Patio atrás	Patio butacas	Patio delante
Fluorescentes				
E_{mh} [lux]	11,6	28,5	6,68	0,84
E_{mv} [lux]	1,42	3,83	0,67	0,43
UGR_L	≤ 10	12,7	≤ 10	≤ 10
U_O	0,10	0,03	0,05	0,33
Halógenos				
E_{mh} [lux]	8,51	1,26	15,7	14,3
E_{mv} [lux]	14,97	2,08	8,49	3,97
UGR_L	> 30	≤ 10	≤ 10	≤ 10
U_O	0,44	0,53	0,13	0,62
Fluorescentes y halógenos				
E_{mh} [lux]	20,2	29,8	22,4	15,2
E_{mv} [lux]	16,3	6,24	9,16	4,39
UGR_L	> 30	≤ 10	≤ 10	≤ 10
U_O	0,25	0,06	0,26	0,61

Tabla 8: Valores actuales iluminancia media, deslumbramiento y uniformidad en el cine.

Para resumir, se muestra en la tabla 9 el cumplimiento normativa en los distintos espacios. Podemos observar como cuando se cumple el Código Técnico de la Edificación [13] no se cumple la norma UNE-12464 [12] y viceversa. Por tanto, no se cumple en ninguno de los espacios la normativa vigente.

Espacio:	Pasillo exposiciones Zona de paso	Pasillo exposiciones Taquillas	Hall cine	Cine
C.T.E - H3	X	X	✓	✓
UNE-12464	✓	✓	X	X

Tabla 9: Resumen cumplimiento actual de la normativa

5. Propuesta de mejora

A la vista de lo comentado, la iluminación es deficiente en todos los espacios analizados, tanto por su baja eficiencia energética como por la distribución de niveles de iluminancias, uniformidades y deslumbramientos.

A continuación se propone una propuesta de mejora, en la que se han modificado el tipo de luminarias, las lámparas utilizadas, así como la distribución espacial de las mismas para intentar tanto mejorar los parámetros anteriormente citados y poder cumplir la normativa vigente como para presentar una iluminancia más acorde con la arquitectura y cuidando además los efectos emocionales.

5.1. Elementos a mejorar

Para reducir la energía consumida por la instalación y llegar a la eficiencia energética, se cambiarán las distintas luminarias a luminarias LED, pues con menos potencia suministrada son capaces de proporcionar igual o mayor cantidad de flujo luminoso.

Respecto al resto de parámetros, vamos a analizar cada sala por separado proponiendo a su vez las nuevas luminarias a utilizar:

- **Pasillo de exposiciones:** Es necesario aumentar la iluminancia media así como mejorar la uniformidad en todo el espacio.

Se sustituyen los fluorescentes del techo por una luminaria similar *TCS260 2XTL5-35W HFP D6* [14], añadiendo uno más para mejorar la uniformidad.

Se cambian los bañadores halógenos que alumbran a los posters por unos nuevos LED (*Light Broad Bañador de pared con lente 1xLED 12W warm white* [15]). Estos además se sitúan centrados en el techo en vez de encima de cada póster, de forma que la iluminación de la pared es más uniforme.

Además, se añaden 6 lámparas pendulares, *Starpoint Downlight pendular 1xLED 8W warm white* [15] sobre las mesas para proporcionar en la zona de taquillas esa mayor iluminancia necesaria sin interferir en el resto del espacio.

- **Hall del cine:** Hay que mejorar el nivel de iluminancia media así como el deslumbramiento. Además, se observa que la zona de exposición de la cartelera está también pobremente iluminada, siendo éste un lugar a destacar.

Se cambian las lámparas de araña por unas nuevas también suspendidas (*Supernova 65 Down-up DIM2* [16]) además de ampliar su número de 3 a 9, distibuyéndolas de forma uniforme en el espacio. Por otro lado, se colocan 9 bañadores de pared iguales a los del pasillo de exposiciones para proporcionar a la zona de los posters una iluminancia superior y más uniforme.

- **Sala de cine:** Se necesita mejorar la iluminancia media así como la uniformidad en todo el espacio.

En primer lugar se sustituyen los bañadores existentes por unos LED (*Trion Bañador de techo 1xLED 30W RGB warm white [15]*)

Por otro lado, para conseguir una mayor iluminación, se coloca una tira LED (*Tira LED Essential 19,2W/m 4000K IP20 [17]*) en el techo acompañando la arquitectura del espacio, así como lámparas focales (*DN145B PSU D218 1xLED20S/840* y *DN145B PSD D166 1xLED10S/840 [14]*) en los laterales para conseguir la uniformidad deseada.

Además, se instalan otras tiras LED (*FINE LED STRIP IP 65 24V 5M 2500 RGB [17]*), en este caso rojas, entre las butacas para señalizar las zonas de paso.

En la figura 6 pueden verse las imágenes de las nuevas luminarias propuestas.

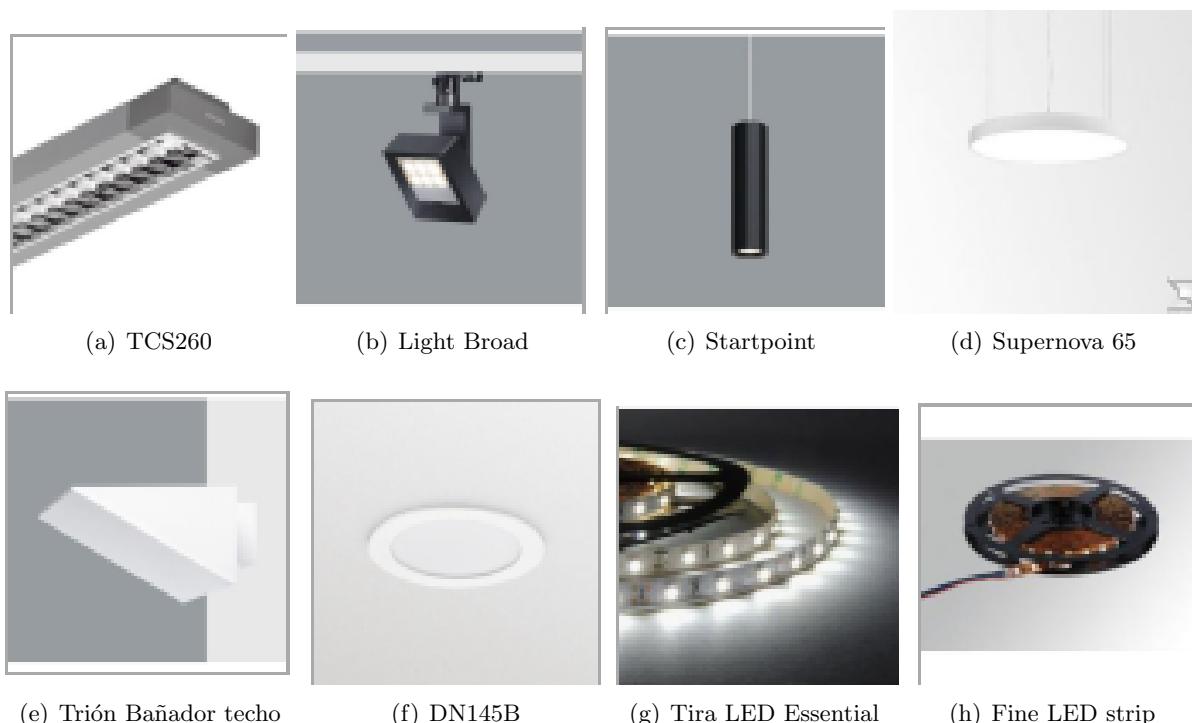


Figura 6: Imágenes nuevas luminarias propuestas

Por último, en las figuras 7 y 8 se muestran los planos de la distribución de las luminarias tanto actuales como de la propuesta de mejora en el caso del cine. Los correspondientes al resto de espacios pueden observarse en el Anexo II.

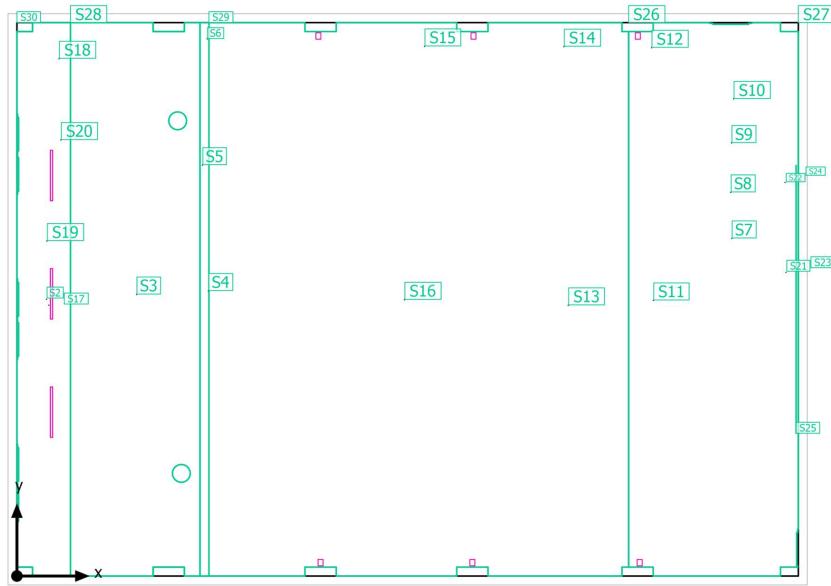


Figura 7: Distribución luminarias cine actual.

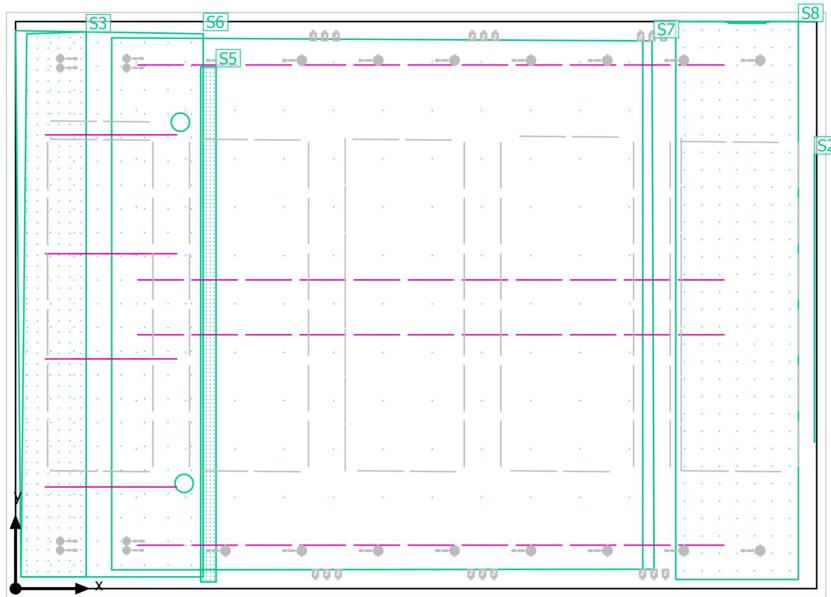


Figura 8: Propuesta distribución LED señalización suelo cine

5.2. Comparación luminarias

A continuación se muestran en las tablas 10, 11 y 12 los datos de las luminarias actuales junto con las nuevas propuestas. Puede observarse que se aumenta en casi todos los casos el rendimiento de la luminaria, así como se intenta mantener una temperatura de color similar.

Los índices de reproducción cromática se mantienen en todos los casos por encima de 80, como pauta la normativa. Para el pasillo de exposiciones, se han buscado luminarias con el índice más próximo a 100 al tratarse de una zona en la que se requiere un mayor rendimiento visual.

Así mismo, en las figuras 9, 10 y 11 pueden observarse las curvas características de las distintas luminarias empleadas.

	Potencia(W)	Flujo (lm)	Rendimiento(lm/W)	T _{CC} (K)	R _a
Luminaria 2 fluorescentes	144	6154	42,7	4000	80
TCS260 2XTL5-35W HFP D6	77	4446	57,7	3000	100
Halógeno PRISMA Skipper	300	4053	13,5	3000	100
Light Broad Bañador de Pared	14	944	67,4	3052	97
Starpoint Downlight Pendular	11	448	40,7	3036	90

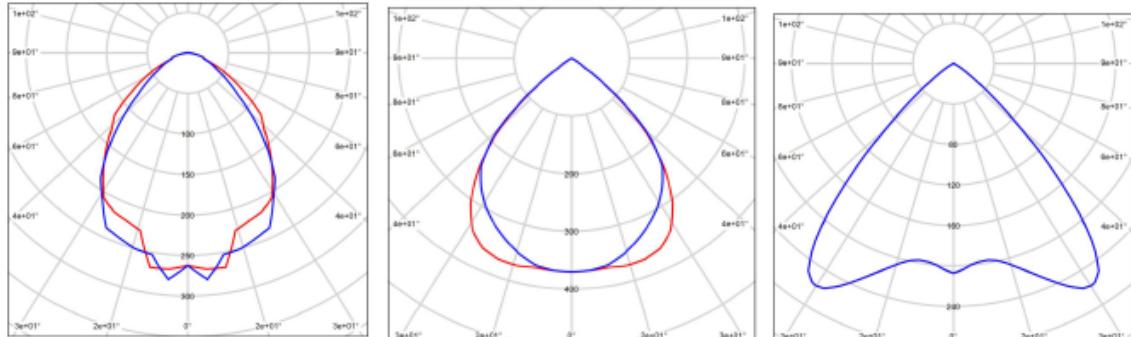
Tabla 10: Comparación luminarias pasillo exposiciones

	Potencia (W)	Flujo (lm)	Rendimiento (lm/W)	T _{CC} (K)	R _a
Lámparas de araña	72	3660	50,8	2700	80
Supernova 65 Down-up DIM2	90	4491	49,9	3000	80

Tabla 11: Comparación luminarias hall

	Potencia (W)	Flujo (lm)	Rendimiento (lm/W)	T _{CC} (K)	R _a
Fluorescentes TND	36	2898	80,5	4000	80
Tira LED Essential	19,2	2400	125,0	4000	80
Halogenuro HIT-DE-(CE)	77	7112	92,4	3000	100
Trion Bañador de techo	48	1351	28,1	3063	91
DN145B PSU D218	21	2100	100,0	4000	80
DN145B PSD D166	11	1100	100,0	4000	80
FINE LED STRIP	17,8	286	16,1	3010	80

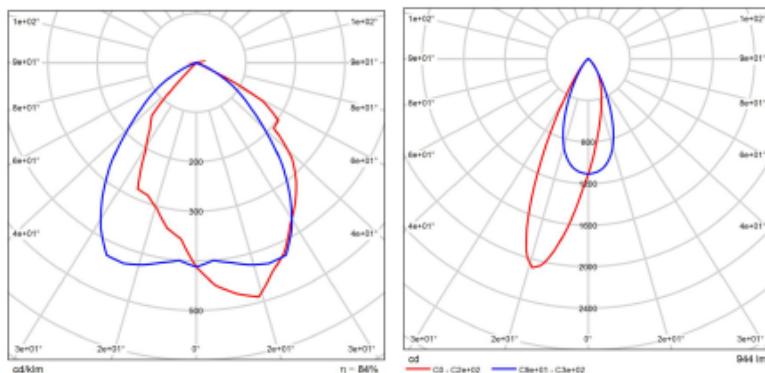
Tabla 12: Comparación luminarias cine



(a) Fluorescentes

(b) TCS260 2XTL5-35W HFP D6

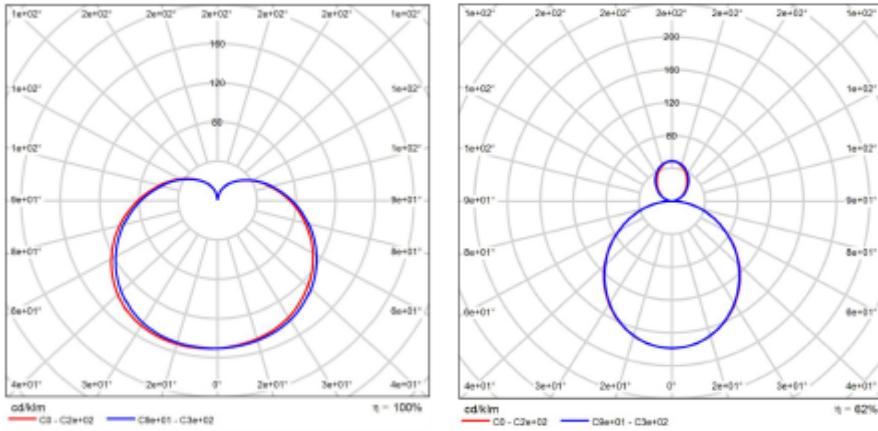
(c) LStarpoint Downlight Pendular



(d) Halógeno PRISMA Skipper

(e) Light Broad Bañador de pared

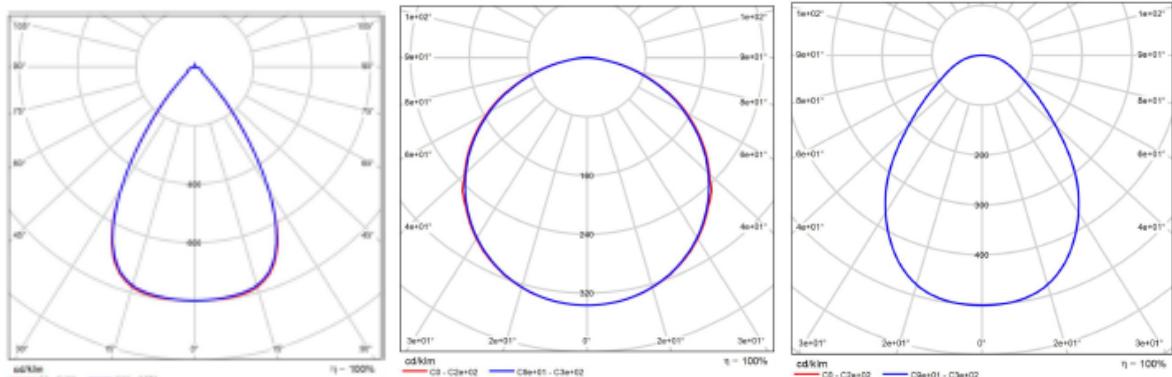
Figura 9: Curvas características luminarias pasillo exposiciones



(a) Bombilla lámpara araña

(b) Supernova 65 Down-up DIM2

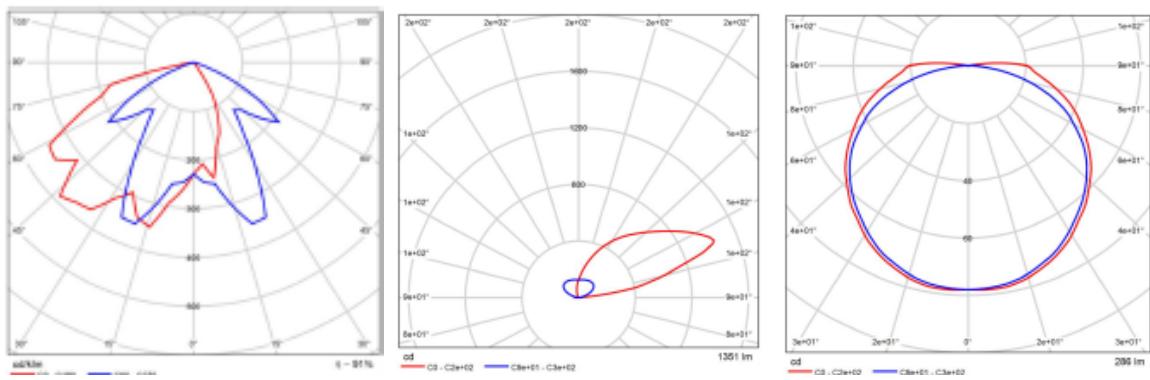
Figura 10: Curvas características luminarias hall



(a) Fluorescentes

(b) Tira LED Essential

(c) DN145B D218



(d) Halogenuro HIT-DE-(CE)

(e) Trion Bañador de techo

(f) FINE LED STRIP

Figura 11: Curvas características luminarias cine

5.3. Nueva simulación

Una vez definidos los cambios a realizar y seleccionadas las nuevas luminarias, se simulan los mismos espacios con las nuevas distribuciones y luminarias. (Figura 12).

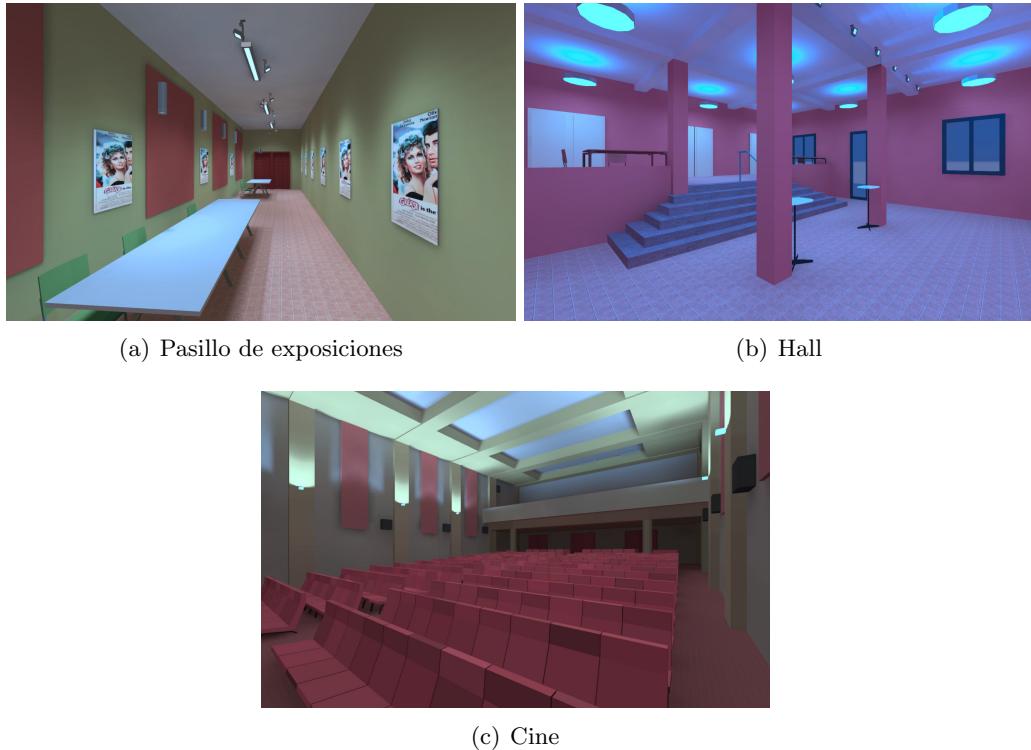


Figura 12: Simulaciones espacios propuesta de mejora

Para cada espacio, se realizaran varias simulaciones con distintas combinaciones de las luminarias empleadas para observar el comportamiento de las mismas, así como que configuración es la más adecuada.

En cada simulación, se determinarán los planos isolux de las distintas superficies de cálculo así como su iluminación media, la uniformidad y el deslumbramiento.

5.4. Cumplimiento de la normativa

De forma análoga a como se realizó para la situación actual, vemos si con la propuesta de mejora se llega a cumplir la normativa analizando las mismas superficies.

En primer lugar, podemos observar en la tabla 13 que se cumple el Código Técnico de la Edificación para alumbrado interior [13] en todos los casos, exceptuando la potencia máxima por unidad de superficie en el pasillo de exposiciones para el caso en el que se emplean todas las luminarias (completa) así como para cuando se emplean los fluorescentes y bañadores que queda justo en el límite.

También se excede la potencia máxima por unidad de superficie en el cine, para el caso en el que se emplean todas las luminarias.

Esto no supone un problema puesto que podemos alcanzar los valores mínimos de uniformi-

		VEEI [W/m ² /100lux]	P _{max} [Wm ²]
Máximo		6 o 8	10
Pasillo exposiciones	Completa	2,72	11,49
	Fluorescentes	2,63	6,53
	Fluorescentes y bañadores	2,71	10,09
	Bañadores y pendular	2,85	4,96
Hall del cine	Completa	4,48	9,37
	Supernova	4,23	8,03
Cine	Proyectores	8,08	2,65
	Techos	2,39	9,85
	Completa	2,83	12,5

Tabla 13: Valores VEEI y potencia máxima de las propuestas de mejora simuladas

dad e iluminancia media con las otras configuraciones que si que poseen una potencia máxima por unidad de superficie inferior a $10Wm^{-2}$. Además, como se observará a continuación, el nivel de iluminancia media alcanzado es más que suficiente para el uso que se le va a dar al espacio, por lo que se podría reducir la intensidad de los LED, disminuyendo así el consumo total de la instalación. La utilización de drivers regulables permite hacer una gestión correcta de la iluminación cumpliendo de forma global la normativa en todas las zonas.

Por otro lado, procedemos a ver si se cumple también la norma UNE-12464 [12].

Para el pasillo de exposiciones, tendremos en cuenta esta norma para la zona de taquilla en las mesas ($E_{mh} = 300$, $UGR_L < 22$ y $U_O > 0,6$) y para zonas de paso en el resto ($E_{mh} = 100$, $UGR_L < 25$ y $U_O > 0,4$). Podemos observar en la tabla 14 que como zona de paso, sería suficiente con los fluorescentes; y que para su uso como taquillas basta con el uso de los fluorescentes más los bañadores de pared. Se observa también que la uniformidad ha aumentado considerablemente en todo el espacio.

Para apoyar la iluminación de la mesa se había propuesto con emplear los *Starpoint Down-light Pendular* pero no es necesario para alcanzar el nivel de iluminancia requerido y además, incrementa el deslumbramiento del espacio en general así como reduce la uniformidad. Por tanto, se prescindirá de ellos.

	Plano mesa	Mesa entradas	Pared ventanas	Pared posters
Completa				
E_m [lux]	422	526	232	258
UGR_L	26,2	20,2	>30	>30
U_O	0,56	0,82	0,66	0,48
Fluorescentes				
E_m [lux]	248	271	138	137
UGR_L	23,1	18,7	27,2	26
U_O	0,58	0,93	0,41	0,38
Fluorescentes y Bañadores				
E_m [lux]	371	386	220	250
UGR_L	24,4	17,0	>30	>30
U_O	0,63	0,84	0,48	0,68
Bañadores y pendular				
E_m [lux]	174	255	93,3	122
UGR_L	28,7	22,3	>30	>30
U_O	0,27	0,60	0,58	0,56

Tabla 14: Valores simulados para la propuesta de mejora del pasillo de exposiciones.

Para el hall del cine, podemos observar (Tabla 15) que se cumple la normativa y se ha aumentado notablemente la iluminancia en todos los espacios así como la uniformidad que llega a doblarse en los suelos. Cabe destacar tan solo el deslumbramiento de los posters, pero que no es relevante debido a su posición y orientación, así como la uniformidad en el suelo de arriba, que se ve perjudicada por la existencia de mesas que hacen sombra en la superficie de cálculo. Retirando estas mesas se observa una uniformidad de 0,66.

	Normativa	Suelo abajo	Suelo arriba	Mesa cristal	Mesa arriba	Posters
E_m [lux]	100	214	236	242	275	337
UGR_L	<25	16,4	16,9	17,5	19,2	26,6
U_O	>0,4	0,68	0,4	0,74	0,76	0,55

Tabla 15: Valores simulados para la propuesta de mejora del hall del cine.

Por último, en el cine debe cumplirse la norma *UNE 12464* [12] para áreas de asientos ($E_{mh} = 200$ lux, $UGR_L < 22$ y $U_O > 0,5$) así como para una sala de conferencias ($E_{mh} = 500$ lux, $UGR_L < 19$ y $U_O > 0,6$). Cabe destacar que en este caso, dadas las funcionalidades de la sala, 400 luxes son iluminancias acordes con las exigencias del espacio, por lo que fijaremos en este valor el mínimo a alcanzar.

Podemos observar como con solo los proyectores la iluminancia alcanzada es totalmente insuficiente. En cambio, con las luminarias situadas en el techo (*Tira LED Essential* y las lámparas focales *DN145B*) se obtienen ya unos resultados satisfactorios para todos los parámetros.

Se ha aumentado el nivel de iluminancia media notablemente, pasando de los 22,4 luxes en el caso actual para el patio de butacas a los 432 luxes con la propuesta. El deslumbramiento ha aumentado en todo el espacio respecto al caso actual, pero sin superar en ningún caso el mínimo de 19 establecido para salas de conferencias. Además, para el anfiteatro donde actualmente se produce un gran deslumbramiento (> 30) debido a los halógenos, con la propuesta se ha reducido notablemente este valor.

	Anfiteatro	Patio atrás	Patio butacas	Patio delante
Proyectores				
E_{mh} [lux]	25,8	5,57	34,9	31,8
E_{mv} [lux]	46,7	9,69	20,7	9,83
UGR_L	<10	<10	<10	<10
U_O	0,74	0,52	0,57	0,68
Techos				
E_{mh} [lux]	467	416	432	392
E_{mv} [lux]	328	238	227	119
UGR_L	17,3	18,2	17,2	14,9
U_O	0,67	0,55	0,6	0,69
Completa				
E_{mh} [lux]	465	392	463	422
E_{mv} [lux]	365	236	246	128
UGR_L	17,1	18,3	17,2	14,6
U_O	0,68	0,55	0,68	0,73

Tabla 16: Valores simulados para la propuesta de mejora del cine.

Finalmente, la uniformidad también se ha visto mejorada en todo el espacio y para todas las posibles combinaciones de luminarias. Observando el plano isolux para el patio de butacas (Figura 15) podemos observar como en la zona central donde se encuentran las butacas, la uniformidad sería mayor a la determinada para el espacio total, pues la iluminancia disminuye principalmente en los laterales donde se encuentran las zonas de paso.

A continuación se muestran los planos con las curvas isolux obtenidas en cada espacio para la combinación de luminarias con la que se cumple la norma UNE-12464 [12] y los valores del Potencia máxima y VEEI que pauta el Código Técnico de la Edificación para alumbrado interior [13] son mínimos. En el Anexo III se muestran el resto de los planos ixolux obtenidos para las otras configuraciones de luminarias.

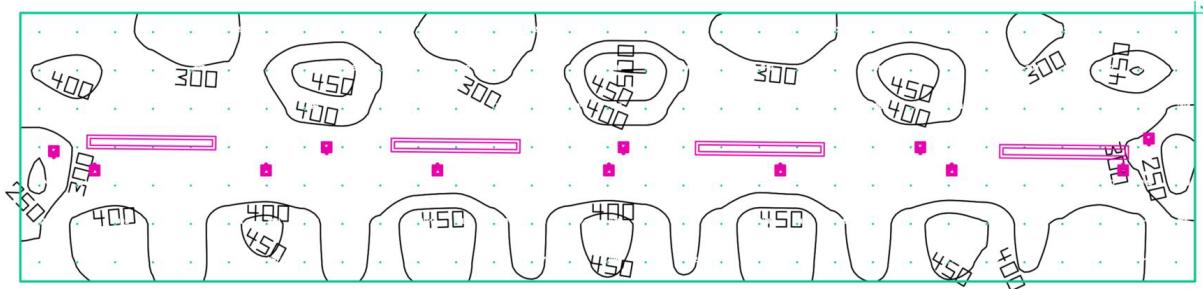


Figura 13: Plano isolux propuesta pasillo exposiciones. Fluorescentes y bañadores.

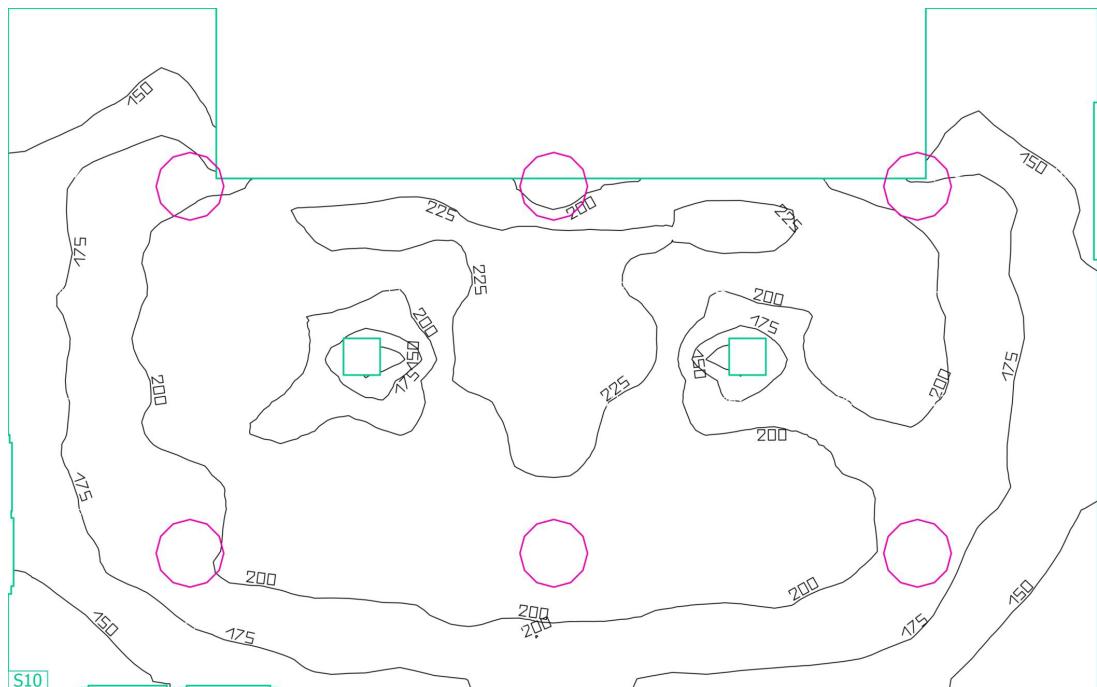


Figura 14: Plano isolux hall cine.

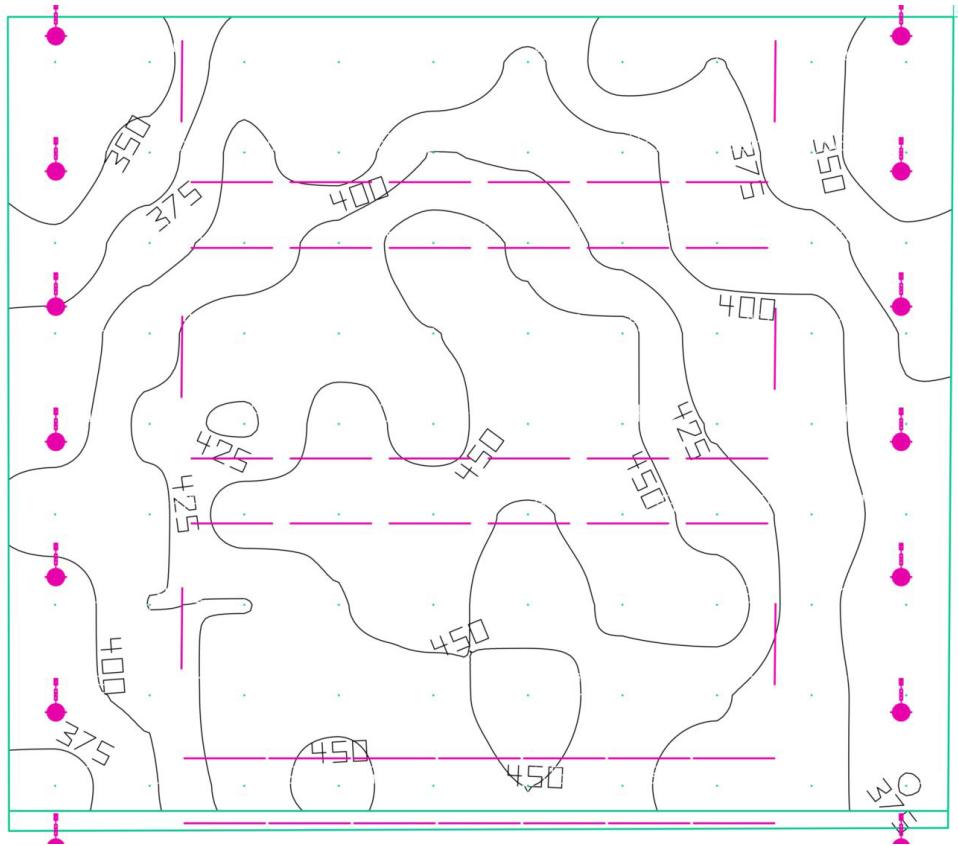


Figura 15: Plano isolux propuesta cine-patio de butacas iluminación techo.

6. Análisis de resultados

Una vez analizados los resultados obtenidos de las simulaciones tanto de los espacios actuales como de las propuestas de mejora cabe destacar:

En primer lugar, que las luminarias existentes instaladas inicialmente y su distribución en general en el espacio no es la más adecuada para la correcta iluminación de los mismos. En particular, se observan elementos importantes que deberían tener una iluminación especial que se encuentran muy pobremente iluminados, como sería las zonas de los posters.

En segundo lugar, la baja iluminancia media en todos los espacios, así como el alto deslumbramiento en el pasillo de exposiciones y en el hall, y la baja uniformidad tanto en el pasillo como en la sala de cine.

Igualmente, la iluminación es poco eficiente, superándose con creces la potencia máxima por unidad de superficie en el pasillo de exposiciones y el VEEI tanto en este espacio como en la sala de cine.

Por tanto, el sistema de iluminación actual no cumple ni el Código Técnico de la Edificación para alumbrado interior [13], ni la norma UNE-EN-12464-1 [12]. Esto era lo esperable puesto que se trata de un edificio construido en 1950 y cuyo mantenimiento ha sido el mínimo necesario para el funcionamiento básico del mismo.

Con la propuesta de mejora planteada se logran cumplir ambas normativas, aumentando notablemente la iluminación media en todos los espacios y consiguiendo una uniformidad mucho mayor. Además, se refuerza la iluminación de los espacios destacados y se integran las luminarias con la arquitectura del espacio, favoreciendo así la imagen del espacio y el confort visual.

Este cambio se ha podido realizar principalmente debido a dos factores. En primer lugar, la reducción del consumo original debido al cambio de las luminarias tradicionales (incandescentes, fluorescentes o halógenas) por la tecnología LED actual mucho más eficiente [4]. Por otro lado, aumentando el número de luminarias, así como modificando su distribución en el espacio se ha conseguido aumentar la iluminación media, mejorar la uniformidad y reduciendo el deslumbramiento.

Además, estas nuevas luminarias permiten con drivers regulables la modificación tanto de su intensidad como la de su espectro, por lo que pueden adaptarse los parámetros en función de la actividad que va a desarrollarse en el espacio, así como facilitar la transición de unos espacios a otros, sin cambios bruscos en la iluminación.

7. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo era mejorar la iluminación obsoleta de los espacios del cine del C.M.U Pedro Cerbuna, objetivo que se ha logrado cumplir.

Se ha comprobado el no cumplimiento actual de la normativa vigente mediante la simulación de los espacios a analizar de forma acorde a la iluminación real.

Con el cambio de las luminarias tradicionales a las LED, se ha mejorado la eficiencia energética de la instalación, reduciendo el consumo de las luminarias, lo que ha permitido aumentar su número cumpliendo la normativa del Código Técnico de la Edificación para alumbrado interior [13].

Gracias a este cambio de luminarias, se han podido redistribuir en el espacio optimizando la iluminación funcional y emocional y cumpliéndose la normativa UNE-12464 [12] en todos los espacios mejorando notablemente la uniformidad y la iluminancia media.

Así mismo, se ha producido un cambio en la apariencia de la iluminación del espacio, tanto en la reproducción cromática como en su integración con la arquitectura, destacando las zonas de mayor relevancia así como la estructura del propio cine y modernizando notablemente el sistema de iluminación.

Por último, como acciones futuras para este trabajo con el objetivo de seguir mejorando el espacio y su funcionalidad, sería interesante evaluar la modificación del grado de reflexión de las superficies de los espacios, buscando el óptimo para conseguir una iluminación más eficiente pero sin que interfiera ni en el confort visual de los usuarios ni en la estética.

Por otro lado, podría tenerse en cuenta el aporte de la luz diurna en la iluminación tanto del pasillo de exposiciones como del hall del cine, con el objetivo de integrarla con las luminarias y reducir el consumo en aquellas horas del día en las que el nivel de iluminancia solar sea suficiente. Esto podría realizarse mediante la introducción de sensores de luz en el espacio y la regulación de la intensidad de las distintas luminarias o bien de forma automática o manual.

Referencias

- [1] Madias END, Doulos LT, Kontaxis PA, Topalis FV. A decision support system for techno-economic evaluation of indoor lighting systems with LED luminaires. *Operational Research*. 2021;21(2):1403-22.
- [2] Pracki P, Dziedzicki M, Komorzycka P. Ceiling and Wall Illumination, Utilance, and Power in Interior Lighting. *Energies*. 2020;13(18).
- [3] Danila E, Lucache DD. Consequences of Inappropriate Use of Architectural Lighting. 2021 03;2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE).
- [4] Montoya FG, Peña-García A, Juaidi A, Manzano-Agugliaro F. Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving. *Energy and Buildings*. 2017;140:50-60.
- [5] Kumar A, Kar P, Warrier R, Kajale A, Panda SK. Implementation of Smart LED Lighting and Efficient Data Management System for Buildings. *Energy Procedia*. 2017;143:173-8. Leveraging Energy Technologies and Policy Options for Low Carbon Cities.
- [6] Buratti C, Belloni E, Merli F, Ricciardi P. A new index combining thermal, acoustic, and visual comfort of moderate environments in temperate climates. *Building and Environment*. 2018;139:27-37.
- [7] Xu L, Pan Y, Yao Y, Cai D, Huang Z, Linder N. Lighting energy efficiency in offices under different control strategies. *Energy and Buildings*. 2017;138:127-39.
- [8] Dong X, Wu Y, Chen X, Li H, Cao B, Zhang X, et al. Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review. *Science of The Total Environment*. 2021;786:147537.
- [9] Vargas R. Guía: Interiorismo en locales de ocio; Detailers.
- [10] Stokkermans MG, Vogels IM, Heynderickx IE. The effect of spatial luminance distribution on dark adaptation. *Journal of vision*. 2016;16(8):11-1.
- [11] Vyvey T, Castellar EN, Maes D, Vandevelde B, Van Looy J. An experimental study on the impact of cinema theater reflections on users' perceived intra-frame dynamic range. *Quality and User Experience*. 2018;3(1):1-9.
- [12] UNE-EN12464-1:2012. "Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: Lugares de trabajo en interiores" Comité Europeo de Normalización (CEN); 2012.
- [13] DB-HE2019. Documento Básico HE Ahorro de energía: HE3-Condiciones de las instalaciones de la iluminación; 2019.
- [14] Philips Lighting. Product Selector; Última consulta: 15-06-2021. Disponible en: <https://www.lighting.philips.com/main/support/support/tools/product-selector>.

- [15] Erco. Erco product finder; Última consulta: 15-06-2021. Disponible en: <https://www.erco.com/es/productos/product-finder-7093/>.
- [16] Delta Light. DELTA LIGHT Productos Luminarias; Última consulta: 14-06-2021. Disponible en: <https://www.deltalight.com/es/products/light>.
- [17] Lumsearch. Buscador de luminarias; Última consulta: 05-08-2021. Disponible en: <https://lumsearch.com/en#0>.

Anexo I. Medidas experimentales y simulación

Iluminancia medida y simulada

	Iluminancia experimental [lux]					Iluminancia simulación [lux]				
	Poster		Mesa			Poster		Mesa		
	D	I	D	C	I	D	I	D	C	I
1	-	40,0	-	62,8	57,7	-	45,3	-	70,3	52,3
2	71,5	78,5	121,4	157,8	126,0	69,5	81,2	108,0	134,0	102,0
3	44,8	58,1	82,5	116,0	92,6	43,9	52,7	75,0	84,4	75,0
4	88,0	101,4	129,7	193,3	135,9	79,9	89,4	122,0	150,0	126,0
5	46,3	55,6	79,2	102,1	74,0	46,2	49,8	75,0	86,5	71,0
6	67,6	80,2	110,5	160,0	115,0	69,1	76,7	121,0	130,0	111,0
7	34,8	40,7	59,6	60,4	59,3	48,7	38,6	55,8	59,6	56,2

Tabla 17: Iluminancia medida y simulada para los fluorescentes del pasillo de exposiciones. Las letras D,C,I indican derecha, centro e izquierda respecto a la puerta de acceso respectivamente.

	Iluminancia experimental [lux]					Iluminancia simulación [lux]				
	Poster		Mesa			Poster		Mesa		
	D	I	D	C	I	D	I	D	C	I
1	-	220	-	125	288		123	-	122	285
2	115	169	381	183	336	149	102	374	154	263
3	171	70	372	163	106	168	75	378	150	112
4	131	192	348	184	268	156	142	377	168	288
5	179	60	271	157	88	164	57	379	156	111
6	159	132	300	179	255	139	123	369	162	250
7	45	220	116	138	296	148	133	283	126	297

Tabla 18: Iluminancia medida y simulada para los halógenos del pasillo de exposiciones. Las letras D,C,I indican derecha, centro e izquierda respecto a la puerta de acceso respectivamente.

	Iluminancia experimental [lux]					Iluminancia simulación [lux]				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Suelo arriba	16,4	-	15,0	-	11,0	14,3	-	19,8	-	11,2
Suelo abajo	20,1	19,4	15,2	15,2	11,8	16,5	18,2	17,2	16,4	14,8
Poster	21,3	21,6	19,7	16,0	13,2	18,4	22,3	22,9	21,7	17,6
Esc. Arriba	33,1	32,1	36,0	Mesa columna	24,0	38,6	39,7	39,2	Mesa columna	35,7
Esc. Medio	33,8	30,9	27,6	Mesa arriba 1	25,7	36,7	38,5	37,9	Mesa arriba 1	27,3
Esc. Abajo	30,6	29,1	23,8	Mesa arriba 2	30,3	35,5	36,6	34,3	Mesa arriba 2	29,1

Tabla 19: Iluminancia medida y simulada hall cine.

Planos isolux

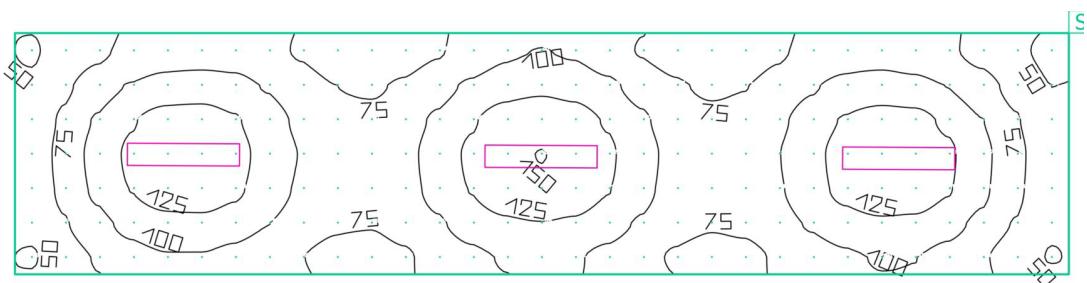


Figura 16: Plano isolux fluorescentes altura mesa pasillo exposiciones.

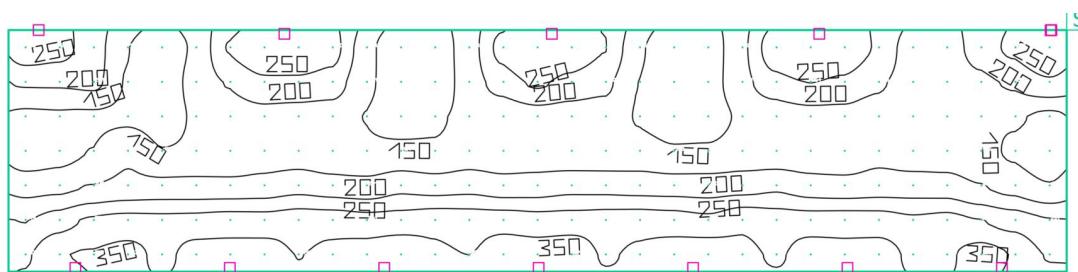


Figura 17: Plano isolux halógenos altura mesa pasillo exposiciones.

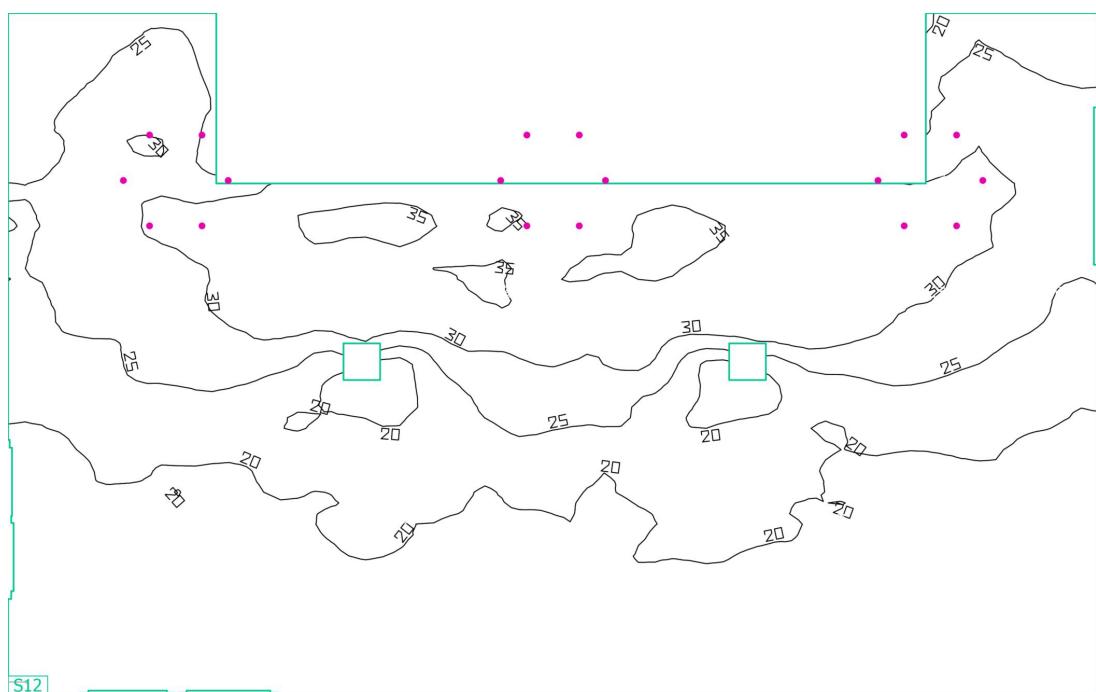


Figura 18: Plano isolux hall cine

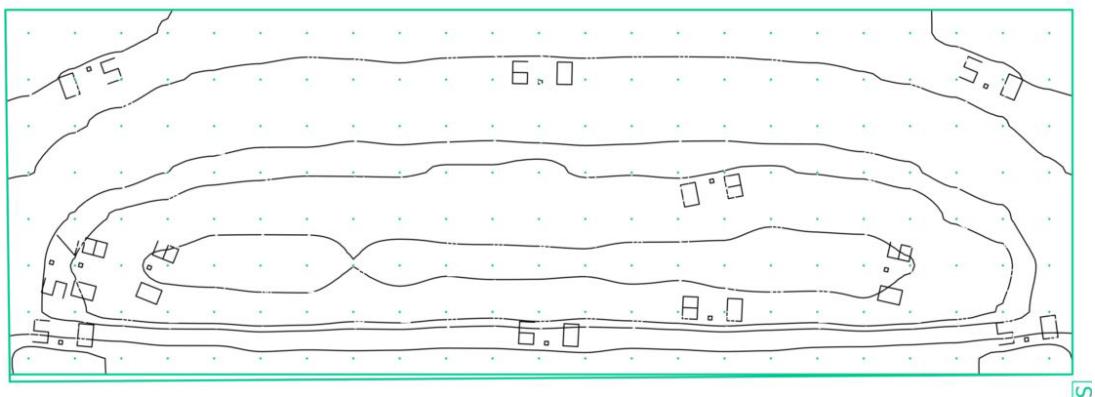


Figura 19: Plano isolux halogenuros anfiteatro cine

Anexo II. Distribución de luminarias

Pasillo de exposiciones

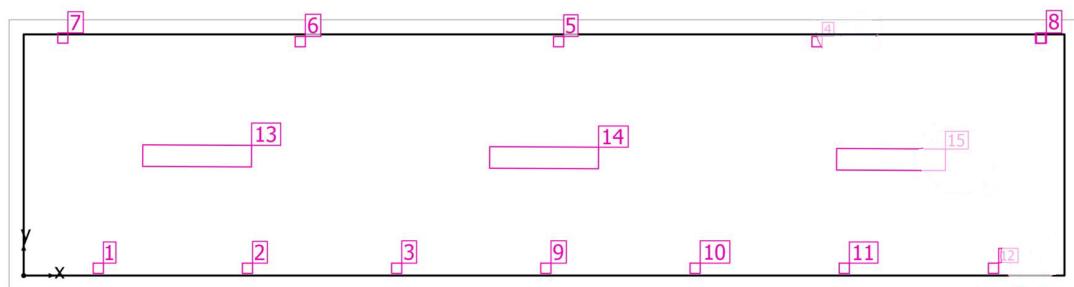


Figura 20: Distribucion actual luminarias pasillo exposiciones

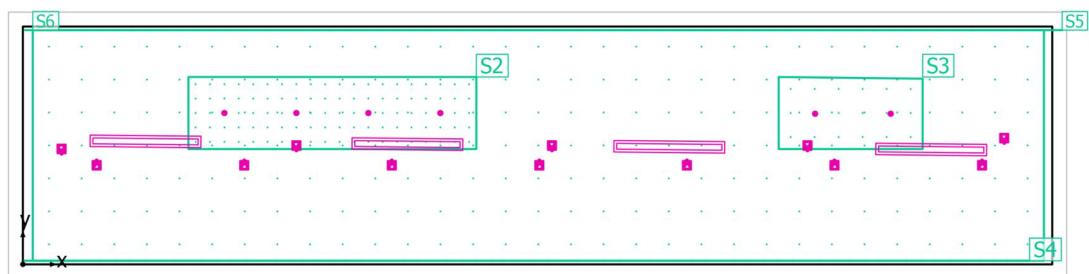


Figura 21: Propuesta distribucion luminarias pasillo exposiciones

Hall del cine

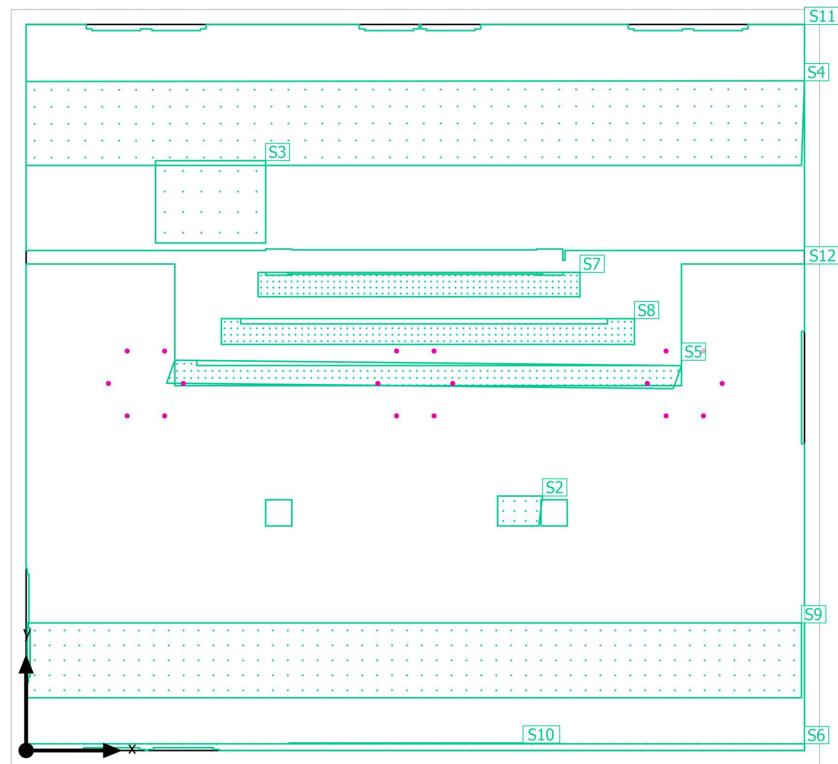


Figura 22: Distribución luminarias hall actualidad

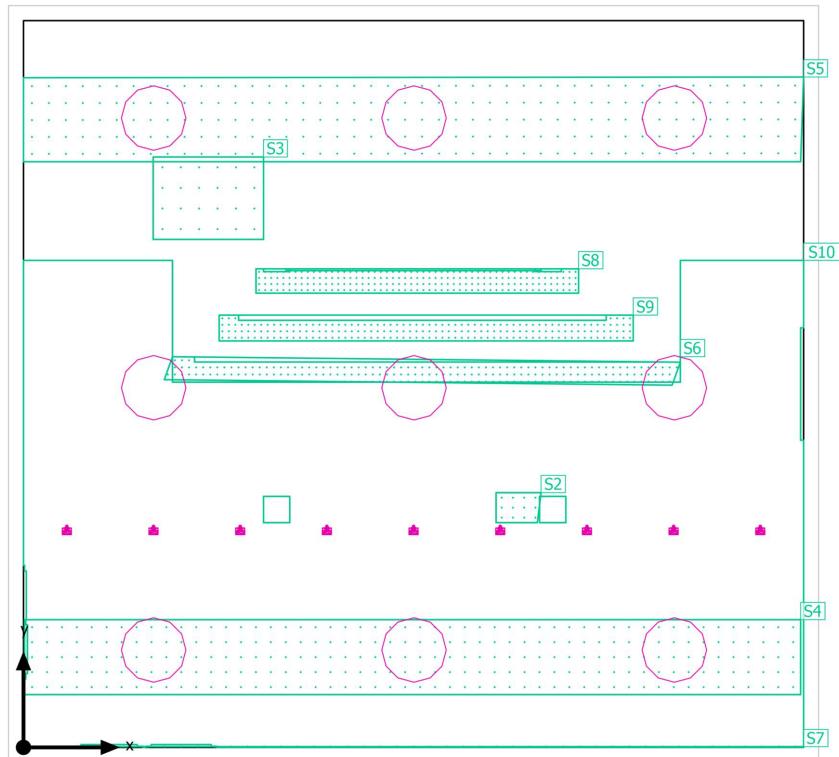


Figura 23: Propuesta distribución luminarias hall

Anexo III. Planos isolux propuesta de mejora

Pasillo de Exposiciones

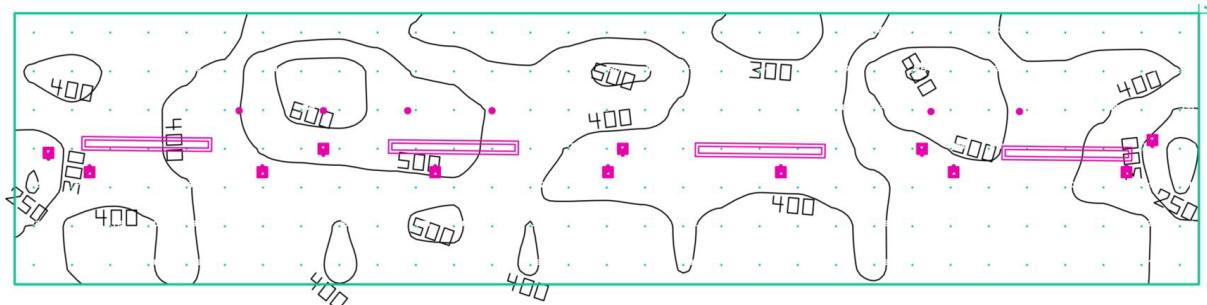


Figura 24: Plano isolux propuesta pasillo exposiciones. Completa.

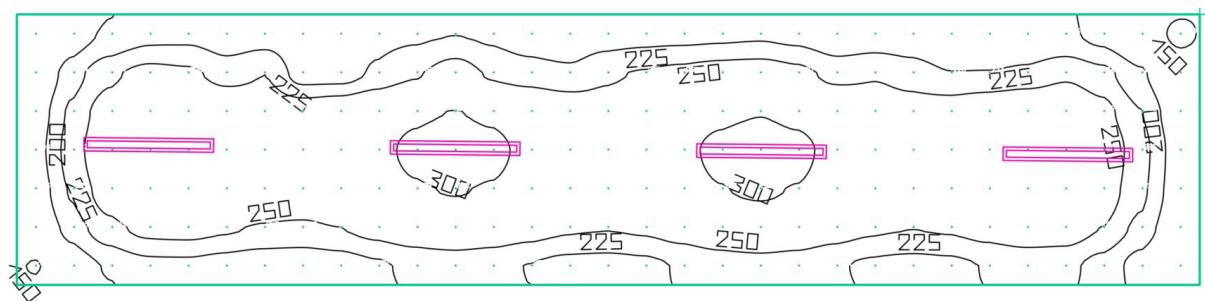


Figura 25: Plano isolux propuesta pasillo exposiciones. Fluorescentes.

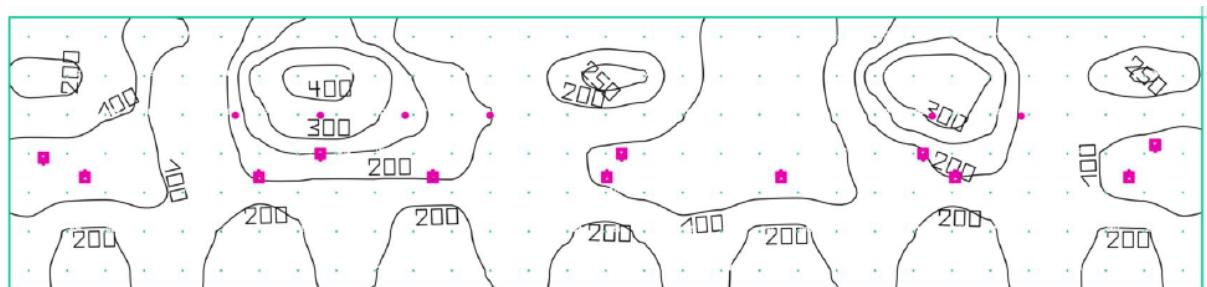


Figura 26: Plano isolux propuesta pasillo exposiciones. Proyectores y pendulares.

Sala de cine

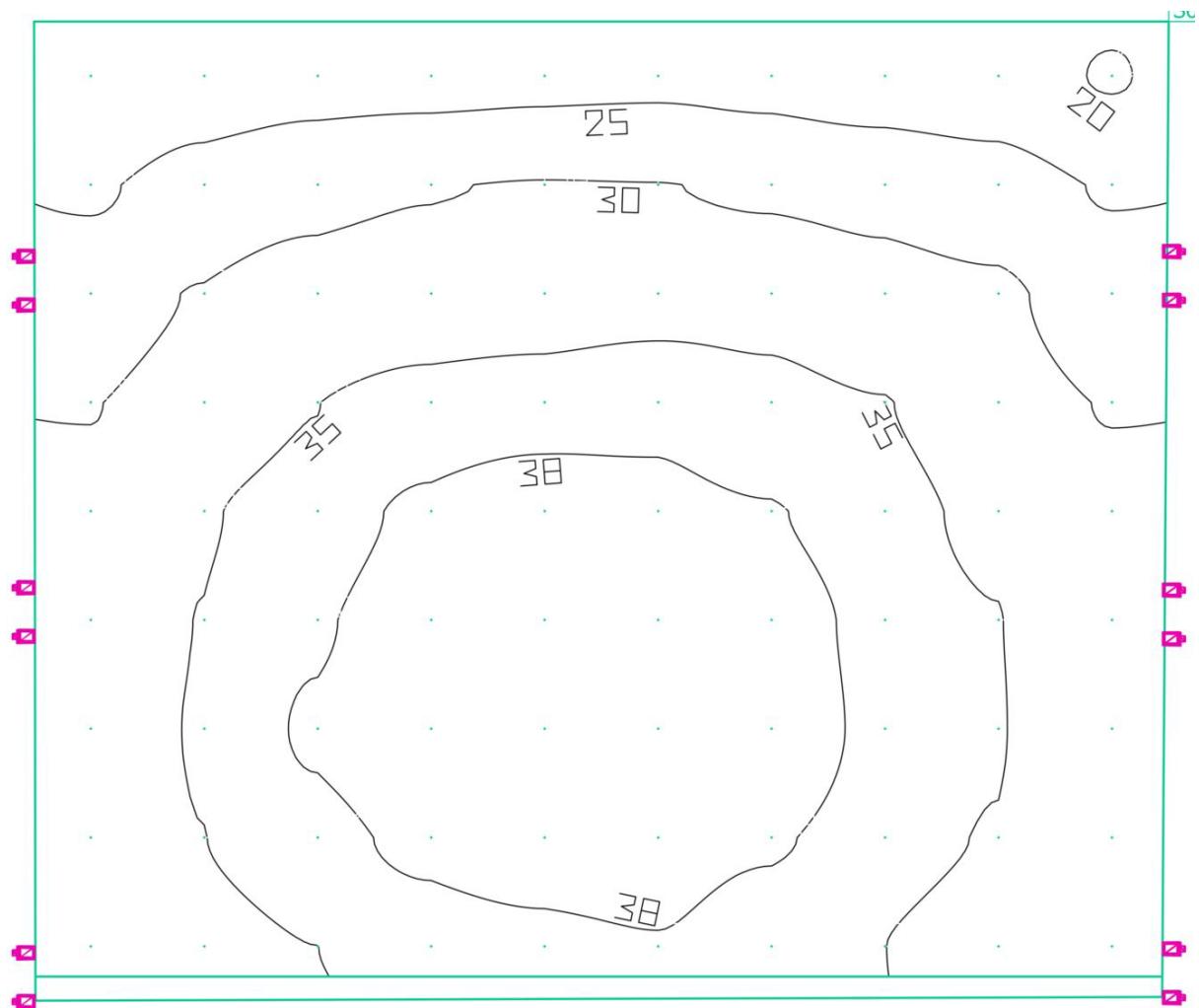


Figura 27: Plano isolux propuesta cine-patio de butacas iluminación proyectores.

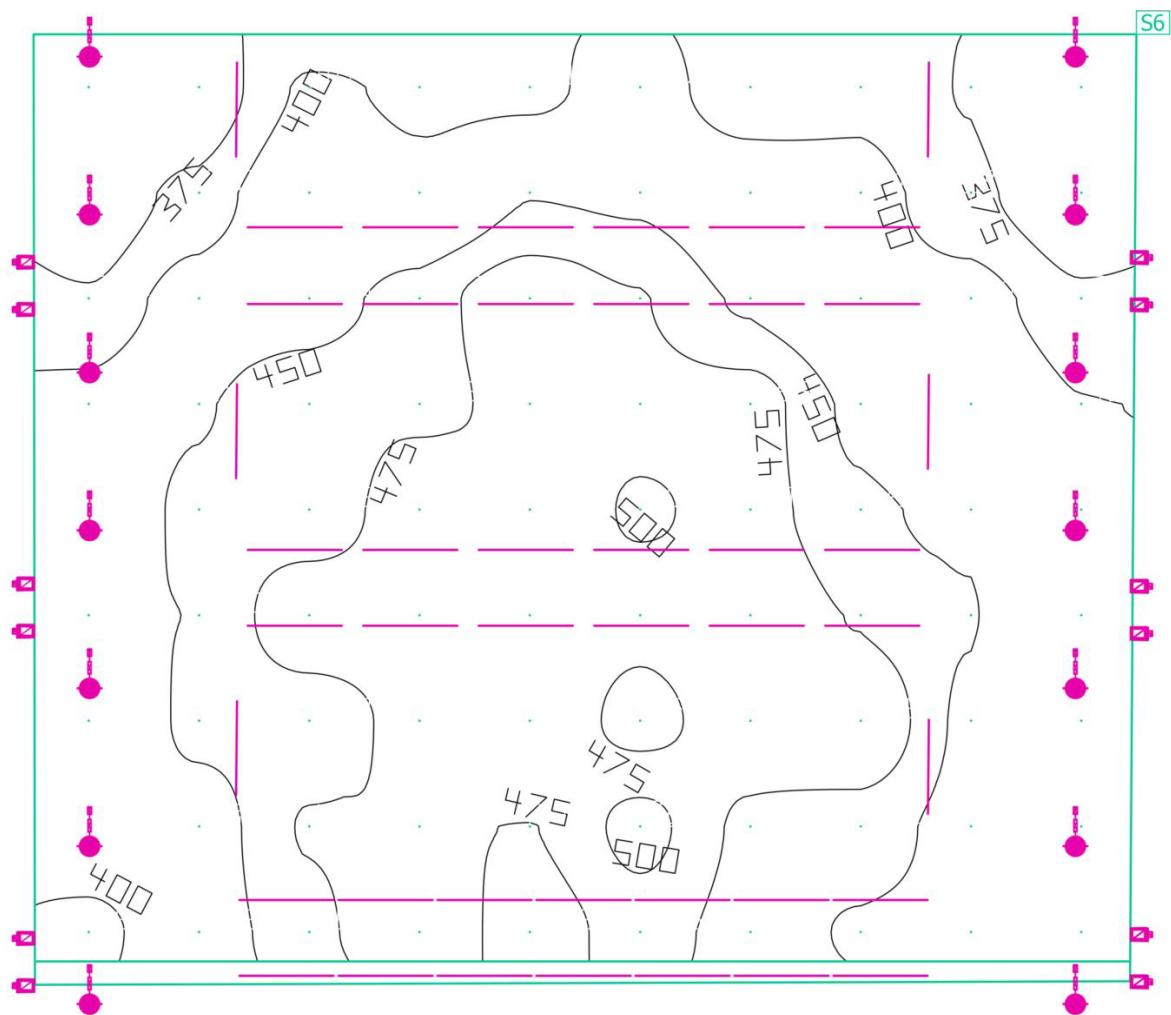


Figura 28: Plano isolux propuesta cine-patio de butacas iluminación completa.