



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y simulación de un nuevo sistema de iluminación para el
edificio de la piscina de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Luis Sánchez Cervera-Mercadillo

DIRECTORES: Ana Ogando Martínez

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y simulación de un nuevo sistema de iluminación para el
edificio de la piscina de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es el estudio y la mejora de las condiciones lumínicas del edificio que alberga la piscina de la Escuela Naval Militar. La piscina cumple una función esencial tanto en el adiestramiento de los futuros oficiales de la Armada como para la realización de diversas actividades deportivas por parte de los alumnos y diversos equipos civiles. La mayoría de estas actividades se realizan cuando la luz natural es escasa o inexistente, por lo que es imprescindible contar con un sistema de iluminación que garantice unas adecuadas condiciones visuales y de seguridad, cumpliendo con los requisitos establecidos por la normativa de aplicación.

Para abordar esta cuestión, en este trabajo se analizan las condiciones lumínicas actuales en la piscina, identificando deficiencias en la instalación actual. Posteriormente, se modela el edificio de la piscina en un software de simulación lumínica y se diseñan y simulan diferentes alternativas que mejoren las condiciones actuales. Por último, las soluciones analizadas se comparan atendiendo a diferentes criterios como el consumo energético, el coste y las prestaciones lumínicas.

PALABRAS CLAVE

Simulación lumínica, iluminación, eficiencia energética, piscina, DIALux evo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia el apoyo incondicional durante estos seis años (sí, seis) guiándome como un faro lo hace con un barco perdido en una tempestad. A mis compañeros, sin sus explicaciones durante largas noches de estudio jamás podría haber superado la dificultad del grado. A mi tutora, Ana Ogando Martínez, agradecer su predisposición y disponibilidad para solventar todas las dudas que me han surgido en la realización de este trabajo.

No podía dejar pasar la oportunidad tampoco de darle las gracias de todo corazón a las personas que han impactado de manera notable en mi desarrollo como persona y como oficial de la Armada: oficiales, jefes de instrucción, comandantes de brigada y compañeros, tanto nacionales como extranjeros.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Normativa vigente.....	9
1.4 Software utilizado	9
1.5 Estructura de la memoria	9
2 Estado del arte	11
2.1 Descripción del apartado.....	11
2.2 La luz.....	11
2.3 Definiciones luminotécnicas	14
2.3.1 Flujo Luminoso.....	14
2.3.2 Intensidad luminosa	15
2.3.3 Iluminancia	16
2.3.4 Luminancia	17
2.3.5 Uniformidad.....	18
2.3.6 Contraste	19
2.3.7 Eficiencia luminosa	19
2.4 Propiedades	20
2.4.1 Índice de rendimiento cromático	20
2.4.2 Temperatura de color	21
2.4.3 Refracción.....	21
2.4.4 Reflexión.....	22
2.5 Luminarias	23
2.5.1 Iluminación LED	23
2.5.2 Diagrama polar de intensidad luminosa	23
2.6 Simulación lumínica	24
3 Desarrollo del TFG.....	25
3.1 Descripción del apartado.....	25
3.2 Descripción del edificio	26
3.3 Medición de la iluminancia.....	28

3.3.1 Equipo empleado	28
3.3.2 Metodología de medición	29
3.4 Modelado 3D.....	31
3.4.1 Obtención de planos	31
3.4.2 Representación de los planos en AutoCAD.....	32
3.4.3 Importación de los planos a DIALux evo	33
3.4.4 Construcción del modelo	34
3.4.1 Retícula de cálculo y medición.....	38
3.4.2 Elección de materiales	40
3.4.3 Renderizado de la escena.....	43
3.4.1 Simulación de la escena.....	45
4 Resultados	47
4.1 Descripción del apartado.....	47
4.2 Requerimientos lumínicos.....	47
4.3 Análisis de la situación actual	49
4.4 Validación del modelo 3D	51
4.5 Alternativas de mejora	52
4.5.1 Recolocación de las luminarias existentes.....	52
4.5.2 Instalación de nuevas luminarias del mismo modelo	54
4.5.3 Instalación de un nuevo modelo de luminarias.....	55
4.5.4 Combinación de luminarias actuales y nuevas	59
4.6 Análisis de alternativas	61
5 Conclusiones y líneas futuras	63
5.1 Descripción del apartado.....	63
5.2 Conclusiones	63
5.3 Líneas futuras	64
6 Bibliografía.....	65
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	71
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	72
Anexo III: Equipo utilizado.....	73
Anexo IV: Documentación de luminarias	74
Anexo IV: Documentación de DIALux evo.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Funcionamiento de la cámara estenopeica [24].....	11
Figura 2-2 Ley de Snell [27]	12
Figura 2-3 Teoría corpuscular de Newton [29]	12
Figura 2-4 Modelo de propagación de la luz de Huygens [31]	13
Figura 2-5 Experimento de la doble rendija de Thomas Young [33].....	13
Figura 2-6 Imagen que demuestra la dualidad onda-partícula de la luz [39]	14
Figura 2-7 Espectro visible [41]	14
Figura 2-8 Clasificación de las luminarias [43]	15
Figura 2-9 Representación de la intensidad luminosa.....	16
Figura 2-10 Representación de la iluminancia horizontal y vertical.....	17
Figura 2-11 Representación de luminancia e iluminancia	18
Figura 2-12 Ejemplos de relaciones de contraste [47]	19
Figura 2-13 Representación de la eficiencia luminosa [49]	20
Figura 2-14 Comparación entre diferentes niveles de CRI (IRC) [51]	20
Figura 2-15 Representación de diferentes temperaturas de color [55].....	21
Figura 2-16 Refracción de la luz al cambiar de medio [57]	21
Figura 2-17 Representación del rayo incidente y rayo reflejado.....	22
Figura 2-18 Representación visual de la reflexión especular y la reflexión difusa.....	22
Figura 2-19 Sólido fotométrico y su sección en dos dimensiones [62].....	23
Figura 2-20 Representación de la luminaria y su diagrama polar de intensidad luminosa [63]	24
Figura 3-1 Diagrama de la metodología llevada a cabo	25
Figura 3-2 Vista aérea de Galicia, Marín la ENM y el “Gimnasio Guardiamarina Barrutia”, donde se encuentra la piscina	26
Figura 3-3. Prueba de natación en la piscina de la ENM [68].....	27
Figura 3-4 Foco Disano Fosnova Sevilla 3 y su diagrama polar [69]	27
Figura 3-5 Luxómetro PCE-174.....	29
Figura 3-6 Retícula de cálculo sobre la piscina.....	30
Figura 3-7 Intersección en uno de los puntos para la recogida de datos	31
Figura 3-8 Proceso de toma de datos en la piscina.....	31
Figura 3-9 Plano del gimnasio de la ENM en papel.....	32
Figura 3-10 Plano del alzado exterior del Gimnasio Guardiamarina Barrutia en versión digital	32
Figura 3-11 Contorno exterior del edificio realizado en AutoCAD.....	33
Figura 3-12 Plano bidimensional como plantilla y elementos en 3D.....	33

Figura 3-13 Selección del plano en DIALux evo.....	34
Figura 3-14 Establecimiento de eje de referencia y escala.....	34
Figura 3-15 Menú de construcción y edificio con los límites ya establecidos.....	34
Figura 3-16 Vista interior del edificio realizado con DIALux	35
Figura 3-17 Modelo simplificado (a) y modelo completo incluyendo todos los elementos de la escena (b).....	35
Figura 3-18 Mapas de iluminancias obtenidos con el modelo simplificado (a) y el modelo completo (b)	36
Figura 3-19 Menú de la herramienta “Elementos del ambiente”	37
Figura 3-20 Columnas en rampa añadidas mediante la herramienta “Elementos del ambiente”	37
Figura 3-21 Menú de la herramienta “Recorte”	38
Figura 3-22 Piscina vacía	38
Figura 3-23 Parámetros seleccionados para mostrar en DIALux.....	38
Figura 3-24 Parámetros de cálculo disponibles en DIALux	39
Figura 3-25 Cuadrícula de cálculo predeterminada.....	39
Figura 3-26 Configuración de la trama de medición.....	39
Figura 3-27 Configuración de norma predeterminada en DIALux	40
Figura 3-28 Modelo simplificado con materiales seleccionados (a) y modelo simplificado con materiales predeterminados (b)	40
Figura 3-29 Mapa de iluminancias en el modelo simplificado con materiales seleccionados (a) y modelo simplificado con materiales predeterminados (b).....	41
Figura 3-30 Captura de DIALux mostrando diferentes porcentajes de reflexión y reflejo para dos materiales diferentes.....	41
Figura 3-31 Catálogo de materiales de DIALux	42
Figura 3-32 Captura de la página archivetextures.net.....	42
Figura 3-33 Implementación de texturas propias mediante imágenes del ordenador	43
Figura 3-34 Menú de la herramienta “Raytracer”	44
Figura 3-35 Diferencia entre la imagen (a), obtenida con la herramienta “Raytracer” y la imagen (b), obtenida realizando una captura de la escena	44
Figura 3-36 Modelo 3D de un salvavidas en Sketchfab [71]	45
Figura 3-37 Exportación de objeto en formato 3DS con pCon.planner	45
Figura 3-38 Representación del botón de cálculo (A), el progreso en el cálculo de los parámetros (B) y un sumario de los resultados obtenidos en la sección elegida (C)	46
Figura 3-39 Lista de las luminarias y su situación en la planta del edificio y mapa de luminarias de la zona de estudio	46
Figura 4-1 Extracto de la normativa UNE-EN 12193 dónde se detalla el anexo A.6 [20]	47
Figura 4-2 Tabla A.6 mostrando los requisitos de iluminación para la práctica deportiva en piscinas [20]	47
Figura 4-3 Partido del Club Waterpolo Pontevedra en la piscina de la ENM [72].....	48

Figura 4-4 El Capitán de Navío Pedro Cardona Suanzes, Comandante Director de la ENM, presenta el torneo junto a la alcaldesa de Marín, María Ramallo Vázquez y la junta directiva del Club Waterpolo Pontevedra [73].....	49
Figura 4-5 Requisitos para una piscina con alumbrado clase II [20]	49
Figura 4-6 Mediciones obtenidas mediante el luxómetro en la zona de cálculo.....	50
Figura 4-7 Mapa de iluminancias elaborado a través de las mediciones obtenidas en la piscina	50
Figura 4-8 Renderizado de la piscina con la disposición actual de luminarias	51
Figura 4-9 Mapa de iluminancias de la disposición actual	52
Figura 4-10 Comparación entre la posición original (imágenes (a) y (c)) y la óptima (imágenes (b) y (d))	53
Figura 4-11 Mapa de iluminancias con la disposición óptima	53
Figura 4-12 Nueva disposición de las luminarias en la grada superior	54
Figura 4-13 Disposición de las luces retirando la primera luminaria de la primera columna.....	55
Figura 4-14 Mapa de iluminancias con la nueva disposición	55
Figura 4-15 Captura de pantalla de la página web DIALux Luminaire Finder.....	56
Figura 4-16 Plugin para DIALux de Opple lighting (a) y una luminaria con modelado 3D comparado con una predeterminada (b)	56
Figura 4-17 Proyector Ansell Aztec Coastal 150 y su diagrama polar [75].....	57
Figura 4-18 Disposición de las luminarias en las columnas	58
Figura 4-19 Disposición de las luminarias en la grada superior	58
Figura 4-20 Disposición de las luminarias en la zona de los vestuarios	58
Figura 4-21 Mapa de iluminancias obtenido con DIALux para la disposición conformada por las nuevas luminarias	59
Figura 4-22 Disposición de las luminarias en la grada superior	60
Figura 4-23 Disposición de las luminarias en la zona de vestuarios.....	60
Figura 4-24 Disposición de las nuevas luminarias colocadas sobre la columna central	60
Figura 4-25 Mapa de iluminancias obtenido con DIALux para la disposición conformada por la combinación de luminarias actuales y nuevas.....	61
Figura 0-1 Luxómetro PCE-172 [80]	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Longitud de onda en nm de diferentes colores [42].....	15
Tabla 2-2 IRC de diferentes tipos de luminarias [52]	20
Tabla 3-1 Principales características del foco Disano Fosnova Sevilla 3	28
Tabla 3-2 Características técnicas del luxómetro PCE – 174	29
Tabla 3-3 Resultados obtenidos con el modelo simplificado y el modelo completo para la uniformidad y la iluminancia media.....	36
Tabla 3-4 Resultados obtenidos en los modelos simplificado (a) y (b)	41
Tabla 3-5 Materiales elegidos	43
Tabla 4-1 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux.....	51
Tabla 4-2 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux con disposición óptima...	53
Tabla 4-3 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux con dos proyectores adicionales	54
Tabla 4-4 Principales características del proyector Ansell Aztec Coastal 150	57
Tabla 4-5 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux la disposición conformada por nuevas luminarias.....	59
Tabla 4-6 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux con la disposición conformada por la combinación de luminarias actuales y nuevas	61
Tabla 4-7 Principales características de las posibles alternativas	62

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En la situación actual de crecimiento poblacional y nuevas tecnologías, el consumo mundial de energía sigue en auge [1], Como consecuencia de la reducción de la actividad industrial durante la crisis del COVID-19, se produjo un ligero descenso en el consumo, pero que se ha visto reflejado en una sobredemanda en los años posteriores. Actualmente el consumo energético supone un 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [2], por lo que uno de los objetivos de la Agenda 2030, el plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, es el acceso a la energía asequible y no contaminante.

La inestabilidad de la energía y la necesidad de cambiar las fuentes de producción de esta se vio reflejada en el año 2022. La invasión de Ucrania por parte de Rusia produjo una subida en el precio del gas natural [3], principal combustible fósil utilizado para generar electricidad, representando en la UE un 19,6% del total [4]. La subida del precio del gas ruso, mayor productor de la UE con hasta un 40% del total consumido en 2021 fue producida por las diferentes sanciones que le fueron impuestas. Esto provocó que la factura del gas en países como España se encareciera hasta un 41% en 2022 [3]. A la crisis provocada por la guerra de Ucrania se le sumó además un invierno especialmente frío y largos periodos con escasez de viento, por lo que la energía eólica, responsable de 22% del total consumido en España no pudo hacer frente a las necesidades de la población [5].

En concreto, la iluminación artificial representa un 20% del gasto energético global y es responsable del 6% de todas las emisiones de CO₂ [6]. Esto evidencia la necesidad de invertir en nuevos sistemas de iluminación que reduzcan el consumo. La bombilla de filamento incandescente tal y como se conoce fue patentada y comercializada por Thomas Edison en el año 1880 [7]. Esta bombilla producía alrededor de 400 lúmenes consumiendo 60 vatios, muy lejos de los valores que se consiguen en la actualidad. La mejora de esta tecnología se produjo con la invención de las lámparas halógenas, que utilizan un hilo de tungsteno encapsulado en un cristal de cuarzo relleno de gas halógeno. Con esto se lograron bombillas más eficientes y pequeñas, como las que llevan los faros de la mayoría de coches [8]. Actualmente, los fluorescentes mejoran tanto a las incandescentes como a las halógenas en eficiencia y consumo. Sin embargo, el deshecho de este tipo de lámparas implica riesgos medioambientales al poseer mercurio en su interior, elemento altamente contaminante.

Desde la introducción al mercado de las primeras bombillas LED a finales del siglo XXI [9] el consumo global relacionado con la iluminación ha bajado un 2% [10]. Esto se produce a pesar del incremento drástico de la cantidad de personas con acceso a electricidad y la reducción del consumo hasta un 80% tras la introducción del LED frente a su alternativa incandescente [11]. Es la inversión

inicial la que amedrenta a empresas y otras instalaciones con gran cantidad de luminarias a cambiar sus sistemas de iluminación, ya que en domicilios particulares la inversión se puede recuperar en ahorro en la factura de la luz en un año [12].

Las ventajas de la iluminación LED son más pronunciadas en cuanto a alumbrado público se refiere. España es el país de la UE con más gasto per cápita en alumbrado público. Especialmente en ciudades de menos de 200.000 habitantes, siendo las que más consumen según diferentes estudios [13]. El motivo principal de este gasto es el uso de sistemas de iluminación a base de sodio de alta presión, que producen una luz de color anaranjado típica de las farolas. Esta tecnología se eligió en su momento por su bajo coste, duración elevada con hasta 16.000 horas sin necesitar mantenimiento (las luces LED actuales pueden durar hasta 100.000 horas) y su capacidad de regulación [14]. Ahora se sabe que, en comparación con otras tecnologías más modernas, estas luces tienen escasa potencia lumínica (100 lm/W aproximadamente) y son caras de mantener.

La iluminación forma parte del día a día de las personas y tiene gran influencia en su desarrollo. Está demostrado que la falta de luz natural, más común en invierno y en países nórdicos, produce el denominado trastorno afectivo estacional, que puede acarrear depresión, aumento de peso o cambios de humor repentinos [15]. Diversos estudios han conseguido demostrar también la relación entre niveles de luz variables y la concentración en las aulas [16], así como la tendencia decreciente del cansancio y la agresividad cuando se expone a los alumnos a luz azulada.

En el mundo del deporte la iluminación cumple la función tanto de evitar peligros para los atletas como facilitar siempre la práctica evitando interferir en los ritmos circadianos de los mismos, ya que al alterarlos podrían producir una reducción de sus capacidades en un mundo donde cada centésima es importante [17]. Concretamente, la correcta iluminación en piscinas es fundamental para la práctica cómoda y segura de todas las actividades que se realicen en ella. En el año 2023, 47 personas perdieron la vida por ahogamiento en piscinas [18] del total de 422 muertes por esta causa. En la piscina de la Escuela Naval Militar se practican ejercicios que sin una correcta supervisión podrían llegar a ser peligrosos, como pueden ser pruebas de supervivencia, saltos desde el trampolín o iniciación al buceo con botella de aire [19]. La práctica de estas actividades, por los riesgos que estas llevan asociados, se hace siempre bajo vigilancia mediante buzos o personal que se encuentra en la superficie. Es por este motivo que el posicionamiento de las luminarias no solo sirve para proporcionar confort y facilitar la práctica deportiva, sino que también debe ayudar al trabajo de supervisión de estas.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar las condiciones lumínicas en la piscina de la ENM¹ y diseñar un nuevo sistema de iluminación que garantice unas buenas prestaciones visuales y se ajuste a la normativa vigente, prestando especial atención a la eficiencia y al consumo energético. Para ello, se tomarán medidas de iluminancia con un luxómetro y estudiarán las condiciones actuales de iluminación. En paralelo, se realizará un modelo 3D del edificio empleando el software de simulación lumínica DIALux evo². Sobre este modelo se probarán diferentes opciones analizando no solo alternativas para la sustitución de las luminarias sino también para su disposición en el edificio. Finalmente, se presentará un análisis de las propuestas diseñadas atendiendo a tres factores: el cumplimiento de los requisitos que establece la normativa de aplicación, el coste económico y el consumo energético.

¹ La Escuela Naval Militar se conoce comúnmente como la ENM, desde este punto se referirá a ella con estas siglas a fin de evitar la constante repetición del nombre completo.

² Siempre que DIALux sea mencionado se referirá a la versión DIALux evo.

1.3 Normativa vigente

Al ser un espacio multipropósito es difícil encontrar una norma específica para este tipo de espacios, pero es la norma UNE-EN 12193:2020 “Iluminación de instalaciones deportivas” la que más se adecúa a nuestros intereses.

Esta norma específica la iluminación para los eventos deportivos más practicados en Europa. Solo tiene en cuenta la iluminación artificial, proporciona métodos para medir los parámetros mediante el luxómetro y también contiene restricciones relativas a la posición de las luminarias para aplicaciones específicas [6].

1.4 Software utilizado

Para la realización de este trabajo ha sido indispensable el uso de diversos programas informáticos, principalmente:

- AutoCAD. El programa AutoCAD, creado por la empresa estadounidense Autodesk es el software líder en diseño asistido por ordenador (*Computer Aid Design* en inglés). AutoCAD fue lanzado al mercado en el año 1982 y desde entonces se ha convertido en una herramienta esencial tanto para las diferentes empresas del mundo del diseño y la ingeniería como para particulares que quieran representar planos o dibujos, en 2D y en 3D [21].

Los archivos que genera el software tienen la extensión DWG, que son compatibles con una gran variedad de programas como SketchUp, Inventor (también propiedad de Autodesk) o DIALux evo, pilar de este trabajo.

El programa fue utilizado principalmente a la hora de representar la planta del edificio y utilizarla como guía para luego construirlo en DIALux.

- DIALux evo. Es un programa para calcular y visualizar la luz en habitaciones individuales o edificios enteros. Mediante la importación de ficheros en formato DWG de AutoCAD se consiguen realizar los modelados en 3D [21]. DIALux destaca por encima de otros programas destinados a la representación de iluminación por su sencillez de uso, con una interfaz simplificada e intuitiva y por tener una gran comunidad de usuarios detrás. Al realizar simulaciones con DIALux se puede determinar cómo posicionar las luminarias de la manera más eficiente, ahorrando tiempo y dinero.
- pCon.planner. Es un programa principalmente destinado al diseño de interiores en 3D. En este caso el programa no ha sido utilizado con esos fines, si no por la capacidad que tiene de variar la extensión de determinados ficheros no reconocidos por DIALux y exportarlos de manera que sí sean aceptados por este. Esta función ha sido utilizada a la hora de añadir objetos con el objetivo de dotar de realismo el modelo 3D.

1.5 Estructura de la memoria

Para la correcta realización del trabajo, este se ha dividido en diferentes secciones, las cuáles se detallarán a continuación:

- Introducción y objetivos: en esta sección del trabajo se detallarán los objetivos a conseguir mediante el trabajo, así como las diferentes herramientas que han sido utilizadas para lograrlo.
- Estado del arte: el estado del arte ayudará mediante la definición de diferentes conceptos lumínicos y propiedades de la luz y los softwares de iluminación a la comprensión del resto

del trabajo, exponiendo de manera sencilla conceptos y términos que se utilizarán en él más adelante.

- Desarrollo del TFG: en esta parte se analizará la norma UNE por la que se rige la instalación, detallando en ella como se procederá a tomar las mediciones. También se elaborará el modelo 3D que luego servirá para reproducir situaciones lumínicas alternativas a la actual.
- Resultados: en esta sección se analizará la situación lumínica actual, se comprobará la fiabilidad del modelo 3D realizado, se plantearán y analizarán diferentes alternativas de mejora, plasmando los resultados obtenidos mediante el software DIALux evo.
- Conclusiones y líneas futuras: en este apartado se analizarán los resultados obtenidos en la sección anterior, analizando el cumplimiento de los objetivos propuestos y se detallarán nuevas líneas de investigación partiendo de la base de los conocimientos obtenidos en este trabajo.
- Bibliografía y anexos: en ella se detallarán todas las fuentes consultadas para la realización del trabajo, así como los anexos conteniendo las implicaciones sociales, económicas y ambientales y las reflexiones éticas y sociales referentes al trabajo, además, es en esta sección donde se anexará toda la documentación obtenida con el software DIALux evo, pieza fundamental para el desarrollo de este.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Descripción del apartado

En esta sección se definirán los conceptos necesarios para comprender de manera básica qué es la luz, como se propaga y que magnitudes la componen, así como las diferentes maneras de producirla, estudiarla y controlarla, lo que se conoce como luminotecnia.

2.2 La luz

A lo largo de la historia la luz ha sido definida de muchas maneras diferentes. Empédocles de Agrigento, creador de la teoría de los cuatro elementos afirmó ya en el siglo V a. C. que la luz era producida por el sol, llegaba a las personas con velocidad finita pero imperceptible y la recibían a través de la vista [22].

En el siglo XI el matemático Hasan Ibn al-Haytham realizó los primeros experimentos que demostraron que la luz viaja en línea recta y que las imágenes se crean cuando llegan a los ojos. Se le acredita además la invención de la cámara estenopeica³ (Figura 2-1) y el descubrimiento de las leyes de refracción [25].

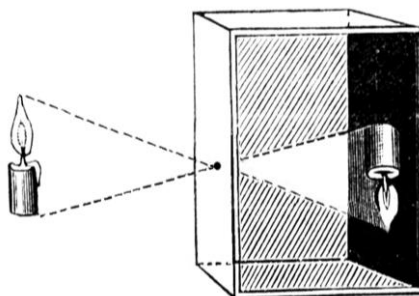


Figura 2-1. Funcionamiento de la cámara estenopeica [23]

Roger Bacon, un importante científico y filósofo inglés del siglo XIII fue el primero que estudió la refracción de la luz al observar cómo se desviaba la misma al pasar de un medio a otro, como lo hace al pasar del aire al agua. Esto sentó el comienzo de desarrollo de la ley de Snell-Descartes (siglo XVII), que relaciona el ángulo de incidencia de la luz con el ángulo de refracción de esta (Figura 2-2) [26].

³ En una cámara estenopeica la luz entra por una pequeña abertura (estenopo) y se proyecta en una superficie

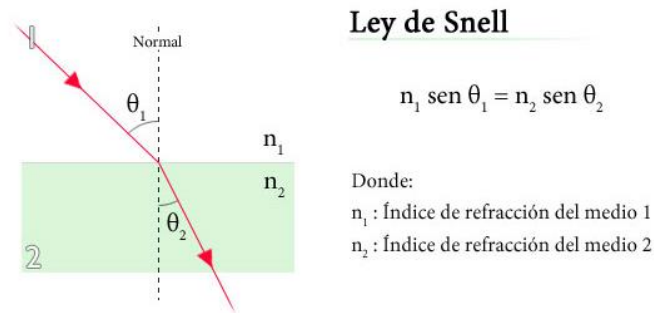


Figura 2-2 Ley de Snell [27]

Isaac Newton, uno de los científicos más influyentes de la historia explicó en su libro *Opticks*, compuesto por tres tomos y publicado en el año 1704, lo que se conoce como la teoría corpuscular de la luz. En ella expone que la luz está formada por partículas sin masa llamadas corpúsculos, que emanan de la fuente emisora a gran velocidad. Cuando estos corpúsculos atraviesan cuerpos transparentes se puede ver a través de ellos, pero, tal y como se representa en la Figura 2-3, cuando se enfrentan a cuerpos sólidos rebotan, no dejándonos ver lo que se encuentra al otro lado. Esta teoría fue aceptada por el público por la gran fama que poseía Newton. Sin embargo, se equivocó en varios matices, como al afirmar que la refracción se producía cuando los corpúsculos de luz cambiaban de medio y se propagaban con mayor velocidad que en el vacío [28].

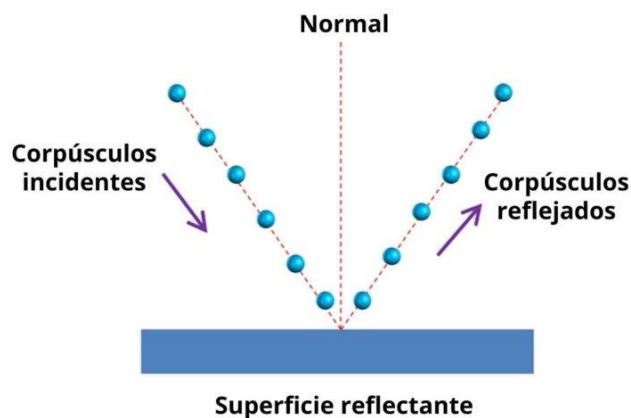


Figura 2-3 Teoría corpuscular de Newton [29]

Los principales detractores de esta teoría fueron el científico inglés Robert Hooke, y el astrónomo, físico y matemático holandés Christiaan Huygens. Hooke argumentó ya en 1670 que la luz se comportaba al igual que el sonido mediante ondas, las cuales necesitaban un medio material por el que propagarse. Huygens, amigo personal de Hooke, trabajó sobre sus ideas y publicó en 1690 su *Traité de la lumière*⁴.

La obra de Huygens explica que la luz se propaga por un medio denominado éter luminoso [30] mediante ondas esféricas. Cada punto de esta onda se comporta como un centro emisor que va emitiendo ondas secundarias en la misma frecuencia y velocidad que las ondas primarias (Figura 2-4). La teoría de Huygens explicaba las leyes de la refracción y reflexión, pero no fue aceptada debido a la inmensa fama de la que gozaba Newton [31].

⁴ Tratado sobre la luz en español.

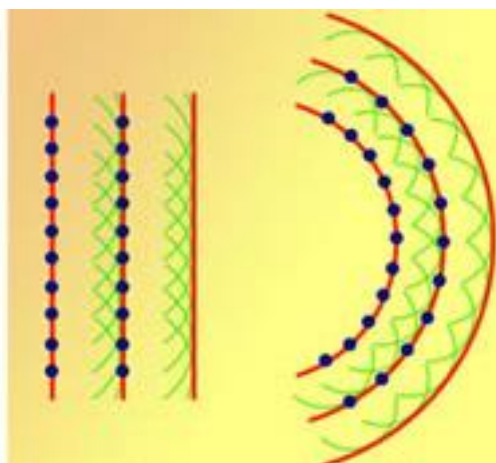


Figura 2-4 Modelo de propagación de la luz de Huygens [31]

En la década de 1740 los trabajos sobre óptica del físico y matemático suizo Leonhard Euler ayudaron a que la teoría propuesta por Huygens se convirtiese en la más aceptada y se desechase la corpuscular de Newton. Sin embargo, las teorías de Euler se basaban en razonamientos y no pudieron ser demostradas mediante experimentos [32].

En julio de 1816, El físico e ingeniero francés Augustin-Jean Fresnel consiguió demostrar mediante una serie de experimentos continuando la obra de Thomas Young y su famoso experimento de la doble rendija⁵ (Figura 2-5), que el comportamiento de la luz no podía explicarse mediante la creencia de que esta estaba formada mediante partículas. Por lo tanto, estaba constituida por ondas.



Figura 2-5 Experimento de la doble rendija de Thomas Young [33]

Sus postulados fueron aceptados hasta 1865, cuando el físico escocés James Clerk-Maxwell formuló su teoría del electromagnetismo, en la que se deduce que la luz está formada por campos eléctricos y magnéticos que se propagan por el espacio. Con esta deducción, a su vez se predijeron la existencia de las ondas de radio y las radiocomunicaciones [34].

El mayor giro sobre la investigación del comportamiento de la luz se produjo con la explicación de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico⁶ en el año 1905, mismo año en el que publicó su teoría de la relatividad, quizás la teoría más conocida de la historia. El físico alemán explicó el efecto fotoeléctrico basándose en las hipótesis del físico Max Planck en el cuál determina que la luz tiene un comportamiento con características típicas de partículas newtonianas clásicas y partículas de física cuántica [36]. El físico estadounidense Robert Andrews Millikan estuvo durante 10 años intentando demostrar que Einstein se equivocaba, pero mediante sus experimentos concluyó que estaba en lo cierto, declarando que “La ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico ha sido sometida a muchas

⁵ Experimento mediante el cual se demuestra que la luz y la materia pueden demostrar características tanto de ondas como de partículas [33]

⁶ Los metales expulsan electrones cuando son irradiados con luz [35]

pruebas experimentales y en todos los casos predice con exactitud los resultados observados”. Con esta declaración consiguió que el alemán ganase el premio Nobel en 1921 [37].

En 1924 el físico francés Louis de Broglie revoluciona la física explicando la dualidad de la luz. No solo es una onda electromagnética, sino que también se comporta como lo hacen las partículas. Esta hipótesis se confirmó en 1927 mediante la observación de la difracción de electrones en la Universidad de Aberdeen, Escocia [38]. Esta teoría es la aceptada en la actualidad, y, mediante diferentes técnicas, se ha conseguido representar, como muestra la Figura 2-6, que la luz se comporta como una onda y como una partícula simultáneamente.

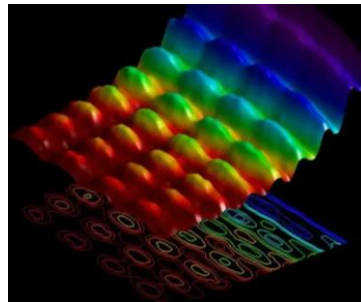


Figura 2-6 Imagen que demuestra la dualidad onda-partícula de la luz [39]

2.3 Definiciones luminotécnicas

En este apartado se definirán una serie de conceptos sobre la luz que resultan relevantes para la comprensión de las siguientes partes del trabajo, ya que serán mencionados de forma alternativa y frecuente.

2.3.1 Flujo Luminoso

El flujo luminoso (Φ) se define como la cantidad de luz emitida por una fuente dentro del espectro visible [40] y percibida por el ojo humano y se mide en lúmenes (lm). Las longitudes de ondas electromagnéticas visibles son las comprendidas entre 380 y 780 nm [41]. Dependiendo del valor de esta longitud el ojo diferencia diversos colores (Figura 2-7).

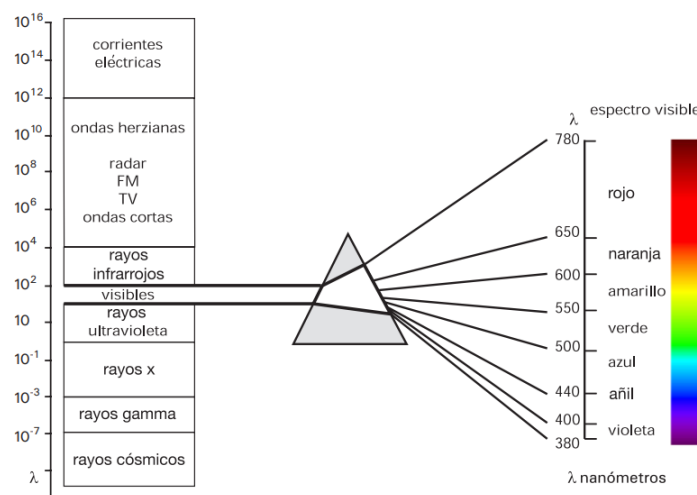


Figura 2-7 Espectro visible [41]

Como se observa en la Tabla 2-1, las longitudes más cercanas a los rayos ultravioletas se observarán como colores morados y las que lo sean a los rayos infrarrojos tomarán tintes rojizos.

Color	Longitud de onda (nm)
Rojo	620 - 780
Naranja	585 - 620
Amarillo	570 - 585
Verde	490 - 570
Azul	440 - 490
Índigo	420 - 440
Violeta	400 - 420

Tabla 2-1 Longitud de onda en nm de diferentes colores [42]

El flujo luminoso también ayuda a diferenciar entre los tipos de iluminación, tal y como se observa en la Figura 2-8, atendiendo al porcentaje de este que se ubica por encima o por debajo de un plano horizontal establecido en la luminaria. Se puede distinguir entre luz directa, semidirecta, indirecta, etc.

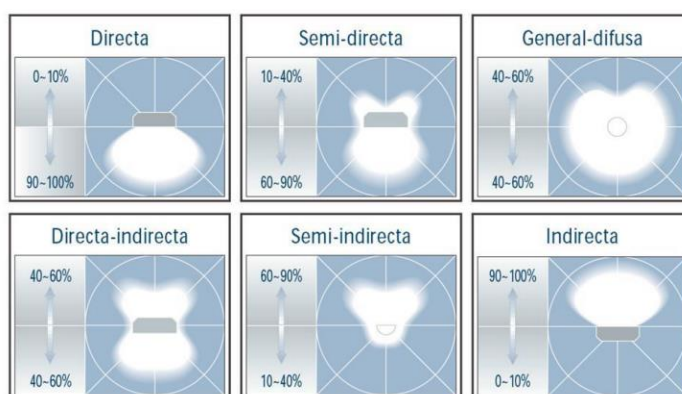


Figura 2-8 Clasificación de las luminarias [43]

2.3.2 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa (I), representada en la Figura 2-9, se define como la intensidad de flujo luminoso proyectado en una dirección y contenido en un estereorradián. Se calcula mediante el cociente entre el flujo luminoso y el ángulo sólido en una dirección concreta, atendiendo a la Ecuación (1), y se mide en candelas (cd) [41].

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (1)$$

Donde:

I es la intensidad luminosa en candelas.

Φ representa el flujo luminoso en lúmenes.

ω hace referencia al estereorradián.

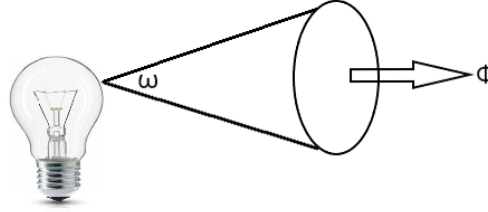


Figura 2-9 Representación de la intensidad luminosa

2.3.3 Iluminancia

La iluminancia (E) se define como el flujo luminoso que incide sobre la unidad de superficie en luxes (lx), que equivale a un lumen por metro cuadrado (lm/m^2). Dependiendo del plano la superficie de incidencia se puede distinguir entre iluminancia vertical (E_{vert}) e iluminancia horizontal (E_{hor}), representadas en la Figura 2-10. En este trabajo la más utilizada será la iluminancia horizontal media, $E_{hor Ave}$, cuando se mencione la iluminancia como un resultado referido a una zona se referirá a la iluminancia horizontal media, que es la media de las diferentes iluminancias en una determinada zona.

La iluminancia no se encuentra vinculada a una superficie real. Puede ser determinada en cualquier lugar del espacio y se puede deducir de la intensidad luminosa, ya que esta disminuye con el cuadrado de la distancia de la fuente de luz (ley de la inversa del cuadrado de la distancia) y, por tanto, puede expresarse como se muestra en la Ecuación (2) [44].

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

A la hora de calcular la iluminancia horizontal (E_{hor}) se deberá aplicar la Ecuación (3).

$$E_{hor} = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{d^2} \quad (3)$$

Mientras que para la iluminancia vertical (E_{vert}) se aplicará la Ecuación (4).

$$E_{vert} = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{d^2} \quad (4)$$

Combinando las Ecuaciones (3) y (4) se obtiene otra forma de calcular la iluminancia, representada en la Ecuación (5).

$$E = \sqrt{E_{hor}^2 + E_{vert}^2} \quad (5)$$

Donde:

E es la iluminancia en luxes.

E_{hor} es la iluminancia horizontal en luxes.

E_{vert} es la iluminancia vertical en luxes.

I es la intensidad luminosa en candelas.

α es el ángulo de incidencia medido en grados.

d es la distancia vertical desde la fuente a la superficie de incidencia en metros.

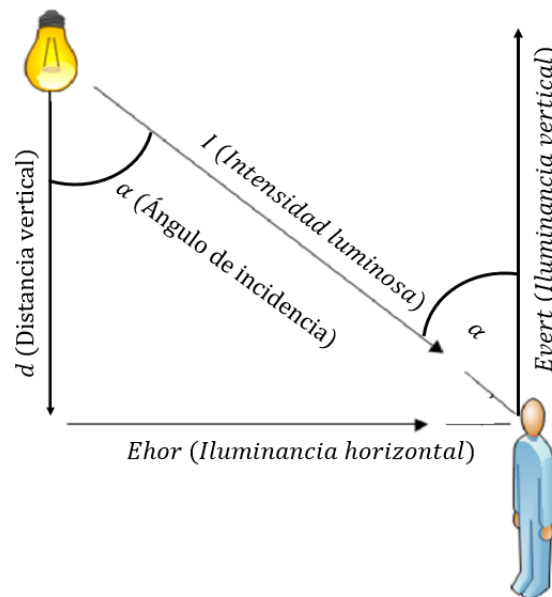


Figura 2-10 Representación de la iluminancia horizontal y vertical

2.3.4 Luminancia

La luminancia se define como la relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo. Depende del flujo luminoso que incide en una superficie y el que refleja (Figura 2-11), siendo este último característico de cada material. Se representa mediante L y se mide en candelas por metro cuadrado (cd/m^2) [45].

La luminancia se relaciona con la intensidad luminosa mediante la Ecuación (6).

$$L = \frac{I}{\text{Superficie Aparente}} = \frac{I}{A \cdot \cos \alpha} \quad (6)$$

Donde:

L es la luminancia en cd/m^2 .

I es intensidad luminosa en candelas.

α es el ángulo comprendido entre el observador y la recta normal a la superficie real iluminada en grados.

A es el área de la superficie real iluminada en metros cuadrados.

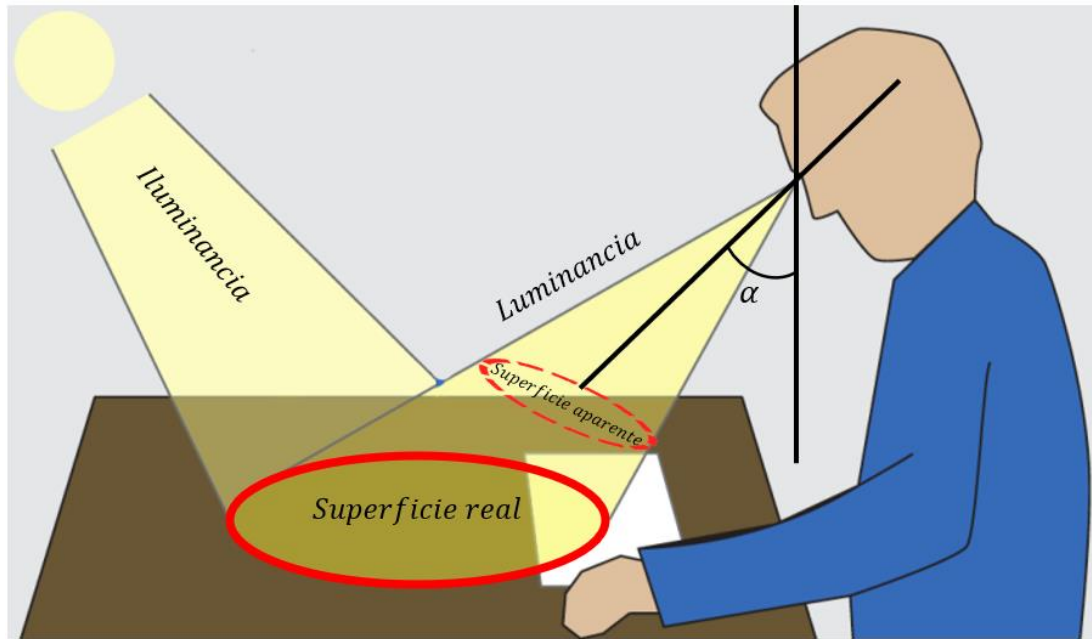


Figura 2-11 Representación de luminancia e iluminancia

2.3.5 Uniformidad

La uniformidad se refiere en términos generales a la homogeneidad de la iluminancia en una superficie concreta y acotada [44], dependiendo del tipo de uniformidad se puede distinguir:

- Uniformidad horizontal mínima a máxima ($U1hor$), es el resultado del cociente entre las iluminancias horizontales mínima ($E_{hor Min}$) y máxima ($E_{hor Max}$) registradas en una superficie, Ecuación (7).

$$U1hor = \frac{E_{hor Min}}{E_{hor Ave}} \quad (7)$$

- Uniformidad horizontal mínima a media ($U2hor$), es el resultado del cociente entre las iluminancias horizontales mínima ($E_{hor Min}$) y media ($E_{hor Ave}$) registradas en una superficie, Ecuación (8). En este trabajo será esta la uniformidad utilizada, de aquí en adelante cuando se mencione la uniformidad, esta será la $U2hor$.

$$U2hor = \frac{E_{hor Min}}{E_{hor Ave}} \quad (8)$$

- Uniformidad vertical mínima a máxima ($U1vert$), es el resultado del cociente entre las iluminancias verticales mínima ($E_{vert Min}$) y máxima ($E_{vert Max}$) registradas en una superficie, Ecuación (9).

$$U1vert = \frac{E_{vert Min}}{E_{vert Max}} \quad (9)$$

- Uniformidad vertical mínima a media ($U2_{vert}$), es el resultado del cociente entre las iluminancias verticales mínima ($E_{vert Min}$) y media ($E_{vert Ave}$) registradas en una superficie, Ecuación (10).

$$U2_{vert} = \frac{E_{vert Min}}{E_{vert Ave}} \quad (10)$$

2.3.6 Contraste

El contraste se define como la diferencia en luminancia percibido entre dos colores [46], generalmente el del objeto que se observa y su fondo. Es fundamental para la percepción y apreciación de detalles. Se cuantifica como una relación que va desde 1:1 hasta 21:1, siendo esta última blanca sobre negro o negro sobre blanco. En la Figura 2-12 se pueden apreciar diferentes relaciones de contraste, destacando visualmente aquellas con una relación más grande.

3.2:1	1.8:1		2.2:1	4.4:1	6.6:1
1.4:1	1.3:1	2.1:1	3:1	9.9:1	15:1
	1.8:1	3:1	7:1	14:1	21:1

Figura 2-12 Ejemplos de relaciones de contraste [47]

2.3.7 Eficiencia luminosa

La eficiencia luminosa, también llamando rendimiento luminoso o lumínico establece la relación entre la cantidad de luz transformada en visible (flujo luminoso) y la energía eléctrica consumida [48]. Tal y como se ve representada en la Figura 2-13, la eficiencia luminosa nunca es perfecta, las luminarias transforman parte de la energía que les llega en calor y en radiaciones imperceptibles por el ojo humano. Se expresa en lúmenes por vatio (lm/W) y se relaciona mediante la Ecuación (11).

$$\eta = \frac{\Phi}{W} \quad (11)$$

Donde:

η es la eficiencia luminosa en lm/W.

Φ es el flujo luminoso en lúmenes.

W es la potencia eléctrica consumida en vatios.



Figura 2-13 Representación de la eficiencia luminosa [49]

2.4 Propiedades

2.4.1 Índice de rendimiento cromático

El índice de rendimiento cromático, muchas veces abreviado como IRC o CRI por sus siglas en inglés (*Color Rendering Index*) cuantifica la capacidad de reproducir fidedignamente los colores de una fuente luminosa [50]. El IRC toma valores que habitualmente oscilan entre 0 y 100, siendo el sol en un día despejado el que reproduce los colores con un IRC de 100.

Dependiendo del uso que se le vaya a dar a una luminaria estas se elegirán con un IRC adecuado (Tabla 2-2). Por ejemplo, el alumbrado de las calles, donde distinguir los colores no es tan importante, no suele superar un valor de 70, mientras que para el de una galería de arte se elegirán fuentes luminosas lo más cercanas posibles a 100. En la Figura 2-14 se pueden apreciar las diferencias de color entre un mismo objeto iluminado por luminarias con diferentes niveles de CRI (IRC en castellano).



Figura 2-14 Comparación entre diferentes niveles de CRI (IRC) [51]

Luminaria	IRC
LED	80 - 95
Lámpara halógena	100
Lámpara fluorescente	15 - 85
Lámpara de inducción	79
Lámpara de sodio de alta presión	0 - 70
Lámpara de sodio de baja presión	0

Tabla 2-2 IRC de diferentes tipos de luminarias [52]

2.4.2 Temperatura de color

La temperatura de color se define como la temperatura, medida en grados kelvin, a la que se tiene que calentar un cuerpo negro para que emita ondas electromagnéticas y estas se puedan percibir como colores [53]. Los humanos percibimos la luz en tres grandes grupos: luz cálida, natural o fría (Figura 2-15).

La temperatura de color tiene una gran influencia en el ser humano. Diversos estudios han asociado temperaturas de color más altas con un mejor rendimiento académico y mayor concentración, mientras que valores más bajos son asociados a un peor desempeño estudiantil, es por esto que las aulas suelen tener luces frías [54].

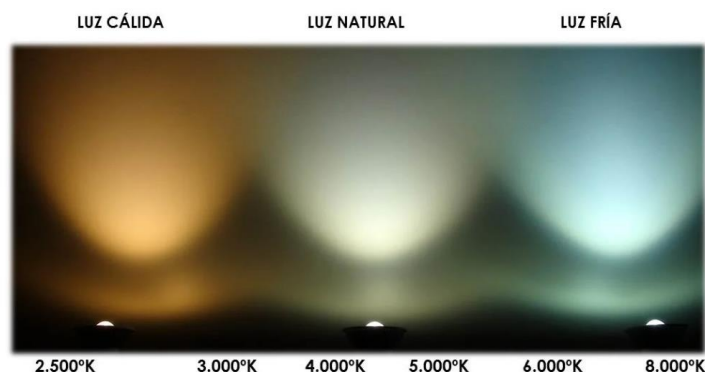


Figura 2-15 Representación de diferentes temperaturas de color [55]

2.4.3 Refracción

La refracción se define como el cambio de velocidad y dirección de una radiación al cambiar de medio, en este caso las ondas electromagnéticas de la luz al pasar por un medio de diferente densidad [56]. La refracción depende del ángulo de incidencia y de la densidad del medio y se calcula mediante la siguiente Ecuación (12).

$$n = \frac{c}{v} \quad (12)$$

Donde:

n es el índice de refracción o factor de refracción representado mediante un cociente adimensional.

c es la velocidad de la luz en el vacío en m/s.

v es la velocidad de la luz en el medio a analizar en m/s.

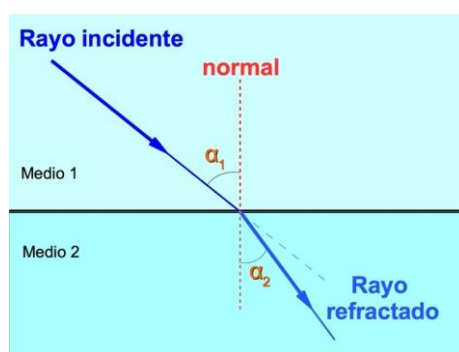


Figura 2-16 Refracción de la luz al cambiar de medio [57]

Mediante la segunda ley de Snell-Descartes se sabe también que los índices de refracción de los diferentes medios y los ángulos de incidencia y refracción se relacionan mediante la Ecuación (13).

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (13)$$

Donde:

n_1 es el índice de refracción del medio número uno, magnitud adimensional.

n_2 es el índice de refracción del medio número dos, magnitud adimensional.

α_1 es el ángulo de incidencia medido en grados.

α_2 es el ángulo de refracción medido en grados.

2.4.4 Reflexión

La reflexión se define como el cambio de dirección de una onda, como es la luz, cuando esta incide en una superficie desde un medio regresando a este de nuevo [58]. La reflexión no cambia ni la velocidad ni la frecuencia ni la longitud de onda.

Se denomina ángulo de incidencia (Φ) al ángulo formado por el rayo incidente respecto al normal de la superficie y ángulo de reflexión (Φ') al formado por el rayo reflejado con la normal a la superficie (Figura 2-17) [59].

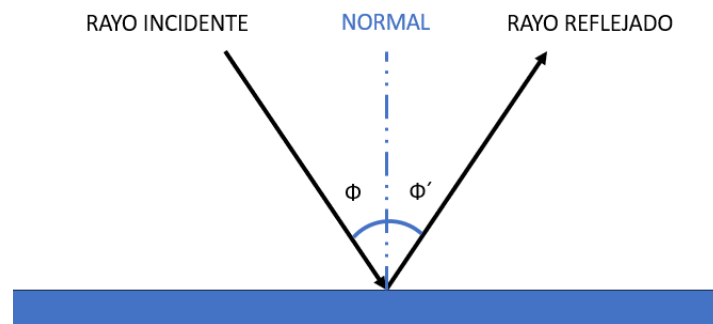


Figura 2-17 Representación del rayo incidente y rayo reflejado

Tal y como se ve representado en la Figura 2-18, dependiendo de la superficie en la que incide el rayo se distingue entre reflexión especular, si la superficie es uniforme y el ángulo de incidencia también, o reflexión difusa si la superficie presenta irregularidades y, por lo tanto, el ángulo de reflexión varía a lo largo de la misma [60].

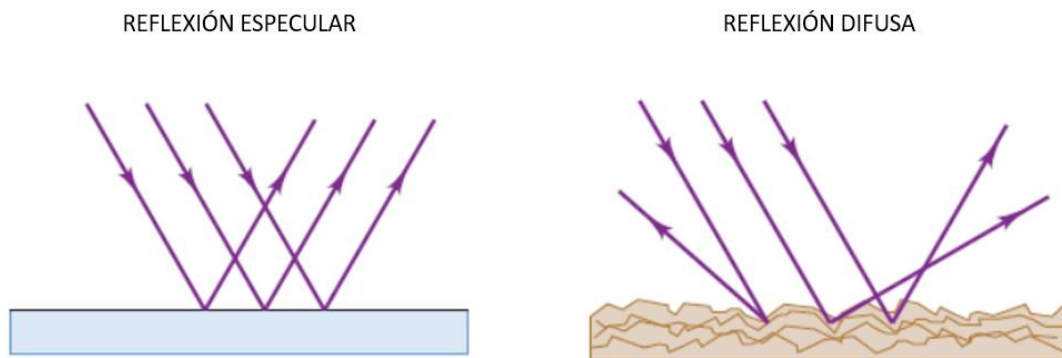


Figura 2-18 Representación visual de la reflexión especular y la reflexión difusa

2.5 Luminarias

A lo largo de los años se han comercializado luminarias de diferentes tecnologías, desde las bombillas incandescentes hasta las luces fluorescentes o las lámparas de vapor de sodio de alta y baja presión. Cada una con sus características y sus beneficios. Sin embargo, la tecnología LED es la que en la actualidad presenta las mayores ventajas, por lo que en este trabajo se hará especial énfasis a esta tecnología.

2.5.1 Iluminación LED

La iluminación LED ha revolucionado el mundo de la iluminación con sus numerosas ventajas. Estas luces son conocidas por su excepcional durabilidad y vida útil, superando con creces a las tecnologías tradicionales como las lámparas incandescentes o fluorescentes. Además de su longevidad, las luces LED son altamente eficientes, convirtiendo una gran parte de la energía en luz en lugar de calor, lo que no solo reduce el consumo de energía, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. La posibilidad de regulación permite adaptar la intensidad lumínica a las necesidades específicas, ofreciendo un control total sobre la iluminación. Con una amplia gama de colores disponibles, desde tonos cálidos hasta fríos, las luces LED proporcionan flexibilidad en el diseño de iluminación, permitiendo crear ambientes atractivos y funcionales en una variedad de aplicaciones, hogares, espacios públicos, comercios, instalaciones deportivas, etc.

2.5.2 Diagrama polar de intensidad luminosa

Para representar la intensidad luminosa emitida por una luminaria de manera tridimensional esta se suele hacer mediante un sólido fotométrico tal y como se indica en la Figura 2-19 [61]. Este sólido indica cómo se dispersa la luz en diferentes direcciones y ángulos desde la luminaria, proporcionando por tanto información sobre la distribución espacial de la luz.

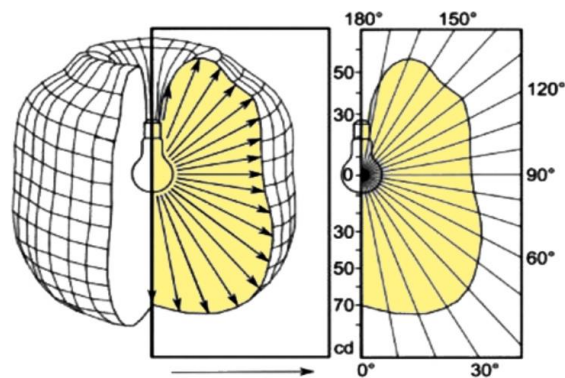


Figura 2-19 Sólido fotométrico y su sección en dos dimensiones [62]

Los diagramas polares (Figura 2-20) de intensidad luminosa sirven para entender la distribución de la intensidad luminosa de una determinada luminaria de manera visual. Existen muchos tipos de diagramas polares, pero los más utilizados constan de una retícula numerada en grados y candelas y dos figuras geométricas, una roja y otra azul. Estas figuras son el resultado de cortar el sólido fotométrico mediante un plano con determinado ángulo, indicado en la leyenda del gráfico sobre la luminaria en cuestión. Si el diagrama no presenta leyenda se puede asumir que la figura roja representa el plano 0°-180°, mientras que la azul es el plano perpendicular a este, 90°-270° [63].

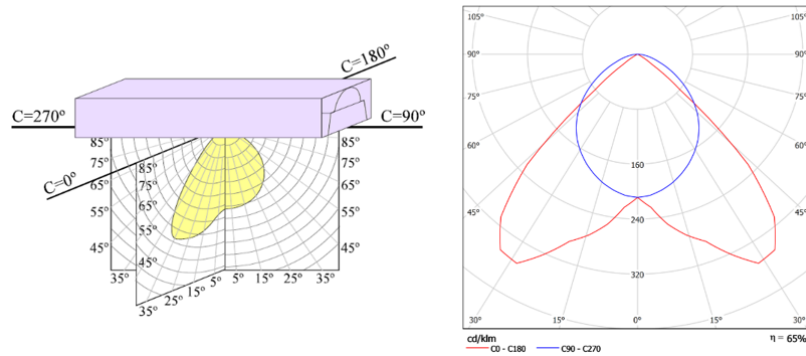


Figura 2-20 Representación de la luminaria y su diagrama polar de intensidad luminosa [63]

2.6 Simulación lumínica

Los programas de simulación lumínica, como pueden ser Relux o el utilizado en este trabajo, DIALux evo, son programas destinados a la arquitectura, la ingeniería o el diseño de interiores. Sus características principales son la representación gráfica, precisa y numérica, a la par que una interfaz sencilla de utilizar. En el caso de DIALux, que el software sea gratuito genera que tenga una comunidad activa a la hora de reportar bugs y solucionar posibles problemas de los usuarios, pero el equipo de desarrollo no realiza tantas actualizaciones como en otros programas de pago.

En el caso de DIALux, el programa realiza los cálculos de iluminancia y luminancia mediante “lanzamiento de fotones” (*photon shooting* en inglés), este método se basa en la emisión de fotones desde las luminarias. Estos fotones llegan a las diferentes superficies y, dependiendo del material de esta, pueden ser absorbidos o transmitidos al resto en diferentes porcentajes. Estas superficies son posteriormente analizadas para determinar la iluminancia y la luminancia teniendo en cuenta el número de fotones y la energía que contienen.

La parte positiva de este método es que es la representación más fiel de cómo se propaga la luz en la realidad, mientras que la parte negativa es que para hacer simulaciones más precisas estas conllevan mayor número de lanzamiento de fotones. Los ordenadores no son capaces de procesar números de fotones similares a los de la realidad, por lo que al verse reducido este número, las superficies más pequeñas reciben menos fotones y los cálculos sobre ellas tienen menor precisión [64].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del apartado

En este apartado se cubrirá la parte principal del trabajo: cómo se han obtenido los datos y cómo se ha representado la escena en DIALux para el posterior estudio de las mediciones actuales y sus posibles alternativas, de acuerdo con el siguiente diagrama (Figura 3-1).

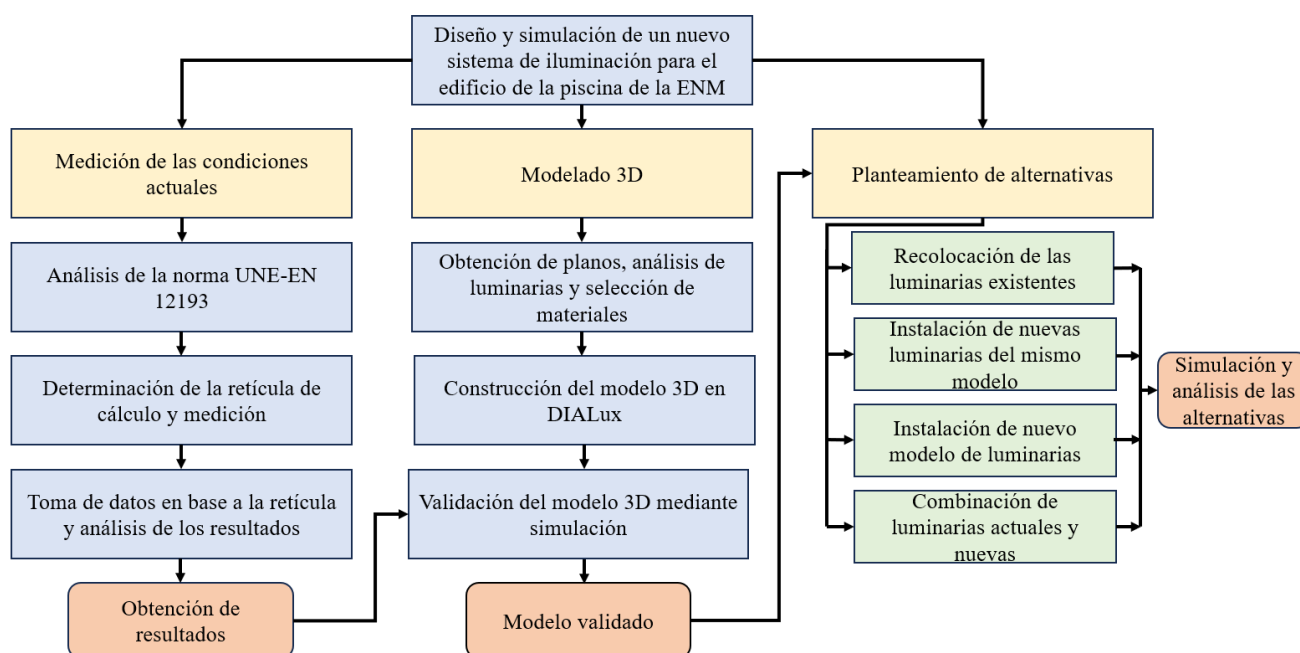


Figura 3-1 Diagrama de la metodología llevada a cabo

La metodología seguida en este trabajo y definida en el diagrama de la Figura 3-1 consta de tres etapas: la medición de las condiciones actuales de iluminación en la piscina, el modelado de la escena y el diseño de alternativas para la mejora del sistema de iluminación.

Medición de las condiciones actuales: atendiendo los requisitos de iluminación expresados en la norma UNE-EN 12193 y la forma obtener las mediciones expresada también en ella, se utilizará para analizar la situación lumínica actual de la piscina.

Mediante el software DIALux evo y gracias a los planos del edificio conseguidos se elaborará un modelo 3D lo más próximo a la realidad posible, teniendo en cuenta tanto los materiales de los que está hecho como las luminarias instaladas en la actualidad.

Una vez se hayan completado estas líneas y se compruebe la fiabilidad del modelo 3D al simular en él la situación actual y conseguir datos similares a los experimentales, se procederá con la parte final, la de proponer y analizar diferentes alternativas. Esta es la última parte del desarrollo del trabajo. En ella, atendiendo a los resultados obtenidos mediante la medición de las condiciones actuales y la comprobación del cumplimiento de la normativa, se plantearán diferentes combinaciones y modelos de luminarias y se simulará su comportamiento para tener una aproximación certera de los resultados que se obtendrían en la realidad.

3.2 Descripción del edificio

La piscina se sitúa en el interior del “Gimnasio Guardiamarina Barrutia” (Figura 3-2), nombrado en honor al Guardiamarina Antonio Hermenegildo de Barrutia, el primer Guardiamarina muerto en acto de servicio al enfrentarse su navío en el año 1718 contra tres navíos holandeses en las proximidades del Cabo de Gata [65]. El gimnasio se encuentra en el sur de la ENM, ubicada desde 1943 en Marín [66], un municipio situado en la costa noroeste de España, en la provincia de Pontevedra, Galicia.

La ENM se trasladó a su ubicación actual en el año 1943, ocupando las instalaciones de lo que era conocido como el Polígono de Tiro y Artillería Naval Jaime Janer [67].



Figura 3-2 Vista aérea de Galicia, Marín la ENM y el “Gimnasio Guardiamarina Barrutia”, donde se encuentra la piscina

El edificio objeto de estudio es el que alberga la piscina de ENM. El vaso de la piscina (representada en la Figura 3-3) es de 33,4 m de largo por 16,1 m de ancho, dispone de 8 calles para practicar la natación, así como de un trampolín de 5,9 m de altura desde el que los alumnos del cuerpo de Infantería de Marina tienen que saltar anualmente ataviados con su equipo completo para realizar su “prueba de aguas” y poder progresar de curso, también dispone de dos gradas situadas en los laterales, una grada superior y una zona de vestuarios situada detrás del trampolín.

La piscina es usada durante todo el día. Por las mañanas, el personal de la ENM y los profesores del centro universitario de la defensa (CUD) pueden hacer uso de ella. En las horas destinadas para el deporte de los alumnos⁷, entrena el equipo de natación y los alumnos que tengan estipulado usarla ese

⁷ 12:15-14:00

día, mientras que, por las tardes, diversos equipos de waterpolo y natación de la comarca de Pontevedra y el Morrazo utilizan las instalaciones.



Figura 3-3. Prueba de natación en la piscina de la ENM [68]

Actualmente la piscina cuenta con 20 focos LED del modelo Disano Fosnova Sevilla 3 (Figura 3-4) colocados en parejas en cada una de las 10 columnas existentes. Las principales características de este foco se detallan en la Tabla 3-1.

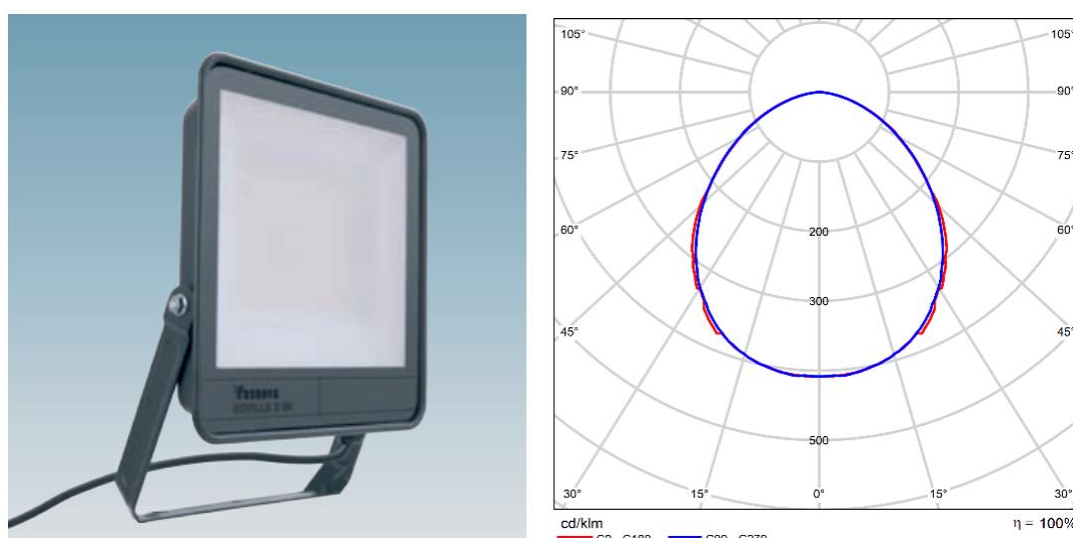


Figura 3-4 Foco Disano Fosnova Sevilla 3 y su diagrama polar [69]

Las luminarias se encuentran colocadas en parejas sobre las columnas, a 4,9 m de altura sobre el agua, abiertas hacia fuera entre ellas 5° y con una inclinación de 49° grados sobre la horizontal.

Al analizar la curva polar de esta luminaria (Figura 3-4) se observa que se trata de un foco simétrico y de iluminación directa (Figura 2-8). Presentan la ventaja de que iluminan por igual en todo su alcance, pero han de situarse con grandes grados de inclinación respecto a la normal de la superficie para no iluminar zonas no deseadas.

Disano Fosnova Sevilla 3	
Tipo	LED
Alimentación	220 – 240 V
Flujo luminoso	9.900 lm
Grados de apertura	100°
Temperatura de color	4000 K
Vida	50.000 horas
Temperatura de funcionamiento	-30°C - 40°C
Potencia	90 W
IRC	80
Eficiencia luminosa	110 lm/W
Precio	47 €

Tabla 3-1 Principales características del foco Disano Fosnova Sevilla 3

3.3 Medición de la iluminancia

Para la realización del trabajo es fundamental conocer la situación lumínica actual del edificio. Para ello, se deben realizar mediciones acordes a lo indicado en la norma UNE-EN 12193 “Iluminación de instalaciones deportivas”.

3.3.1 Equipo empleado

Para la toma de medidas de iluminancia se ha precisado el uso de un luxómetro, en este caso el modelo PCE-174 (Figura 3-5), cuyas principales características vienen detalladas en la Tabla 3-2.

El luxómetro funciona mediante una célula fotoeléctrica situada en el fotorreceptor que capta la luz y la transforma en impulsos eléctricos. Las medidas son interpretadas por el lector y convertidas a los valores de iluminancia que muestra en pantalla.

Los primeros medidores de luz fueron inventados para uso fotográfico a finales del siglo XIV y se componían de papeles que se oscurecían al ser expuestos a la luz, viendo cuando tardaban en oscurecerse se podía determinar la cantidad de luz que incidía en su superficie [70]. Actualmente, los luxómetros y otros medidores de luz se utilizan en la construcción, así como en el cine y la fotografía para asegurar que las condiciones de trabajo van a ser óptimas.



Figura 3-5 Luxómetro PCE-174

PCE - 174

Rango	0 – 400 klux
Alimentación	Batería de 9 V
Memoria	16.000 valores
Actualización de valores	Cada 0,67 s
Precisión	± 5 % del valor de medición <10.000 lux ±10 % del valor de medición >10.000 lux

Tabla 3-2 Características técnicas del luxómetro PCE – 174

3.3.2 Metodología de medición

En la norma UNE-EN 12193 se establece un procedimiento de medición para determinar magnitudes fotométricas de forma experimental. Las mediciones se deben realizar con el equipo adecuado y en base a una retícula de cálculo, cuyo tamaño está condicionado por diversos factores como el área de la zona deportiva a analizar, la geometría de dicha instalación deportiva, la distribución de las luminarias o incluso el nivel de precisión deseado. Aunque la relación entre estas variables es compleja, en la norma citada se indica que el tamaño máximo de cuadrícula se puede estimar mediante la Ecuación (14).

$$p = 0,2 \times 5^{\log_{10} d} \quad (14)$$

Una vez determinado el valor máximo, el número de puntos en la dimensión más larga de la retícula viene dado por el número entero impar más próximo a la relación $\frac{d}{p}$. Teniendo en cuenta las dimensiones del vaso de la piscina, el número de puntos en esta dimensión se aproxima a 15.

Habiendo obtenido que el largo de la piscina se divide en 15 puntos, se puede determinar fácilmente que los puntos en el lado largo de la retícula estarán separados 2,227 m.

Para tratar de mantener la relación entre las dimensiones de cada celda de la cuadrícula próxima a 1, la separación calculada se emplea para determinar el número de puntos en la dimensión

más corta de la retícula. En este caso, si se repite la división $\frac{d}{p}$ pero esta vez tomando p como 2,227 m, se obtiene que la retícula estará formada por 7 puntos en su dimensión más corta, con una separación de 2,3 m entre ellos.

Los cálculos detallados anteriormente se refieren a la retícula de cálculo que la normativa establece que se debe considerar, pero esta norma también contempla que las mediciones se pueden realizar en una retícula simplificada. De esta forma, se puede construir una retícula de medición en la que se elimina uno de cada dos puntos de cálculo. Siguiendo estas directrices, la dimensión más larga de la piscina en la retícula de medición se dividiría en 8 puntos, separados 4,453 m entre sí, y la dimensión más corta en 4 puntos, separados 4,6 m entre sí. En la Figura 3-2 se especifican los puntos que forman parte de la retícula de medición, representados por un círculo, y los puntos que forman parte de la retícula de cálculo, representados por una cruz.

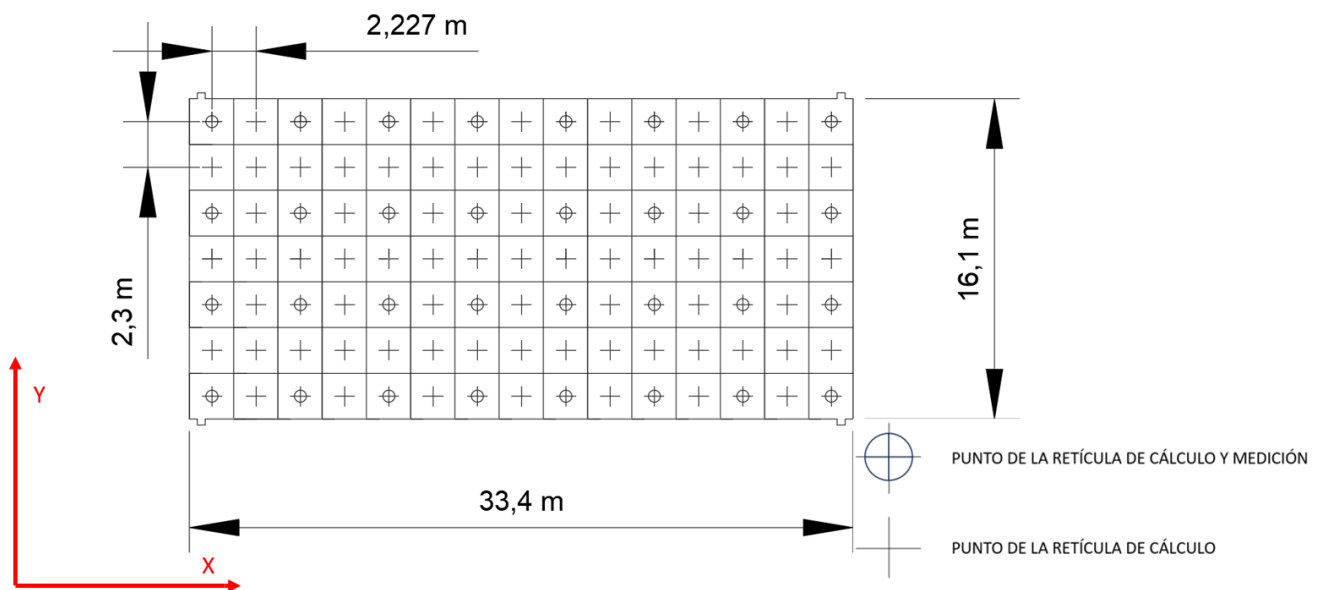


Figura 3-6 Retícula de cálculo sobre la piscina

En definitiva, es en los puntos rodeados por un círculo en la Figura 3-6 en donde se procede a hacer las mediciones mediante un luxómetro para determinar el nivel de iluminancia en la zona de interés.

Para llevar a cabo este procedimiento de medición y tomar datos en los puntos señalados de la retícula de medición, se marcaron una serie de puntos de referencia con conos a lo largo y ancho de la piscina, tal y como se representa en la Figura 3-7, de forma que las medidas se toman en los puntos de intersección de los puntos de referencia marcados.

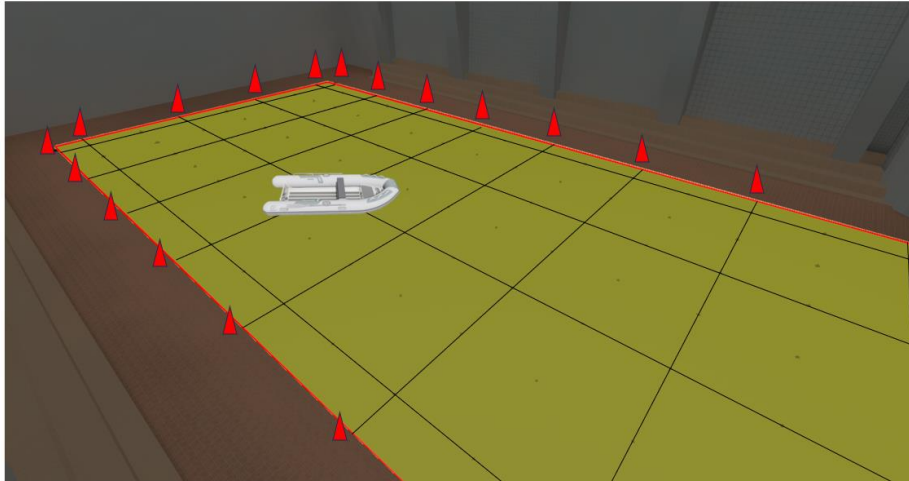


Figura 3-7 Intersección en uno de los puntos para la recogida de datos

El luxómetro fue llevado a una lancha hinchable, y, con la ayuda de un compañero, se fue llevando a cada uno de los 32 puntos en los que según la normativa era necesario tomar medidas. A la hora de tomar medidas se tuvo especial cuidado con colocar el luxómetro lo más pegado a la superficie de medición posible, el vaso de la piscina, e intentar mantener al menos un metro de distancia para evitar reflejos que pudiesen alterar los datos, para esto se procuró además vestir lo más oscuro posible (Figura 3-8).

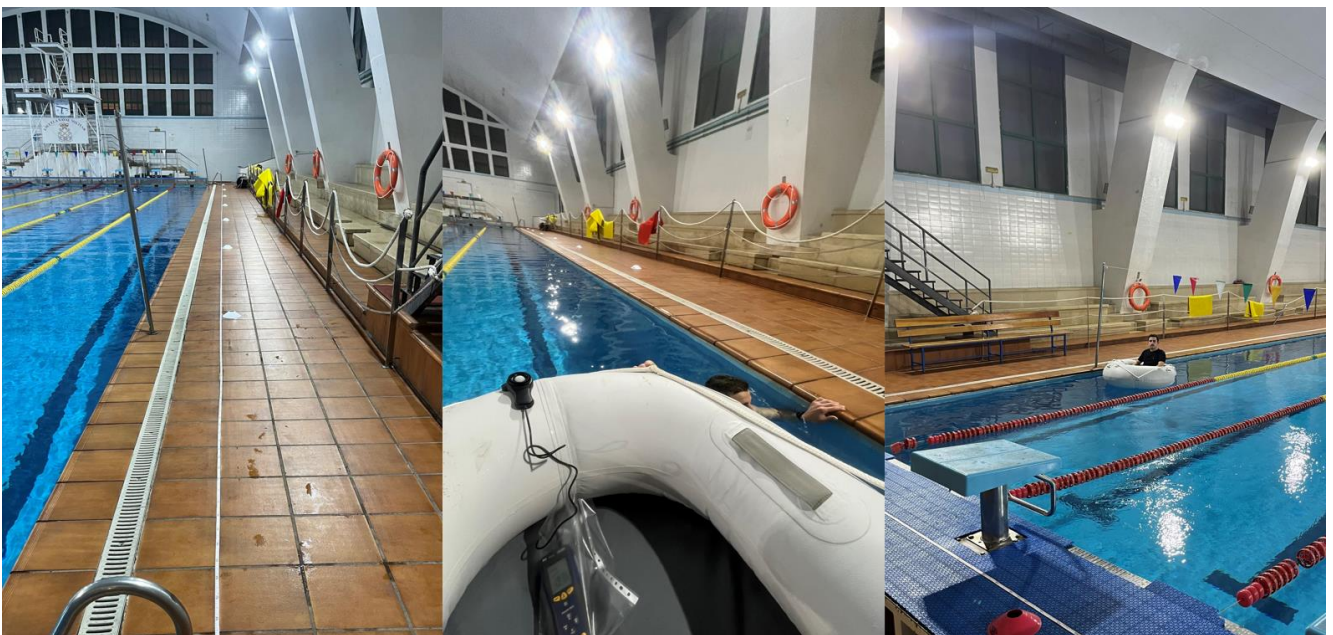


Figura 3-8 Proceso de toma de datos en la piscina

3.4 Modelado 3D

Una de las principales herramientas de este trabajo ha sido el modelado 3D del edificio de la piscina mediante el software DIALux.

3.4.1 Obtención de planos

Para poder realizar el modelado 3D de la manera más precisa posible se ha recurrido a la oficina de mantenimiento de la ENM, la cual alberga el archivo con los planos de las instalaciones de esta y todas las obras y modificaciones que han sufrido. Gracias a los planos como los representados en la

Figura 3-9 y la Figura 3-10 se han podido obtener todas las medidas de la mayoría de los elementos del edificio: vaso de la piscina, altura de las gradas, distancia entre ventanas, etc.

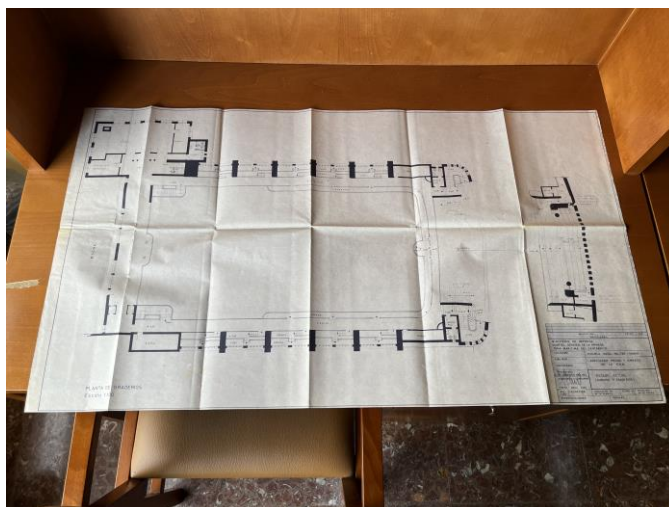


Figura 3-9 Plano del gimnasio de la ENM en papel

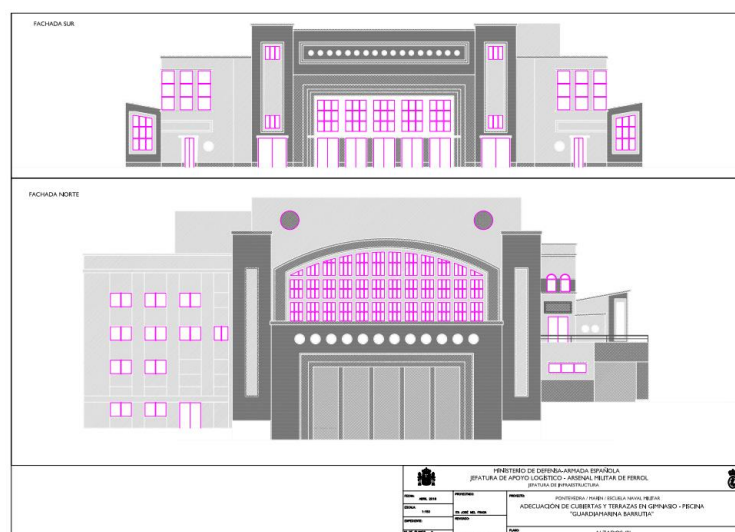


Figura 3-10 Plano del alzado exterior del Gimnasio Guardamarina Barrutia en versión digital

Tras una corta búsqueda, siempre ayudado por el atento personal, se localizaron los planos referentes al edificio de la piscina. Algunos de estos planos se encontraban digitalizados (Figura 3-10), lo cual facilitó el trabajo de obtención de las medidas.

3.4.2 Representación de los planos en AutoCAD

Una vez obtenidos los planos el siguiente paso fue la representación 2D del edificio en el programa informático AutoCAD. Para ello se descargó el software mediante la licencia que proporciona la Universidad de Vigo a sus alumnos.

Atendiendo a la escala del plano y midiendo sobre el papel se obtuvieron las medidas del contorno exterior del edificio y se procedió a dibujarlo tal y como se puede ver en la Figura 3-11.

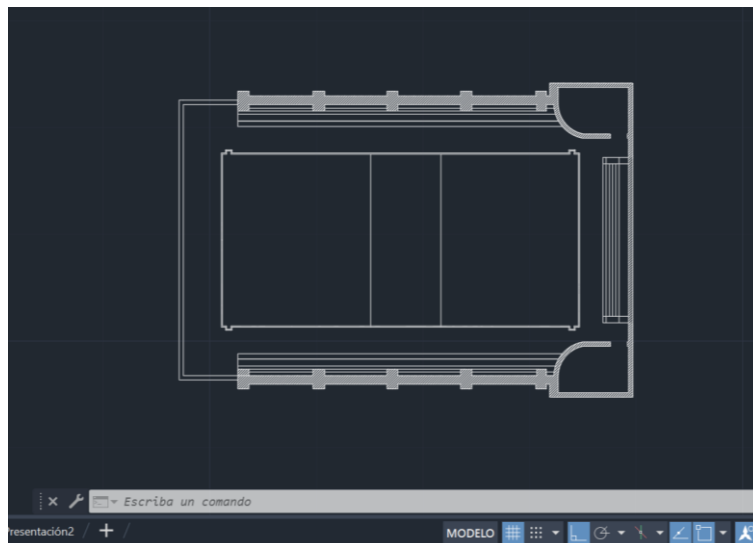


Figura 3-11 Contorno exterior del edificio realizado en AutoCAD

3.4.3 Importación de los planos a DIALux evo

Una de las funcionalidades del software DIALux evo es la importación de archivos DWG, común en los programas de dibujo computarizado como AutoCAD. Con esta funcionalidad se pueden emplear planos bidimensionales para utilizarlos como soporte a la hora de trabajar en 3D. En este trabajo se utiliza este plano como plantilla, tal y como se observa en la Figura 3-12, para levantar el modelado en tres dimensiones.

El programa reconoce las líneas del plano y permite ajustar las dimensiones de los elementos hasta que coincidan con ellas.

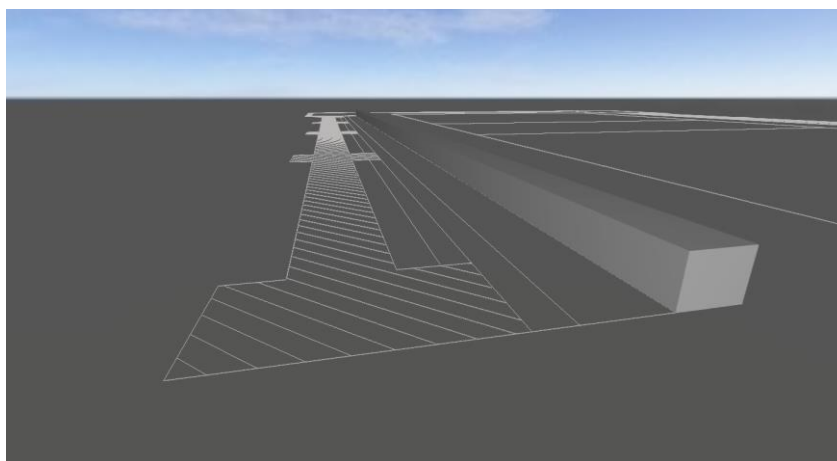


Figura 3-12 Plano bidimensional como plantilla y elementos en 3D

Para la importación de los planos se utilizó la herramienta que ofrece DIALux “Plan de importación”, cuando se selecciona esta herramienta se abre el explorador de archivos del ordenador, tal y como se puede observar en la Figura 3-13, dejando elegir al usuario archivos de planos como pueden ser aquellos con la extensión IFC, DXF o en este caso los generados por el programa usado previamente AutoCAD, archivos DWG.

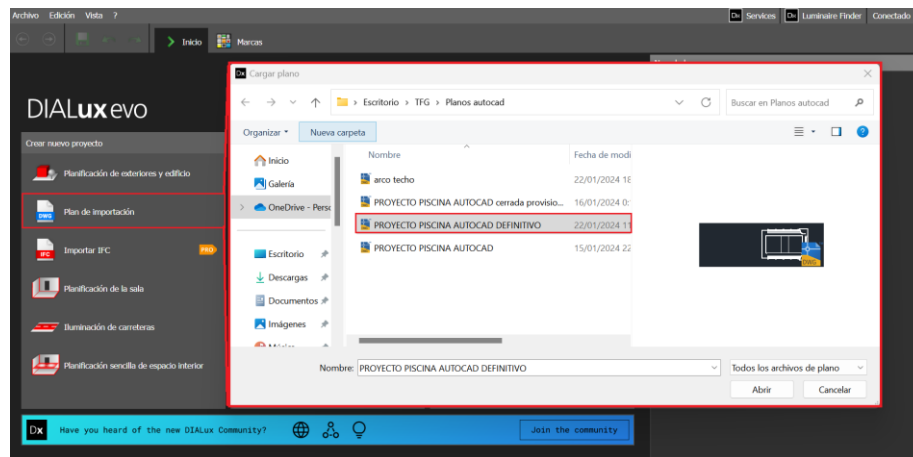


Figura 3-13 Selección del plano en DIALux evo

3.4.4 Construcción del modelo

Tras ser importado el plano es necesario establecer los ejes y la medida de algún elemento conocido, a fin de que sea posible establecer una escala para mantener las proporciones de los demás elementos constructivos. El programa ofrece una fácil solución a esto mediante dos menús desplegables, representados en la Figura 3-14, que permiten al usuario establecerlos de manera sencilla.

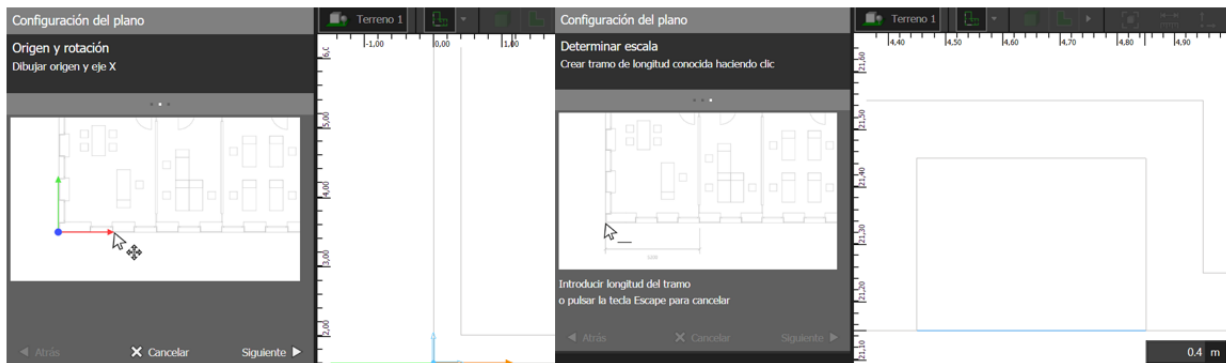


Figura 3-14 Establecimiento de eje de referencia y escala

Tras establecer ejes y escala, el usuario tiene la oportunidad de dibujar un nuevo edificio en el menú "Terreno", en el que se tendrán que delimitar los bordes exteriores y la altura interior del mismo (el techo), como se muestra en la Figura 3-15.

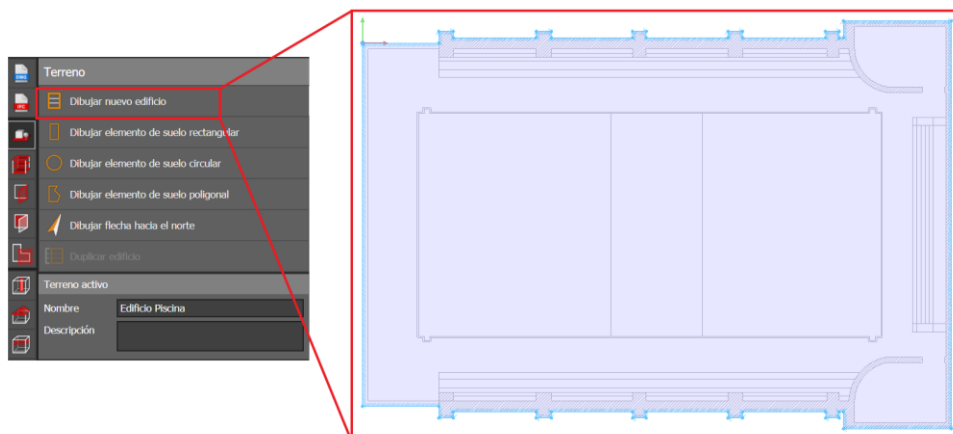


Figura 3-15 Menú de construcción y edificio con los límites ya establecidos

Una vez el usuario haya delimitado el límite exterior del edificio, el programa ofrece la posibilidad de delimitar el interior de la misma manera que se ha hecho con el exterior. Una vez completado este paso, todo lo que se encuentre entre el exterior y el interior se convertirá en el muro del edificio, quedando el edificio cerrado como se muestra en la Figura 3-16.

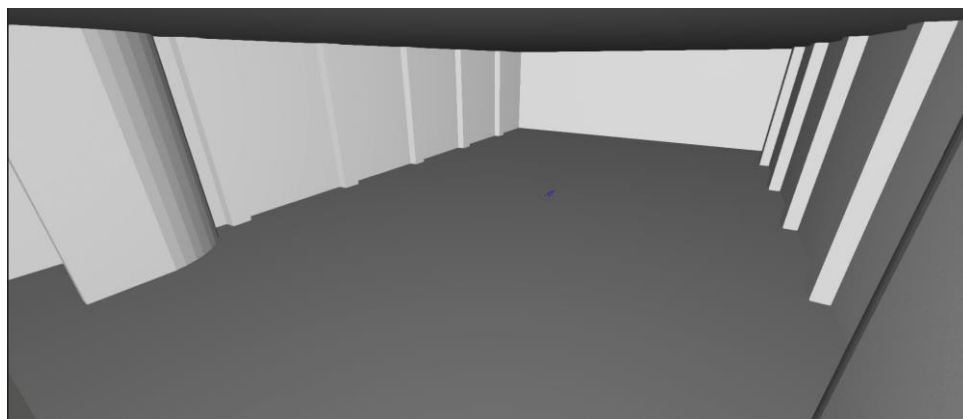


Figura 3-16 Vista interior del edificio realizado con DIALux

Una vez establecidos los límites, se deberán añadir el resto de los elementos constructivos que posee la piscina, como las gradas inferiores, la grada superior, las ventanas o el trampolín. Esto se hará con la finalidad de obtener un modelado lo más preciso posible y dar credibilidad a los resultados obtenidos en las simulaciones. Cualquiera de estos elementos puede generar zonas de sombra o reflejos que afecten a los resultados.

Al inicio del trabajo se valoró la posibilidad de emplear un modelo simplificado, omitiendo en la etapa de modelado del edificio ciertos elementos constructivos como las gradas o el trampolín. En la Figura 3-17 se muestra gráficamente la diferencia entre el modelo completo y el modelo simplificado. Para analizar la viabilidad de este procedimiento se llevó a cabo un análisis preliminar de resultados simulando ambos modelos con la misma disposición de luminarias. Los resultados obtenidos en cada caso para la uniformidad y la iluminancia media se detallan en la Tabla 3-3, mientras que en la Figura 3-18 se pueden apreciar las diferencias en la distribución de iluminancias en la superficie de la piscina para cada modelo.

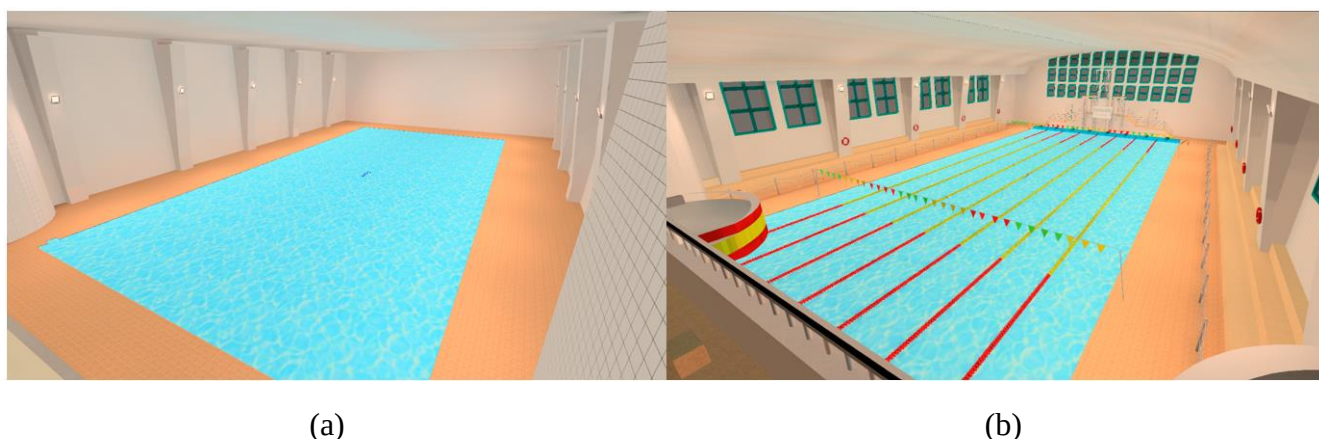


Figura 3-17 Modelo simplificado (a) y modelo completo incluyendo todos los elementos de la escena (b)

	Modelo simplificado	Modelo completo
<i>Ehor Ave</i>	179 lx	164 lx
<i>U2hor</i>	0,68	0,63

Tabla 3-3 Resultados obtenidos con el modelo simplificado y el modelo completo para la uniformidad y la iluminancia media

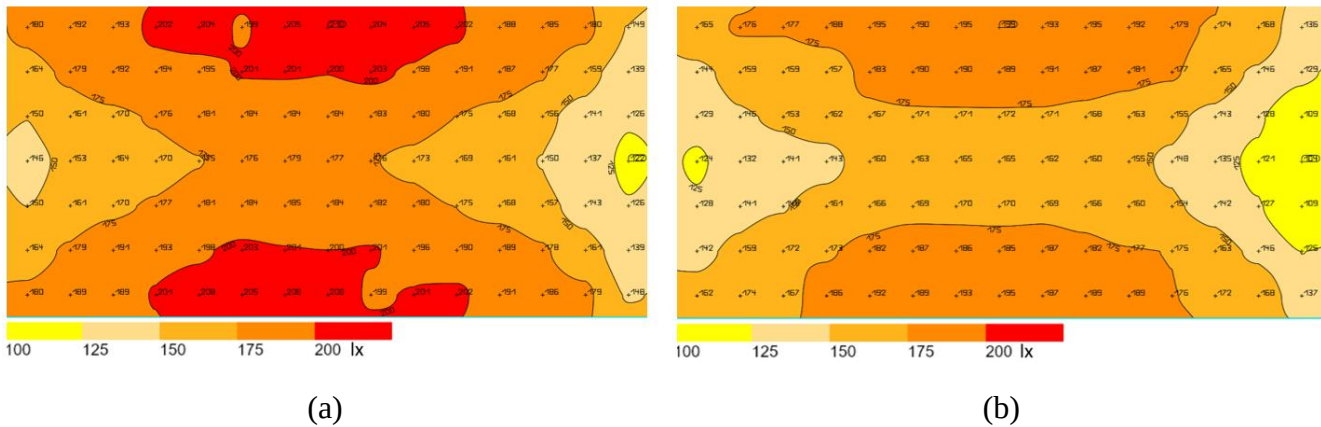


Figura 3-18 Mapas de iluminancias obtenidos con el modelo simplificado (a) y el modelo completo (b)

En ambos casos la disposición de las luminarias es la misma, pero como se puede comprobar la iluminancia horizontal media y la uniformidad mínima a media son diferentes. Como se ha mencionado previamente cualquier elemento puede alterar los resultados. Una de las principales causas de esta diferencia en los resultados es la existencia de ventanas en el modelo definitivo, al llegar la luz reflejada en otras superficies hacia las ventanas, se produce la refracción de esta hacia el exterior mediante el vidrio, en el modelo simplificado la luz se refleja en otras superficies y se vuelve a reflejar en la pared, que actúa como otro foco.

Por otra parte, si se comparan los mapas de iluminancia de los dos modelos (Figura 3-18) se puede observar que la mayor diferencia de luxes entre los dos modelos coincide con la zona del trampolín y la grada superior. Esta diferencia pronunciada en las dos partes apoya la teoría de que los elementos adicionales generan zonas de sombra.

Para añadir todos los elementos y conseguir un modelo fiable, DIALux cuenta con diferentes herramientas dependiendo de lo que se desee añadir.

Mediante la herramienta “Elementos del ambiente” se puede añadir cualquier forma geométrica y modificar tanto sus medidas como su posición respecto al eje de coordenadas que fue seleccionado al importar los planos. En este caso esta herramienta se utilizó para las gradas (Figura 3-19), columnas (Figura 3-20), escaleras, etc.

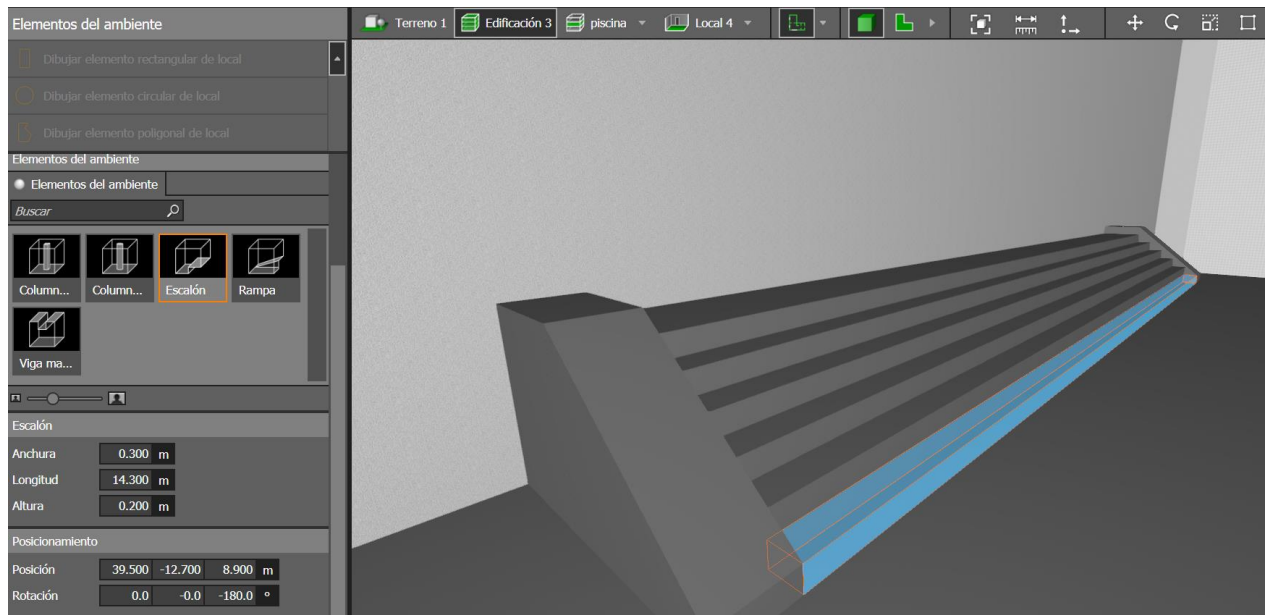


Figura 3-19 Menú de la herramienta “Elementos del ambiente”

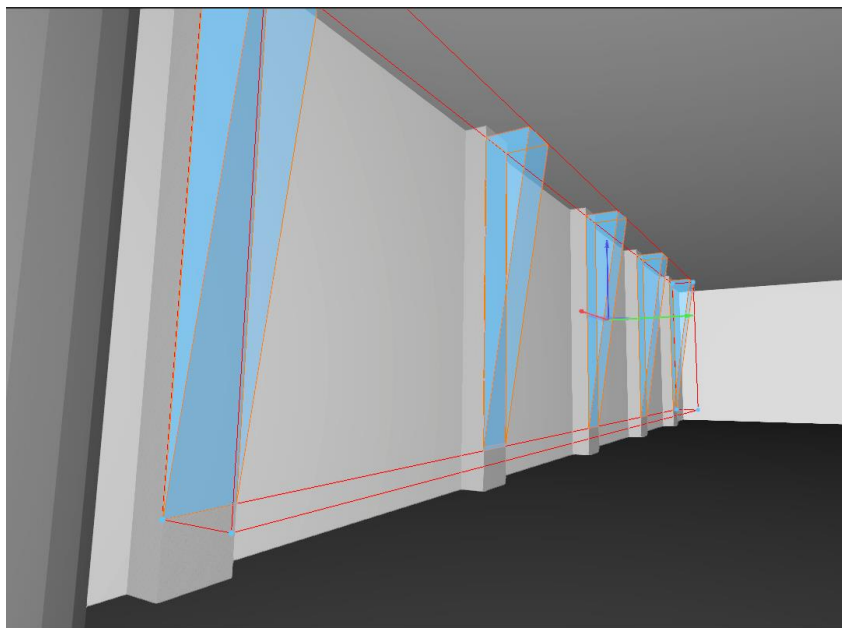


Figura 3-20 Columnas en rampa añadidas mediante la herramienta “Elementos del ambiente”

Tras añadir estos elementos se procedió con la elaboración del vaso de la piscina, para ello se utiliza la herramienta “Recorte” (Figura 3-21), y atendiendo a la profundidad de esta representada en los planos, se determinaron tres zonas con tres alturas diferentes, siendo estas visibles en la Figura 3-22.

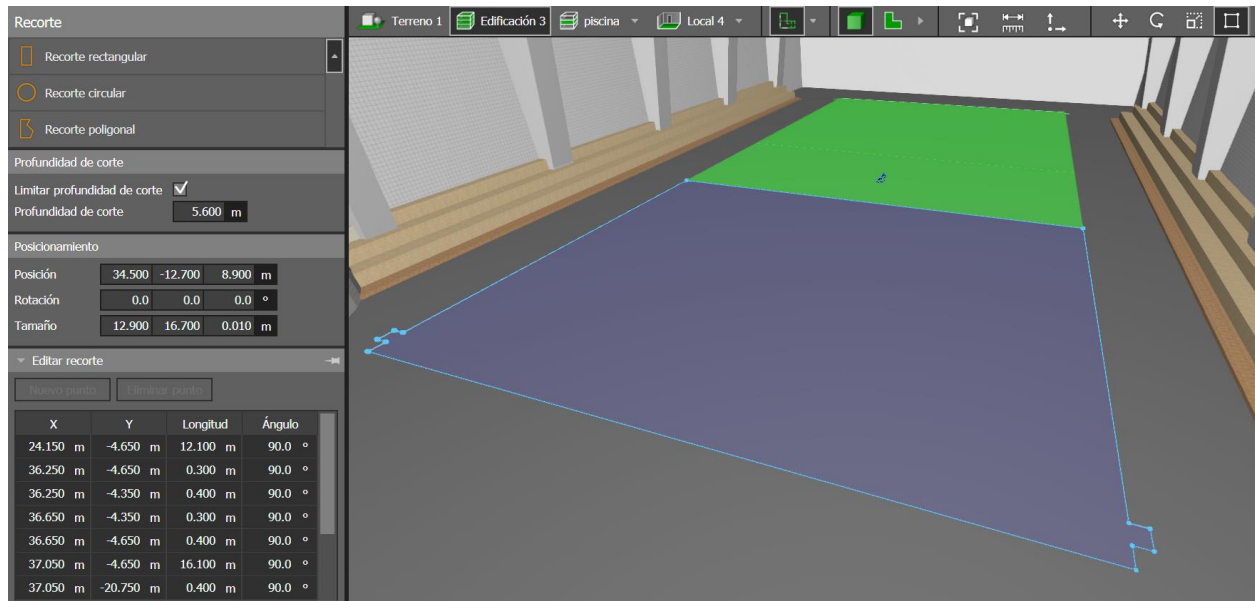


Figura 3-21 Menú de la herramienta “Recorte”

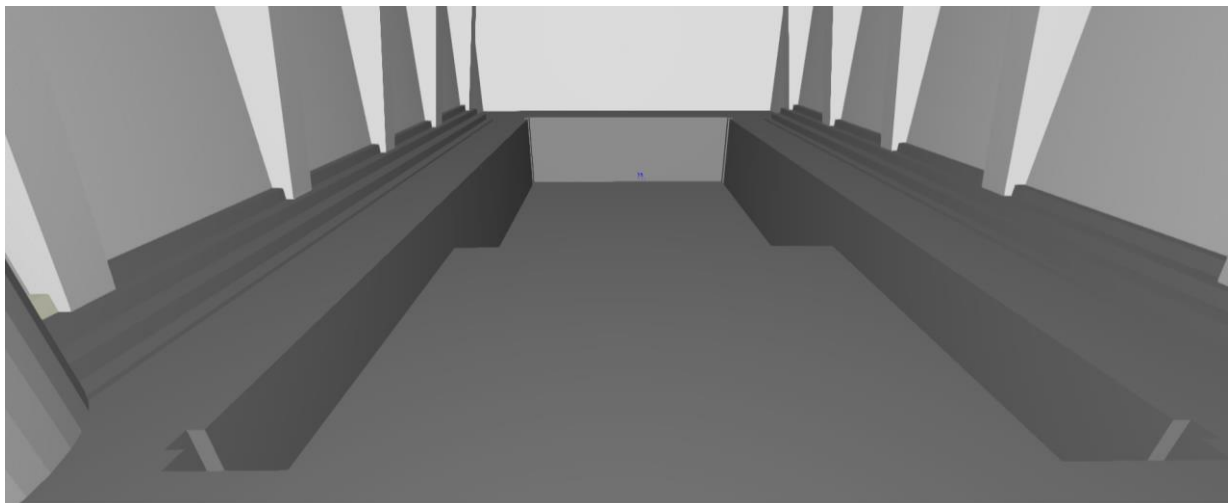


Figura 3-22 Piscina vacía

3.4.1 Retícula de cálculo y medición

Para poder realizar las simulaciones de luminosidad en DIALux de manera satisfactoria, se deberá indicar al programa qué datos se quieren visualizar y en qué zona se quieren realizar las mediciones. El programa mostrará los resultados que se hayan seleccionado (Figura 3-23), pudiendo el usuario elegir entre diferentes parámetros, como pueden ser la intensidad lumínica vertical, intensidad lumínica hemisférica, etc. (Figura 3-24).

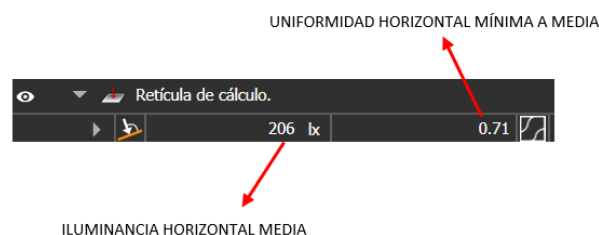


Figura 3-23 Parámetros seleccionados para mostrar en DIALux



Figura 3-24 Parámetros de cálculo disponibles en DIALux

Una vez seleccionados los parámetros adecuados, en este caso intensidad lumínica horizontal o iluminancia perpendicular y uniformidad, se deberá seleccionar la superficie de cálculo. En este caso concreto la superficie de cálculo se colocará sobre el vaso de la piscina, al nivel del agua. Cuando se delimite la zona mediante la herramienta “Dibujar objeto de cálculo rectangular” el programa trazará una cuadrícula de cálculo predeterminada (Figura 3-25).

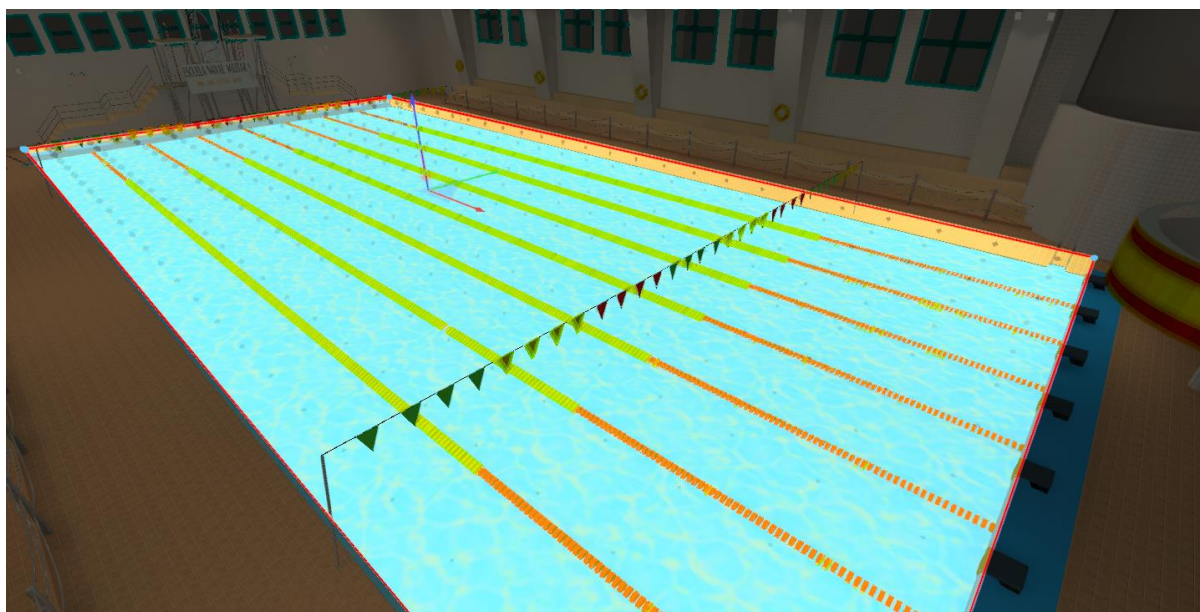


Figura 3-25 Cuadrícula de cálculo predeterminada

Para transformar la cuadrícula de cálculo predeterminada en la cuadrícula de cálculo y medición acordada en el apartado 3.3.2, DIALux ofrece diferentes maneras de modificar la trama. Tal y como se puede apreciar en la Figura 3-26, la cuadrícula se puede determinar de tres maneras diferentes: de manera automática, modificando la cantidad de puntos o su separación.

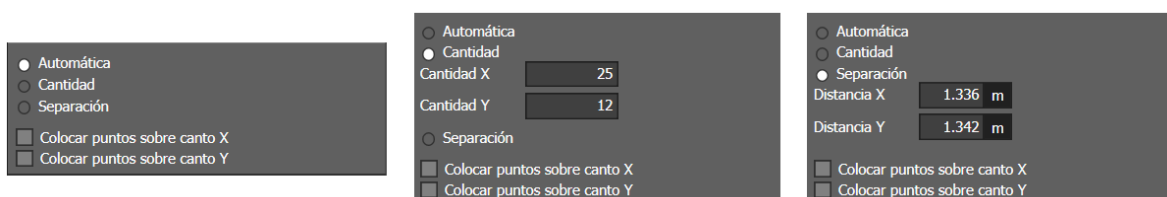


Figura 3-26 Configuración de la trama de medición

La cuadrícula automática se coloca según la norma que DIALux tenga configurada por defecto en la configuración del programa (Figura 3-27). En este caso, el programa detecta como predeterminada la norma UNE-EN 12464-1:2021 “Luz e iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo”, por lo que no es de aplicación al ámbito de estudio y requiere de una configuración manual de la retícula de cálculo.

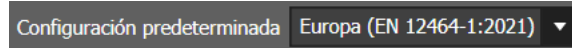


Figura 3-27 Configuración de norma predeterminada en DIALux

Para los análisis que se llevan a cabo en este trabajo se emplean tanto la retícula de cálculo como la de medición, por lo que será necesario modificar los parámetros de configuración atendiendo a las necesidades de cada caso. Para la validación del modelo se utilizará la retícula de medición establecida en el apartado 3.3.2, de modo que sea posible comparar los resultados obtenidos de la simulación con los datos recogidos de forma experimental. Para ello se configurará la trama según la separación calculada, estando los puntos separados en el eje X 4,453 m y en el eje Y 4,6 m.

Para el resto de pruebas y simulaciones que se van a realizar para comprobar el comportamiento de nuevas configuraciones y sistemas de iluminación, se utilizará la retícula de cálculo, con 15 puntos de cálculo en el eje X separados 2,227 m y 7 puntos en el eje Y separados 2,3 m.

3.4.2 Elección de materiales

Para que la simulación funcione correctamente es importante que los materiales de las diferentes superficies sean elegidos de la manera más fiel posible a la realidad. Teniendo en cuenta cómo se comporta la luz cuando incide sobre las superficies, es de gran relevancia no solo el color del material escogido sino también el acabado y textura de este. Los materiales más oscuros absorben una mayor cantidad de luz, por lo que una escena con este tipo de materiales requerirá de más iluminación que otra con materiales más claros, en los que se refleja más la luz. A su vez, el acabado del material influye en la interacción de la luz con la superficie, dado que superficies lisas producen una reflexión más especular y predecible y las rugosas una reflexión más difusa e impredecible.

Para analizar la influencia de los materiales en la simulación concreta del caso de estudio se han realizado una serie de ensayos. Uno de estos ensayos consistió en utilizar la versión simplificada del modelo final representado previamente en la Figura 3-17 (a) y volver a poner los materiales predeterminados que ofrece DIALux al crear el modelo (Figura 3-28 (b)), si comparamos ahora los dos mapas de iluminancias obtenidos (Figura 3-29) y los resultados obtenidos en las mismas (Tabla 3-4), podemos observar que estos son diferentes.

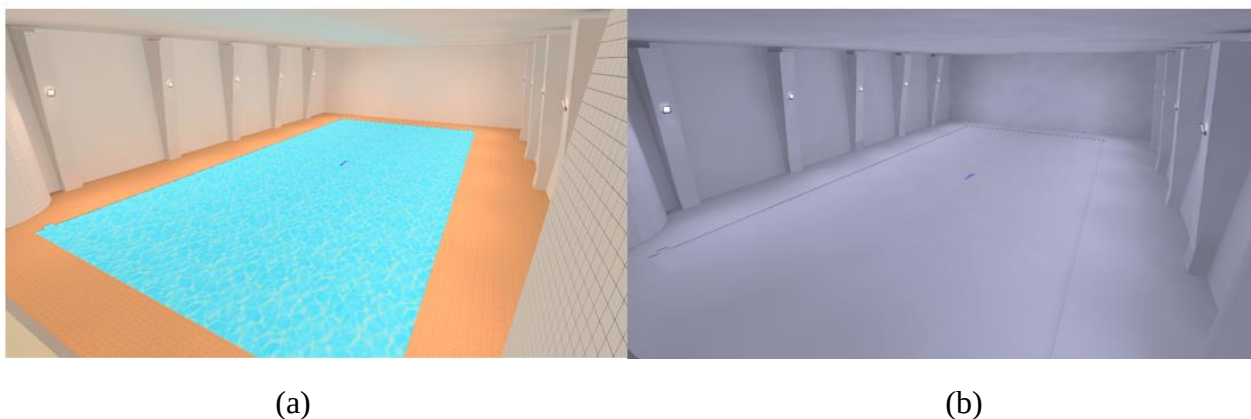


Figura 3-28 Modelo simplificado con materiales seleccionados (a) y modelo simplificado con materiales predeterminados (b)

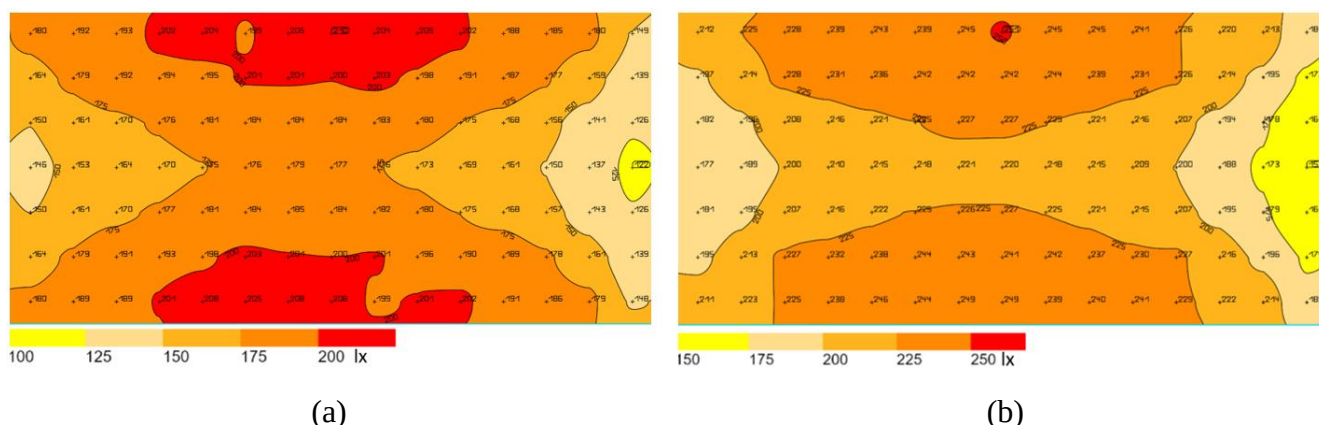


Figura 3-29 Mapa de iluminancias en el modelo simplificado con materiales seleccionados (a) y modelo simplificado con materiales predeterminados (b)

	Modelo simplificado (a)	Modelo simplificado (b)
<i>Ehor Ave</i>	179 lx	217 lx
<i>U2hor</i>	0,68	0,72

Tabla 3-4 Resultados obtenidos en los modelos simplificado (a) y (b)

La diferencia en los resultados entre estos dos modelos se debe a que cada material tiene unos valores de reflexión y reflejo diferentes en DIALux, tal y como se muestra en la Figura 3-30. Con el grado de reflexión DIALux cuantifica que porcentaje de luz incidente que es reflejada en una superficie, mientras que el reflejo indica el porcentaje de especularidad de esta, siendo 100% una superficie completamente especular y 0% una superficie difusa. Ambas propiedades alteran el resultado final a la hora de realizar la simulación. Las mayores diferencias entre los dos mapas de iluminancias se dan en el centro de la piscina, donde la incidencia de la luz reflejada es mayor. En el caso de los materiales que presenten refracción, se indicará mediante un factor, explicado en el apartado 2.4.3.

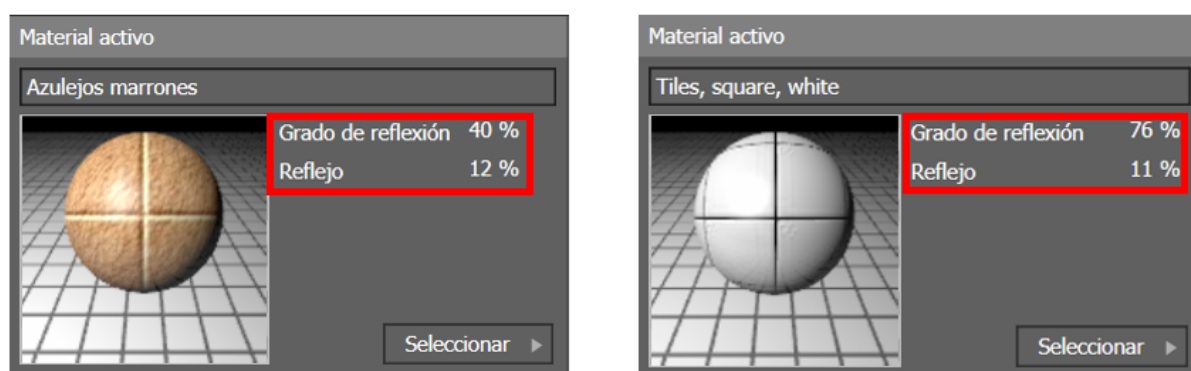


Figura 3-30 Captura de DIALux mostrando diferentes porcentajes de reflexión y reflejo para dos materiales diferentes

A la hora de elegir los materiales se dispone de varias opciones:

- Catálogo de materiales. DIALux evo dispone de un amplio catálogo de materiales para seleccionar. También contiene diferentes texturas divididas en varias categorías como pueden ser interior o exterior. Dentro de cada categoría se encuentran materiales comunes como por ejemplo una pared de ladrillos estándar (Figura 3-31).

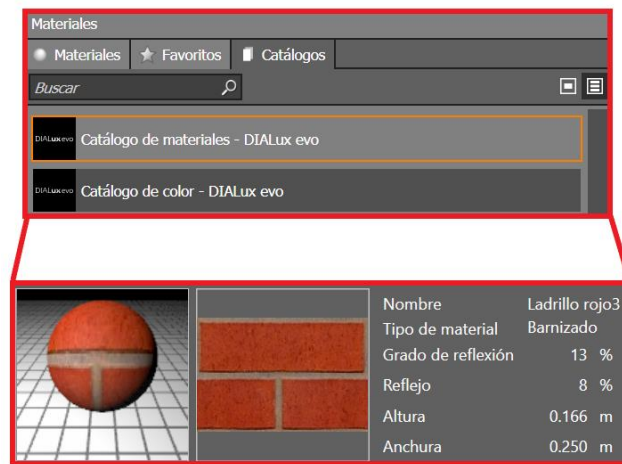


Figura 3-31 Catálogo de materiales de DIALux

- Internet. A través de internet (Figura 3-32) se pueden encontrar bases de datos con multitud de texturas diferentes que se adecúen a las necesidades del usuario.

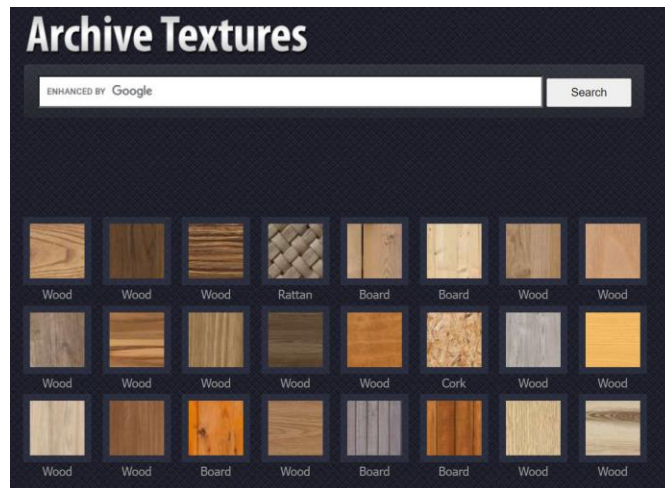


Figura 3-32 Captura de la página archivtextures.net

- Elaboración propia. Si no se encuentra la textura deseada en internet o en el propio catálogo de DIALux, este programa ofrece también la posibilidad de crear texturas propias con imágenes seleccionadas desde el ordenador, como la representada en la Figura 3-33 A estas texturas se le podrán modificar los valores de reflexión y reflejo. Esta opción es interesante para añadir detalles, que, si bien no ayudan a la precisión del modelo, lo dotan de realismo.

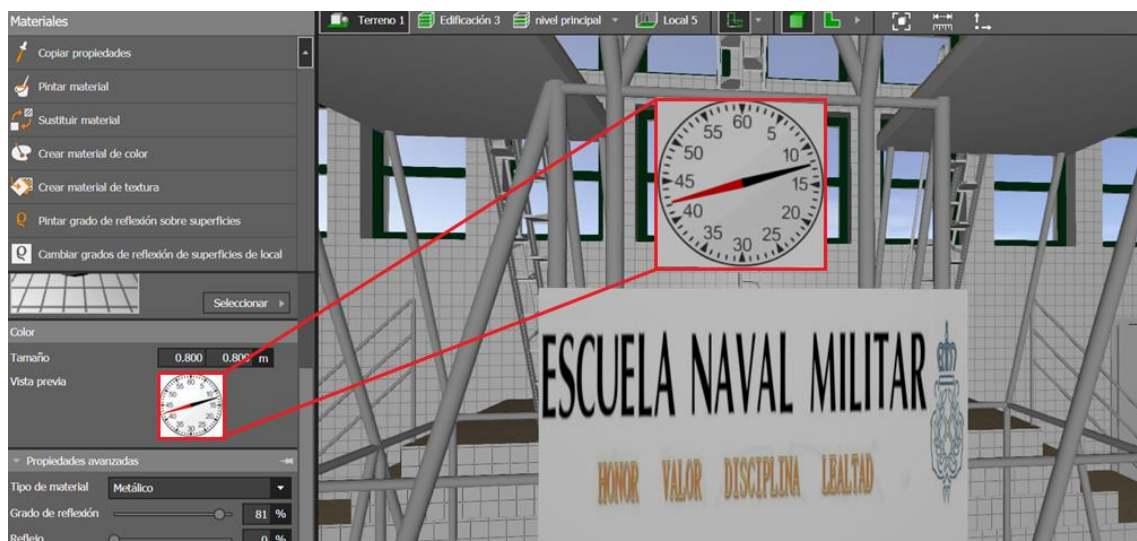


Figura 3-33 Implementación de texturas propias mediante imágenes del ordenador

Tras analizar en persona los materiales de la piscina, se han elegido en el propio buscador de DIALux los siguientes materiales con sus correspondientes características (Tabla 3-5).

Superficie	Material	Especularidad (0%-100%)	Porcentaje de reflexión (0%-100%)	Índice de refracción
Gradas	Piedra pulida	8	61	-
Escaleras	Hormigón pintado	0	62	-
Columnas	Hormigón pintado	0	62	-
Suelo	Baldosas	12	40	-
Vaso de la piscina	Agua	-	38	1,5
Techo	Hormigón pintado	0	62	-
Ventanas	Vidrio	-	10	1,5
Paredes	Azulejos	11	76	-

Tabla 3-5 Materiales elegidos

3.4.3 Renderizado de la escena

Para poder obtener imágenes más realistas del modelo 3D, DIALux cuenta con una herramienta llamada “Raytracer”, la cual permite obtener renderizados del mismo con resoluciones que van desde los 400 x 300 píxeles hasta 3840 x 2160 píxeles (4K UHD) (Figura 3-34).

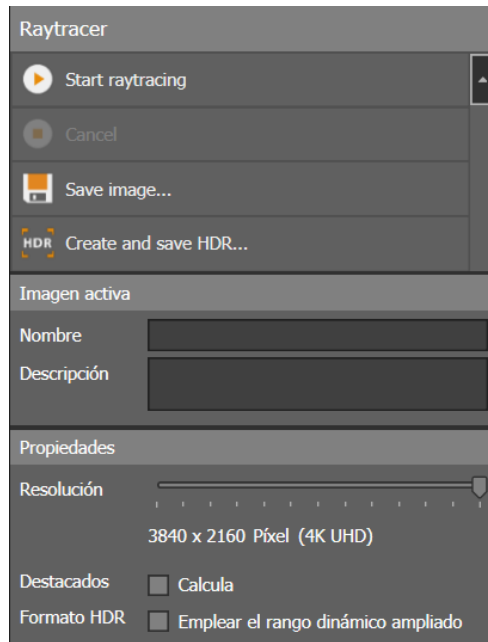


Figura 3-34 Menú de la herramienta “Raytracer”

Esta herramienta permite apreciar de la manera más parecida a la realidad cómo se va a visualizar la escena. En la Figura 3-35 se puede observar la diferencia entre el renderizado de la escena empleando “Raytracer” frente a una captura sencilla de la simulación.

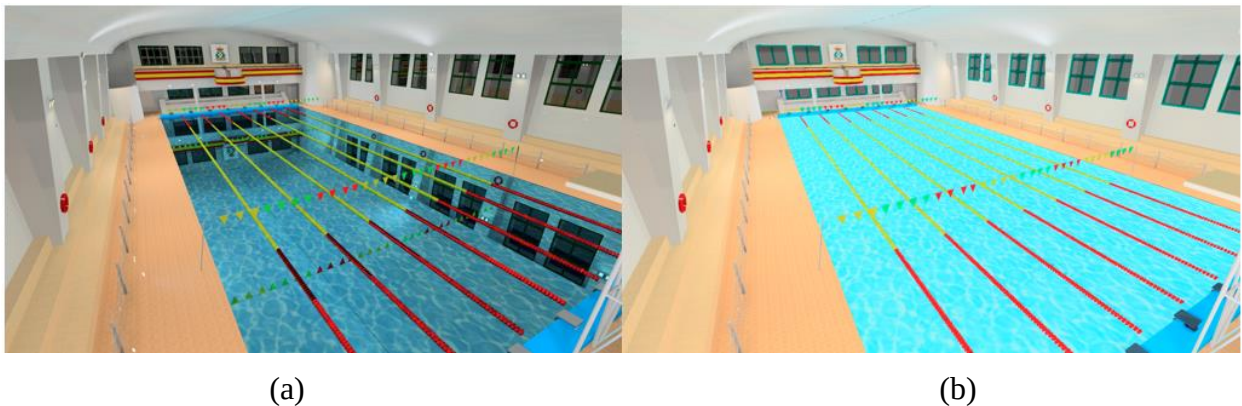


Figura 3-35 Diferencia entre la imagen (a), obtenida con la herramienta “Raytracer” y la imagen (b), obtenida realizando una captura de la escena

Para dotar de realismo el modelado 3D y que sea lo más fiel posible a la realidad en las imágenes obtenidas con “Raytracer” se le fueron añadiendo diversos objetos, como son los salvavidas, pasamanos o carteles. Para buscar estos objetos, DIALux no dispone de una librería propia, pero sí recomienda diversas páginas web donde buscarlos como son TurboSquid, archive3d, Sketchfab (Figura 3-36) o 3DWarehouse, esta última propiedad de SketchUp, programa líder en modelado 3D. Estas páginas dividen sus modelos por temáticas, haciendo que sea más fácil encontrarlos.

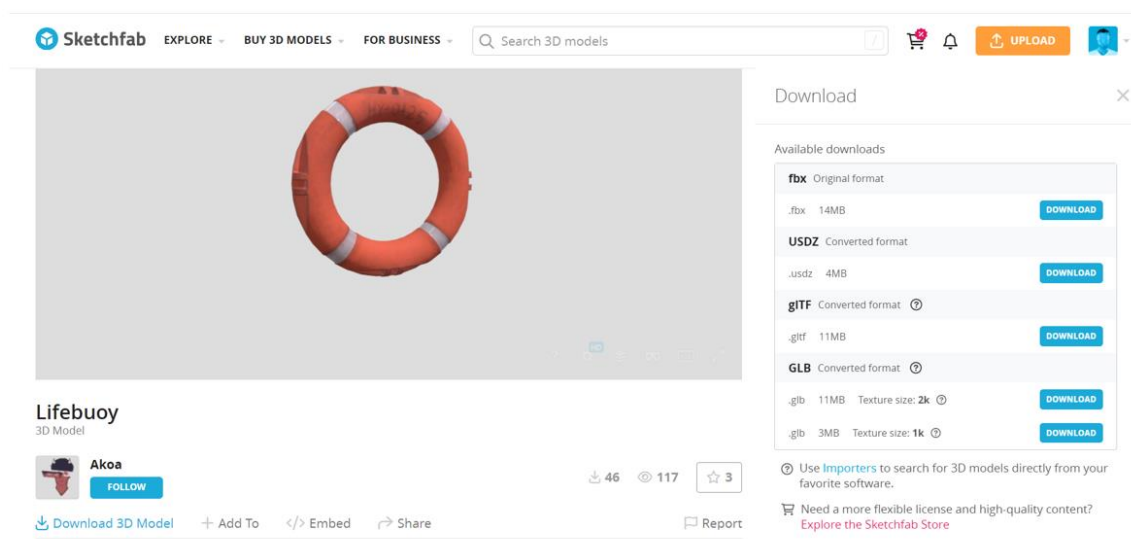


Figura 3-36 Modelo 3D de un salvavidas en Sketchfab [71]

Algunas de estas páginas ofrecen tanto modelos de pago como objetos simplificados en 3D de manera gratuita. DIALux acepta archivos 3D con las extensiones M3D, SAT, 3DS o DXOBJ. Para poder importar otros archivos 3D y transformarlos en otros aceptados por DIALux se ha hecho uso del programa pCon.planner Figura 3-37. Este programa admite otros tipos de archivos y permite exportarlos a los admitidos por DIALux.

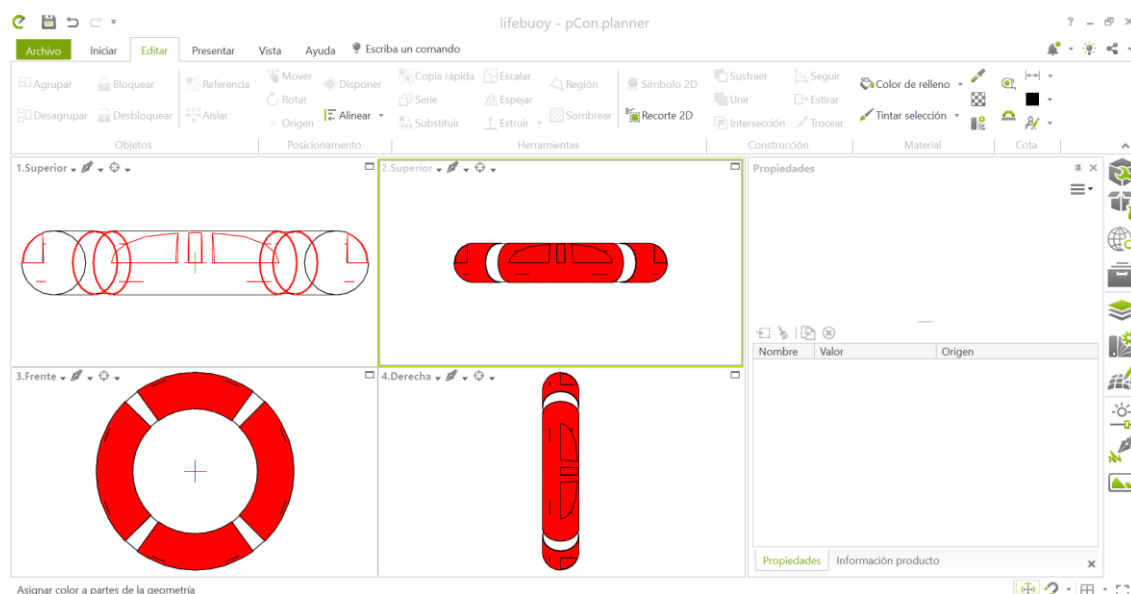


Figura 3-37 Exportación de objeto en formato 3DS con pCon.planner

3.4.1 Simulación de la escena

Una vez completado el modelado se puede proceder con la simulación de la escena para analizar el comportamiento de diferentes sistemas de iluminación. Para ello se deberá pulsar en la opción “Cálculo”. Una vez pulsado, DIALux ejecutará el algoritmo *Photon Shooting* y proporcionará los resultados para los parámetros que se le hayan seleccionado (Figura 3-38).

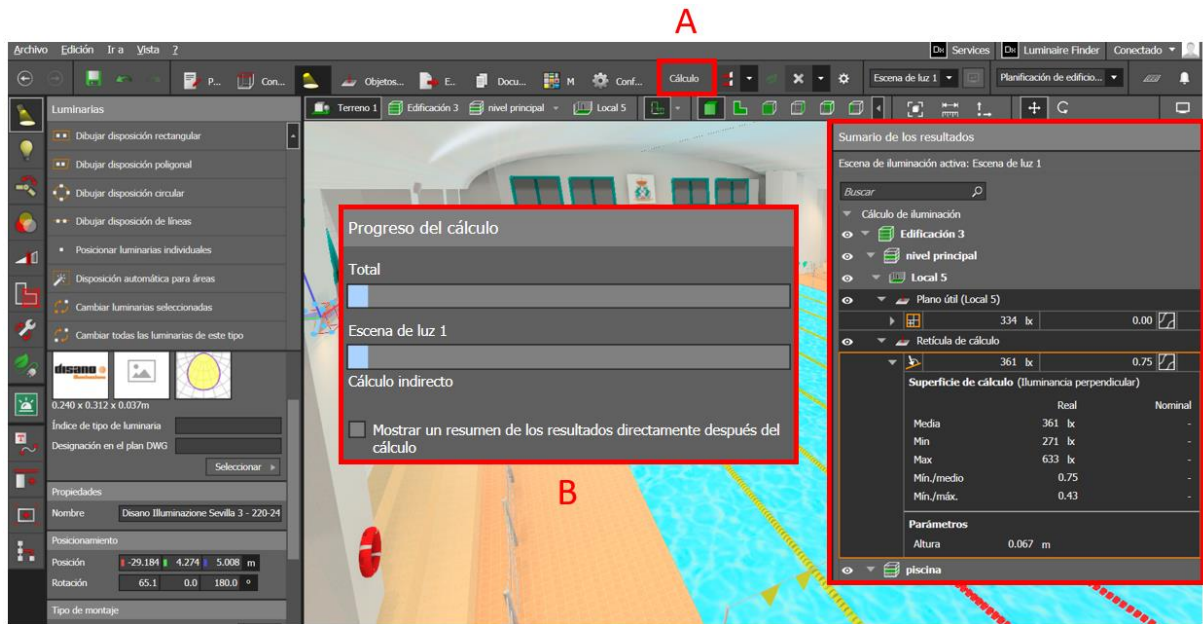


Figura 3-38 Representación del botón de cálculo (A), el progreso en el cálculo de los parámetros (B) y un sumario de los resultados obtenidos en la sección elegida (C)

DIALux da también la opción de acceder a estos resultados calculados en el apartado “Documentación”, donde se proporcionan datos como pueden ser las luminarias que se encuentran en el modelado y su ubicación o los mapas de iluminancias de las diferentes zonas definidas, tal y como se puede apreciar en la Figura 3-39.

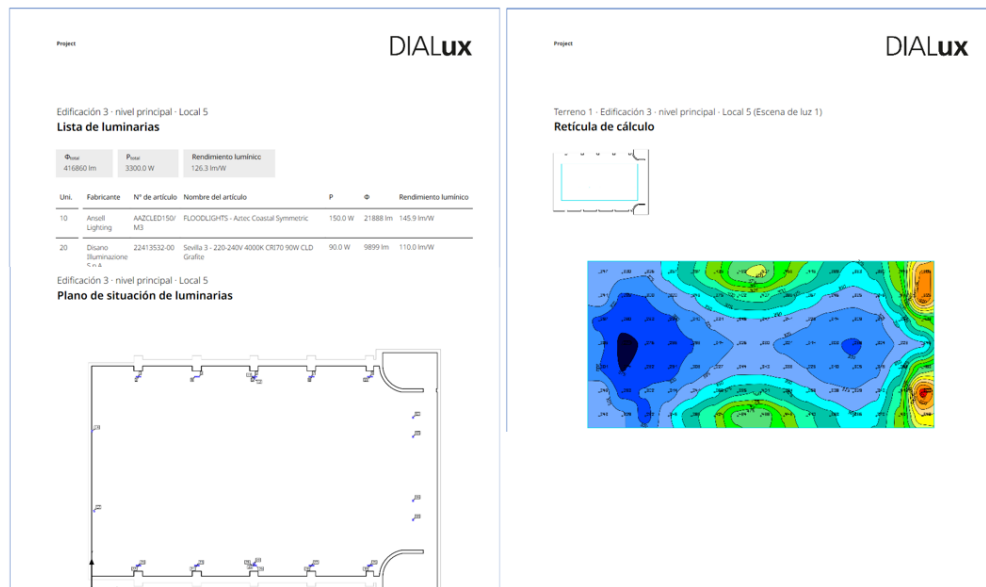


Figura 3-39 Lista de las luminarias y su situación en la planta del edificio y mapa de luminarias de la zona de estudio

El procedimiento de simulación se repetirá para todas las alternativas analizadas para diseñar un nuevo sistema de iluminación. Se llevará a cabo un pequeño estudio de mercado seleccionando las luminarias con mayor potencial para el caso de estudio atendiendo a sus características, precio y eficiencia. En cada caso, se escogerá el modelo de luminaria que se pretende estudiar y se editará el modelo añadiendo el número de luminarias correspondiente en la disposición deseada.

4 RESULTADOS

4.1 Descripción del apartado

En esta sección se analizarán las condiciones lumínicas actuales de la piscina, se comprobará la fiabilidad del modelo 3D realizado en la sección 3.4, se plantearán y analizarán diferentes alternativas de mejora, plasmando los resultados obtenidos mediante el software DIALux evo.

4.2 Requerimientos lumínicos

La normativa vigente (UNE-EN 12193) contiene un listado con distintos tipos de recintos deportivos y deportes, como pueden ser el bádminton, el esquí alpino o el fútbol, así como una serie de tablas en las que se detallan requisitos específicos de iluminación para estos deportes. Buscando en la lista se puede observar que la natación en interiores, el objeto de este trabajo se encuentra en la tabla A.6 (Figura 4-1 y Figura 4-2).

Natación (todos los estilos)	Interior	A.6
	Exterior	A.27

Figura 4-1 Extracto de la normativa UNE-EN 12193 dónde se detalla el anexo A.6 [20]

Tabla A.6

Interior			Área de referencia		Números de puntos de la retícula		
			Longitud m	Anchura m	Longitud	Anchura	
Natación ^a	Salto	PA	15	10,50	11	7	
	Carrera ^b	PA	25 a 50	15 a 22	13 a 17	7	
	Waterpolo ^b	PA	20 a 30	15 a 20	13 a 15	9 a 11	
	Sincronizada	PA	25	15	13	7	
Clase	Iluminancia horizontal		Requisito adicional para salto ^c		Bloques de inicio y giro ^e		
	Ehor Ave lx	U2hor	Ehor Ave/Evert Ave		Ehor Min lx		
I	500	0,70	0,80		600	35	80
II	300	0,70	0,50		–	40	60
III	200	0,50	0,50		–	40	60

^a Los anteriores son solamente requisitos generales. Pueden necesitarse requisitos especiales para piscinas individuales.
^b No debería usarse alumbrado subacuático.
^c Recomendación FINA sólo para competiciones Internacionales.
^d R_G sólo aplica para alturas de montaje por encima de 10 m.
^e La retícula vertical comienza a 2 m por encima y en frente del trampolín al nivel del agua y es de 3 m de ancho. La retícula está situada a lo largo del lado del trampolín. Los puntos de la retícula se calculan de acuerdo con la fórmula (1).

Figura 4-2 Tabla A.6 mostrando los requisitos de iluminación para la práctica deportiva en piscinas [20]

Al analizar la tabla A.6 se observa que esta define unos requisitos diferentes dependiendo de la clase de iluminación de la piscina que se esté estudiando. Las clases de alumbrado se definen en la misma norma:

- Clase I: “Competición del más alto nivel, tal como competición internacional y nacional, que implicará generalmente grandes capacidades de espectadores con distancias de visión potencialmente largas. También se puede incluir en esta clase el entrenamiento de nivel superior. Para algunos deportes los requisitos del órgano rector podrían prevalecer sobre los valores de esta norma”.
- Clase II: “Competición de nivel medio, tal como competición regional o de clubes locales, que implica generalmente capacidades de tamaño medio de espectadores con distancias de visión medias. También se puede incluir en esta clase el entrenamiento de alto nivel”.
- Clase III: “Competición de bajo nivel tal como competición local o de clubes pequeños, que generalmente no implica espectadores. También se incluye en esta categoría el entrenamiento general, la educación física (deportes escolares) y actividades recreativas”.

Analizando las diferentes clases de alumbrado existentes y el uso que recibe la piscina se puede afirmar que esta se englobaría dentro de la clase II.

En cuanto a natación se refiere, solo se realizan competiciones no oficiales de bajo nivel, como pueden ser las propias organizadas entre alumnos y cada 6 años las denominadas Interacademias. La necesidad de clasificar la piscina como una de clase II viene requerida por las competiciones de waterpolo que se han realizado en la misma en los últimos años y que pueden volver a realizarse en ella de manera oficial si se consigue cumplir la normativa, algo beneficioso para la marca de la Armada y para las relaciones de esta con la ciudadanía gallega.

En los últimos años, diversas obras y problemas en las piscinas de los equipos de la provincia les han hecho tener que buscar otras para poder desarrollar sus actividades. Este fue el caso, por ejemplo, del Club Waterpolo Pontevedra. La piscina donde entrenaban, ubicada en el complejo deportivo Rías do Sur, se mantuvo cerrada durante dos años. El club se vio obligado a buscar una piscina alternativa para jugar sus partidos de liga como local, la de la ENM.



Figura 4-3 Partido del Club Waterpolo Pontevedra en la piscina de la ENM [72]

A consecuencia de esto, también llegó a celebrarse entre otros el Campeonato Gallego Juvenil de Waterpolo de 2022 (Figura 4-4).



Figura 4-4 El Capitán de Navío Pedro Cardona Suanzes, Comandante Director de la ENM, presenta el torneo junto a la alcaldesa de Marín, María Ramallo Vázquez y la junta directiva del Club Waterpolo Pontevedra [73]

Es por esto por lo que la clase donde más se ajusta a las necesidades de la piscina si es necesario estar a la altura para albergar estas competiciones es la clase II (Figura 4-5).

Clase	Iluminancia horizontal	
	<i>Ehor Ave lx</i>	<i>U2hor</i>
II	300	0,70

Figura 4-5 Requisitos para una piscina con alumbrado clase II [20]

Atendiendo a esta clase de alumbrado, la norma exige unos valores de:

- *Ehor Ave lx*, la iluminancia horizontal media tiene que ser superior a 300 lx.
- *U2hor*, la uniformidad horizontal mínima a media tiene que ser superior a 0,7.

4.3 Análisis de la situación actual

Para analizar las condiciones lumínicas actuales de la piscina, el siguiente paso será calcular la iluminancia horizontal media y la uniformidad horizontal mínima a media con los datos obtenidos mediante el luxómetro siguiendo el procedimiento de medición descrito en el apartado 3.3.2. Tras realizar las mediciones se obtienen los datos representados en la Figura 4-6.

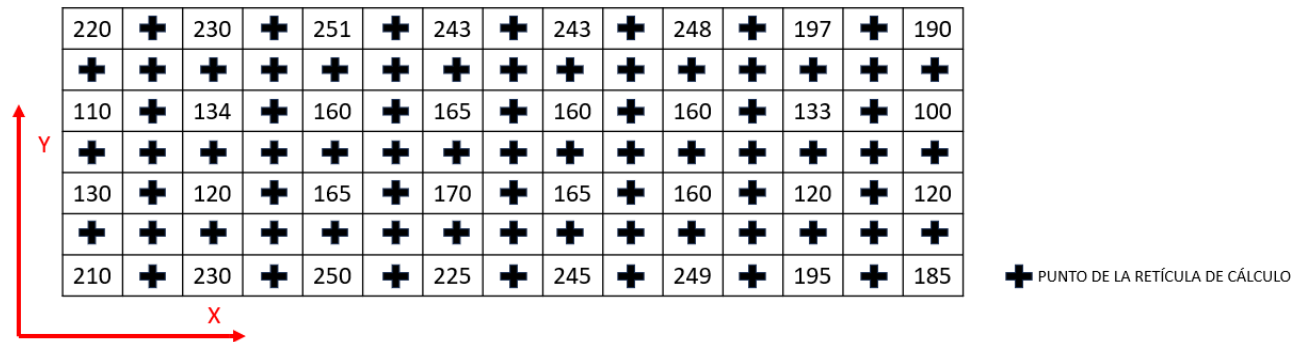


Figura 4-6 Mediciones obtenidas mediante el luxómetro en la zona de cálculo respecto a la retícula de cálculo y medición en luxes

La iluminancia horizontal media se obtiene mediante el cociente de todas las medidas tomadas entre el número de datos, obteniéndose un valor de *E_{hor Ave}* de 183,8 lx.

A su vez, la uniformidad horizontal mínima a media se determina mediante el cociente entre el valor mínimo medido y la iluminancia horizontal media, obteniéndose un valor de *U_{2hor}* de 0,54.

Teniendo en cuenta las medidas realizadas, se estima que la iluminancia media en la superficie de la piscina es de 183,8 lx y la uniformidad es de 0,54. Con estos resultados se puede comprobar que el sistema de iluminación actual no cumple la normativa, ya que la uniformidad horizontal mínima a media si es menor de 0,7 y la iluminancia horizontal media es menor de 300 lx.

A partir de los datos obtenidos en la piscina se ha elaborado el siguiente mapa de iluminancias en el que se puede ver la distribución de la iluminancia en la piscina (Figura 4-7).

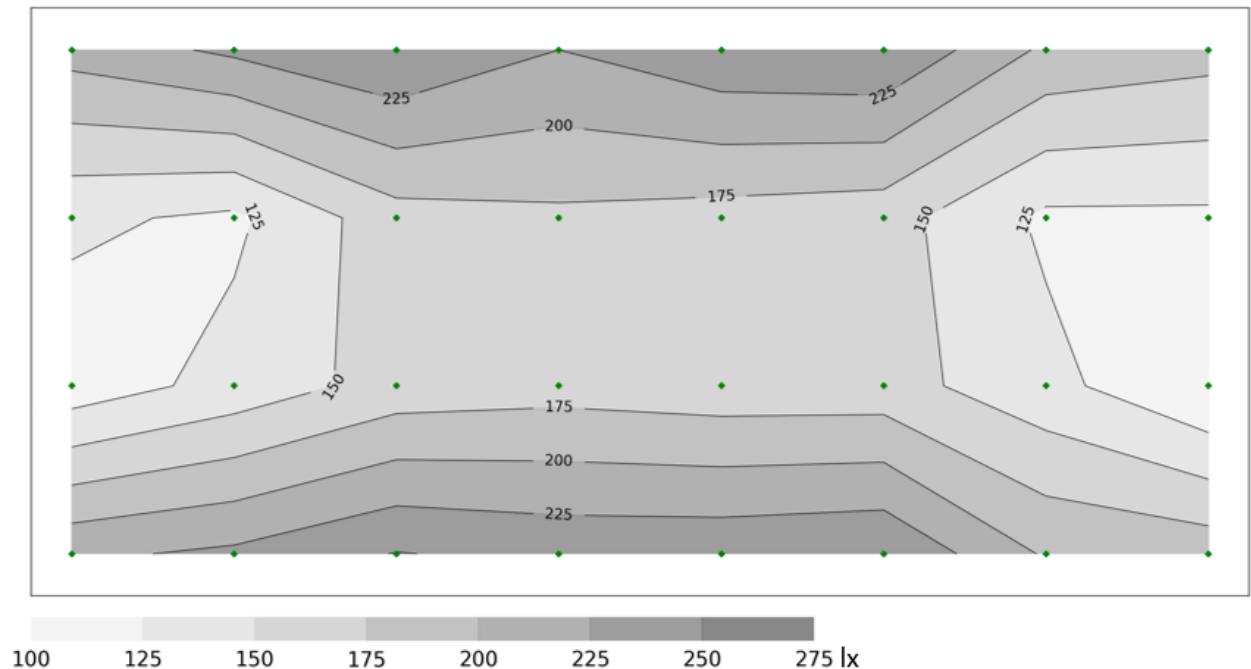


Figura 4-7 Mapa de iluminancias elaborado a través de las mediciones obtenidas en la piscina. Los marcadores verdes indican los puntos de medición

Estos resultados evidencian la necesidad de buscar y analizar nuevas alternativas de iluminación que permitan cumplir los requisitos exigidos mediante pruebas con el modelo 3D desarrollado y el programa de simulación.

4.4 Validación del modelo 3D

Al realizar la simulación en DIALux evo colocándose las luminarias en su posición actual, se obtiene un valor para la iluminancia horizontal media de 185 lx y un valor de uniformidad horizontal mínima a media de 0,54, como se puede observar en la Tabla 4-1.

Retícula de cálculo.

<i>Ehor Ave</i>	185 lx
<i>U2hor</i>	0,54

Tabla 4-1 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux

Por lo tanto, viendo la similitud con los datos calculados en el apartado 4.3, se puede afirmar que el proceso de medición ha sido preciso. El modelo 3D se ajusta a la realidad y, por ende, es un buen modelo para realizar el resto de las simulaciones y analizar el comportamiento de sistemas de iluminación alternativos.



Figura 4-8 Renderizado de la piscina con la disposición actual de luminarias

Si se compara ahora el mapa de iluminancias obtenido mediante el luxómetro (Figura 4-7) con el obtenido en esta simulación (Figura 4-9), se puede ver como se asemeja la distribución de la luz en la superficie de la piscina.

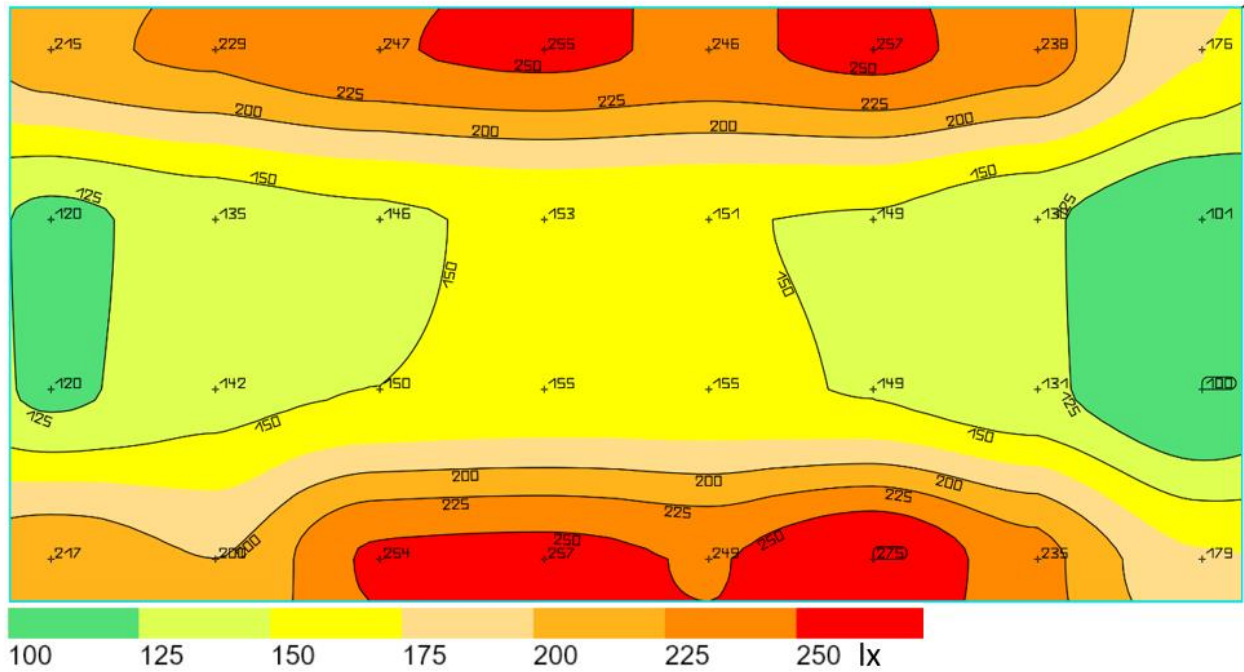


Figura 4-9 Mapa de iluminancias de la disposición actual

4.5 Alternativas de mejora

Al comprobarse que, en la situación actual en la que se encuentra la piscina, no se cumple con los requisitos mínimos de la normativa por la cual se rige, surge la necesidad de mejorar la instalación. Para solucionar las deficiencias actuales en materia de iluminación se han planteado diferentes alternativas, que serán estudiadas con el programa DIALux para comprobar cuáles mejorarían la situación actual y qué resultados se pueden esperar de ellas. Estas posibles soluciones son:

- Recolocación de las luminarias existentes.
- Instalación de nuevas luminarias del mismo modelo.
- Instalación de nuevo modelo de luminarias.
- Combinación de luminarias actuales y nuevas.

4.5.1 Recolocación de las luminarias existentes

La forma más económica y sencilla para solucionar este problema sería buscar una configuración con las luminarias ya instaladas para que se cumplan los valores requeridos.

Se probaron diferentes posiciones en las que colocar las luminarias ya instaladas, variando la altura de su instalación, su grado de inclinación, la distribución a lo largo de las columnas o mover alguno hacia las zonas menos iluminadas.

Tras probar diferentes configuraciones para intentar optimizar la instalación, los valores máximos de iluminación horizontal media y de uniformidad horizontal mínima a media con el número de proyectores actuales, se obtienen reduciendo el ángulo de los proyectores sobre la horizontal hasta los 33° y subiendo su altura sobre el nivel del agua hasta los 6,1 m. En la Figura 4-10 se puede observar la diferencia entre la posición actual y la posición óptima de los mismos.

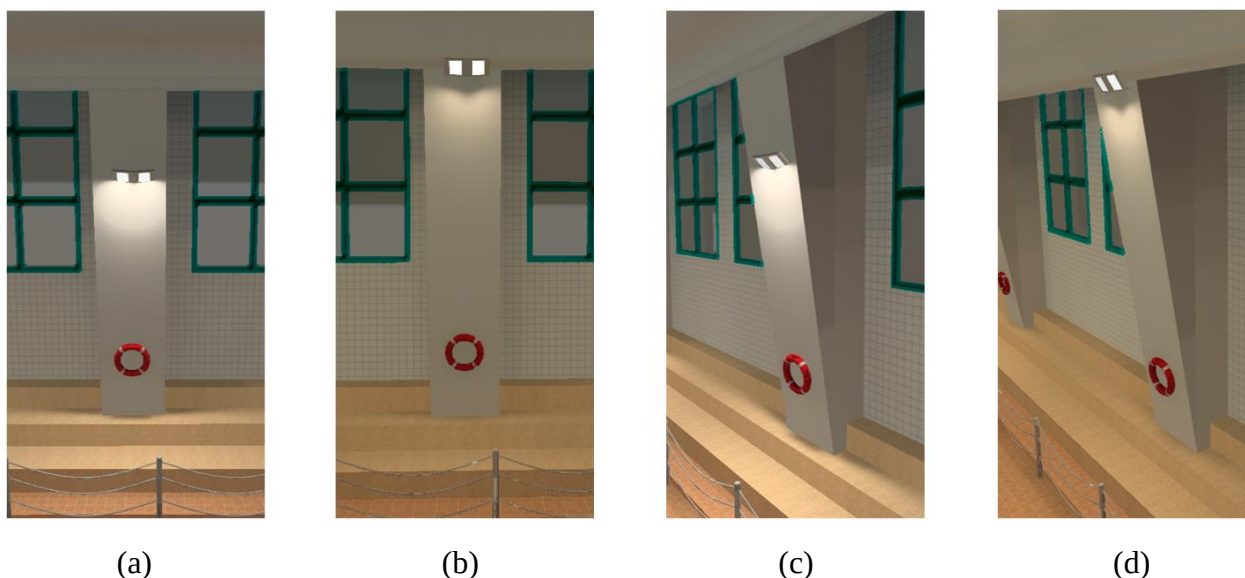


Figura 4-10 Comparación entre la posición original (imágenes (a) y (c)) y la óptima (imágenes (b) y (d))

Con estas variaciones la iluminancia horizontal media sube hasta los 193 lx y la de uniformidad horizontal mínima a media sube hasta 0,62 (Tabla 4-2), sin embargo, estos valores siguen sin cumplir los requisitos, por lo que se tendría que buscar otra solución.

Retícula de cálculo.

<i>Ehor Ave</i>	193 lx
<i>U2hor</i>	0,62

Tabla 4-2 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux con disposición óptima

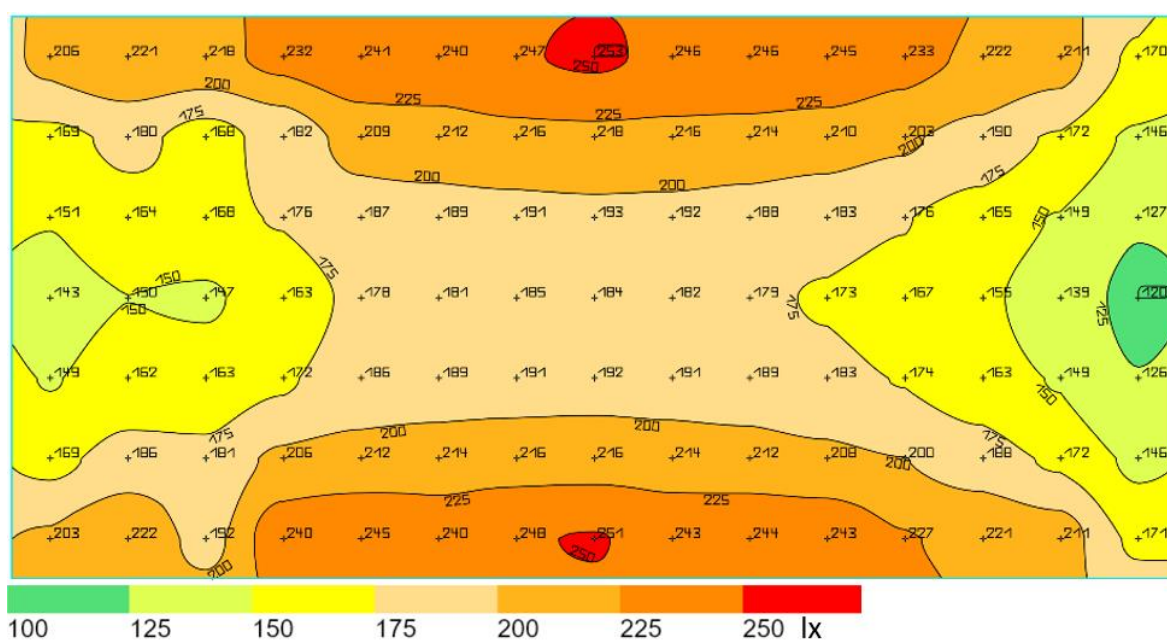


Figura 4-11 Mapa de iluminancias con la disposición óptima

Al analizar el mapa de iluminancias en la Figura 4-11 se observa que este es muy parecido al representado en la Figura 4-9, la zona de vestuarios y la grada superior son las zonas menos iluminadas.

4.5.2 Instalación de nuevas luminarias del mismo modelo

Otra de las pruebas realizadas parte de la simulación anterior. A partir del modelo anterior, se retiraron los dos primeros proyectores situados en las columnas de la entrada y estos se añadieron, junto a otros dos a la grada superior, a una altura de 3 m sobre el agua, a una separación de 7,6 m y 4,25 m sobre la línea de crujía⁸ de la piscina y con un ángulo de inclinación de 20° sobre la horizontal, obteniéndose valores representados en la Tabla 4-3. Con esta disposición, la iluminancia horizontal media resulta de 206 lx y la uniformidad horizontal mínima a media de 0,71. Por tanto, esta alternativa ofrece muy buenos resultados en cuanto a uniformidad, pero con una iluminación insuficiente, inferior a los 300 lx que exige la norma.

Retícula de cálculo.

<i>Ehor Ave</i>	206 lx
<i>U2hor</i>	0,71

Tabla 4-3 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux con dos proyectores adicionales

La nueva colocación de las luminarias sería la siguiente, representada en la Figura 4-12 y en la Figura 4-13, en ella se ve como quedan los cuatro proyectores sobre la grada superior (Figura 4-12) y como se quedaría la primera columna de cada lado solo con un proyector (Figura 4-13).



Figura 4-12 Nueva disposición de las luminarias en la grada superior

⁸ En un barco la línea de crujía es una línea imaginaria que cruza el barco de proa a popa y lo divide en babor y estribor [74], aquí la línea de crujía es una línea imaginaria que cruza la piscina a lo largo y la divide en dos mitades perfectas.



Figura 4-13 Disposición de las luces retirando la primera luminaria de la primera columna

Al observar el mapa de iluminancias (Figura 4-14) se aprecia que la zona correspondiente a la grada superior recibe ahora mejor iluminación, pero sigue sin cumplir los valores mínimos globales.

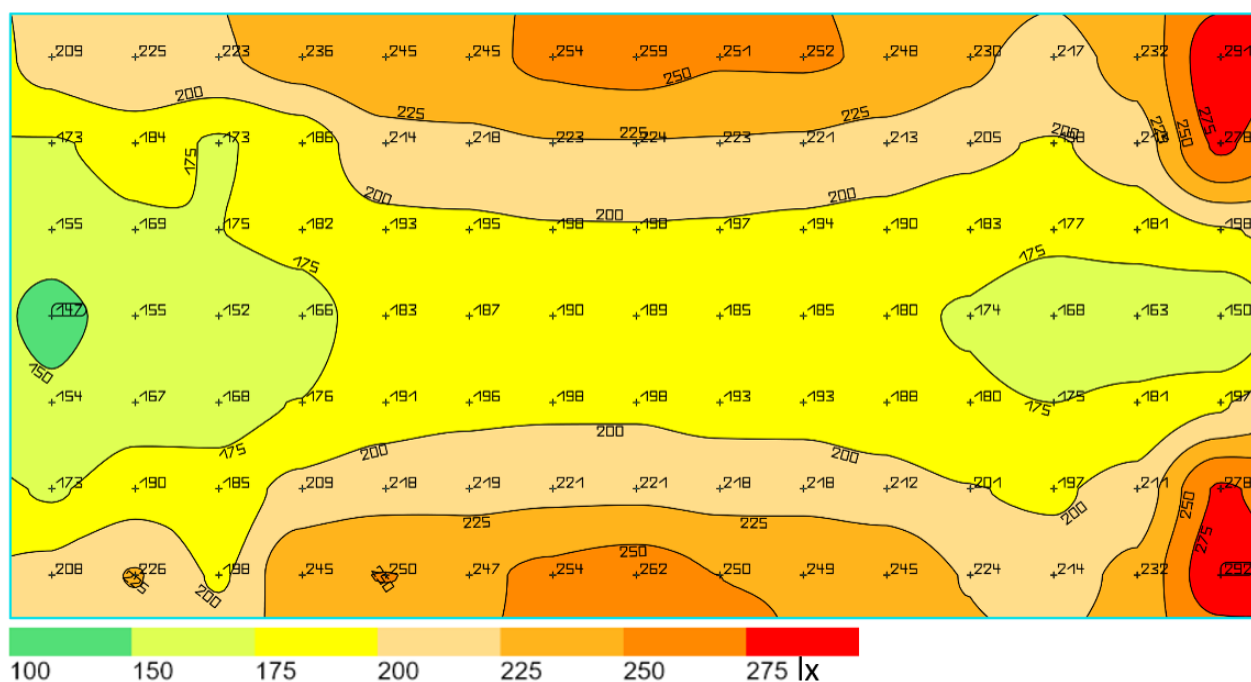


Figura 4-14 Mapa de iluminancias con la nueva disposición

4.5.3 Instalación de un nuevo modelo de luminarias

Para buscar una luminaria adecuada entre todas las opciones disponibles en el mercado se han utilizado diversos métodos. El propio DIALux evo da la opción a las marcas que así lo deseen de incluirlas en su propio software. Se buscan mediante la herramienta “DIALux Luminaire Finder” y en ella se pueden introducir diferentes parámetros como la superficie de montaje, el tipo de haz de luz o la potencia (Figura 4-15).

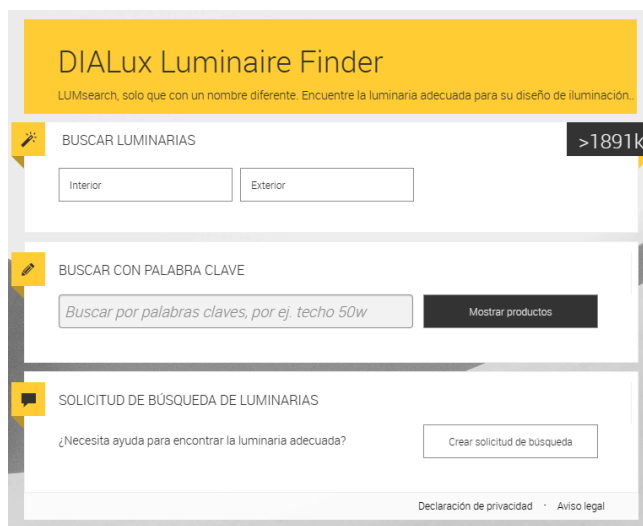


Figura 4-15 Captura de pantalla de la página web DIALux Luminaire Finder

Algunas marcas como Disano no se encuentran en el DIALux Luminaire Finder, si no que en su propia página web se puede descargar el archivo formato IES o LDT, los cuales se pueden importar a DIALux mediante la herramienta “importar archivo de luminarias”. Este método ha sido utilizado para probar algunas de las luminarias, entre ellas las que están instaladas actualmente en la piscina.

Otras empresas de iluminación como la china Opple lighting disponen de plugins propios para DIALux. Estas herramientas permiten el acceso a las diferentes luminarias de la marca sin conexión a internet, y además suelen añadir también el modelo 3D de la propia luminaria, para dar así más realismo a las simulaciones (Figura 4-16).

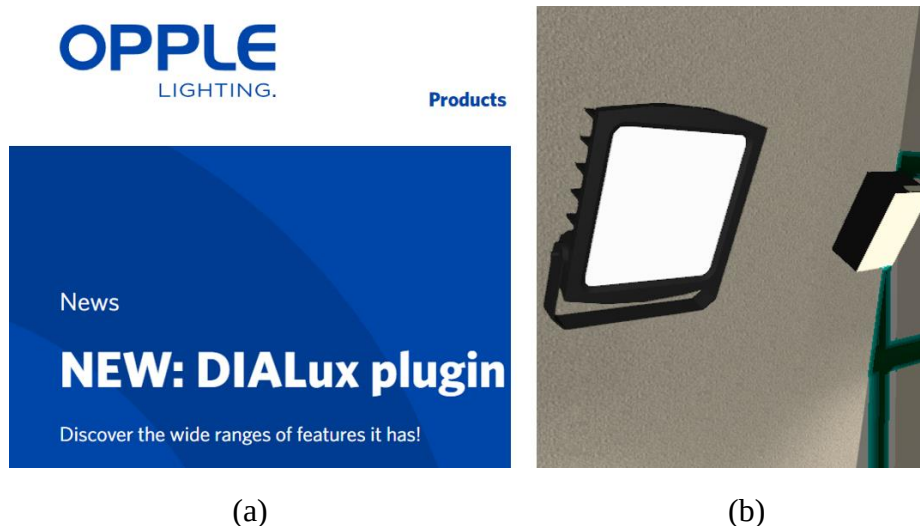


Figura 4-16 Plugin para DIALux de Opple lighting (a) y una luminaria con modelado 3D comparado con una predeterminada (b)

Tras analizar el mercado y probar en la simulación multitud de luminarias, se ha determinado que las que más se adecuaban eran las que se situaban entre los 150 W y los 200 W y superaban los 20000 lm. Estas luminarias se suelen caracterizar por tener la mejor relación entre la eficiencia luminosa y el precio. El modelo seleccionado para sustituir las luminarias actuales es el Ansell Aztec Coastal 150 (Figura 4-17), un potente proyector de 150 W simétrico y precio contenido de la empresa de iluminación inglesa Ansell lighting. Sus principales características se pueden observar en la Tabla 4-4.

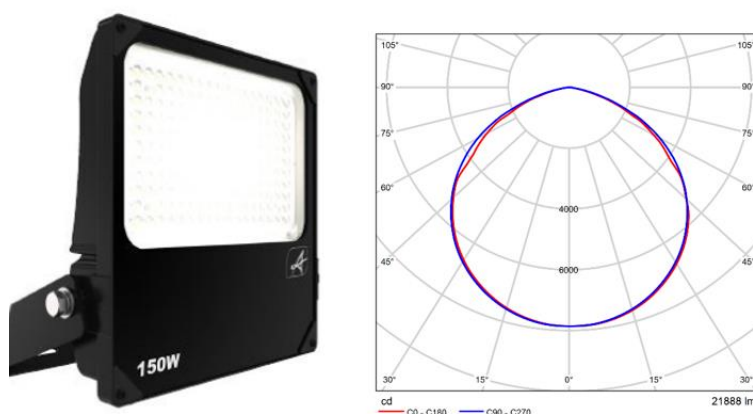


Figura 4-17 Proyector Ansell Aztec Coastal 150 y su diagrama polar [75]

Ansell Aztec Coastal 150	
Tipo	LED
Alimentación	220 – 240 V
Flujo luminoso	21880 lm
Grados de apertura	120°
Temperatura de color	5000 K
Vida	54,000 horas
Temperatura de funcionamiento	-30°C - 50°C
Potencia	150 W
IRC	70
Eficiencia luminosa	145,9 lm/W
Precio	145 €

Tabla 4-4 Principales características del proyector Ansell Aztec Coastal 150

Tras realizar la simulación con diferentes disposiciones, una de las posibles configuraciones que satisfarían las necesidades de iluminación de la piscina se conseguirían añadiendo 20 proyectores a la escena. Parte de los proyectores se colocarían en las columnas, en parejas en la primera, tercera y quinta e individualmente en la segunda y cuarta. De esta forma, a las columnas se destinarían un total de 16 proyectores. Se instalarían a 5,43 metros sobre el nivel del agua, inclinados 32° con respecto a la horizontal. En el caso de los proyectores que se sitúan en parejas, estos irían inclinados 3° hacia fuera de la columna (Figura 4-18). En cuanto a la separación entre ellos, se han realizado diversas pruebas y se ha concluido que la distancia entre los proyectores situados en parejas no afecta a la iluminancia ni a la uniformidad.

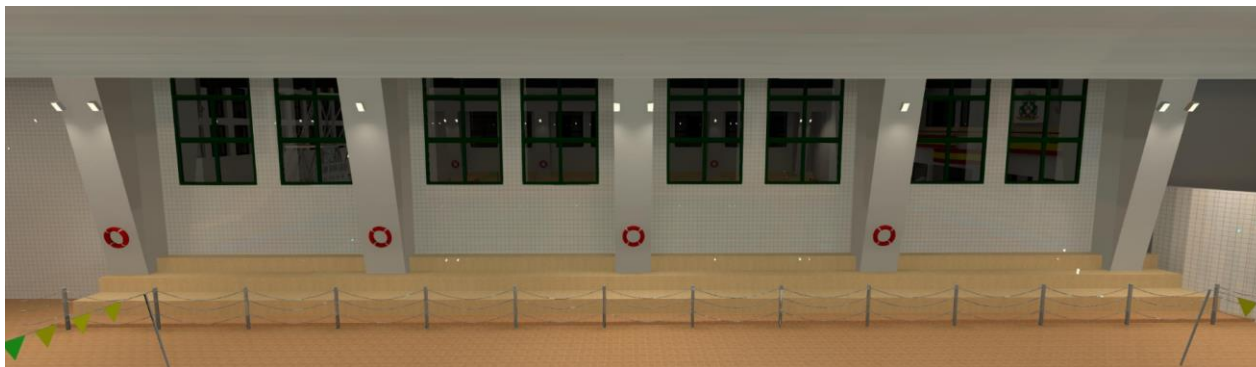


Figura 4-18 Disposición de las luminarias en las columnas

De los cuatro proyectores restantes, dos de ellos se instalarían en la grada superior, a 2,9 m sobre el nivel del agua, inclinados 7° grados sobre la horizontal, 7° hacia dentro y a 5,9 m de la línea de crujía, quedando el montaje como se representa en la Figura 4-19.



Figura 4-19 Disposición de las luminarias en la grada superior

Por último, los dos proyectores restantes se situarían en la zona de los vestuarios de la piscina, a 2,85 m sobre el nivel del agua, inclinados 7° grados sobre la horizontal, 7° hacia dentro y a 6,7 m de la línea de crujía, como se ve en la Figura 4-20.



Figura 4-20 Disposición de las luminarias en la zona de los vestuarios

Una vez colocados los proyectores se procede con la simulación, arrojando los siguientes resultados de iluminancia horizontal media y uniformidad horizontal mínima a media (Tabla 4-5).

Retícula de cálculo.

<i>Ehor Ave</i>	319 lx
<i>U2hor</i>	0,82

Tabla 4-5 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux la disposición conformada por nuevas luminarias

Como se puede comprobar, los resultados obtenidos con esta nueva disposición y modelo de luminarias son superiores a los niveles que requiere la normativa de aplicación para ambos parámetros. Además, si se observa el mapa de iluminancias mostrado en la Figura 4-21, se comprueba que se ha mejorado la iluminación en las zonas de la piscina situadas próximas a la grada superior y a los vestuarios. Ambas zonas presentan una iluminación insuficiente en la situación actual.

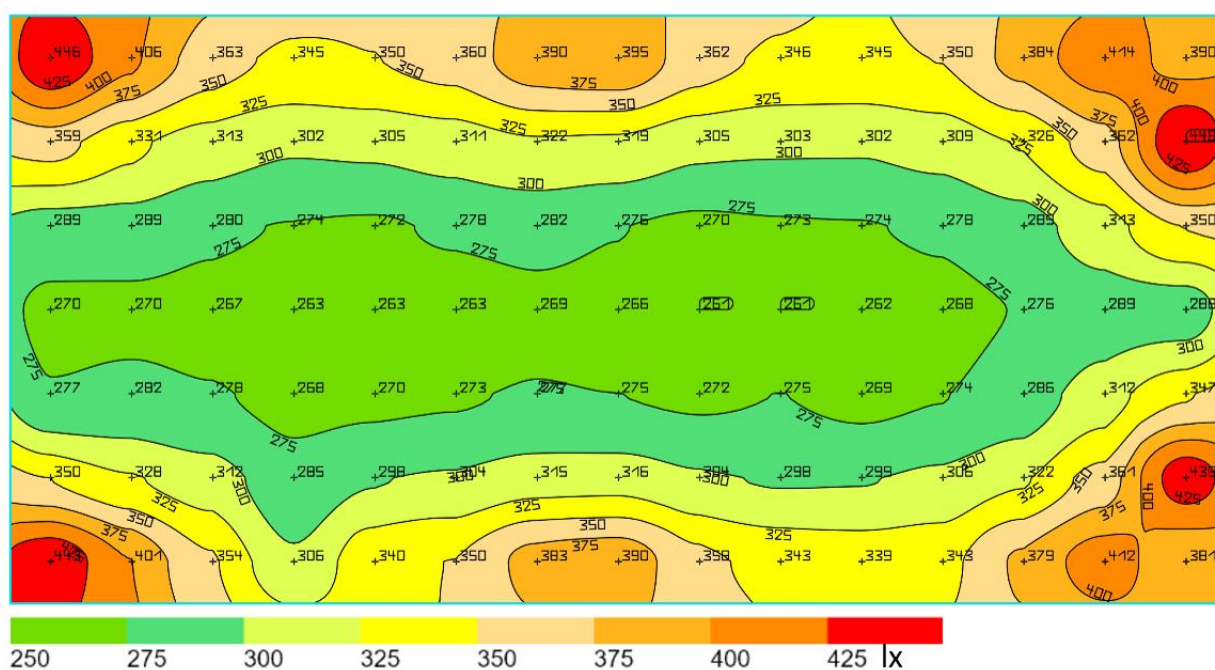


Figura 4-21 Mapa de iluminancias obtenido con DIALux para la disposición conformada por las nuevas luminarias

4.5.4 Combinación de luminarias actuales y nuevas

Aprovechando las luminarias instaladas actualmente en la piscina, una posible solución sería combinar estas con un número reducido de nuevas luminarias del modelo seleccionado y presentado en la sección 4.5.2. De esta forma, se lograría cumplir con los requisitos, pero evitando altos costes de adquisición y aumentando el consumo lo menos posible, teniendo en cuenta que las luminarias que se encuentran instaladas ahora mismo consumen 90 W frente a los 150 W del nuevo modelo seleccionado. Previsiblemente, al instalar una menor cantidad de luminarias del modelo más potente se conseguiría un aumento menor del consumo total.

Trabajando sobre la optimización conseguida en el apartado 4.5.1 se añadieron cuatro proyectores a la grada superior, a una altura de 3 m sobre el nivel del agua, separados de la línea de crujía 5,8 m y 3,5 m e inclinados sobre la horizontal 21°, quedando la instalación como se ve representado en la Figura 4-22.

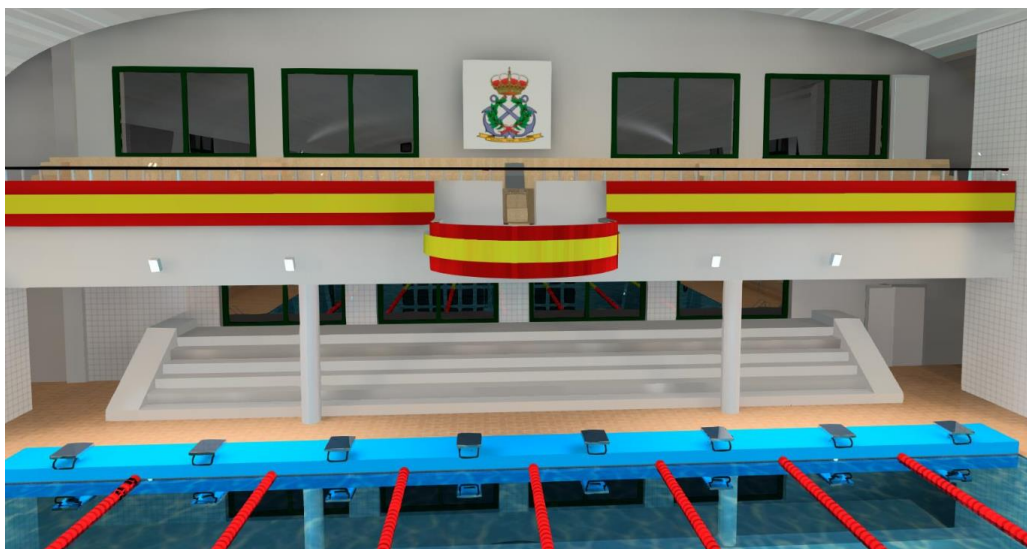


Figura 4-22 Disposición de las luminarias en la grada superior

Adicionalmente, en la zona de vestuarios se incluyeron dos proyectores, a una altura de 3,4 m sobre el nivel del agua, separados de la línea de crujía 4,95 m, inclinados sobre la horizontal 26° y hacia el interior 20° (Figura 4-23).

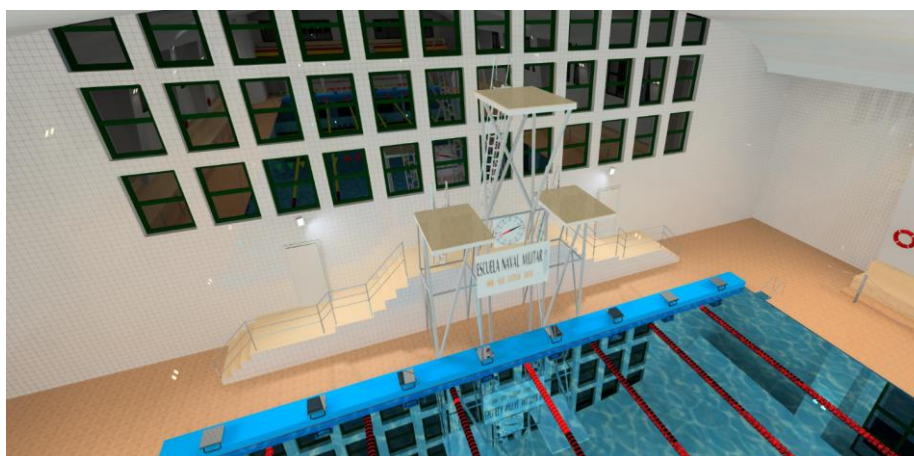


Figura 4-23 Disposición de las luminarias en la zona de vestuarios

También se añadieron dos proyectores en cada lado sobre columna central, a una altura de 6,2 m e inclinados $24,5^\circ$ sobre la horizontal (Figura 4-24).



Figura 4-24 Disposición de las nuevas luminarias colocadas sobre la columna central

En definitiva, en esta alternativa se mantienen los 20 proyectores presentes actualmente en las columnas laterales de la piscina, sin modificaciones en su disposición, y se añaden 8 proyectores nuevos de mayor potencia para mejorar la iluminación en la línea central de la piscina, en la zona próxima a los vestuarios y bajo la grada superior. Con la incorporación de estos 8 nuevos proyectores se obtienen los siguientes resultados de iluminancia y uniformidad (Tabla 4-6).

Retícula de cálculo.

<i>Ehor Ave</i>	361 lx
<i>U2hor</i>	0,75

Tabla 4-6 Valores de iluminancia y uniformidad obtenidos en DIALux con la disposición conformada por la combinación de luminarias actuales y nuevas

Por lo tanto, con este sistema se conseguiría cumplir los requisitos que exige la norma sin necesidad de una inversión elevada. Si se observa el mapa de iluminancias (Figura 4-25) se puede apreciar claramente la aportación de las nuevas luminarias. La iluminación en las zonas menos iluminadas se incrementa notablemente, en especial bajo la grada superior.

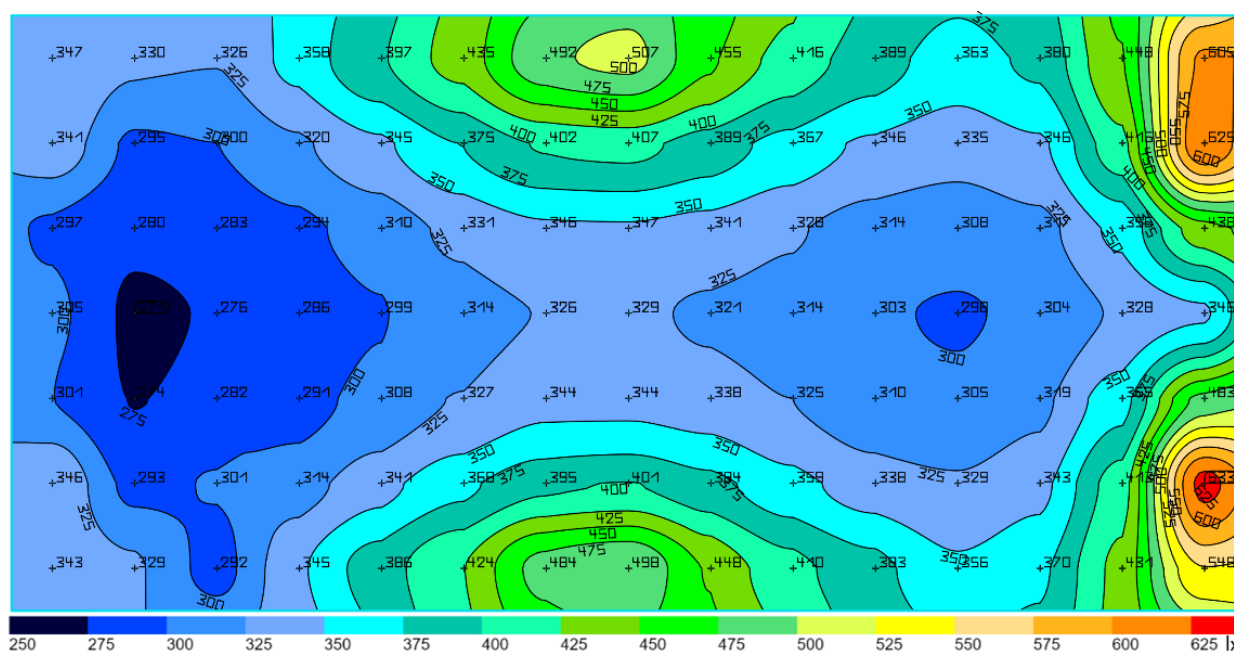


Figura 4-25 Mapa de iluminancias obtenido con DIALux para la disposición conformada por la combinación de luminarias actuales y nuevas

4.6 Análisis de alternativas

Con objeto de comparar los resultados obtenidos en DIALux se ha elaborado la Tabla 4-7, en la que se incluye un resumen general de las características de las diferentes alternativas. Adicionalmente, a los resultados ya presentados se ha añadido el coste que supondría la nueva instalación junto a su consumo.

	<i>Ehor Ave (lx)</i>	<i>U2hor</i>	Número total de luminarias	Precio	Consumo
Disposición actual	185	0,54	20 x 90 W	-	1,8 kWh
Recolocación de las luminarias existentes	193	0,62	20 x 90 W	0 €	1,8 kWh
Instalación de nuevas luminarias del mismo modelo	206	0,71	22 x 90 W	94 €	1,98 kWh
Instalación de un nuevo modelo de luminarias	319	0,82	20 x 150 W	2900 €	2,9 kWh
Combinación de luminarias actuales y nuevas.	361	0,75	20 x 90 W 10 x 150 W	1160 €	3,3 kWh

Tabla 4-7 Principales características de las posibles alternativas

- Disposición actual: a la vista de los resultados obtenidos en el apartado 4.3, se llegó a la conclusión de que actualmente no se cumple con la normativa por la que se rige la piscina, por lo tanto, no se debería mantener la disposición actual.
- Recolocación de las luminarias existentes: alterando el posicionamiento de las luminarias conforme a lo expresado en el apartado 4.5.1, se determinó que los valores máximos alcanzables (disposición óptima) sin variar el número de luminarias son los representados en la Tabla 4-7, no alcanzándose los valores mínimos exigidos.
- Instalación de nuevas luminarias del mismo modelo: a partir de la disposición óptima calculada en el apartado 4.5.1 se probaron numerosas combinaciones añadiendo diferentes números de luminarias. En las simulaciones donde se obtuvieron mejores resultados fueron en las que se añadieron proyectores sobre la zona de la grada superior, una de las zonas peores iluminadas, aun así, no se consiguieron mejoras significativas añadiendo un número lógico y realista (se realizaron simulaciones en las que se añadían hasta 15 luminarias) de luminarias al conjunto global.
- Instalación de nuevo modelo de luminarias: tras analizar y probar diferentes alternativas del mercado de iluminación se probó a realizar simulaciones con el modelo Ansell Aztec Coastal 150, este modelo destaca por su alto flujo luminoso, su alta eficiencia luminosa y su reducido coste, con una disposición de 20 luminarias se consigue cumplir con los requisitos establecidos sin elevar en exceso el consumo eléctrico, esta alternativa sería válida para su instalación.
- Combinación de luminarias actuales y nuevas: aprovechando las luminarias ya instaladas, estas se colocarían en la disposición óptima calculada en el apartado 4.5.1 al igual que en otras alternativas, tras buscar diferentes colocaciones se determinó que instalando 10 luminarias del nuevo modelo Ansell Aztec Coastal 150 se consigue el mejor equilibrio entre gastos de compra y aumento de consumo, esta alternativa resulta a primera vista más conveniente que solo instalando luminarias nuevas, ya que se consiguen mejores valores de iluminación, es menos costosa y el consumo aumenta ligeramente, por lo que a priori es la mejor opción para conseguir el objetivo de este trabajo aunque la uniformidad baje ligeramente y el consumo sea superior comparándolo con una instalación formada exclusivamente por luminarias del nuevo modelo seleccionado.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Descripción del apartado

En esta sección se examinarán los resultados obtenidos en la sección 4, evaluando el grado de cumplimiento de los objetivos expuestos y explorando nuevas líneas de investigación y trabajo para los años posteriores.

5.2 Conclusiones

El objetivo de este trabajo era diseñar un nuevo sistema de iluminación para el edificio de la piscina de la ENM. Para lograr este objetivo se dividió el trabajo en tres partes fundamentales: el análisis de la situación actual y la comprensión de los requerimientos; el desarrollo de un modelo 3D del edificio; y el planteamiento, simulación y análisis de diferentes alternativas lumínicas para mejorar la disposición actual.

En el análisis de la situación actual se determinó que, por tratarse de una instalación deportiva y por las características de su uso, la iluminación en la piscina de la ENM se rige por la norma UNE-EN 12193:2020 “Iluminación de instalaciones deportivas”. La toma de medidas se realizó conforme a lo expresado en esta norma, en la que se detalla tanto el procedimiento para determinar una retícula de cálculo para realizar mediciones, como los valores mínimos de iluminación que deben cumplir diferentes instalaciones deportivas dependiendo de su uso o de sus características.

En el caso de estudio de este trabajo era necesario tomar las medidas de iluminancia a ras del agua de la piscina, lo cual se realizó mediante un luxómetro y una pequeña embarcación hinchable. Tras calcular los valores de los parámetros detallados en la norma, la iluminancia horizontal media (*E_{hor Ave}*) y la uniformidad mínima a media (*U_{2hor}*), se comprueba que los valores están lejos de los mínimos exigidos, lo cual evidencia la necesidad de modificar la instalación.

Para la elaboración del modelo 3D se utilizó el programa DIALux evo. Con este programa se construyó un modelo considerando todos los elementos constructivos, materiales y puntos de luz que pueden tener una influencia en las condiciones lumínicas de la piscina. Al recrear la disposición actual de los proyectores en la escena y ejecutar la simulación en el programa se obtuvieron valores prácticamente idénticos a los recabados mediante el luxómetro, quedando así acreditada la fiabilidad del modelo para analizar las prestaciones de otros sistemas de iluminación alternativos.

A la hora de intentar mejorar la instalación, tras estudiar las opciones disponibles surgieron una serie de alternativas. Se consideró la posibilidad de mejorar las condiciones de iluminación aprovechando el sistema de iluminación actual, modificando la disposición de las luminarias existentes y añadiendo más luminarias del mismo modelo. Sin embargo, con ninguna de las opciones analizadas

se logra cumplir con los requisitos mínimos exigidos por la normativa de aplicación, por lo que fue necesario incluir un nuevo modelo de luminarias más potente para ello.

Para la elección de la luminaria adecuada se llevó a cabo un pequeño estudio de mercado. Se optó por luminarias de empresas de relativo prestigio, precio contenido y cuya potencia oscilase entre los 100 W y 300 W (habitualmente las más eficientes lumínicamente). Se analizaron multitud de modelos diferentes hasta seleccionar la luminaria idónea que proporcionase las prestaciones lumínicas buscadas. Con este nuevo modelo se exploraron dos opciones: sustituir la instalación íntegramente cambiando todas las luminarias y diseñando un nuevo sistema; y aprovechar las luminarias ya instaladas, mejorando su posicionamiento y añadiendo un menor número de luminarias nuevas, reduciendo así la inversión necesaria. Con las dos alternativas se consigue cumplir los requisitos mínimos de iluminación exigidos de manera satisfactoria, lográndose menos consumo con la sustitución íntegra, pero requiriendo una inversión inicial más grande. Además, esta solución proporciona una uniformidad ligeramente superior que con la combinación del nuevo modelo y los proyectores ya instalados. Sin embargo, si se busca reducir la inversión, la alternativa que implica la combinación de ambos modelos de luminaria se perfila como una buena opción.

A la vista del análisis de la situación, la metodología llevada a cabo y la proposición razonada de diferentes alternativas para la resolución del problema, se puede afirmar que se ha cumplido el propósito de este trabajo de manera científica y fidedigna.

5.3 Líneas futuras

Con el objetivo de mejorar, completar y aprovechar el trabajo realizado, algunas de posibles líneas de actuación para hacerlo podrían ser:

- **Sensores de luz:** actualmente el encendido y apagado de las luces se controla mediante un horario fijo. Por las mañanas se encienden de 06:00 a 10:00 h y por las tardes de 18:00 a 23:00 h. Ese horario puede ser variado, pero si no se le presta una debida atención, a consecuencia de la variación de horas de luz en España, (dónde la hora del ocaso puede llegar a variar hasta cuatro horas entre invierno y verano) se pueden dar situaciones en la que los niveles de iluminación estén por debajo de los estándares, generando molestias entre los usuarios o estén encendidas mientras haya luz natural suficiente, aumentando innecesariamente el gasto eléctrico. Es, por lo tanto, un proyecto futuro interesante, la implementación de sensores de luz que detecten la cantidad de luz natural existente, de forma que sea posible programar el encendido de las luminarias cuando realmente sean necesarias.
- **Luminarias regulables:** en el mercado existen multitud de luminarias que disponen de regulación, es decir, cuya intensidad puede ser variada según las necesidades proporcionando más o menos lúmenes. Una continuación de este proyecto sería la de buscar, con los conocimientos ya adquiridos mediante este trabajo, unas luminarias que puedan regular su intensidad, y dependiendo de la luz natural que entre a través de las ventanas puedan ajustarla para ser lo más energéticamente eficientes posibles.
- **Instalación de placas solares:** para la reducción del gasto energético, una posible línea de actuación sería la colocación de placas solares en el techo del Gimnasio Guardiamarina Barrutia. Esto conllevaría un gran ahorro monetario a largo plazo y además de todas las ventajas que conlleva para el medioambiente la producción de energía limpia.
- **Diseño y simulación de un nuevo sistema de iluminación para el Cuartel Almirante Francisco Moreno:** la instalación lumínica del cuartel en el que viven la mayoría de los alumnos, el Cuartel Almirante Francisco Moreno está anticuada, siendo la mayoría de estas luces fluorescentes, contaminantes y poco eficientes. La sustitución de estas luminarias en pasillos, salas de estudio y zonas comunes puede tener grandes ventajas a nivel económico y para el confort de los alumnos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Este es el estado de la energía mundial - en gráficos», Foro Económico Mundial. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.weforum.org/agenda/2022/08/este-es-el-estado-de-la-energia-mundial-en-graficos/>
- [2] M. Moran, «Energía», Desarrollo Sostenible. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [3] «Los motivos principales de la subida del precio de la luz», REPSOL. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/subida-precio-luz/>
- [4] «¿Cómo se produce y se vende la electricidad de la UE?» Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>
- [5] «¿De dónde viene la energía que consumimos?», El Blog de CaixaBank. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.caixabank.es/de-donde-procede-energia-consumimos-espana/>
- [6] U. N. Environment, «The rapid transition to energy efficient lighting: an integrated policy approach», UNEP - UN Environment Programme. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.unep.org/resources/report/rapid-transition-energy-efficient-lighting-integrated-policy-approach>
- [7] «¿Quién inventó realmente la bombilla?», Endesa. Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/biografias/quien-invento-bombilla>
- [8] «Bombillas halógenas | null». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lighting.philips.com.mx/consumer/bombillas-halogenas>
- [9] «El verdadero origen de las bombillas LED», Endesa. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/led-origen-historia>
- [10] H. Onuma, S. Matsumoto, y T. H. Arimura, «How much household electricity consumption is actually saved by replacement with Light-Emitting Diodes (LEDs)?», *Economic Analysis and Policy*, vol. 68, pp. 224-238, dic. 2020, doi: 10.1016/j.eap.2020.09.015.
- [11] BBVA, «Ventajas de las bombillas LED o de “bajo consumo” para ahorrar luz», BBVA NOTICIAS. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/estas-son-las-ventajas-de-las-bombillas-led-o-de-bajo-consumo-para-ahorrar-luz/>

[12] «Upgrade your household lighting», NSW Climate and Energy Action. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.nsw.gov.au/households/rebates-grants-and-schemes/household-energy-saving-upgrades/upgrade-your-household-lighting>

[13] A. Sánchez de Miguel *et al.*, «Contaminación lumínica en España 2010», sep. 2010, Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/41908>

[14] «Gil et al. - 2022 - Limitaciones en la normativa y oportunidades para .pdf». Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://guaix.fis.ucm.es/sites/guaix.fis.ucm.es/reec1/files/Limitaciones_y_oportunidades_en_normativa_LUCES-CEI.pdf

[15] «Steps to keep your mood and motivation steady throughout the year-Seasonal affective disorder (SAD) - Symptoms & causes», Mayo Clinic. Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/seasonal-affective-disorder/symptoms-causes/syc-20364651>

[16] K. Nitter, N. U. of Science, y Technology, «How does light impact kids in school?». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://phys.org/news/2022-09-impact-kids-school.html>

[17] C. Blume, C. Garbazza, y M. Spitschan, «Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood», *Somnologie (Berl)*, vol. 23, n.º 3, pp. 147-156, 2019, doi: 10.1007/s11818-019-00215-x.

[18] J. S. García, «422 muertes por ahogamiento en 2023, un 8 % más que en 2022», Real Federación Española de Salvamento y Socorrismo. Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://rfess.es/2024/01/422-muertes-por-ahogamiento-en-2023-un-8-mas-que-en-2022/>

[19] Armada, «Escuela Naval Militar - Escuelas de la Armada - Galería Fotográfica - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/multimedialogaleria/prefLang-es/18escuelas--02enm-es?_pageNum=2¶mNo=

[20] «UNE12193-2020.pdf». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ledprojects.es/wp-content/uploads/2023/07/UNE12193-2020.PDF>

[21] «Conoce la historia de AutoCAD: ¡sus orígenes! | Deusto Formación», Deusto. Accedido: 24 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.deustoformacion.com/cursos/disenio-arquitectura-audiovisual/curso-autocad/historia>

[22] «Empedocles - Biography», Maths History. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Empedocles/>

[23] «Pinhole Camera», Mark Tamer Ellis. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://markellisimagery.com/pinhole-camera>

[24] «Pinhole Camera». Accedido: 24 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://nrich.maths.org/8041/note>

[25] «La condena que llevó al científico Alhazen a descubrir los secretos de la luz», *BBC News Mundo*. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44457642>

- [26] «Roger Bacon y la Innovación óptica | Vertex Lab». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://vertexlab.com.mx/articulos-para-blog/roger-bacon-y-la-innovacion-optica/>
- [27] «Ley de Snell», Fibra Optica_blog. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://fibropticablog.wordpress.com/2014/07/14/ley-de-snell/>
- [28] «La naturaleza de la luz, corpuscúlos y ondas - Día Internacional de la Luz - Nodo México», Día de la Luz. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dielaluz.unam.mx/leer/66/la-naturaleza-de-la-luz-corpusculos-y-ondas>
- [29] «Teoría corpuscular de la Luz de Newton», Lifeder. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/teoria-corpuscular-luz-newton/>
- [30] A. Beléndez, «Christian Huygens (1629-1695) | Física para tod@s». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.ua.es/fisicateleco/2015/03/10/huygens-1629-1695/>
- [31] «Huygens y la naturaleza de la luz: el modelo ondulatorio. Museo Virtual de la Ciencia del CSIC». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz27.htm>
- [32] K. M. Pedersen, «Leonhard Euler's Wave Theory of Light», *Perspectives on Science*, vol. 16, n.º 4, pp. 392-416, dic. 2008, doi: 10.1162/posc.2008.16.4.392.
- [33] «Light Interacts With Itself When Squeezed Through "Slits In Time"», IFLScience. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iflscience.com/light-interacts-with-itself-when-squeezed-through-slits-in-time-68282>
- [34] A. J. Durán, «Maxwell ve la luz», Blog del Instituto de Matemáticas de la Universidad de Sevilla. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://institucional.us.es/blogimus/2021/11/maxwell-ve-la-luz/>
- [35] «Efecto fotoeléctrico. La naturaleza de la luz.», MotyScience. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.motyscience.com/bachillerato/2o-bachillerato/quimica-ii-2o-bachillerato/efecto-fotoelectrico-la-naturaleza-de-la-luz/>
- [36] A. Cassini y M. L. Levinas, «La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico: un análisis histórico-epistemológico», *Revista latinoamericana de filosofía*, vol. 34, n.º 1, pp. 5-38, may 2008.
- [37] «Millikan_OpenMind_03_05_2017_ESP.pdf». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/65747/1/Millikan_OpenMind_03_05_2017_ESP.pdf
- [38] «De Broglie: las ondas de materia – Física cuántica en la red». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fisicacuantica.es/de-broglie-las-ondas-de-materia/>
- [39] A. Bernardo, «Ésta es la imagen histórica de la luz como onda y partícula», Blogthinkbig.com. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blogthinkbig.com/imagen-historica-de-la-luz-como-onda-y-particula>
- [40] P. Á. B. Espinosa, «3er Curso, Grado en Ingeniería Eléctrica». [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/75442/ILUMINACION_GIE-3_2en1.pdf
- [41] «UNAD-2020-Física-de-la-luz.pdf». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://m16dialuz.unlp.edu.ar/wp-content/uploads/2020/05/UNAD-2020-F%C3%ADsica-de-la-luz.pdf>

- [42] «UV-Visible Spectroscopy». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/uv-vis/spectrum.htm>
- [43] B. Giménez, C. Cabanes, M. Antón, y T. Clemente, «Construcciones Arquitectónicas». [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/103661/Blanca?sequence=1>
- [44] «Curso de iluminación». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/fundamentosIluminacion-leyesBasicasDeIluminacion.php>
- [45] «Vicente - ESTUDIO COMPARATIVO DE ILUMINANCIAS GLOBALES EN SU.pdf». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/9749/1/TESIS_MASTER_MIGUEL_ANGEL_FERNANDEZ_VICENTE223.pdf
- [46] «Color y Contraste | Apoyo a la edición Web». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.ucm.es/edicionweb/contraste-y-color>
- [47] Stephen, «Text Contrast for Web Pages», Medium. Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://devstephen.medium.com/text-contrast-for-web-pages-d685636c0749>
- [48] «BERRADA_MERYEM_CSA-F0062.pdf». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/112624/BERRADA_MERYEM_CSA-F0062.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [49] «Magnitudes y unidades de medida.» Accedido: 4 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://recursos.citcea.upc.edu/llum/fotometria/magnitud.html>
- [50] E. M. Cordero Pérez, «Estudio de indicadores de calidad de fuentes luminosas y su correlación con la discriminación y la apariencia del color de fuentes convencionales y fuentes LED», doctoralThesis, 2016. Accedido: 4 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dehesa.unex.es:8443/handle/10662/4209>
- [51] D. Hakimi, «How to Let Those True Colors Come Shining Through», Insights. Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.alconlighting.com/blog/lighting-design/color-rendering-index-cri/>
- [52] «CRI de las campanas led». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://campanasled.com/Blog/cri-de-las-campanas-led/>
- [53] «La radiación del cuerpo negro». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>
- [54] G. A. V. Mazuelos y A. M. Alcojor, «La temperatura de color y su rol dentro de la iluminación artificial de espacios de educación inicial», *Arquitek*, n.º 19, Art. n.º 19, jun. 2021, doi: 10.47796/ra.2021i19.490.
- [55] «La Temperatura De Color: ¿Cómo Elegir La Adecuada?» Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://megalamparas.com.gt/temperatura-de-color-como-elegir/>
- [56] «01 LUZ Y COLOR v3.pdf». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/3_anio/acustica/Luminotecnica/01%20LUZ%20Y%20COLOR%20v3.pdf
- [57] «FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN by Andreina Nohelia Arana Rosero - Infogram». Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://infogram.com/fenomenos-de-propagacion-1h7z2l8kvexlx6o>
- [58] «18_-_reflexion_y_refraccion.pdf». Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica_Aplicada/transparencias/05-Luz/18_-_reflexion_y_refraccion.pdf

- [59] «Presentacion3.pdf». Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dcb.ingenieria.unam.mx/wp-content/themes/tempera-child/CoordinacionesAcademicas/FQ/MaterialDidacticoAyO/Presentacion3.pdf>
- [60] Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.um.es/leq/laser/Misc/Capndx3.htm>
- [61] «TEO-13_S1-C04_MAGNITUDES.pdf». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.fadu.edu.uy/condicionamiento-luminico/files/2012/02/TEO-13_S1-C04_MAGNITUDES.pdf
- [62] «Courbe photométrique», Ledixa. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ledixa.com/lexique/courbe-photometrique>
- [63] «La utilidad de las curvas fotométricas», Iluminet revista de iluminación. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iluminet.com/curvas-fotometria-iluminacion/>
- [64] «DIALux_evo- _New_calculation_method.pdf». Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dialux.com/fileadmin/documents/DIALux_evo-_New_calculation_method.pdf
- [65] «Guardiamarina primer muerto en combate 1718 - Todoavante.es». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://todoavante.es/index.php?title=Guardiamarina_primer_muerto_en_combate_1718
- [66] Armada, «Saber más de Historia - Escuela Naval Militar - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/personalennm/prefLang-es/01bienvenida--02historia--01historiasm>
- [67] D. de Pontevedra, «Marín, el Tiro Naval Janer (II)», Diario de Pontevedra. Accedido: 9 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.diariodepontevedra.es/opinion/angel-garcia-carragal/marin-tiro-naval-janer-ii/202006011517451089002.html>
- [68] Armada, «La ENM organiza los XXI Campeonatos Deportivos de Academias Militares - Noticias de la Armada - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosnoticias/prefLang-es/00noticias--2017--11--NT-172-CAMP-INTERACADEM-es?_selectedNodeID=3131089&_pageAction=selectItem&_pageNum=41¶mNo=000000
- [69] «disano.it/es/cat/fosnova/10523-blue-line/46740-Sevilla-3---220-240V/». Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.disano.it/es/cat/fosnova/10523-blue-line/46740-Sevilla-3---220-240V/>
- [70] «IUPAC-Actinometers04.pdf». Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://kgroup.du.edu/resources/IUPAC-Actinometers04.pdf>
- [71] *Lifebuoy - Download Free 3D model by Akoa (@s_pham23)*, (5 de febrero de 2024). Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://sketchfab.com/models/44fc0edc2da24a90bb4aee75d9182eff/embed?autostart=1>
- [72] «644d69101d-wp-pontevedra.jpg (1200×654)». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pontevedraviva.com/uploads/fotos/foto/936/644d69101d-wp-pontevedra.jpg>
- [73] «Campeonato Gallego Juvenil en la Escuela Naval de Marín». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://waterpolopontevedra.com/campeonato-gallego-juvenil-en-la-escuela-naval-de-marin/>

[74] «Manual PNB. Unidad Teórica 1: NOMENCLATURA Náutica. - Navegantes Oceánicos». Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://navegantesoceanicos.com/manual-pnb-unidad-teorica-1-nomenclatura-nautica/>

[75] «Aztec Symmetrical», Ansell Lighting. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ansell-lighting.com/products/aztec-symmetrical/>

[76] D. de Pontevedra, «“El impacto económico de la Escuela Naval en su entorno es de 18 millones al año”», Diario de Pontevedra. Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.diariodepontevedra.es/articulo/pontevedra-ciudad/el-impacto-economico-de-la-escuela-naval-en-su-entorno-es-de-18-millones-al-ano/20141221001500266582.html>

[77] «rgmcap08.pdf». Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2017/08/rgmcap08.pdf>

[78] «estrategianacionalcontralapobrezaenergetica_tcm30-502982.pdf». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-pobreza-energetica/estrategianacionalcontralapobrezaenergetica_tcm30-502982.pdf

[79] «Instituto Nacional de Estadística. (National Statistics Institute)», INE. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.htm?padre=1927&capsel=9954>

[80] «manual-luxometro-pce-172-nuevo.pdf». Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pce-iberica.es/manuales/manual-luxometro-pce-172-nuevo.pdf>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

La recolocación de la Escuela Naval Militar en Marín en el año 1943 supuso la revitalización económica de una zona tradicionalmente pesquera, superando su impacto económico solo en Marín y la zona urbana de Pontevedra los 18 millones de euros al año [76]. El Vicealmirante José María Núñez Torrente, que fue Comandante Director de la ENM entre 2015 y 2018, declaró que: “no se entendería Marín sin la ENM, ni esta sin Marín” [77].

Por la importancia de la ENM en la provincia, se espera de ella un importante papel social, como puede ejercerse cediendo sus instalaciones a los ciudadanos que las necesiten, para ello estas instalaciones necesitan estar a la altura si se quieren celebrar en ella competiciones o campeonatos que aumenten su renombre y con ello la aprobación de los habitantes hacia ella.

Uno de los principales obstáculos de este trabajo ha radicado en la búsqueda de las luminarias, ya que aquellas con buenas prestaciones suelen tener precios y consumos elevados, se ha hecho especial énfasis en buscar la mejor relación calidad-precio posible para una posible modificación de la instalación siguiendo este trabajo.

La transición hacia la iluminación LED conlleva implicaciones medioambientales significativamente positivas. La inherente eficiencia energética de las luces LED reduce el consumo de electricidad, disminuyendo así las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de esta. Además, dado que las luces LED tienen una vida útil considerablemente más larga que las tecnologías de iluminación convencionales como los fluorescentes o los halógenos, se reduce la cantidad de residuos electrónicos y la necesidad de producción de nuevas luminarias, contribuyendo a la reducción de la contaminación y el consumo de recursos naturales. La migración hacia la iluminación LED representa un paso significativo hacia la sostenibilidad ambiental, reduciendo la huella de carbono y promoviendo un uso más responsable de los recursos energéticos.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En la actualidad la pobreza energética es un problema que afecta de lleno no solo a países lejanos, sino a nuestro propio país, España. En la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética, elaborada por el Ministerio para la Transición Ecológica se define la pobreza energética como: “la situación en la que se encuentra un hogar en el que no pueden ser satisfechas las necesidades básicas de suministros de energía, como consecuencia de un nivel de ingresos insuficiente y que, en su caso, puede verse agravada por disponer de una vivienda ineficiente en energía” [78]. Esta situación de pobreza puede verse reflejada en diferentes aspectos como pueden ser la dificultad de mantener el hogar a temperaturas adecuadas, un gasto destinado a suministros energéticos desproporcionados en relación con la renta o la imposibilidad de hacer frente al pago de las facturas. Según los datos recogidos por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el año 2023, publicados en la Encuesta de Condiciones de Vida (ECV) [79] un 20,7% de la población española no pudo mantener su vivienda a una temperatura adecuada a lo largo del año, el dato más alto de la serie histórica y que supone un incremento de un 9,6% respecto al año 2008, el peor año de la última gran crisis financiera.

A la vista de estos alarmantes resultados surge la necesidad ética y el compromiso social de todos los españoles de reducir el consumo eléctrico, ya que el aumento de la demanda genera la subida de precios y la imposibilidad de muchas familias de afrontar estos gastos. Es incluso más importante, desde el punto de vista de la ENM como institución reducir este gasto en favor de todos los españoles, adoptando medidas como la sustitución de luminarias poco eficientes y contaminantes por otras más modernas como las LED.

ANEXO III: EQUIPO UTILIZADO



Figura 0-1 Luxómetro PCE-172 [80]

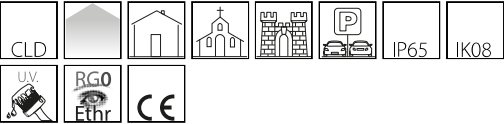
- 1- Botón de ON/OFF: Apaga y enciende el aparato.
- 2- Pantalla: Representa los datos de medición.
- 3- Botón UNITS: Cambia el modo de medición de lux a fotocandela ($1 \text{ lux} = 0,093 \text{ fotocandelas}$).
- 4- Botón LOAD: Ilumina la pantalla en situaciones de baja luminosidad.
- 5- Botón REC Setup: Guarda el valor medido en ese momento en la memoria del luxómetro.
- 6- Botón PEAK: Congela el valor pico de luxes en un momento determinado.
- 7- Botón HOLD: Congela el valor actual de luxes en un momento determinado.
- 8- Botón RANGE: Cambia la escala de medición, de 400 a 4000 luxes.
- 9- Botón MAX MIN: Muestra los valores máximos y mínimos registrados.
- 10- Botón REL: Pone el medidor en 0 para medir incrementos o decrementos desde cierto valor.

ANEXO IV: DOCUMENTACIÓN DE LUMINARIAS

En este anexo se incluirá toda la documentación referente a las luminarias utilizadas para este trabajo.

Sevilla 3 - 220-240V

Código: 22413532-00



Ideal para iluminar fachadas, monumentos o zonas exteriores, Sevilla es un pequeño proyector: esta luminaria propuesta en varias potencias es la que mejor responde a las exigencias funcionales y estéticas de cualquier proyecto de iluminación.

Las diferentes versiones permiten adoptar la solución más adecuada, para evitar el desperdicio y optimizar el consumo.

La gama Sevilla incluye diferentes temperaturas de color (3000, 4000 o 6500K), para poder armonizar la luz con los materiales a iluminar y el entorno exterior. Un producto de alta calidad a un precio muy asequible.



INFORMACIÓN GENERAL

Artículo	Sevilla 3 - 220-240V
Código	22413532-00

DIMENSIONES Y PESO

Longitud (mm)	312 mm
Anchura (mm)	240 mm
Altura (mm)	312 mm
Peso (Kg)	1.286 kg

INSTALACIÓN

Superficie de exposición al viento (mm)	L 20000 mm², F 60000 mm²
---	--------------------------

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y CONTROLES

Tipo de tensión	AC
Tensión Mín. (V)	220 V
Tensión Máx. (V)	240 V
Frecuencia Mín. (Hz)	50 Hz
Frecuencia Máx. (Hz)	60 Hz
Frecuencia (Hz)	50 Hz
Sigla cableado	CLD
Factor de potencia	≥0.9
Clase de aislamiento	Clase I
Control y Regulación	Ninguno

Sevilla 3 - 220-240V

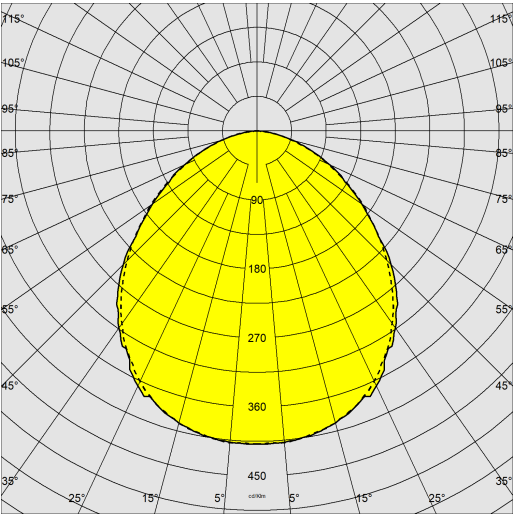
Código: 22413532-00

DATOS FOTOMÉTRICOS

Fuente de luz	LED
CRI	80
Flujo luminoso (salida) (lm)	9900 lm
Potencia absorbida (total) (W)	90 W
CCT	4000 K
Eficiencia luminosa (lm/W)	110 lm/W
Mantenimiento del flujo luminoso LED	50000 hr, L 80, B 20

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

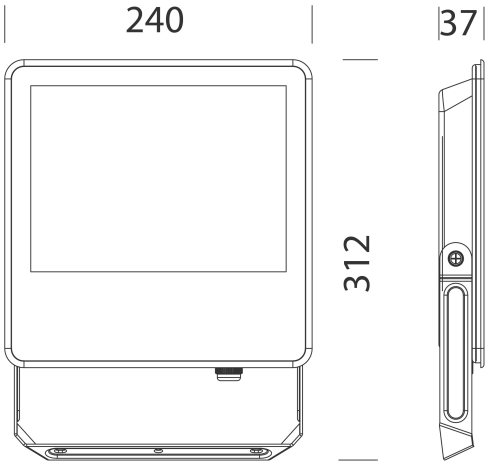
Resistencia mecánica al impacto (IK)	IK08
IP	65



Sevilla 3 - 220-240V

Código: 22413532-00

MATERIALES Y COLORES



DESCARGAR

MONTAJES

InstruccionesMontaje SEVILLA 1-2-3-4-5-6-7
rev11.pdf

DIBUJOS

EsquemasTécnicos sevilla3.dxf



Cuerpo	de aluminio fundido a presión.
Difusor	en vidrio templado esp. 4 mm, resistente al choque térmico y al impacto (UNI EN 12150-1:2001).
Disipador	integrado.
Barnizado	fase de pretratamiento superficial del metal, barnizado con polvo de poliéster, resistente a la corrosión, a la niebla salina y estabilizado a los rayos UV.
Color	Grafito
Equipamiento	-equipado con soporte galvanizado y barnizado. -con cable eléctrico L = 0,3m.

NORMAS Y CUMPLIMIENTO

Clase de seguridad fotobio-lógica	RG0 Ethr
Marcados y pruebas	CE
Normas de referencia	EN60598-1. Tienen un grado de protección según la norma EN60529.
Etiqueta Energética	D

GARANTÍA

Garantía posventa	3 yr
-------------------	------



@es ansel



@es ansel



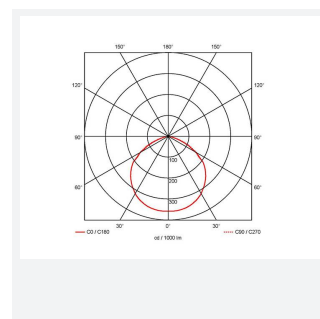
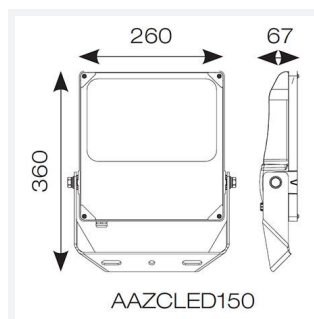
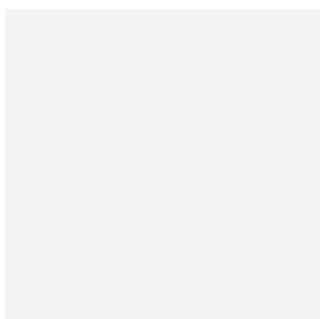
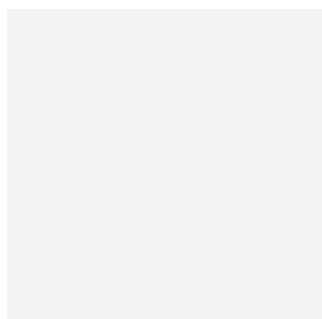
Ansell Lighting E

Aztec Coastal Simétrico

Proyector AZTEC COASTAL Simétrico 150W 5000K

Code: AAZCLED150

Categoría	Floodlights
Solución	Áreas auxiliares, Comercial, Educación, Sanidad, Terciario, Industrial, Exterior, Retail



CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

- Construcción en aluminio, electroforesis superficial y tratamiento anticorrosión
- Adaptado para áreas de posible corrosión; zonas costeras o piscinas
- Válvula de condensación preinstalada para evitar humedad interna
- No regulable
- Test de salinidad verificado de 3000h EN ISO 9227
- Tecnología de lentes asimétricas de alto rendimiento para evitar la contaminación lumínica
- Cable de 1,5m incorporado para una fácil instalación

INFORMACIÓN GENERAL

Potencia	150W
Flujo Luminico	21800lm
lm/W	145lm/W
Ángulo de Apertura	115
CRI	70
Temperatura de color seleccionable	5000K
Entrada	220/240V
Temperatura operativa	-30°C - 50°C
SDCM	5
Peso	4.052 kg

INFORMACIÓN TÉCNICA

Fuente de luz	LED
Color / Acabado	Aluminio
Ratio IP	IP66
Protección	1
Interior / Exterior	Exterior
Superficie / Empotrado / Suspendido	Montaje en poste, Pared
Vida útil	L80 54,000h
Garantía (años)	5
Marcado CE	Sí
Altura	360 mm



1 Luminaire data

1.1 ANSELL Lighting, Aztez Coastal Symmetrical LED (AAZCLED150)

1.1.1 Data sheet

Manufacturer: ANSELL Lighting

AAZCLED150 Aztez Coastal Symmetrical LED Floodlight

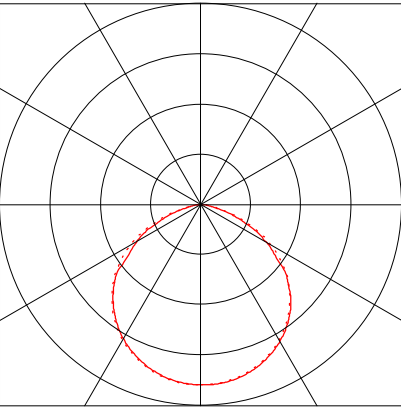
Luminaire data

Luminaire efficiency : 100%
 Luminaire efficacy : 145.92 lm/W
 Classification : A40 ↓ 100.0% ↑ 0.0%
 CIE Flux Codes : 49 83 98 100 100
 UGR 4H 8H : 33.5 / 34.0
 Power : 150 W
 Luminous flux : 21888 lm

Equipped with

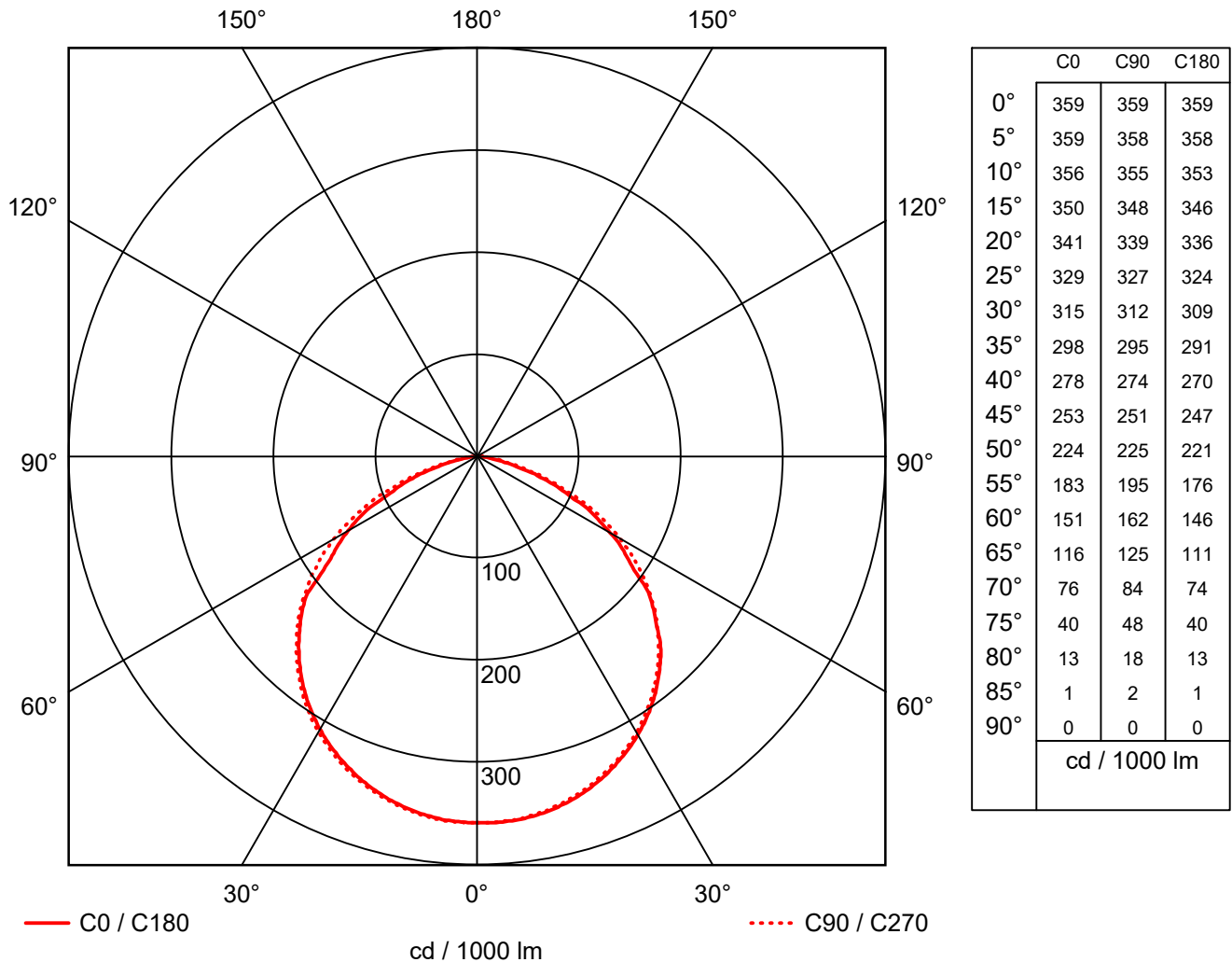
Quantity : 1
 Designation :
 Colour :
 Luminous flux : 21888 lm

Dimensions : 232 mm x 148 mm x 1 mm



1.1 ANSELL Lighting, Aztez Coastal Symmetrical LED... (AAZCLED150)

1.1.2 LDC



Manufacturer : ANSELL Lighting
 Order number : AAZCLED150
 Luminaire name : Aztez Coastal Symmetrical LED Floodlight
 Equipment : 1 x 150 W / 21888 lm
 Dimensions : L 232 mm x W 148 mm x H 1 mm
 File name : rlx_20211116083052.ltd

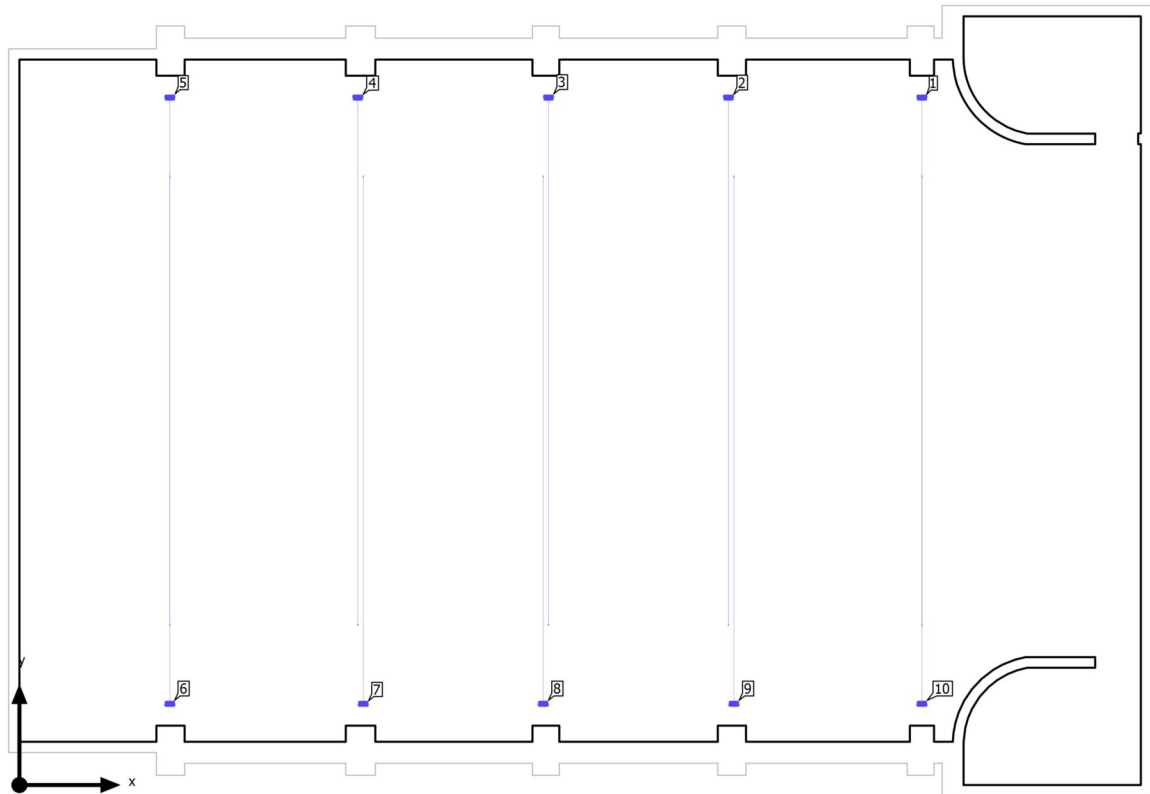
Efficiency factor : 100%
 Luminaire efficacy : 145.92 lm/W(A40)
 Light distribution :
 Beam Angle : 55.6° C0
 57.4° C90
 54.5° C180
 57.5° C270

ANEXO IV: DOCUMENTACIÓN DE DIALUX EVO

En este anexo se incluirá toda la documentación generada por el software DIALux evo referente a las simulaciones mostradas en el trabajo, correspondiendo el orden de la documentación al orden de aparición de las simulaciones a lo largo del trabajo.

Modelo simplificado con materiales seleccionados.

Plano de situación de luminarias





Modelo simplificado con materiales seleccionados.

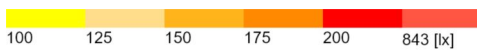
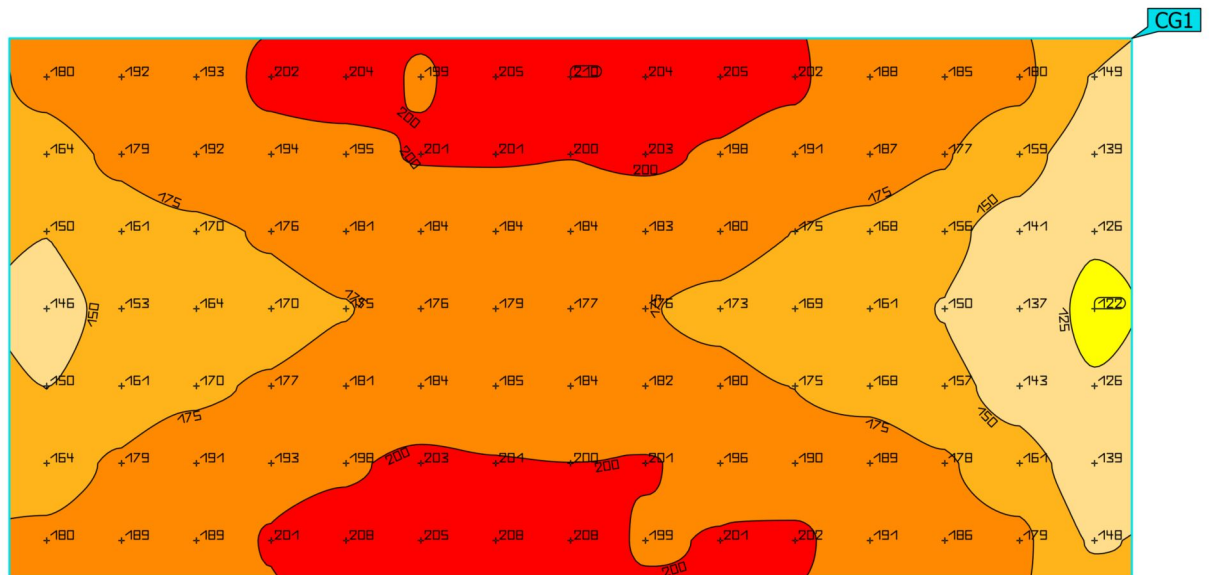
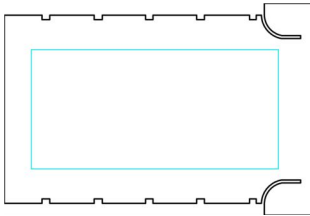
Lista de luminarias

Φ_{total} 200000 lm	P_{total} 1600.0 W	Rendimiento lumínico 125.0 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico
10	Oppe Lighting	140062034	LEDflood-P Re440-160W-4000-W-BL	160.0 W	19999 lm	125.0 lm/W

Modelo simplificado con materiales seleccionados. (Escena de luz 1)

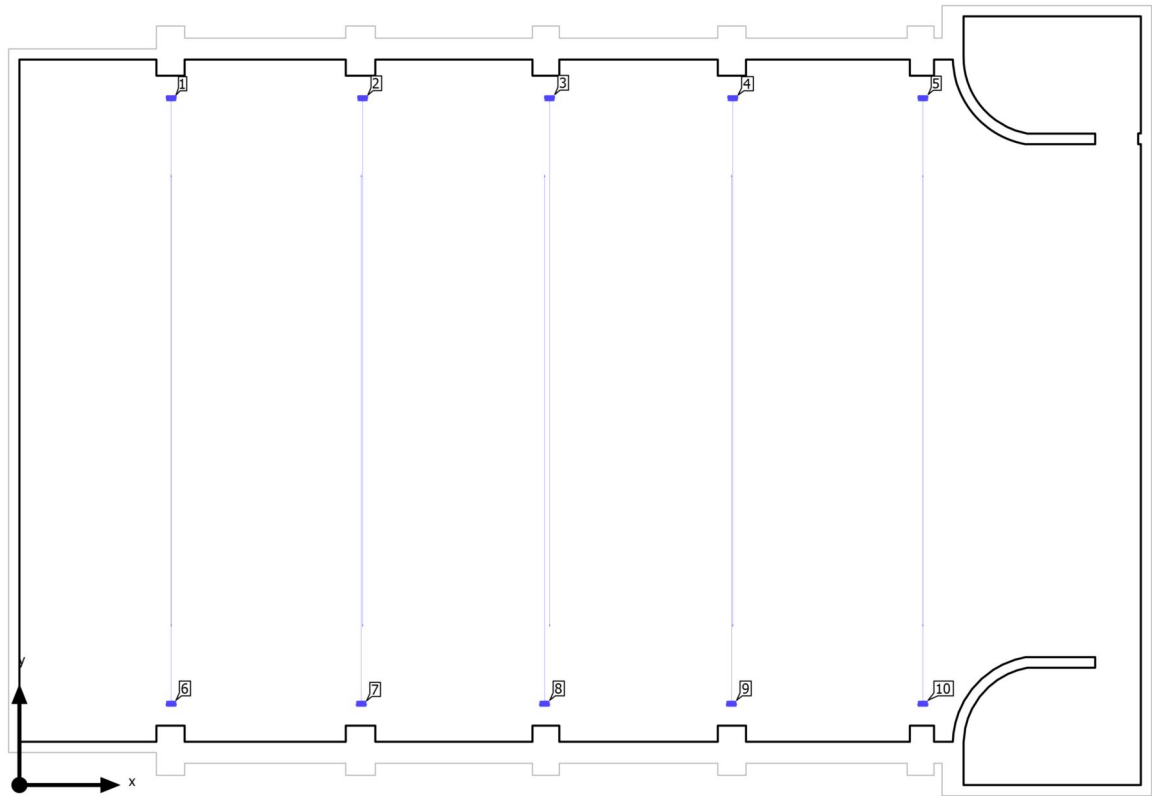
Retícula de cálculo.



Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_o (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo. Iluminancia perpendicular Altura: 0.000 m	179 lx	122 lx	210 lx	0.68	0.58	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))

Plano de situación de luminarias





Modelo completo con materiales seleccionados.

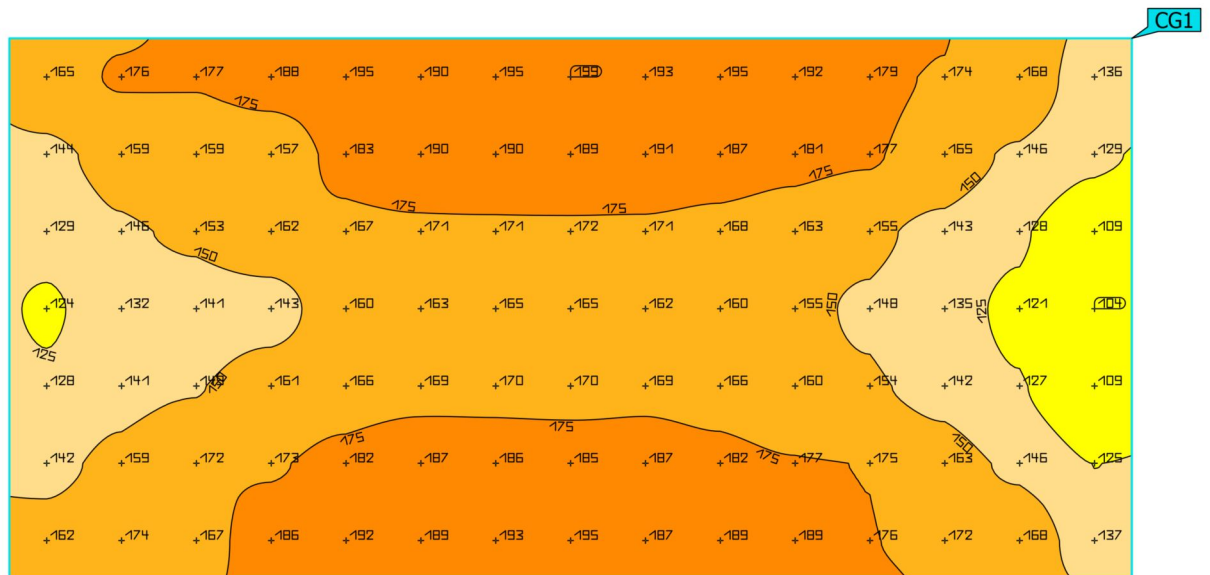
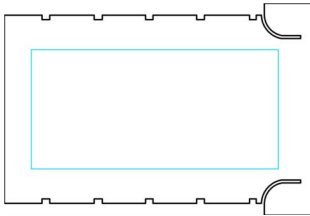
Lista de luminarias

Φ_{total} 200000 lm	P_{total} 1600.0 W	Rendimiento lumínico 125.0 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico
10	Oppe Lighting	140062034	LEDflood-P Re440-160W-4000-W-BL	160.0 W	19999 lm	125.0 lm/W

Modelo completo con materiales seleccionados. (Escena de luz 1)

Retícula de cálculo



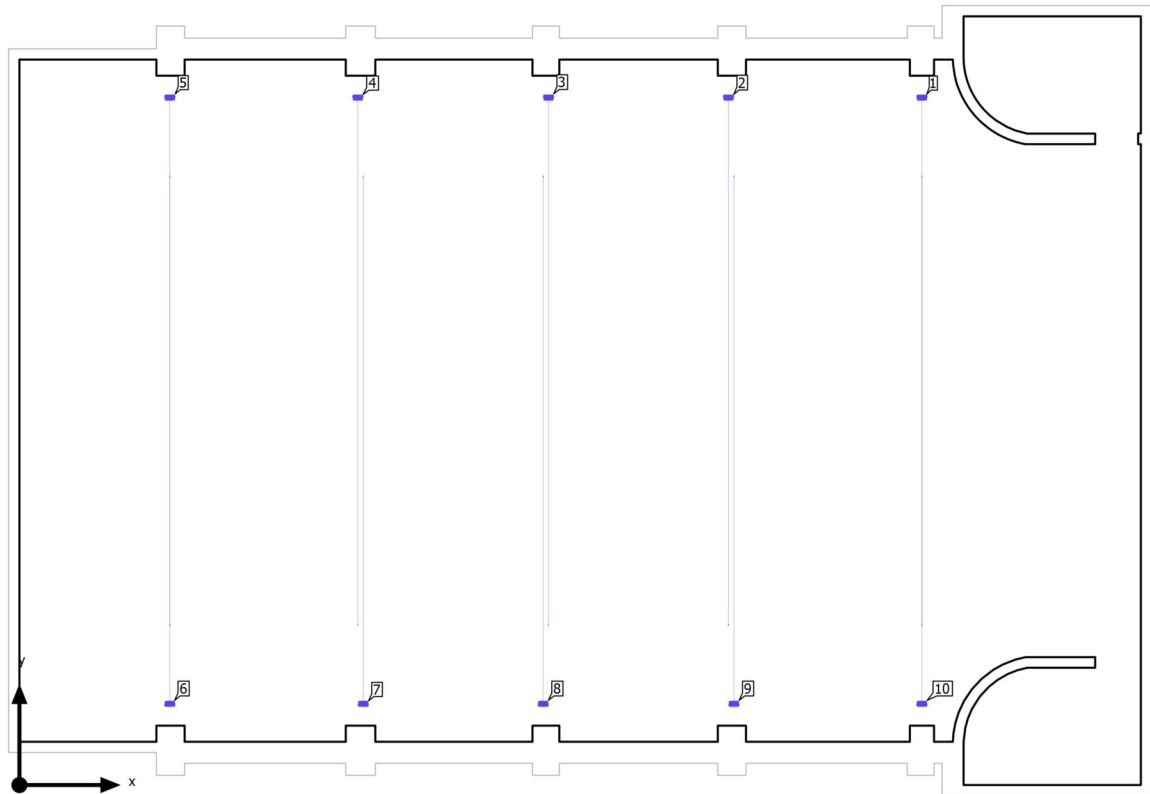
Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_o (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo Iluminancia perpendicular Altura: 0.067 m	164 lx	104 lx	199 lx	0.63	0.52	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))



Modelo simplificado con materiales predeterminados.

Plano de situación de luminarias





Modelo simplificado con materiales predeterminados.

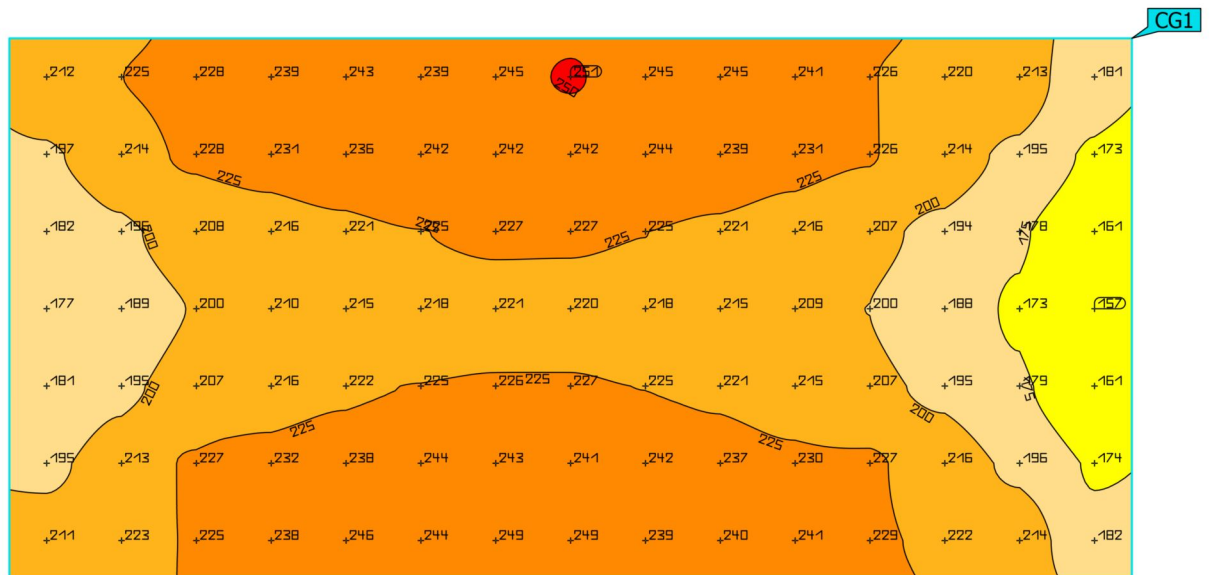
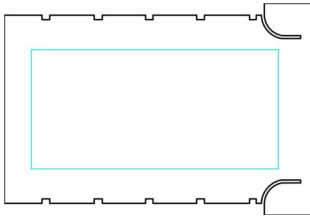
Lista de luminarias

Φ_{total} 200000 lm	P_{total} 1600.0 W	Rendimiento lumínico 125.0 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico
10	Oppe Lighting	140062034	LEDflood-P Re440-160W-4000-W-BL	160.0 W	19999 lm	125.0 lm/W

Modelo simplificado con materiales predeterminados. (Escena de luz 1)

Retícula de cálculo.

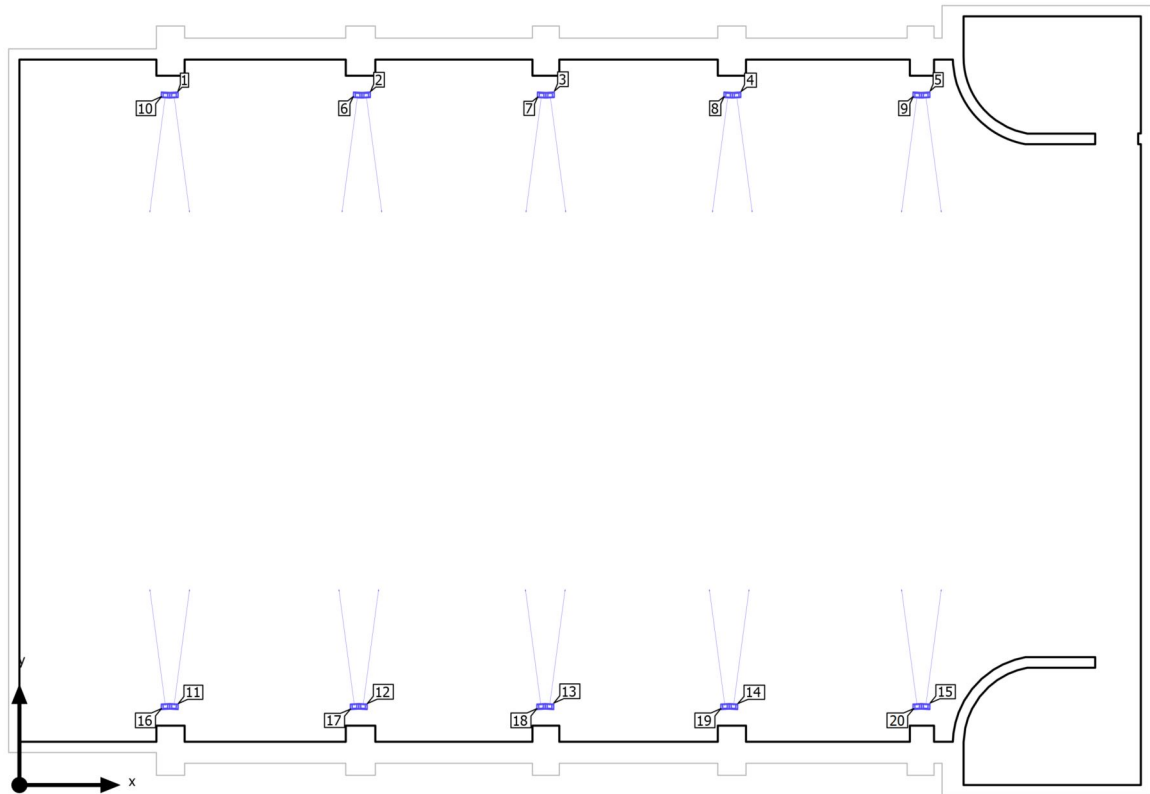


Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_o (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo. Iluminancia perpendicular Altura: 0.000 m	217 lx	157 lx	251 lx	0.72	0.63	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))

Situación actual de las luminarias.

Plano de situación de luminarias





Situación actual de las luminarias.

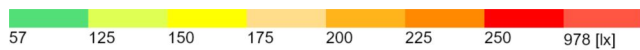
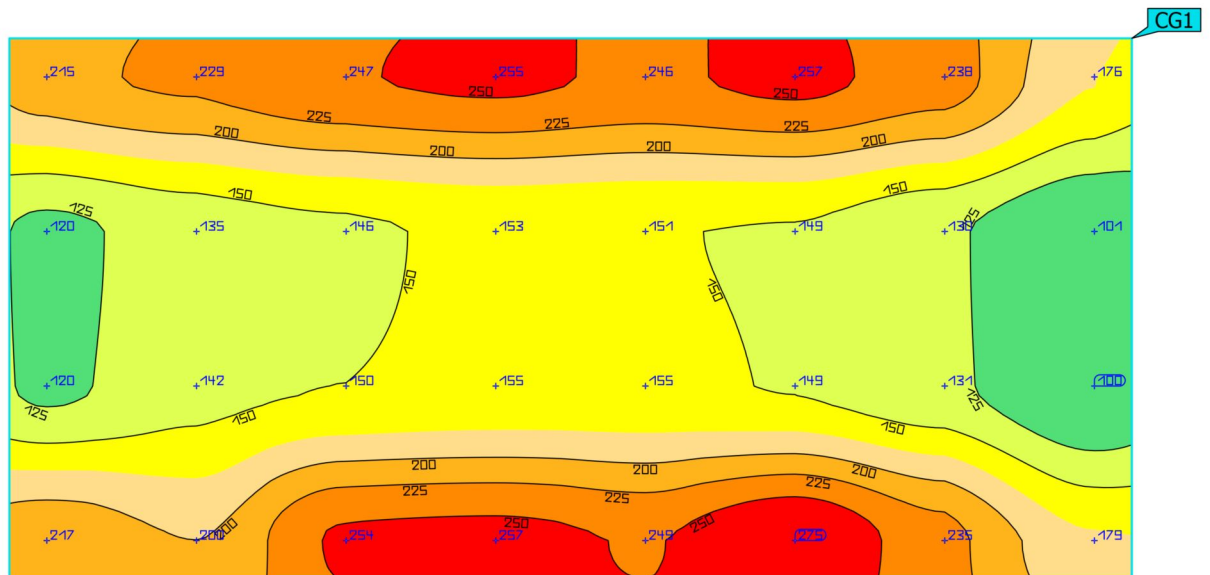
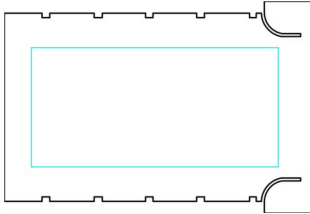
Lista de luminarias

Φ_{total} 197980 lm	P_{total} 1800.0 W	Rendimiento lumínico 110.0 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico
20	Disano Illuminazione S.p.A	22413532-00	Sevilla 3 - 220-240V 4000K CRI70 90W CLD Grafite	90.0 W	9899 lm	110.0 lm/W

Situación actual de las luminarias. (Escena de luz 1)

Retícula de cálculo.

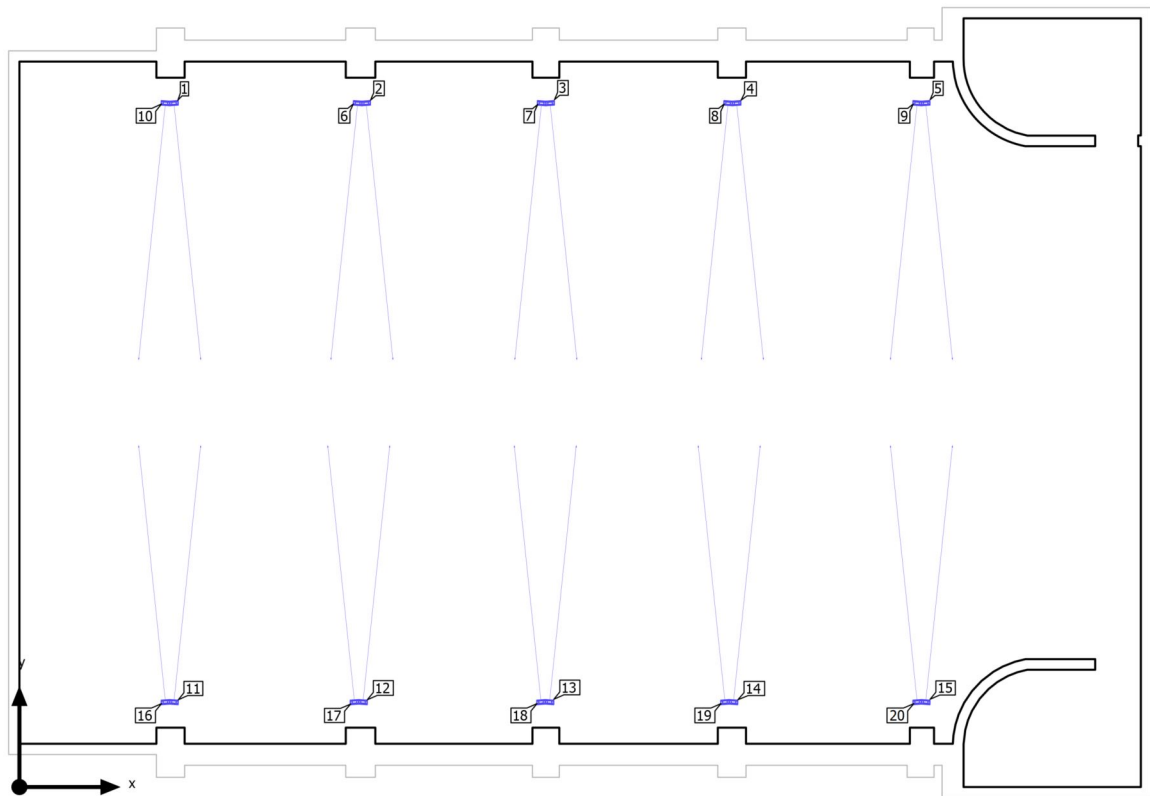


Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_0 (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo. Iluminancia perpendicular Altura: 0.067 m	185 lx	100 lx	275 lx	0.54	0.36	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))

Recolocación de las luminarias existentes.

Plano de situación de luminarias





Recolocación de las luminarias existentes.

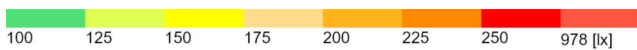
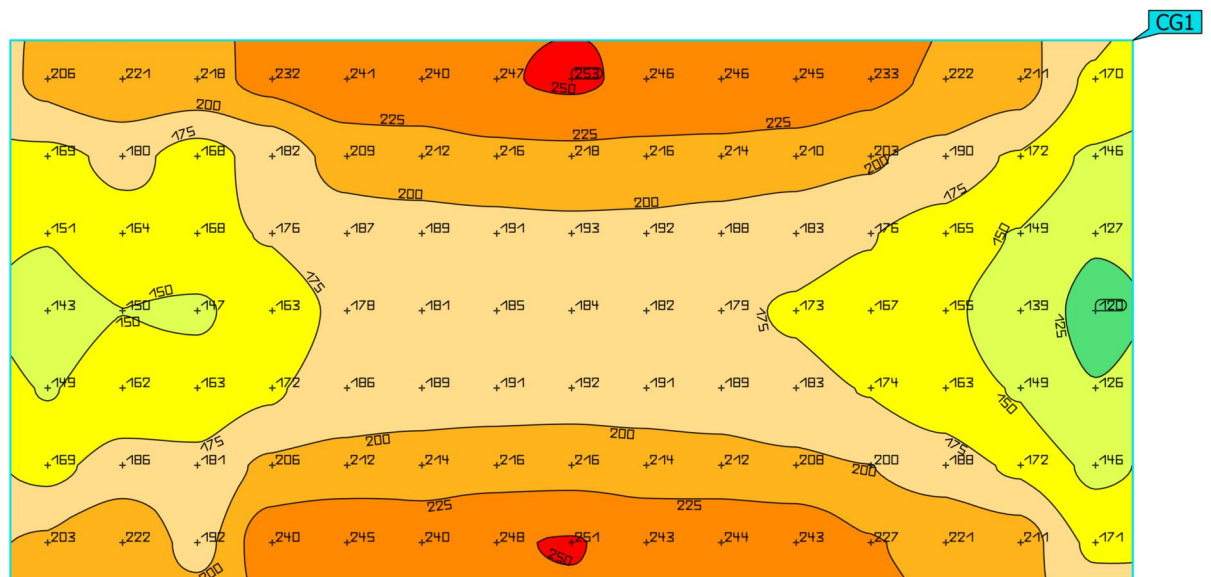
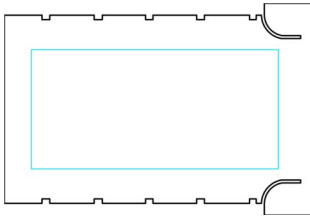
Lista de luminarias

Φ_{total} 197980 lm	P_{total} 1800.0 W	Rendimiento lumínico 110.0 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico
20	Disano Illuminazione S.p.A	22413532-00	Sevilla 3 - 220-240V 4000K CRI70 90W CLD Grafite	90.0 W	9899 lm	110.0 lm/W

Recolocación de las luminarias existentes. (Escena de luz 1)

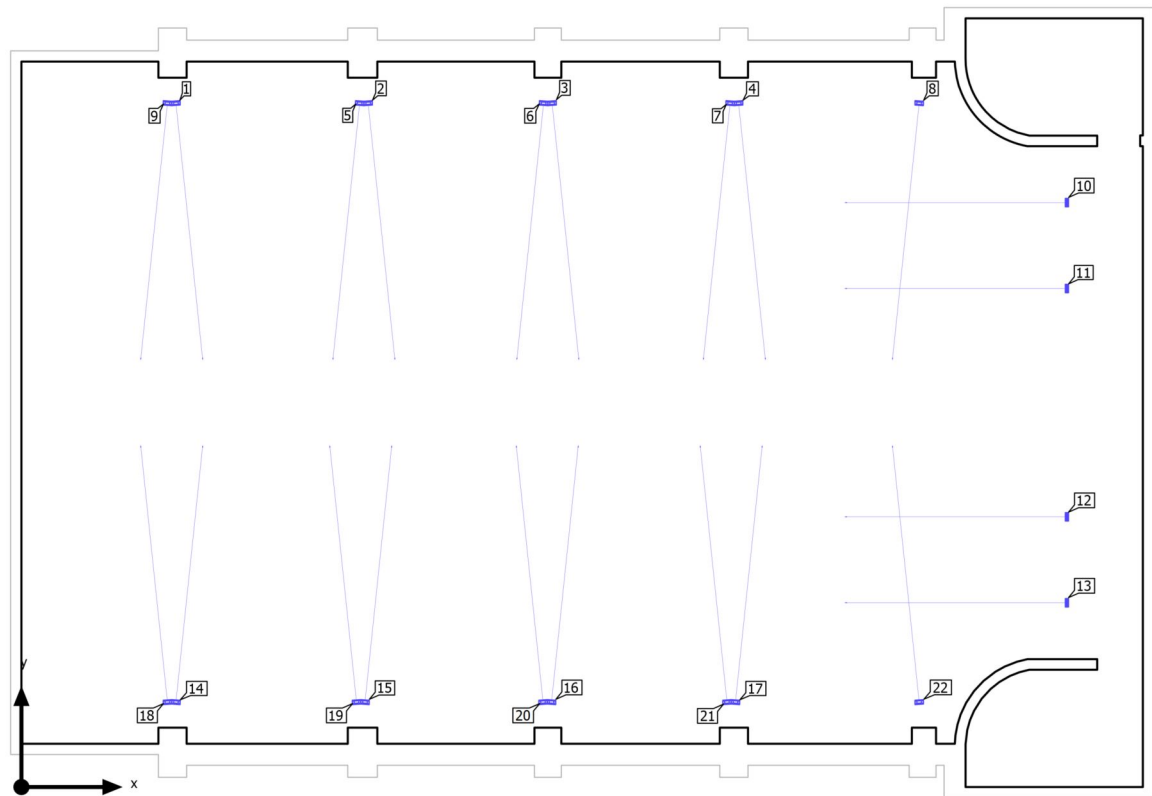
Retícula de cálculo.



Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_o (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo. Iluminancia perpendicular Altura: 0.067 m	193 lx	120 lx	253 lx	0.62	0.47	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))

Plano de situación de luminarias





Instalación de nuevas luminarias del mismo modelo.

Lista de luminarias

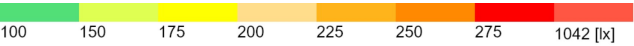
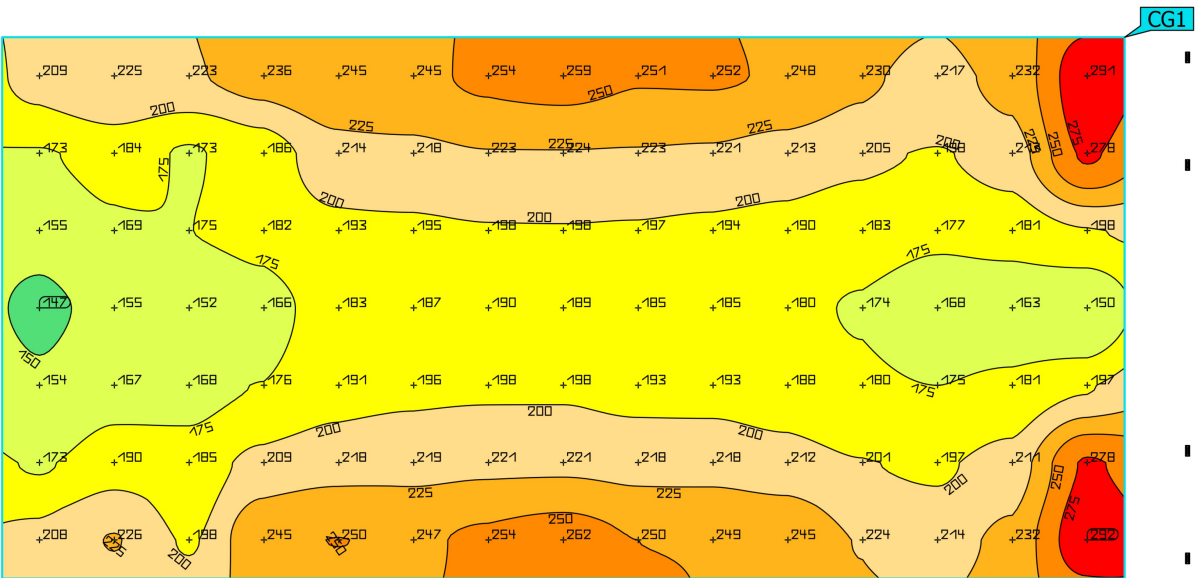
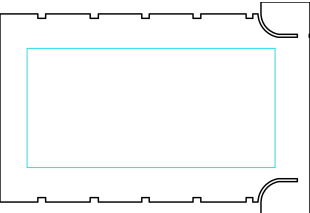
Φ_{total} 217778 lm	P_{total} 1980.0 W	Rendimiento lumínico 110.0 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico
22	Disano Illuminazione S.p.A	22413532-00	Sevilla 3 - 220-240V 4000K CRI70 90W CLD Grafite	90.0 W	9899 lm	110.0 lm/W



Instalación de nuevas luminarias del mismo modelo. (Escena de luz 1)

Retícula de cálculo.

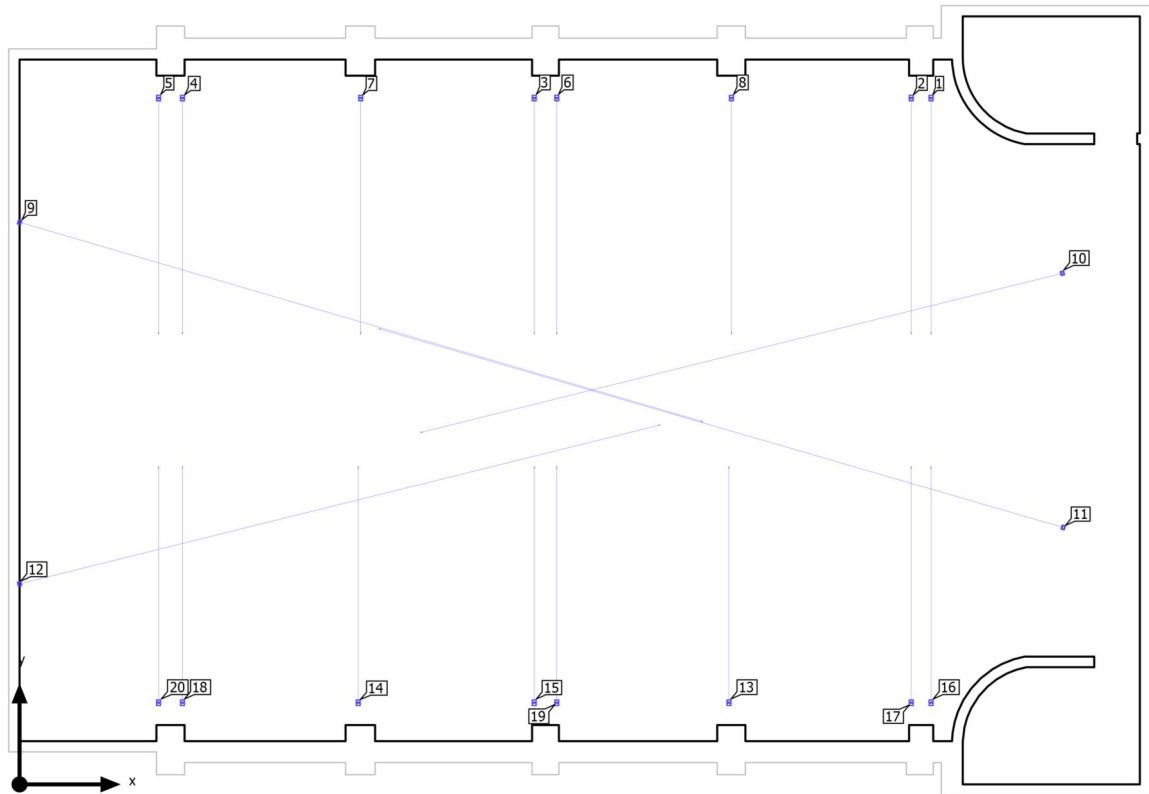


Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_o (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo. Iluminancia perpendicular Altura: 0.067 m	206 lx	147 lx	292 lx	0.71	0.50	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))

Instalación de un nuevo modelo de luminarias.

Plano de situación de luminarias





Instalación de un nuevo modelo de luminarias.

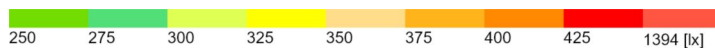
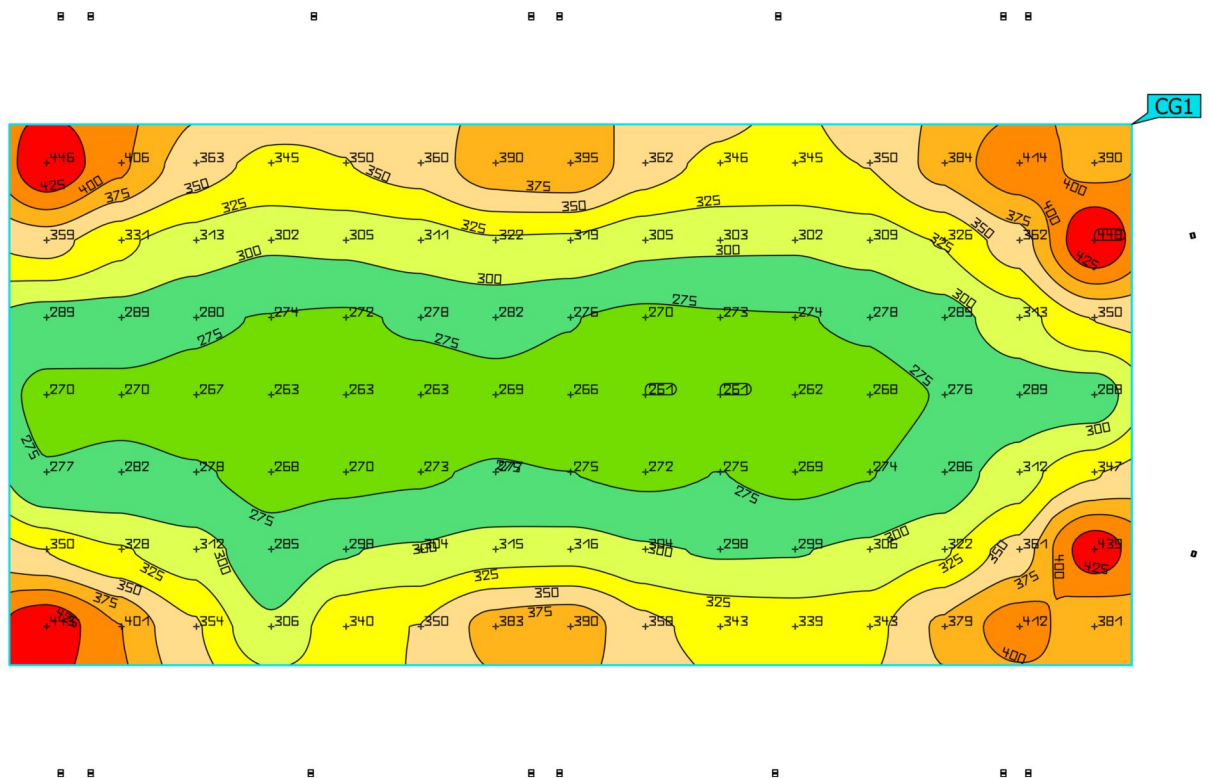
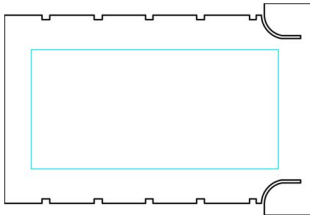
Lista de luminarias

Φ_{total} 437760 lm	P_{total} 3000.0 W	Rendimiento lumínico 145.9 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico	Índice
20	Ansell Lighting	AAZCLED150/M3	FLOODLIGHTS - Aztec Coastal Symmetric	150.0 W	21888 lm	145.9 lm/W	a

Instalación de un nuevo modelo de luminarias. (Escena de luz 1)

Retícula de cálculo.

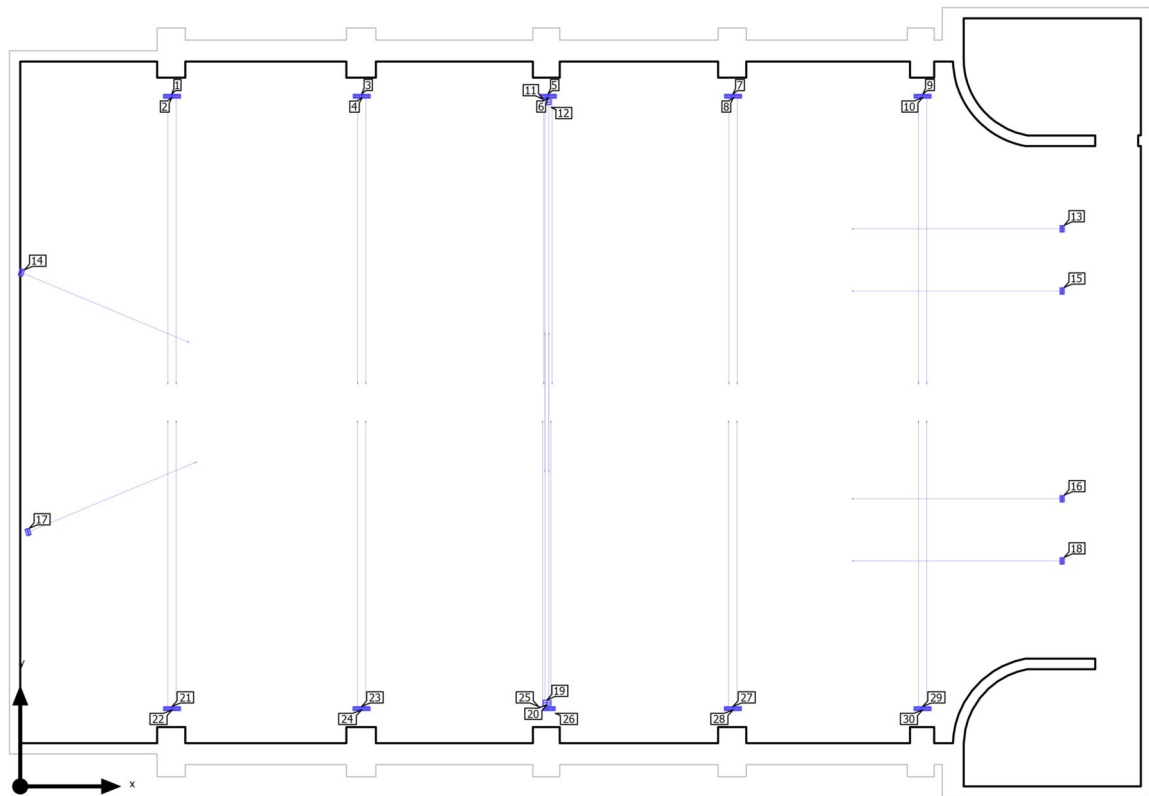


Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_0 (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo. Iluminancia perpendicular Altura: 0.067 m	319 lx	261 lx	448 lx	0.82	0.58	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))

Combinación de luminarias actuales y nuevas.

Plano de situación de luminarias





Combinación de luminarias actuales y nuevas.

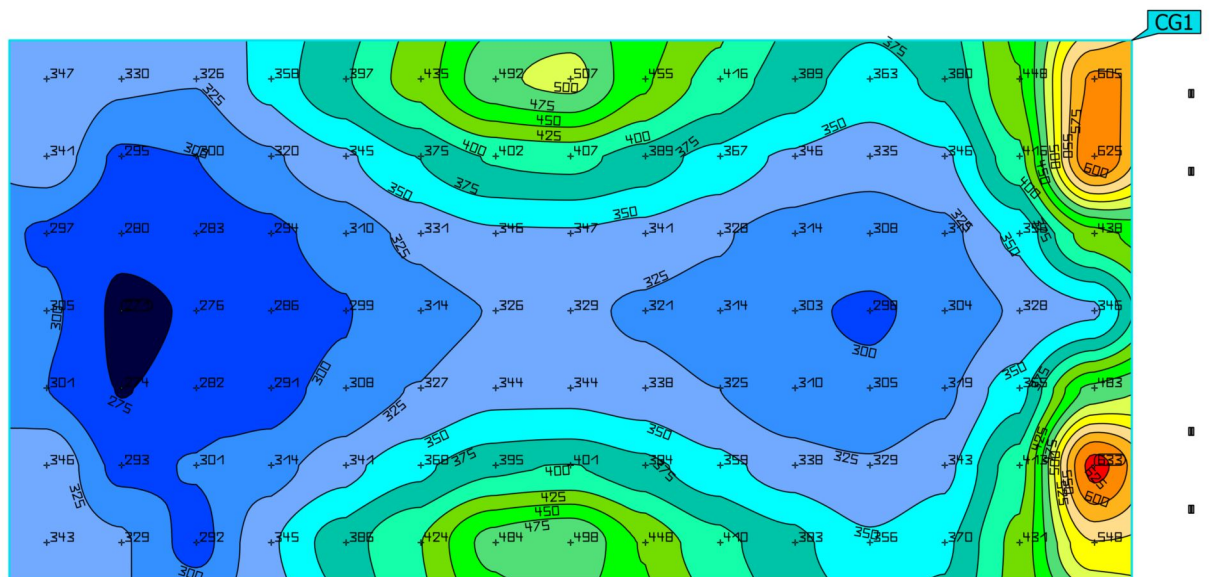
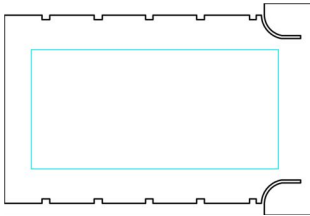
Lista de luminarias

Φ_{total} 416860 lm	P_{total} 3300.0 W	Rendimiento lumínico 126.3 lm/W
------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------

Uni.	Fabricante	Nº de artículo	Nombre del artículo	P	Φ	Rendimiento lumínico
10	Ansell Lighting	AAZCLED150/M3	FLOODLIGHTS - Aztec Coastal Symmetric	150.0 W	21888 lm	145.9 lm/W
20	Disano Illuminazione S.p.A	22413532-00	Sevilla 3 - 220-240V 4000K CRI70 90W CLD Grafite	90.0 W	9899 lm	110.0 lm/W

Combinación de luminarias actuales y nuevas. (Escena de luz 1)

Retícula de cálculo.



Propiedades	$\bar{E}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$U_0 (g_1)$	g_2	Índice
Retícula de cálculo. Iluminancia perpendicular Altura: 0.067 m	361 lx	271 lx	633 lx	0.75	0.43	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (5.26.2 Estándar (oficina))