



Universidad de Valladolid

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

TRABAJO FIN DE GRADO

**AUDITORÍA ENERGÉTICA APLICADA
A LA OPTIMIZACIÓN DE LOS
SISTEMAS DE ILUMINACIÓN EN UN
MODELO DE AULA DE LA ESCUELA
TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA DE VALLADOLID**

Autor:

DAVID ARROYO GARCÍA

Tutor:

ALBERTO MEISS RODRÍGUEZ

DPTO. CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS,
INGENIERÍA DEL TERRENO Y MECÁNICA DE LOS
MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

VALLADOLID, SEPTIEMBRE 2016

Resumen

Según avanza el tiempo, surgen nuevas necesidades que el ser humano, a través de su formación, debe resolver cumpliendo las expectativas previstas.

Sin embargo, cumplirlas requiere cada vez un gasto mayor de los recursos naturales y energéticos que nuestra sociedad actual, con su excesivo gasto, terminará por agotar. En consecuencia, debemos tratar de satisfacerlas a través de un consumo más moderado mediante el uso de sistemas basados en el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía y en la optimización de aquellas que no lo sean.

A través del presente estudio se perseguirá, a pequeña escala, el cumplimiento de estos valores a través de la auditoría energética de un modelo de aula de la Escuela Técnica Superior de Valladolid. Este sistema, teniendo en cuenta el confort de los usuarios, permitirá analizar la problemática del sistema actual y aportar y comparar diversas propuestas de mejora que aboguen por una mayor eficiencia y ahorro energético.

Palabras clave

Centro docente, iluminación, auditoría energética, eficiencia energética, ahorro energético.

Summary

As time goes by, our society is always having new needs that must be achieved through education and specific training to solve and fulfill our expectations.

In order to reach the heavy and selfish demand of today, we are consuming more and more of our natural resources and energy and keep going at this rate they all will run out soon. As a result of this situation, we should satisfy our needs reducing and optimizing the consumption of the nonrenewable sources and trying to implement the use of the renewable ones to avoid waste and pollution.

Through my work, I will try to take in consideration all these values and to examine in small scale the energetic system of a classroom model of the School of Valladolid. I will even analyze the problems of the current energetic system. Comparing various new proposals, I'm going to suggest a better energy audit in order to improve the lighting in the classroom, saving resources. The main goal is achieving a greater efficiency savings energy, combining this with users' satisfaction and needs.

Keywords

Teaching center, energy audit, lighting, energy efficiency, energy saving.

Índice de contenidos

1- Objetivos y consideraciones.....	12
2- Marco teórico y normativo.....	14
2.1- Naturaleza, propiedades y propagación de la luz.....	14
2.2- Magnitudes y unidades luminosas.....	18
2.3- Normativa y conceptos.....	20
2.4- Dispositivos de medición.....	28
2.5- Diagrama polar y curvas Isolux.....	30
2.6- Luminarias.....	32
2.7- Lámparas.....	36
2.7.1- Lámparas fluorescentes.....	36
2.7.2- Lámparas LED.....	43
2.8- <i>Dialux Evo</i>	49
3- Objeto de estudio.....	50
3.1- Emplazamiento y descripción.....	50
3.2- Modelado y recreación del escenario con <i>Dialux Evo</i> ..	62
3.3- Análisis de la situación inicial del sistema de iluminación y criterios de diseño.....	73
3.4- Estrategias de mejora y análisis de los resultados..	94
3.4.1- Estrategia 1. Creación de grupos de luminarias en sentido longitudinal.....	96
3.4.2- Estrategia 2. Sustitución de lámparas de tubos fluorescentes por lámparas de tubo LED.....	101
3.4.3- Estrategia 3. Sustitución del equipo auxiliar formado por balasto electromagnético, cebador y condensador por un balasto electrónico regulable...	112
3.4.4- Estrategia 4. Sustitución total del sistema de luminarias fluorescentes de superficie por un sistema de luminarias LED empotrables con difusor.....	133
4- Conclusiones.....	155
5- Bibliografía.....	158

Índice de figuras

Figura 1. Consumo energético en centros educativos.....	13
Figura 2. Propiedades de las ondas.....	14
Figura 3. Espectro electromagnético y luz visible.....	15
Figura 4. Curva de distribución espectral lámpara fluorescente L 58W/840.....	15
Figura 5. Tabla 5.36. Criterios mínimos de cumplimiento de una instalación de iluminación de un centro docente según la norma UNE-EN 12464-1.....	21
Figura 6. Plano de luminarias y plano de trabajo.....	22
Figura 7. Reparto de puntos según malla geométrica para auditoría y cálculo en el modelo de aula.....	23
Figura 8. Tabla 2.1. DB HE3. Valores límite de eficiencia energética de la instalación.....	25
Figura 9. Tabla 2.2. DB HE3. Potencia máxima de iluminación...	26
Figura 10. Triángulo de potencias.....	26
Figura 11. Escala de Temperaturas de Color (Kelvin).....	27
Figura 12. Luxómetro PCE-174.....	28
Figura 13. Escala de medición 400 lx.....	28
Figura 14. Escala de medición 4.000 lx.....	28
Figura 15. Especificaciones técnicas luxómetro digital modelo PCE-174.....	29
Figura 16. Diagrama de distribución en dos planos Lámpara Fluorescente T8 58W/ 840 OSRAM con plano C0-C180 y plano C90-C270.....	30
Figura 17. Sólido fotométrico Lámpara Fluorescente T8 58W/ 840 OSRAM.....	31
Figura 18. Diagrama Isolux Modelo Aula Caso 1 Aula B2 Estado Inicial Luz Solar+Luminarias Plano Útil 0.80m.....	31
Figura 19. Diversas formas de reflectores.....	33
Figura 20. Curvas fotométricas en función de la simetría.....	34
Figura 21. Curvas fotométricas en función de la dirección de la radiación.....	34
Figura 22. Curvas fotométricas en función del ángulo de la radiación luminosa.....	35
Figura 23. Proceso de encendido de un tubo fluorescente.....	36

Figura 24. Esquema circuito fluorescente con balasto convencional y cebador.....	37
Figura 25. Balasto o reactancia usado en el estado inicial de las luminarias de 58W del modelo de aula a estudiar.....	38
Figura 26. Esquema circuito fluorescente con balasto electrónico.....	38
Figura 27. Sistema de regulación 1-10V con sensor.....	39
Figura 28. Balastro electrónico QUICKTRONIC DIM T8 regulable con sistema 1-10V.....	40
Figura 29. Cebador o arrancador usado en el estado inicial de las luminarias de 58W del modelo de aula a estudiar.....	41
Figura 30. Condensador usado en el estado inicial de las luminarias de 58W del modelo de aula a estudiar.....	41
Figura 31. Variedad de TC dentro de la gama de los 80 para tubos fluorescentes.....	42
Figura 32. Partes de un diodo LED.....	43
Figura 33. Mezcla aditiva de colores.....	43
Figura 34. Chip azul + Fósforo amarillo.....	44
Figura 35. Diferentes tipos de Chips LED.....	45
Figura 36. Driver interno para tubo LED T8.....	45
Figura 37. Placa base o PCB en línea para tubo LED T8.....	46
Figura 38. Diferentes tipos de disipadores de calor de aluminio para tubos LED T8.....	46
Figura 39. Cubierta acrílica para tubo LED T8.....	47
Figura 40. Funcionalidades del interfaz de <i>Dialux Evo</i>	49
Figura 41. Situación y fases de construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid.....	50
Figura 42. Axonométrica de las fases 1 y 2 de la ETSAV.....	51
Figura 43. Modelo de aula a estudiar dentro de la ETSAV.....	51
Figura 44. Perspectiva 1 del modelo de aula.....	52
Figura 45. Perspectiva 2 del modelo de aula.....	52
Figura 46. Diferentes casos de estudio a auditar en la planta 0 de la ETSAV.....	53
Figura 47. Proyector 3M X36.....	54
Figura 48. Perspectiva ventanas modelo de aula.....	54
Figura 49. Dimensiones de los acristalamientos para luz diurna en el modelo de aula.....	55

Figura 50. Especificaciones técnicas de la luminaria.....	56
Figura 51. Diagrama de distribución en dos planos lámpara fluorescente T8 58W/ 840 OSRAM con plano C0-C180 y plano C90-C270.....	56
Figura 52. Luminaria con una lámpara fluorescente Lumilux T8 58W/840 OSRAM.....	57
Figura 53. Especificaciones técnicas tubo fluorescente lumilux T8 58W/840 OSRAM.....	58
Figura 54. Especificaciones técnicas de la luminaria de pared...59	
Figura 55. Luminarias con una lámpara fluorescente Lumilux T8 OSRAM 58W/840 en pared.....	59
Figura 56. Grupos de luminarias, posición e interruptores de las aulas modelo en el estado inicial.....	60
Figura 57. Vista en rejilla de la volumetría general de la E.T.S.A. Valladolid.....	62
Figura 58. Datos orientación de la E.T.S.A. Valladolid.....	63
Figura 59. Desfase de la E.T.S.A.V. respecto a la línea del norte.....	63
Figura 60. Datos de iluminancia tomados con el luxómetro para el caso 1 aula B2. Medidas en lúxeles.....	64
Figura 61. Datos de iluminancia tomados con el luxómetro para el caso 2 aula B1. Medidas en lúxeles.....	65
Figura 62. Grados de reflexión medios de las superficies.....	66
Figura 63. Grados de reflexión de los elementos del aula según materiales y colores.....	67
Figura 64. Reflexión y transmisión de los vidrios que conforman las ventanas de las aulas.....	67
Figura 65. Recreación final del escenario de las aulas Modelo - Perspectiva 1.....	68
Figura 66. Recreación final del escenario de las aulas Modelo - Perspectiva 2.....	68
Figura 67. Datos iluminancia media horizontal del caso 1 aula B2 obtenidos con <i>Dialux Evo</i>	69
Figura 68. Datos iluminancia media horizontal del caso 2 aula B1 obtenidos con <i>Dialux Evo</i>	70
Figura 69. Comparativa de valores de iluminancia entre los datos obtenidos con el luxómetros y aquellos obtenidos con <i>Dialux Evo</i> para el caso 1 aula B2.....	71

Figura 70. Comparativa de valores de iluminancia entre los datos obtenidos con el luxómetros y aquellos obtenidos con <i>Dialux Evo</i> para el caso 2 aula B1.....	72
Figura 71. Iluminancia media horizontal y UGR en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 1.....	75
Figura 72. Trama de 72 puntos de cálculo de iluminancia horizontal en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 1.....	76
Figura 73. Valores UGR en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 1.....	77
Figura 74. Iluminancia media horizontal en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 2.....	78
Figura 75. Trama de puntos de cálculo de iluminancia horizontal en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 2.....	79
Figura 76. Iluminancia media perpendicular para la pantalla del proyector y la pizarra en el modelo de aula a estudiar.....	80
Figura 77. Especificaciones técnicas del balasto electromagnético ELT Serie Plana de la situación inicial.....	81
Figura 78. Datos de la instalación inicial extraídos de <i>Dialux Evo</i>	81
Figura 79. Consumo de energía y coste de la situación inicial...	82
Figura 80. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 1....	85
Figura 81. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 1....	86
Figura 82. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo despejado en el caso 1..	87
Figura 83. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 1....	88
Figura 84. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 2.....	89
Figura 85. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 2.....	90
Figura 86. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo despejado en el caso 2..	91
Figura 87. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 2..	92
Figura 88. Grupos de luminarias, interruptores, reguladores y sensores de las aulas modelo A con la primera estrategia.....	97
Figura 89. Situación aula caso 1 con mitad de ocupación.....	98
Figura 90. Situación aula caso 1 con gran aporte de luz natural..	99

Figura 91. Esquema de eliminación del equipo auxiliar del circuito eléctrico.....	101
Figura 92. Esquema de montaje del tubo LED.....	101
Figura 93. Especificaciones técnicas del tubo LED T8 24/840 SubstiTUBE Advanced Ultra de la marca OSRAM.....	103
Figura 94. Sólido fotométrico tubo LED T8 24/840 SubstiTUBE Advanced Ultra OSRAM.....	104
Figura 95. Tubo LED T8 24/840 1500 mm SubstiTUBE Advanced Ultra de la marca OSRAM.....	104
Figura 96. Grupos de luminarias e interruptores de las aulas modelo con la segunda estrategia de mejora.....	105
Figura 97. Perspectiva 1 del modelo de aula con la implantación de lámparas de tubo LED como segunda estrategia.....	106
Figura 98. Perspectiva 2 del modelo de aula con la implantación de lámparas de tubo LED como segunda estrategia.....	106
Figura 99. Trama de 72 puntos de cálculo de iluminancia horizontal en el modelo de aula a estudiar para la segunda estrategia.....	108
Figura 100. Valores UGR en el modelo de aula a estudiar para la segunda estrategia.....	109
Figura 101. Consumo de energía y coste con la segunda estrategia.....	110
Figura 102. Iluminancia media perpendicular de la pizarra con la segunda estrategia.....	112
Figura 103. Conexiones balasto electrónico.....	113
Figura 104. Temperatura máxima de operación del balasto electrónico.....	113
Figura 105. OSRAM QUICKTRONIC DIM T8 regulable desde 1 a 10 V...114	
Figura 106. Especificaciones técnicas del balasto electrónico OSRAM QUICKTRONIC DIM T8.....	115
Figura 107. Sensor de luz DIM MULTI OSRAM.....	117
Figura 108. Pulsador doble Rocker Switch RETROTOUCH.....	117
Figura 109. Grupos de luminarias, interruptores, reguladores y sensores del modelo de aula en la tercera estrategia de mejora.....	118
Figura 110. Perspectiva 1 del modelo de aula con la implantación del balasto electrónico como tercera estrategia.....	119
Figura 111. Perspectiva 2 del modelo de aula con la implantación del balasto electrónico como tercera estrategia.....	119
Figura 112. Especificaciones técnicas del balasto electrónico regulable QUICKTRONIC DIM T8 de la marca OSRAM.....	120

Figura 113. Consumo de energía y coste con la tercera estrategia.....	121
Figura 114. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 1....	122
Figura 115. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 1....	123
Figura 116. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 1...	124
Figura 117. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 2...	126
Figura 118. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 2...	127
Figura 119. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 2...	128
Figura 120. Niveles de iluminancia para la pantalla del proyector 3M X36 para la tercera estrategia.....	131
Figura 121. Simulación de niveles de iluminación para la visualización del proyector para la tercera estrategia.....	131
Figura 122. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de visualización del proyector en la tercera estrategia.....	132
Figura 123. Grupos de luminarias, interruptores, reguladores y sensores del modelo de aula en la cuarta estrategia de mejora..	134
Figura 124. Especificaciones técnicas luminaria empotrable con difusor LED U25M1/LEDN40S ETAP.....	135
Figura 125. Especificaciones técnicas luminaria pared R750R1/LEDN3645SX2 ETAP.....	136
Figura 126. Perspectiva 1 del modelo de aula con Luminarias LED empotrables con difusor para la cuarta estrategia.....	137
Figura 127. Perspectiva 2 del modelo de aula con Luminarias LED empotrables con difusor para la cuarta estrategia.....	137
Figura 128. Perspectiva 3 del modelo de aula con Luminarias LED empotrables con difusor para la cuarta estrategia.....	137
Figura 129. Trama de 72 puntos de cálculo de iluminancia horizontal en el modelo de aula a estudiar para la cuarta estrategia.....	139
Figura 130. Valores UGR en el modelo de aula a estudiar para la cuarta estrategia.....	140
Figura 131. Consumo de energía y coste con la cuarta estrategia.....	141

Figura 132. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 1...	143
Figura 133. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 1...	144
Figura 134. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 1...	145
Figura 135. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 2...	147
Figura 136. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 2...	148
Figura 137. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 2...	149
Figura 138. Niveles de iluminancia de la pantalla del proyector 3M X36 para la cuarta estrategia.....	152
Figura 139. Simulación de niveles de iluminación para la visualización del proyector para la cuarta estrategia.....	152
Figura 140. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de visualización del proyector en la cuarta estrategia.....	153
Figura 141. Iluminancia media perpendicular de la pizarra con la cuarta estrategia.....	154

Índice de tablas

Tabla 1. Magnitudes luminosas y sus unidades.....	19
Tabla 2. Ventajas de la tecnología LED frente a los fluorescentes.....	48
Tabla 3. Valores para el cumplimiento de las normas UNE-EN 12464-1 y DB HE3 en la situación inicial y en las cuatro estrategias.....	154
Tabla 4. Valores anuales de consumo económico y de potencia en la situación inicial y en las cuatro estrategias.....	154

1- Objetivos y consideraciones

El desarrollo de un país depende de parámetros técnicos, sociales y económicos dentro de los cuales la educación es una parte fundamental. Por tanto, a lo largo del tiempo, se ha producido un aumento en el interés de dotar a los centros educativos y formativos con todos los medios posibles que permitan que esta actividad se desarrolle eficazmente.

Existe una amplia gama de instituciones bajo el concepto de centro educativo, desde guarderías infantiles hasta universidades. Dentro de cada tipo de centro existen diversos espacios como aulas o zonas de trabajo, laboratorios, zonas comunes, aseos, cafeterías, etc.

Esta heterogeneidad de espacios implica que existan diversos parámetros para conseguir un ahorro energético y un confort adecuado según el tipo de actividad que se vaya a desarrollar.

El hecho de perseguir un ahorro energético es debido a que los recursos naturales del planeta son un bien cada vez más escaso y limitado. Por tanto, es necesario llevar a cabo un uso racional y responsable de los mismos, ralentizando su total agotamiento y preservando unas condiciones climáticas adecuadas que impidan la emisión excesiva de gases de efecto invernadero.

Además, para un correcto desarrollo formativo se deben cumplir una serie de parámetros lumínicos, ambientales y térmicos y realizar una adecuada gestión energética.

Por consiguiente, a través del presente estudio, nos centraremos en el aspecto luminotécnico de un modelo de aula teórica de la Escuela Técnica Superior de Valladolid, siendo un centro de educación superior.

Una forma de conocer y controlar la situación energética de un centro educativo es a través de una auditoría energética. Se trata de un estudio integral que permite el análisis de la situación energética inicial y la inclusión de modificaciones y mejoras que converjan en un menor gasto energético, una mayor sensación de confort y un aumento de la durabilidad de los equipos a través de un uso más eficiente de los recursos energéticos disponibles, entre los que se incluirán las energías renovables.

En este caso concreto, se llevará a cabo una auditoría que analizará los niveles lumínicos en un modelo de aula del centro citado anteriormente y propondrá diversas estrategias de mejora en las que la luz natural tendrá un papel protagonista, explorando diversas posibilidades de control y regulación con el fin de optimizarlo.

Por todo lo anterior, la optimización energética de un edificio educativo debe basarse en conceptos como eficiencia energética, ahorro energético, respeto al medioambiente, sostenibilidad y uso de energías renovables. Esta optimización en la iluminación es

tan importante, puesto que el 26% de toda la energía eléctrica consumida por un centro docente es debida a este tipo de instalaciones como se puede comprobar en el gráfico.

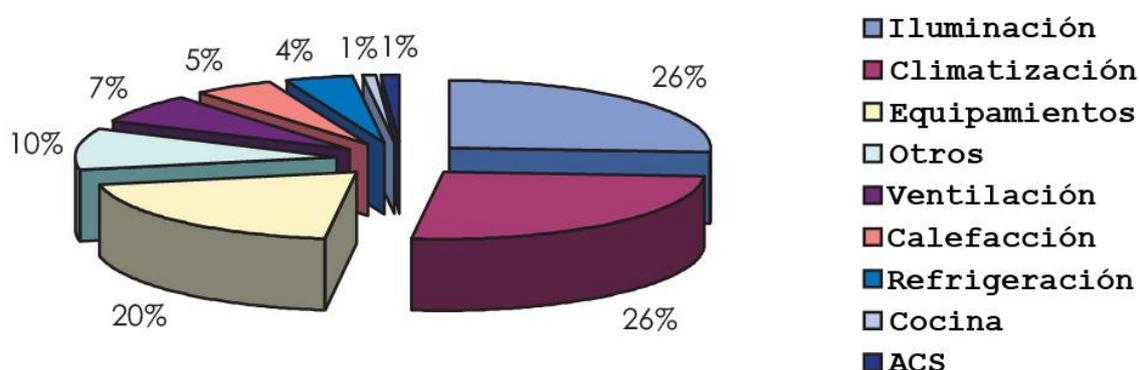


Figura 1. Consumo energético en centros educativos. Fuente: Guía de Ahorro y Eficiencia energética en Centros Docentes

Centrándonos en estos conceptos, podemos entender la eficiencia energética como "la capacidad de un uso, equipo, instalación o proceso para realizar su función con el menor consumo energético posible". La Unión Europea también contempla, a través de la directiva 2010/31/UE del 19 de mayo de 2010, que las medidas para mejorar la eficiencia energética de los edificios tienen que tener en cuenta las condiciones climáticas y peculiaridades locales, así como el entorno ambiental interior y la relación coste-eficiencia. Dichas medidas tomarán protagonismo en gran medida en el objeto de estudio de este trabajo.

De igual forma se puede definir el ahorro de energía como "la disminución del consumo de energía primaria de un centro de consumo de energía mediante la implementación de medidas de índole técnica o no técnica, manteniéndose en todo caso el cumplimiento de los objetivos previstos, y sin disminución de la calidad, productividad, seguridad física de las personas y patrimonial de los bienes y sin producir mayor impacto ambiental que la situación primitiva".

La obtención de una mayor eficiencia energética o reducir costes de un sistema, en este caso de iluminación, son retos poco explorados dentro del campo de la arquitectura que se profundizarán, a través de este trabajo, mediante el análisis de la problemática actual en el sistema de iluminación del aula y la búsqueda de soluciones a través de la selección de tecnologías y materiales adecuados; sin perder el compromiso entre la técnica y el coste y generando un equilibrio entre ellos.

El análisis de este estudio se realizará mediante un software de simulación libre denominado *Dialux Evo* que permite una recreación total de muchos de los parámetros del entorno real.

2- Marco teórico y normativo

2.1- Naturaleza, propiedades y propagación de la luz

La luz es una parte fundamental a la hora de percibir los objetos por medio del ojo humano. Por este motivo es necesario saber utilizarla y controlarla para aplicarla en un determinado campo.

La luz es una onda electromagnética que se desplaza a velocidad constante de 300.000 km/s y que no requiere de un soporte material para su propagación, por lo que podría desplazarse en el vacío. Se genera a partir de oscilaciones originadas por la interacción de partículas eléctricas y electromagnéticas. No tiene barreras, ya que no necesita de un medio físico para su transporte.

Desde el punto de vista luminotécnico nos interesan los elementos que le dan forma:

- **Longitud de onda**, definida como la distancia recorrida por la onda en un intervalo de tiempo.

$$\lambda = v * T [m]$$

- **Frecuencia**, que se define como el número de veces que se repite la onda en la unidad de tiempo.

$$f = v / \lambda [Hz]$$

- **Periodo**, siendo la inversa de la frecuencia, se trata del tiempo que tarda la onda en realizar un ciclo completo.

$$T = 1 / f [s]$$

- **Amplitud**, definida como la distancia por arriba o por abajo de la línea central de una forma de onda.

- **Velocidad de propagación**, es la velocidad a la que la onda viaja en un medio.

$$v = \lambda * f [m/s]$$

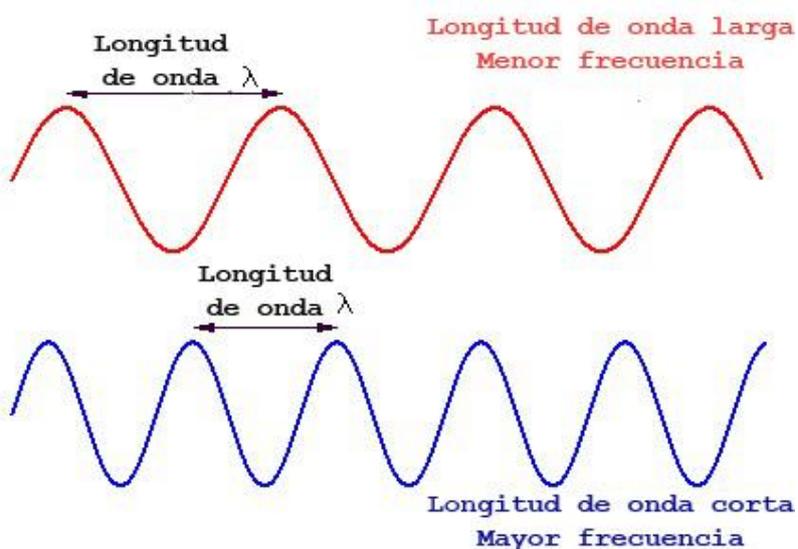


Figura 2. Propiedades de las ondas electromagnéticas. Fuente:

<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/propiedades-de-las-ondas-electromagneticas-teoria-cuantica-de-planck-contribucion-de-bohr-.html>

Las características que diferencian a las radiaciones electromagnéticas son la **longitud de onda** y la **frecuencia**, puesto que su naturaleza y velocidad de propagación en un mismo medio son iguales.

La retina del ojo humano es estimulada por longitudes de onda comprendidas entre **380 y 780 nm**. A este rango de longitudes de onda se les denomina **espectro visible**. A cada longitud de onda le corresponde un determinado color según la siguiente relación:

Violeta de 380 a 400, Azul 450, Azul-verde 500, Verde 525, Amarillo-verde 550, Amarillo 575, Naranja 600 y Rojo de 650 a 780. El conjunto de estos colores que componen el espectro conforman la **luz solar blanca**.

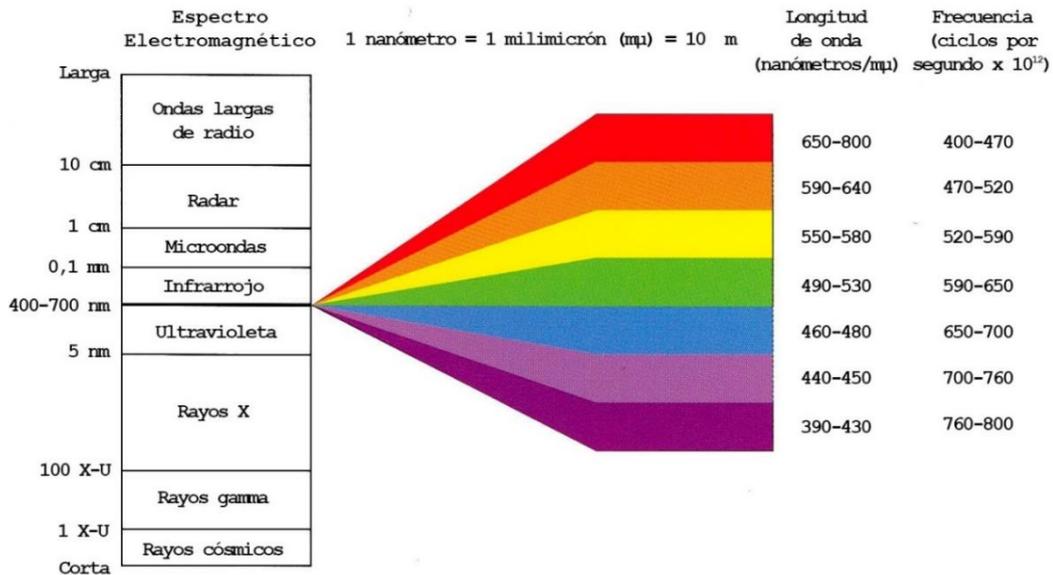


Figura 3. Espectro electromagnético y luz visible. Fuente: <http://www.taringa.net/post/ciencia-educacion/16532166/La-vision-cromatica-de-los-animales.html>

A la hora de realizar un estudio de iluminación es necesario conocer la **curva de distribución espectral** que representa la distribución de la potencia radiada por una fuente luminosa en las diferentes longitudes de onda.

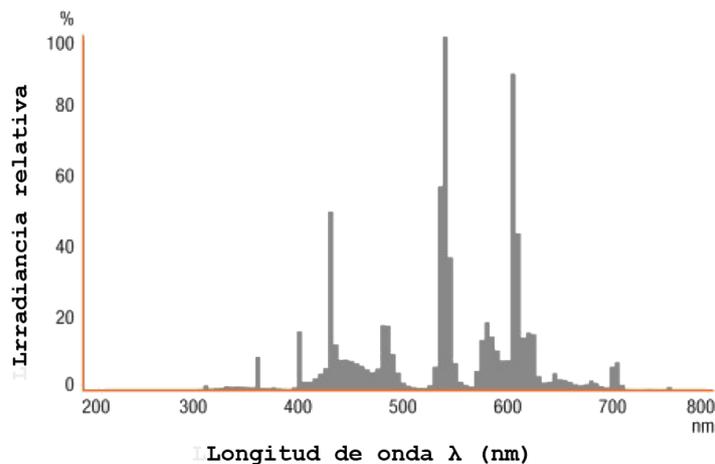


Figura 4. Curva de distribución espectral lámpara fluorescente L 58W/840 OSRAM. Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/lamparas/lamparas-fluorescentes/lamparas-fluorescentes-t8/lumilux-t8/index.jsp

La figura corresponde a la lámpara fluorescente L 58 W/840 de OSRAM utilizada en el estado inicial del modelo de aula de la E.T.S de Arquitectura de Valladolid que posteriormente se estudiará. En este caso, se recorren muchas frecuencias del espectro visible, sin embargo, presenta una distribución muy discontinua.

Respecto a la incidencia directa de la radiación luminosa sobre un material, se producen cinco fenómenos diversos o propiedades de la luz. Nos estamos refiriendo a la reflexión, la transmisión, la absorción, la refracción y la difusión. Sin embargo, nos centraremos en los tres primeros que son los que afectan directamente al estudio que desarrollaremos a continuación.

- La **reflexión** es la cualidad superficial de devolver al espacio la luz recibida. Se pueden producir tres tipos de reflexión en función del tipo de textura ya sea pulida o rugosa.
 - o **Reflexión especular o regular.** Es aquella en el que el rayo incidente forma con la normal de la superficie un ángulo α que es igual al ángulo formado por el rayo reflejado con dicha normal.
 - o **Reflexión difusa.** Se produce en las superficies rugosas, cuyas partículas están orientadas en distintos planos. El haz luminoso incide en estas superficies y se refleja en todas direcciones.
 - o **Reflexión mixta.** Se trata de la combinación de la reflexión regular y la difusa, en la que parte del haz incidente se refleja y parte se difunde. Puede ser principalmente regular o principalmente difusa.

De esta manera llegamos al concepto de **reflectancia o factor de reflexión** que consiste en el cociente entre el flujo reflejado y el incidente.

$$\rho = \Phi_r / \Phi_i \leq 1$$

Esta es una de las características que más influirán en el estudio, puesto que la reflectancia de techo, paredes, suelo y mobiliario afectarán, en gran medida, a los niveles de iluminancia y deslumbramiento en las aulas.

- La **transmisión** ocurre cuando la radiación luminosa atraviesa un material u objeto.

Se pueden determinar tres tipos diferentes en función del mayor o menor grado de transparencia.

- o **Transmisión regular.** Tiene lugar cuando el haz de luz incidente y el haz de luz después de atravesar el medio son iguales, con ángulos de incidencia y transmisión iguales. Se produce en los cuerpos transparentes como el vidrio.
- o **Transmisión difusa.** Se produce cuando el haz incidente atraviesa el medio y se desplaza de forma dispersa en varias direcciones. Se produce en cuerpos traslúcidos tales como el vidrio traslúcido.
- o **Transmisión mixta.** Es la fusión de los dos fenómenos anteriores. Algunos ejemplos podrían ser el vidrio orgánico o los cristales labrados.

De igual manera surge el concepto de **transmitancia o factor de transmisión** como la relación entre los flujos transmitido e incidente.

$$\tau = \Phi_t / \Phi_i \leq 1$$

Este fenómeno permitirá que la luz solar atraviese el vidrio de las ventanas para llegar al interior de las aulas.

- La **absorción**, en la que una parte del flujo luminoso que incide sobre un cuerpo es absorbido por el propio cuerpo en lugar de ser reflejado. La capacidad de absorción depende del tipo y de los materiales que componen el cuerpo.

Una de las consecuencias que produce este fenómeno de la absorción es el color de los objetos. El color se produce cuando un cuerpo iluminado absorbe parte del espectro luminoso y el resto lo refleja. De esta manera, un objeto es de color azul porque absorbe todas las longitudes de onda excepto la azul que es reflejada.

De igual manera surge el concepto de **absortancia o factor de absorción** como la relación entre el flujo luminoso absorbido por un cuerpo y el flujo recibido.

$$\alpha = \Phi_a / \Phi$$

Por último, señalar que la luz, sea natural o artificial, juega un papel fundamental en la salud y bienestar de las personas. La luz natural, combinada con una adecuada luz artificial, ayuda a los estudiantes en su aprendizaje. El aprovechamiento de la luz natural en instalaciones de iluminación es fundamental, ya que la luz diurna aumenta la generación de cortisol que incrementa la capacidad de atención y la actividad de los estudiantes.

2.2- Magnitudes y unidades luminosas

Para llevar a cabo este estudio de iluminación será necesario conocer algunas magnitudes y sus unidades, así como las relaciones entre ellas que aparecerán a lo largo del desarrollo de este trabajo y que el software *Dialux Evo*, empleado para la recreación del escenario y valoración de propuestas, usa constantemente para el cálculo.

Magnitud	Símbolo	Definición	Unidad	Relación
Flujo luminoso	Φ	"Caudal de radiación de una fuente luminosa en la unidad de tiempo"	Lumen (lm)	$\Phi=Q/t$ $\Phi=I*\omega$
Intensidad luminosa	I	"Relación entre el flujo emitido por una fuente luminosa y el ángulo sólido en el que se emite"	Candela (cd) Lm/str	$I=\Phi/\omega$
Iluminancia o Nivel de Iluminación	E	"Relación o cociente entre el flujo luminoso emitido por una fuente y la superficie sobre la que incide"	Lux (lx) Lm/m ²	$E = \Phi/S$
Luminancia	L	"Cociente entre la intensidad luminosa de una fuente de luz, en una dirección, y la superficie de la fuente proyectada según dicha dirección"	Cd/cm ²	$L = (I/S)* \cos \beta$
Eficacia luminosa	ε	"Relación entre el flujo luminoso y la potencia eléctrica"	Lm/w	$\varepsilon = \Phi/P$
Coefficiente de utilización	η	"Relación entre el flujo luminoso recibido por un cuerpo y el flujo emitido por una fuente luminosa"		$\eta = \Phi/\Phi_e$
Factor de mantenimiento	F_m	"Relación entre el rendimiento de una luminaria al momento de la limpieza y su valor inicial"		$F_m = E_m/E_{inicial}$
		"Período de tiempo en		

Vida útil	V_u	<i>funcionamiento durante el cual el flujo de la lámpara no desciende por debajo del 70% de su valor nominal"</i>	h	
Uniformidad media	U_o	<i>"Relación entre la iluminación mínima y la media, de una instalación de alumbrado"</i>	%	$U_o = E_{min}/E_{med}$
Uniformidad extrema	U_e	<i>"Relación entre la iluminación mínima y la máxima, de una instalación de alumbrado"</i>	%	$U_m = E_{min}/E_{max}$
Temperatura de Color	$T.C.$	<i>"Color de una fuente luminosa por comparación con el que produce un cuerpo negro a esa misma temperatura"</i>	Kelvin (°K)	
Índice de Rendimiento de Color	$I.R.C. \text{ o } Ra$	<i>"Describe como una fuente de luz hace que el color de un objeto aparezca a los ojos humanos y qué las variaciones sutiles en tonos de color son reveladas"</i>	%	

Tabla 1. Magnitudes luminosas y sus unidades

2.3- Normativa y conceptos

El desarrollo de este trabajo se ha basado en el cumplimiento de la normativa vigente y de diversas guías, dando especial atención a los siguientes documentos:

- **CTE DB HE3**. Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.
- **UNE-EN 12464-1:2011**. Aplicaciones de iluminación. Iluminación de entornos de trabajo interior.
- **Real Decreto 486/1997, de 14 de abril**, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. **Anexo IV**.
- **CTE SU-4**. Seguridad frente a riesgo causado por iluminación inadecuada.
- **Real Decreto 314/2006, de 17 de Marzo**, que desarrolla el Código Técnico de la Edificación (CTE).
- **Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación. Centros docentes, de marzo de 2001**. Redactado por IDAE y CEI.
- **Guía sobre tecnología LED en el alumbrado, de 2015**. Redactada for FENERCOM Y ANFALUM.

Una vez expuestas las normas que se han usado como referencia, es necesario profundizar más en aquellas que serán especialmente relevantes en el desarrollo del trabajo a través del software **Dialux Evo**, utilizado para el cálculo de la instalación luminotécnica en este trabajo.

La **norma UNE-EN 12464-1**, principal referencia para este trabajo, establece una serie de fases que se llevarán a cabo en el desarrollo de este trabajo:

- Obtención de datos iniciales para el proyecto y determinación de las condiciones previas.
- Estudio de diversas propuestas y soluciones.
- Análisis y valoración de los cálculos y documentación.

Los cuatro parámetros que *Dialux Evo*, en función de la **norma UNE-EN 12464-1**, utiliza como criterios mínimos de cumplimiento de una instalación lumínica en centros docentes, son los siguientes y corresponden a la tabla 5.36:

Nº ref.	Tipo actividad	E_M (lx)	UGR_L	U_0	R_a	Requisitos específicos
5.36.1	Aulas, aulas de tutoría	300	19	0,60	80	Iluminación controlable
5.36.4	Pizarras negras, verdes y blancas	500	19	0.70	80	Evitar reflexiones especulares
5.36.10	Aulas de manualidades	500	19	0.60	80	
5.36.16	Vestíbulo de entrada	200	22	0.40	80	
5.36.17	Áreas de circulación, pasillos	100	25	0.40	80	
5.36.20	Salas de profesores	300	19	0.6	80	
5.36.22	Biblioteca: áreas lectura	500	19	0,6	80	
5.36.25	Cantinas escolares	200	22	0.4	80	
5.36.26	Cocina	500	22	0.6	80	

Figura 5. Tabla 5.36. Criterios mínimos de cumplimiento de una instalación de iluminación de un centro docente según la norma UNE-EN 12464-1. Fuente: UNE-EN 12464-1

- La **iluminancia** será el parámetro más importante a tener en cuenta en este trabajo. Se simboliza con la letra "**E**" y su unidad es el **lux= lm/m²**.

Sin embargo, es necesario conocer el concepto de plano de trabajo, pues será necesario calcular la iluminancia sobre éste.

El **plano de trabajo o plano útil** indica la altura, respecto al suelo, a la cual se realizarán las actividades dentro del local. En el caso que concierne a este estudio se usará una altura de plano de trabajo de **0.80m**, correspondiente a la altura de la **superficie de las mesas del aula**, objeto de estudio de este trabajo.

En el caso del cálculo de iluminancia en superficies verticales, como puede ser el plano de la pizarra o de la pantalla del proyector de las aulas, las propias superficies verticales se considerarán como planos de trabajo.

La cantidad de luz sobre la superficie del plano de trabajo afecta a la agudeza visual, a la sensibilidad de contraste o capacidad de discriminar diferencias de luminancia y color y a la eficacia de enfoque a diferentes distancias. Cuanto mayor sea la cantidad de luz y hasta un cierto máximo (evitando el deslumbramiento), mejor será el rendimiento visual.

El nivel de iluminancia se establece en función de la actividad que se va a realizar, de la duración de dicha actividad y de las condiciones ambientales. Según el tipo de actividad, se pueden considerar iluminancias horizontales y verticales.

La **iluminancia media horizontal (E_{med})** permitirá obtener la iluminancia promedio sobre el plano horizontal de trabajo, que corresponde a la superficie de las mesas.

El **número de puntos (n) mínimos** que se considerarán para la realización del **cálculo promedio** y como puntos mínimos de **toma de datos con el luxómetro** en las aulas, según la DB-HE-3, es función del **índice del local (K)** y de la obtención de un reparto de cuadrícula simétrico.

El cálculo del índice del local "K" se obtiene a partir de:

$$K = [L \times A] / [H \times (L + A)]$$

Donde L y A es la longitud y anchura del aula y H la altura de la luminaria sobre el plano de trabajo.



Figura 6. Plano de luminarias y plano de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido dicho valor, se puede obtener el número de puntos (n) mínimos según la siguiente relación:

- 4 puntos si $K < 1$
- 9 puntos si $2 > K \geq 1$
- 16 puntos si $3 > K \geq 2$
- 25 puntos si $K \geq 3$

En este caso concreto, se estudiará un modelo de aula cuyas características se explicarán en el punto 3.1, considerando como longitud y anchura los lados del rectángulo que contienen al aula; obteniendo el siguiente número mínimo de puntos a auditar :

$$K = [14.75\text{m} \times 9.25\text{m}] / [2.9\text{m} \times (14.75\text{m} + 9.25\text{m})] = 1,96$$

Por tanto, el número mínimo de puntos a calcular y medir serán 9. Sin embargo, debido a la distribución de las 13 filas de mesas del aula y para una mayor fiabilidad de los resultados, se ha procedido a tomar datos con el luxómetro en 3 puntos por fila, en filas alternas obteniendo un total

de 21 puntos estudiados. El reparto de puntos quedaría de la siguiente manera:

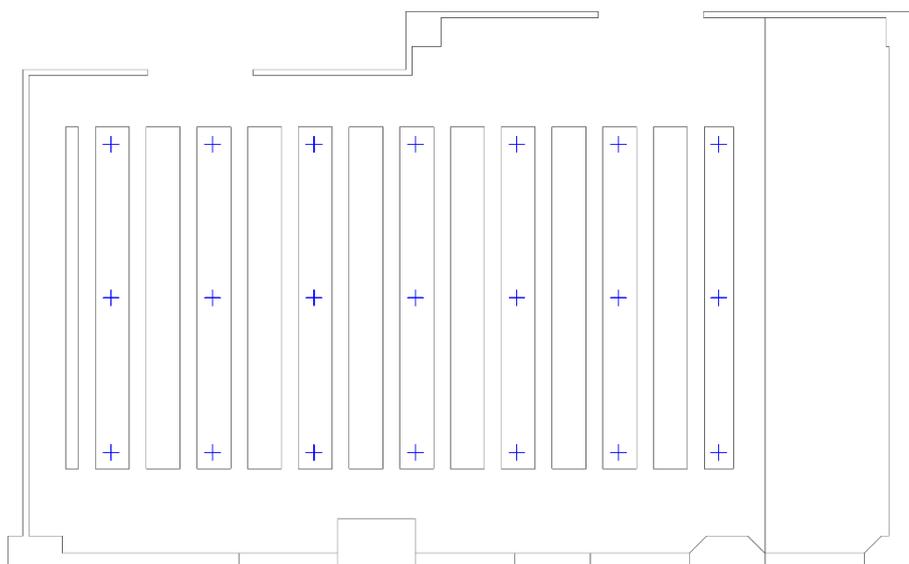


Figura 7. Reparto de puntos según malla geométrica para auditoría y cálculo en el modelo de aula.
Fuente: Elaboración propia

La **iluminancia media horizontal mantenida (Em)** es el límite inferior admitido de iluminancia media horizontal en el área de trabajo, es decir, el valor de la iluminancia media horizontal en el periodo en el que se ha de realizar el mantenimiento. **La norma establece unos valores mínimos de cumplimiento que en el caso de aulas en centros de formación son 300 lx.**

En otros planos de tarea como puede ser el plano de la pizarra y de la pantalla del proyector, que se encuentran en un plano vertical, los puntos donde establecer las mediciones se tomarán en función de las condiciones necesarias para desempeñar la tarea y de la distancia de la o las luminarias funcionando en ese momento a la misma. Esto es así debido a que no es necesario el mismo nivel de iluminación cuando se usa el proyector que cuando se usa la pizarra, puesto que el proyector requerirá de una iluminación más atenuada que la pizarra para la correcta visualización del mismo.

- El valor máximo del **índice de deslumbramiento unificado (UGR)**. Este UGR se trata de un modelo aproximado que indica la probabilidad de que las luminarias produzcan un deslumbramiento directo. Cuanto mayor es este valor, mayor es la probabilidad de que se produzca el deslumbramiento. **La norma establece un valor máximo por encima del cual no se debe superar y en el caso de las aulas es 19.**

El deslumbramiento debido a la luz natural no debe impedir su aprovechamiento, ya que su control se puede lograr a

través de una adecuada distribución de mesas y pizarras o con la utilización de sistemas de apantallamiento con regulación en ventanas (Cortinas, lamas o persianas).

En cuanto a la iluminación de superficies verticales, como pizarras, se deben evitar reflejos que impidan su visión parcial o total. Es aconsejable utilizar luminarias de tipo pared para estas superficies.

El deslumbramiento reflejado depende del color y acabado de las superficies, por lo que es recomendable que tanto las superficies del local como el mobiliario tengan un acabado mate, evitando reflejos que puedan llegar a molestar.

- La **uniformidad media** (U_o) debe ser cumplida, puesto que se trata de la relación entre la iluminación mínima y la media en una instalación lumínica.

$$U_o = E_{\min} / E_{\text{med}}$$

La norma establece un valor mínimo por debajo del cual no se debe descender y en el caso de aulas es 0.6, es decir, una uniformidad del 60%.

- El **índice de rendimiento de color (IRC) o la reproducción mínima de colores (Ra)** depende fundamentalmente de la elección de la lámpara. Es la capacidad de reproducción cromática de las lámparas hacia los objetos iluminados, es decir, describe como una lámpara o fuente de luz hace que el color de un objeto aparezca a los ojos humanos y cuales de las variaciones sutiles en tonos de color son reveladas. Este término se califica de 0 a 100. Cuanto mayor sea el IRC o Ra, mejor es su capacidad de rendimiento de color. Cuando la calificación del IRC o Ra es 0, lo único que se ve es en escala de grises.

En las aulas, que son espacios en los que se debe trabajar durante largos periodos de tiempo, la norma exige un Ra de al menos un 80%.

La norma UNE-EN 12464-1 especifica una iluminación mínima para las zonas de trabajo, de manera que en las zonas inmediatamente circundantes permite un nivel de iluminación inmediatamente inferior en función de los siguientes valores:

20-30-50-75-100-150-**200-300**-500-750-1000-1500-2000-3000-5000
(lx)

Por tanto, en el caso de aulas en las que se exigen una iluminancia mínima de 300 lx, se exigiría una iluminancia de 200 lx en las zonas inmediatamente circundantes a la zona de las mesas de los estudiantes.

Esta norma incide en la necesidad de conseguir un consumo bajo de energía a través de la utilización de **sistemas de control y del aprovechamiento de la luz natural**. Ambos criterios serán tenidos en gran consideración en las propuestas de mejora de iluminación que se desarrollarán en este trabajo.

El **CTE DB HE3**, por su parte, añade dos exigencias más de cumplimiento para las instalaciones de iluminación:

- **Valor de eficiencia energética (VEEI)**. EL VEEI de una instalación de iluminación en una zona se determinará mediante el valor de eficiencia energética de la instalación por cada 100 lux. Su unidad son W/m².

$$VEEI = (P \times 100) / (S \times E_m)$$

siendo "P" la potencia total instalada en las lámparas más los equipos auxiliares (W), "S" la superficie iluminada (m²) y "E_m" la iluminancia media horizontal mantenida (lux).

A través de las estrategias propuestas se debe asegurar el cumplimiento de este parámetro. **En el caso de aulas, el valor límite es 3.5**. Los valores del VEEI límite en recintos interiores de un edificio se extraen de la tabla 2.1 del DB HE3.

Zonas de actividad diferenciada	VEEI límite
administrativo en general	3,0
andenes de estaciones de transporte	3,0
pabellones de exposición o ferias	3,0
salas de diagnóstico ⁽¹⁾	3,5
aulas y laboratorios ⁽²⁾	3,5
habitaciones de hospital ⁽³⁾	4,0
recintos interiores no descritos en este listado	4,0
zonas comunes ⁽⁴⁾	4,0
almacenes, archivos, <i>salas técnicas</i> y cocinas	4,0
aparcamientos	4,0
espacios deportivos ⁽⁵⁾	4,0
estaciones de transporte ⁽⁶⁾	5,0
supermercados, hipermercados y grandes almacenes	5,0
bibliotecas, museos y galerías de arte	5,0
zonas comunes en edificios no residenciales	6,0
centros comerciales (excluidas tiendas) ⁽⁷⁾	6,0
hostelería y restauración ⁽⁸⁾	8,0
religioso en general	8,0
salones de actos, auditorios y salas de usos múltiples y convenciones, salas de ocio o espectáculo, salas de reuniones y salas de conferencias ⁽⁹⁾	8,0
tiendas y pequeño comercio	8,0
habitaciones de hoteles, hostales, etc.	10,0
locales con nivel de iluminación superior a 600lux	2,5

Figura 8. Tabla 2.1. DB HE3. Valores límite de eficiencia energética de la instalación.
Fuente: DB HE3

- **Potencia máxima instalada en iluminación**, teniendo en cuenta la potencia de la lámpara junto con la de su equipo auxiliar. Su unidad también son los W/m². En el caso de docencia, el valor límite son 15 W/m² y sus valores se extraen de la tabla 2.2 del DB HE3.

Uso del edificio	Potencia máxima instalada [W/m ²]
Administrativo	12
Aparcamiento	5
Comercial	15
Docente	15
Hospitalario	15
Restauración	18
Auditorios, teatros, cines	15
Residencial Público	12
Otros	10
Edificios con nivel de iluminación superior a 600lux	25

Figura 9. Tabla 2.2. DB HE3. Potencia máxima de iluminación. Fuente: DB HE3

Un concepto importante a la hora de obtener la potencia que consume una instalación es el **factor de potencia (Cosφ)**, que mide el aprovechamiento real de la energía eléctrica consumida. La potencia total consumida se denomina **potencia aparente (S)** y es la suma de la **potencia activa (P)**, que es la parte de la energía eléctrica transformada en trabajo útil, y la **potencia reactiva (Q)**, que es la energía que realmente usa un equipo para su funcionamiento. La relación entre la potencia activa y la potencia aparente se denomina factor de potencia. Si su valor es igual a 1 quiere decir que toda la energía eléctrica es aprovechada. Un valor de 0.5 indica que la mitad de la energía eléctrica se ha consumido.

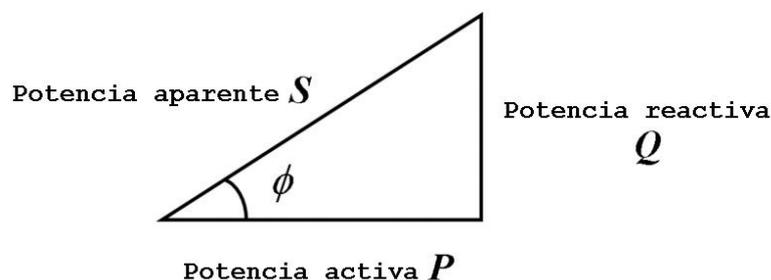


Figura 10. Triángulo de potencias. Fuente:

<https://potenciaelectronica.wikispaces.com/6+Factor+de+Potencia>

Además, para llevar a cabo un buen diseño de iluminación, será necesario tener en cuenta que la **temperatura de color "TC"** de una fuente luminosa afecta psicológicamente sobre las personas en función de las actividades que se desarrollen bajo su iluminación. Su unidad es el **Kelvin (K)**.

Se denominan **fuentes lumínicas cálidas** aquellas que tienen tonos similares al rojizo debido a su temperatura de color. Por el contrario, son **fuentes lumínicas frías** aquellas que tienen tonos

cercanos al azul. Aquellas que se sitúan entre estas dos se consideran neutras.

Un caso particular es la luz que recibimos del sol, que varía su temperatura de color en función de la hora del día y de la presencia o ausencia de nubosidad.

La TC en los centros de docencia adquiere un gran protagonismo, puesto que tiene gran influencia en el rendimiento y concentración de los usuarios. Cuanto más alta es la TC, más sensación de frío se tiene y más se asemeja a la luz del día, permitiendo crear un ambiente de concentración que resulta óptimo para estos usos. Sin embargo, cuanto menor es la TC, más sensación de calor se tiene, creando un ambiente más relajante y confortable.

Como consecuencia de todo esto, en el modelo de aula objeto de estudio, se procurará usar lámparas con TC altas, promoviendo un ambiente frío y propenso a la concentración.

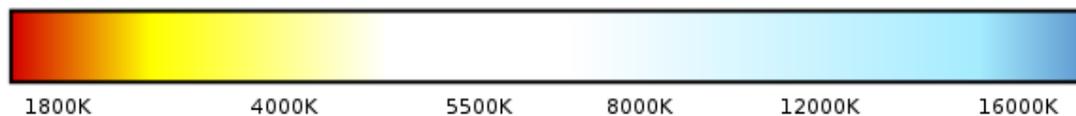


Figura 11. Escala de Temperaturas de Color (Kelvin). Fuente: <http://ledcampos.es/wordpress/?p=32>

2.4- Dispositivos de medición

El instrumento que permitirá la medida de la iluminancia en los diferentes puntos del aula será el luxómetro, que permite medir la iluminancia real y no subjetiva en un punto concreto de un ambiente. Este instrumento permitirá obtener los valores concretos de iluminancia que producen las luminarias instaladas en el aula sobre la superficie de las mesas en los puntos requeridos. Una vez obtenidos estos valores, se modelará mediante el software *Dialux Evo* el entorno de las aulas con sus condiciones; recreando la situación de las mesas, luminarias, ventanas y reflectancias de los materiales, de manera que los valores obtenidos de este programa se aproximen, de mayor forma posible, a los valores obtenidos por el luxómetro.



Figura 12. Luxómetro PCE-174. Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Escala de medición 400 lx. Fuente: Elaboración propia



Figura 14. Escala de medición 4.000 lx. Fuente: Elaboración propia

En este caso, se usa un luxómetro digital modelo PCE-174 cuyo fundamento se basa en el principio de una célula fotovoltaica, es decir, un circuito integrado recibe una cierta cantidad de luz y la transforma en una señal eléctrica visible a través de la fijación de una cifra. Se puede usar diferentes escalas de medición (en las aulas estudio se ha usado únicamente las escalas de 400 y 4.000 lx) y los valores se dan en lux. Las especificaciones técnicas de este modelo son las siguientes:

Especificaciones técnicas	
Rango	400,0 / 4000 / lux 40,00 / 400,0 klux 40,00 / 400,0 / 4000 / fc 40,00 kfc
Resolución	0,1 / 1 / 10 / 100 lux 0,01 / 0,1 / 1 / 10 FootCandle
Precisión	±5 % del valor de medición ±10 dígitos (<10.000 lux) ±10 % del valor de medición ±10 dígitos (>10.000 lux)
Reproducibilidad	±3 %
Memoria	16.000 valores
Cuota de medición	entre 2 segundos y 9 horas
Indicación de sobrerango	OL = Overload
Actualización de pantalla	1,5 cada segundo
Condiciones ambientales	0 ... 40 °C / 80 % H.r.
Pantalla	Pantalla LCD de 3¼ dígitos
Alimentación	batería de 9 V
Dimensiones	Aparato: 203 x 75 x 50 mm (ancho x alto x profundo) Sensor de luz: 115 x 60 x 20 mm (ancho x alto x profundo)
Peso	280 g
Normativas	Seguridad: IEC-1010-1; EN 61010-1 EMV: EN 50081-1; EN 50082- 1 correspondiente DIN 5031; DIN 5032

Figura 15. Especificaciones técnicas luxómetro digital modelo PCE-174. Fuente: <http://www.pce-iberica.es/manuales/manual-luxometro-pce-174-nuevo.pdf>

2.5- Diagrama polar y curvas Isolux

Las representaciones gráficas son indispensables a la hora de usar y representar los datos obtenidos mediante los cálculos de las magnitudes antes expuestas.

Por esta razón, podemos emplear una representación gráfica plana que representa el flujo luminoso emitido por una fuente luminosa mediante vectores de intensidad luminosa distribuidos en todas las direcciones. Esta distribución luminosa se puede cortar en diversos planos y, en función de esto, podemos obtener diferentes tipos de gráficos, como el diagrama polar o las curvas isolux.

- El **diagrama polar o curva fotométrica** de una fuente luminosa o sólido fotométrico se forma cortando la distribución luminosa por un determinado plano que pasa por el eje de simetría de dicha fuente luminosa. Estos planos se determinan a través del sistema de coordenadas C- γ . En el diagrama de la figura podemos ver dos planos. Por un lado el plano C0-C180 que es un plano vertical perpendicular al eje de la luminaria y el plano C90-C270 que es el plano vertical paralelo al eje de la luminaria.

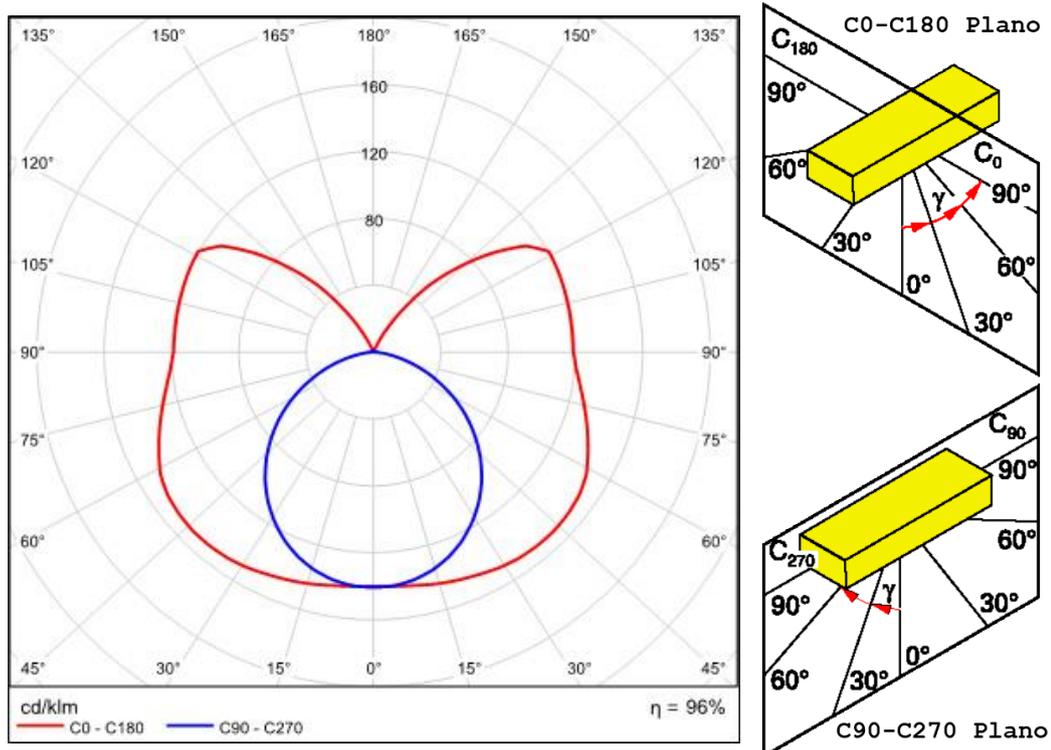


Figura 16. Diagrama de distribución en dos planos Lámpara Fluorescente T8 58W/ 840 OSRAM con plano C0-C180 y plano C90-C270. Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/lamparas/lamparas-fluorescentes/lamparas-fluorescentes-t8/lumilux-t8/index.jsp

El **sólido fotométrico** de una lámpara o luminaria es el cuerpo volumétrico formado al representar vectorialmente la intensidad luminosa proporcionada en todas las direcciones del espacio. Esta representación suele tener una o dos simetrías axiales por lo que se puede llegar a representar de una a dos curvas fotométricas representativas.

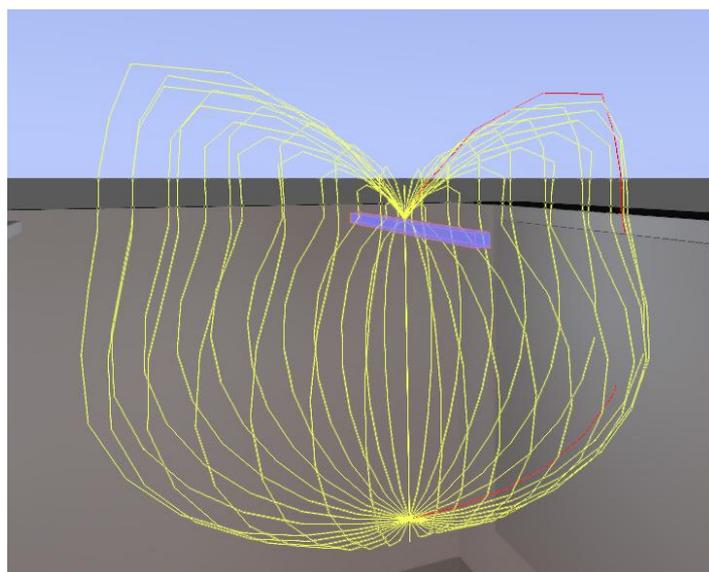


Figura 17. Sólido fotométrico Lámpara Fluorescente T8 58W/ 840 OSRAM.
Fuente: Elaboración propia

- El **diagrama o curvas Isolux** sirve para representar gráficamente la iluminancia o nivel de iluminación de una determinada superficie. Se obtiene cortando por diversos planos paralelos al plano de trabajo y uniendo los puntos con la misma iluminancia en lux.

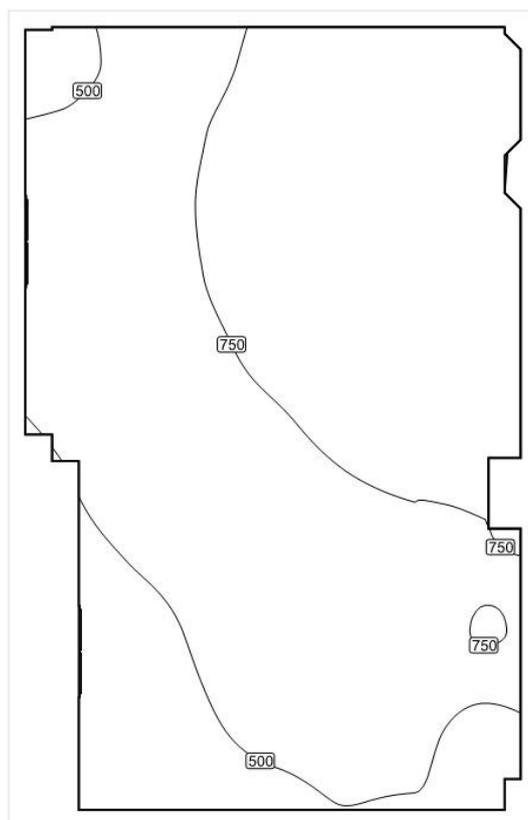


Figura 18. Diagrama Isolux Modelo Aula Caso 1 Aula B2 Estado Inicial Luz Solar+Luminarias Plano Útil 0.80m. Fuente: Elaboración propia

2.6- Luminarias

La norma UNE 20447-86 define la luminaria como *“aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y protección de las lámparas y, en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión de la red de alimentación”*.

Simplificando, la luminaria se podría definir como *“un objeto formado por un conjunto de elementos destinados a proporcionar una adecuada radiación luminosa de origen eléctrico”*.

Estos elementos que componen la luminaria necesitan cumplir unas necesidades **ópticas, mecánicas y eléctricas**. En el aspecto óptico, las luminarias son responsables del **control y distribución luminosa** emitida por las lámparas, de manera que aseguren un buen **rendimiento del conjunto lámpara-luminaria** y **controlen el deslumbramiento** que se pueda producir hacia los usuarios.

Asimismo, mecánicamente, la luminaria debe contener y proteger todos los elementos que se encuentran en su interior. También debe llevar a cabo un **control térmico** que haga estable su funcionamiento y un **control eléctrico** que ofrezca seguridad a los usuarios y proporcione una intensidad y voltaje adecuados.

Para llevar a cabo todo esto, es necesario una **fabricación sólida y eficaz** de la luminaria, permitiendo una **instalación sencilla** y un **mínimo mantenimiento** durante su uso.

Además de todo lo anterior, las luminarias deben cumplir unos mínimos en cuanto a **propiedades estéticas**, de forma que, estando encendidas o apagadas, deben integrarse perfectamente en el conjunto arquitectónico.

Las luminarias que se deban disponer en entornos con condiciones especiales, ya sean ambientes húmedos o con peligro de explosión, deben cumplir exigencias mayores y una construcción especial.

No obstante, el modelo de aula que se estudiará no necesita de condiciones especiales, por lo que las luminarias solo deberán cumplir las exigencias normales.

Los elementos más característicos de una luminaria, que tomarán relevancia en este trabajo, son:

- **Armadura, regleta o carcasa**. Elemento físico que sirve de soporte y contención de todos los elementos de la luminaria y que delimita a su vez el volumen de la misma. Existen varios tipos y clasificaciones, sin embargo, aquellas utilizadas en este estudio, serán las de **superficie o adosadas**, las **empotradas** y las de **pared**, todas para ambientes interiores y en condiciones normales. Otros tipos son las **suspendidas**, las **downlight**, las de **acentuación** y los **sistemas de carriles**.

- **Equipo eléctrico auxiliar.** Elementos necesarios para el arranque y funcionamiento de la lámpara.

Los fluorescentes, explicados en el punto 2.7.1, contarían con balasto electromagnético, condensador y cebador; o en sustitución de los anteriores los balastos electrónicos. A parte de los componentes anteriores necesarios para el encendido y funcionamiento de los fluorescentes, podemos encontrar elementos de control y regulación.

En la tecnología LED, en cambio, se podría considerar como equipo eléctrico auxiliar el driver o fuente de alimentación, explicado en el punto 2.7.2. Además, al igual que en los fluorescentes, pueden llevar un equipo de control y regulación como elemento auxiliar.

- **Reflectores.** Superficies interiores de la luminaria diseñadas para modelar la forma y dirección del flujo de la lámpara. Existen diversas formas, algunas de ellas son las siguientes:

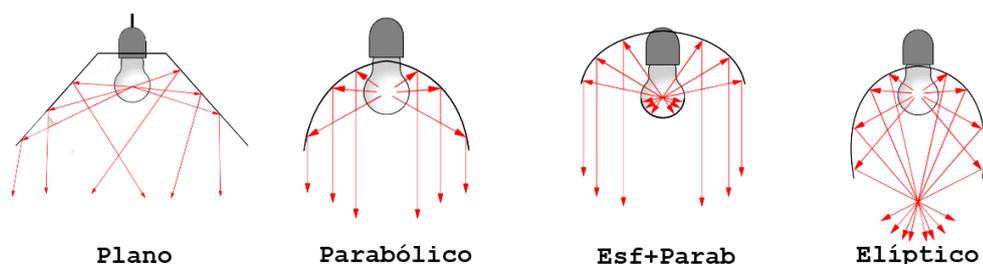


Figura 19. Diversas formas de reflectores. Fuente: Elaboración propia

- **Celosías o difusores.** Carcasa o pantalla que cierra la lámpara en la dirección de la radiación luminosa. Absorbe parte del haz de luz, lo difunde y evita el deslumbramiento. En este estudio se usará el **opal liso** tanto en el estado inicial como en las futuras estrategias.
- **Filtros.** Sirven para potenciar o mitigar determinadas características de la radiación luminosa. En el caso que concierne a este estudio concreto no se hará uso de este elemento.

Una vez definida la luminaria y sus partes, es necesario llevar a cabo una pequeña **clasificación en función de la forma en que distribuyen la radiación luminosa.**

- **Simétrica/ Asimétrica**



Figura 20. Curvas fotométricas en función de la simetría. Fuente: Elaboración propia

- **Directa/ Indirecta** en función de la dirección del haz luminoso (Según UNE 20447-86).
 - o **Iluminación directa** cuando el porcentaje de luz emitida hacia abajo es del 90 al 100%. Estas distribuciones corresponden a luminarias de alta eficiencia pero pueden producir deslumbramiento.
 - o **Iluminación semi-directa** cuando entre el 60 al 90% del flujo luminoso es emitido hacia abajo y el resto hacia paredes y techo.
 - o **Iluminación uniforme o difusa** cuando el flujo luminoso se reparte de igual manera en todas las direcciones del espacio. Tienen menor rendimiento que las de iluminación directa pero son apropiadas para espacios con altas reflectancias.
 - o **Iluminación semi-indirecta** cuando entre el 60 al 90% del flujo luminoso es emitido hacia arriba.
 - o **Iluminación indirecta** cuando entre el 90 y 100% del flujo luminoso es emitido hacia arriba, ya sea el techo o la parte superior de las paredes. Favorece la uniformidad de la iluminación.

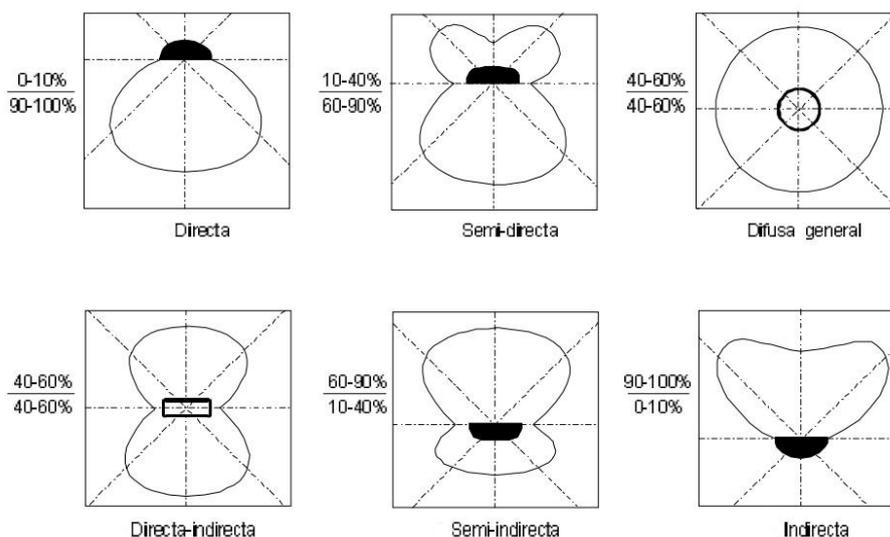


Figura 21. Curvas fotométricas en función de la dirección de la radiación luminosa. Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4023972/>

- **Intensiva/ Extensiva** en función del ángulo del haz luminoso.
 - o **Intensiva** con un ángulo de 0 a 30°.
 - o **Semi-intensiva** con un ángulo de 30 a 40°.
 - o **Dispersora** con un ángulo de 40 a 50°.
 - o **Semi-extensiva** con un ángulo de 50 a 60°.
 - o **Extensiva** con un ángulo de 60 a 70°.
 - o **Hiper-extensión** un ángulo de 70 a 90°.

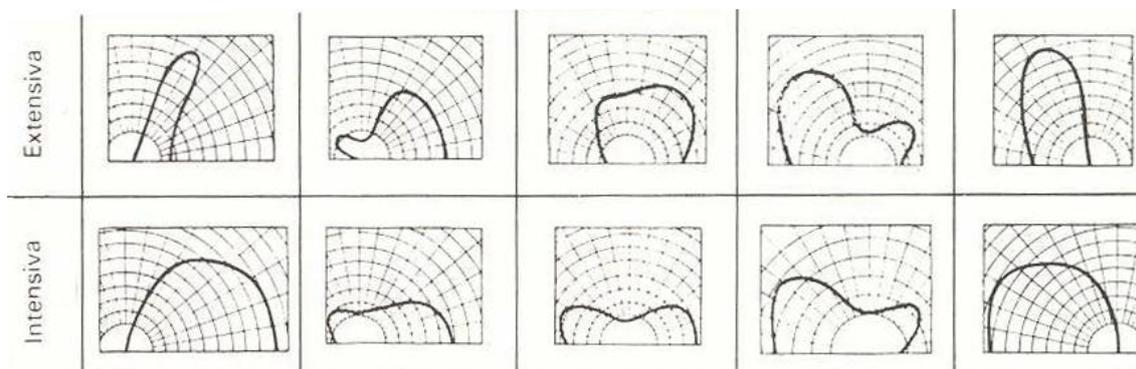


Figura 22. Curvas fotométricas en función del ángulo de la radiación luminosa. Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4023972/>

Por último, es necesario mencionar el concepto vinculado al **rendimiento de la luminaria**, que es la proporción entre el porcentaje del flujo luminoso que realmente sale de la luminaria respecto al flujo luminoso que emite o emiten la lámpara o las lámparas.

2.7- Lámparas

Existe un amplio abanico de tipos de lámparas en el mundo de la iluminación. No obstante, en este trabajo, nos centraremos en las lámparas fluorescentes y en la tecnología LED que serán las usadas en la auditoría y propuestas de mejora que se desarrollarán en puntos posteriores.

2.7.1- Lámparas fluorescentes

Las **lámparas fluorescentes**, cuyo estandar es el tubo fluorescente, está lleno de una pequeña cantidad de gas argón a baja presión, una gota de mercurio puro y en cada extremo del tubo hay un filamento que se calienta con la corriente eléctrica de forma que emite electrones que van del filamento negativo al positivo, pasando a través de vapor de mercurio y emitiendo radiación ultravioleta. Esta radiación, a su vez, es absorbida y reemitida como luz visible a través del recubrimiento interior del tubo formado por productos químicos. Por todo esto, estas lámparas también se llaman de **Descarga de Vapor de Mercurio a Baja Presión (VMBP)**.

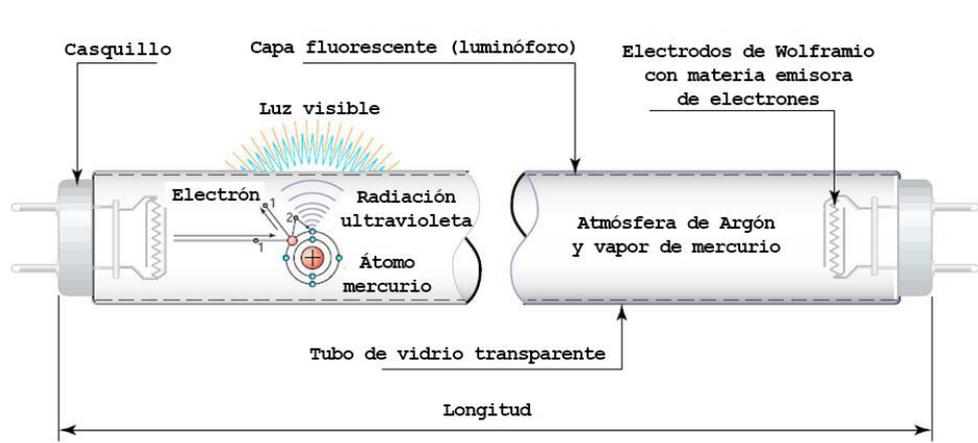


Figura 23. Proceso de encendido de un tubo fluorescente. Fuente: <http://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasiluminacion-fuentesDeLuz-LamparasDeDescarga.php>

Para que se realice todo este proceso, es necesario un equipo eléctrico auxiliar formado por un balasto electromagnético o reactancia, un cebador y un condensador (opcional). Existen otro tipo de balastos denominados electrónicos que evitan la aparición de componentes como el cebador y el condensador.

Como posteriormente se señalará, el modelo de aula objeto de estudio de este trabajo cuenta, en su estado inicial, con luminarias con tubos fluorescentes de 58W cuyo circuito está compuesto por un cebador marca Philips S10, un balasto electromagnético marca ELT Serie Plana que analizaremos en profundidad en la parte de potencia del punto 3.3 y un condensador marca DNA modelo 250-7 con una compensación $7\mu\text{F}$ y una tolerancia de $\pm 10\%$. A continuación se describe la función de cada uno de estos elementos:

El balasto se trata de un dispositivo que limita la corriente que circula a través de la lámpara y controla la potencia que llega a la misma, asegurando su correcto funcionamiento. Puede ser electromagnético o electrónico.

- **El balasto electromagnético o reactancia**, a través de inductancia, genera el arco de energía necesaria para el arranque y posterior funcionamiento de la lámpara, proporcionando una tensión continua. Está formado por un núcleo de láminas de acero rodeado por dos bobinas de aluminio o cobre.

Cuando la electricidad fluye por el balasto, que es corriente alterna y por lo tanto cambia de dirección múltiples veces por segundo, se crea un campo magnético. Este campo se opone al flujo de la electricidad, evitando que la intensidad aumente. Cuando la corriente cambia de dirección, el campo magnético del balasto la ralentiza. De esta manera, cuando quiere aumentar su intensidad ya está cambiando de dirección nuevamente, evitando que la corriente aumente demasiado la intensidad.

Se trata de dispositivos caracterizados por un elevado peso, un bajo factor de potencia, una baja eficiencia de potencia, la necesidad de un elemento separado de arranque como el cebador y no tienen posibilidad de regulación. Estas reactancias trabajan con las frecuencias de red (50 o 60 Hz).

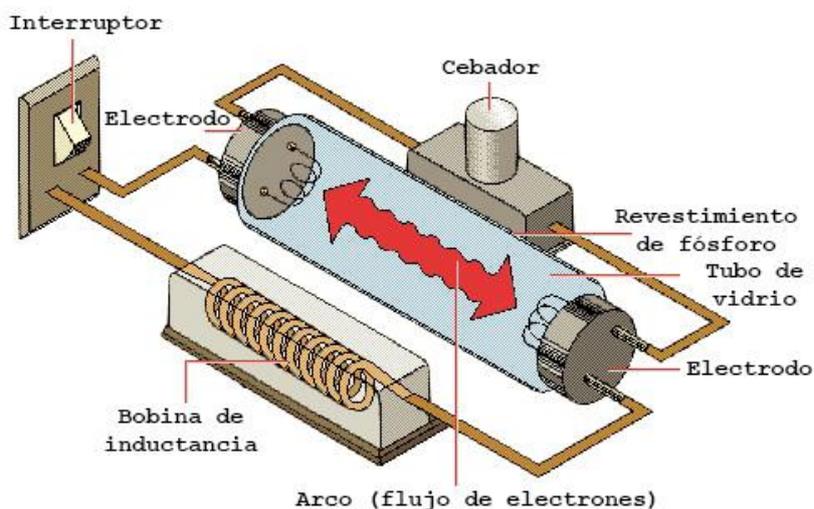


Figura 24. Esquema circuito fluorescente con balasto convencional y cebador.
Fuente: <http://www.afinidadelctrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=35>



Figura 25. Balasto o reactancia usado en el estado inicial de las luminarias de 58W del modelo de aula a estudiar. Fuente: Elaboración propia

- **El balasto electrónico**, en cambio, se trata de un sistema formado por componentes electrónicos que producen un arranque más rápido y sin parpadeos en las lámparas (efecto estroboscópico), haciéndolas trabajar a frecuencias superiores de 20 KHz.

Estos dispositivos, a diferencia de los balastos convencionales, suelen tener un alto factor de potencia, pueden permitir el control de la intensidad luminosa, son más ligeros y tienen todos los componentes necesarios para su funcionamiento en una única unidad compacta, sin necesidad de un cebador y un condensador.

Otras ventajas son un incremento en la eficacia y la vida útil de la lámpara y una reducción de la temperatura de funcionamiento de la luminaria.

Además desconectan la lámpara automáticamente cuando la detectan averiada o gastada.

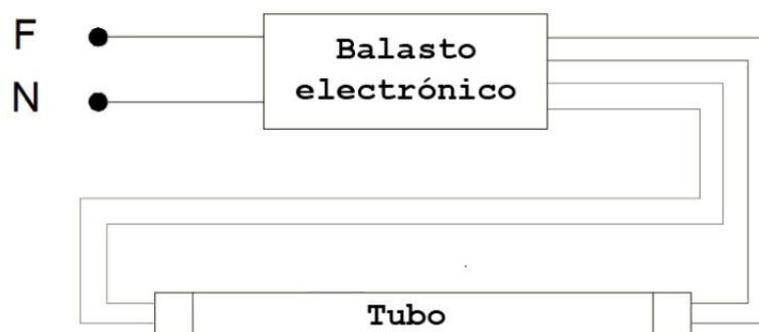


Figura 26. Esquema circuito fluorescente con balasto electrónico. Fuente: <http://meetthings.com/blog/index.php/02-11-2011/como-elegir-y-como-se-conectan-los-tubos-leds/>

Este tipo de balastos pueden ser regulables o no regulables. Dentro del ámbito de los regulables, existen diversos sistemas de regulación y control, tanto analógicos como digitales, compatibles con este tipo de balastos.

Un sistema de control y regulación de la iluminación está formado por un conjunto de dispositivos que envían información al sistema, permiten su programación en función de eventos y/o datos recogidos por las sondas y un conjunto de actuadores para la regulación y conmutación de la iluminación. Algunos de los dispositivos que proveen información pueden ser sensores de luz ambiental, sensores de luz natural o exterior, sensores de presencia, dispositivos según preferencias del usuario y relojes que modifican la iluminación en función de las horas del día.

En este estudio nos centraremos en el protocolo de regulación analógico 1-10V que se desarrollará en el punto 3.4 como estrategia de mejora de iluminación para el modelo de aula que se estudiará en este trabajo.

La **regulación 1-10V** se trata de un sistema analógico de regulación cuyo control se realiza a través de una señal de tensión continua de 10V, obteniéndose el nivel mínimo de luz con 1V y el máximo con 10V. Este sistema admite la instalación de controladores manuales que permitan el ajuste del nivel de iluminación por parte del usuario y de controladores automáticos o sensores que regulen dicho nivel en función de la cantidad de luz natural disponible en cada momento. Es necesario la instalación de una línea adicional de control formada por dos hilos.

Se trata de un sistema de regulación unidireccional, es decir, la información fluye desde el controlador hacia el equipo de iluminación y no en viceversa. La alimentación de las reactancias tiene que pasar a través de los dispositivos de control.

No permite un control por software de los equipos, realizándose la creación de grupos de forma cableada y cuya longitud estará restringida por la caída de tensión producida a lo largo de la misma, por tanto, dependerá del número de equipos a controlar conectados.

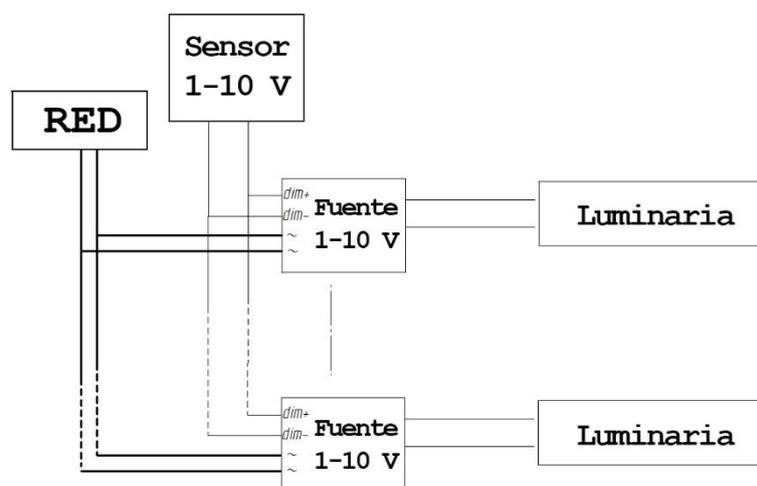


Figura 27. Sistema de regulación 1-10V con sensor. Fuente: <http://www.contaval.es/tag/protocolo-1-10v/>

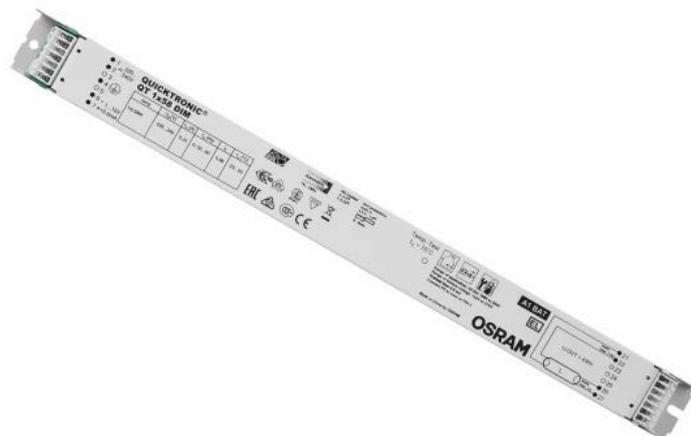


Figura 28. Balastro electrónico QUICKTRONIC DIM T8 regulable con sistema 1-10V. Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/balastos-y-transformadores-para-lamparas/equipos-de-conexion-electronicos-para-iluminacion-tradicional/ece-para-lamparas-fluorescentes-y-fluorescentes-compactas/ece-para-fl-y-cfl%2c-regulable-desde-1....10-v/quicktronic-dim-t8/index.jsp?productId=ZMP_1025340

Existen otros protocolos digitales como el **DALI (Digital Addressable Lighting Interface)** que, pese a que tenga varias ventajas sobre la el protocolo 1-10V tales como ser un sistema bidireccional que se puede controlar mediante software y obtener información del equipo de iluminación como por ejemplo el estado de las lámparas o de las reactancias o programar patrones de funcionamiento en función de diferentes parámetros como las horas de funcionamiento del espacio iluminado o en función de las horas del día o de los meses del año, puede resultar demasiado caro y complejo para instalarse sólo en las aulas. Este tipo de protocolo sería adecuado si se instalase en la totalidad de la facultad.

No obstante, como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo se opta por el protocolo 1-10V debido a su precio más reducido respecto al DALI y debido a que se estudiará el sistema de iluminación del modelo de aula como independiente respecto al resto del edificio.

- **El cebador o arrancador** es una pequeña ampolla rellena de gas neón a baja presión con dos electrodos próximos entre sí. En el interior de la ampolla se encuentra una lámina bimetálica con dos materiales con diverso coeficiente de dilatación. Esta lámina se curva al recibir el calor del gas neón, cerrando el contacto y permitiendo el paso de la corriente eléctrica por el circuito. De esta forma, se calientan los filamentos situados en los extremos del tubo y comienzan con la emisión de electrones. Dentro de la carcasa del cebador se incluye un pequeño condensador en paralelo que atenúa las interferencias electromagnéticas.



Figura 29. Cebador o arrancador usado en el estado inicial de las luminarias de 58W del modelo de aula a estudiar. Fuente: Elaboración propia

- **El condensador** se trata de una reactancia capacitativa capaz de compensar la energía reactiva generada por la reactancia inductiva o balasto, haciendo que éste sea más eficiente.

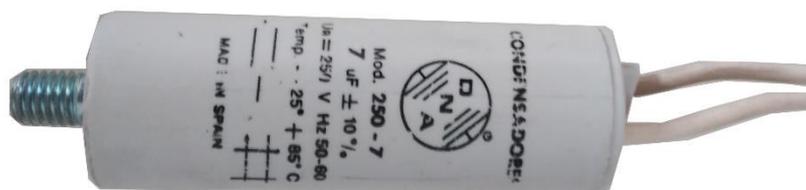


Figura 30. Condensador usado en el estado inicial de las luminarias de 58W del modelo de aula a estudiar. Fuente: Elaboración propia

Existen varios formatos de lámparas fluorescentes, siendo las más habituales las de **tubo recto o estandar** y las **compactas** que a su vez pueden ser **electrónicas** o **normales**.

Dentro de las de tubo recto, que son las que se muestran en este estudio, los tipos más comunes son los **T5**, los **T8** y los **T12**. La letra T se utiliza delante del número para indicar que la lámpara fluorescente es de tipo tubo. Tras esta letra, se indica un número que es el diámetro del tubo medido en octavos de pulgada (2,5cm). De esta manera el **tubo T5** tiene un diámetro de 5/8 de pulgada (16mm), el **tubo T8** tiene un diámetro de 8/8 de pulgada (26mm) y el **tubo de T12** tiene un diámetro de 12/8 de pulgada (38mm).

En la situación inicial de estudio del modelo de aula de la E.T.S. de Arquitectura de Valladolid se usan tubos fluorescentes T8 de 26mm de diámetro con una nomenclatura 58/840. La primera parte significa que el tubo funciona con una potencia nominal de 58W. El primer dígito de la segunda parte de la nomenclatura se refiere al IRC y nos indica que se encuentra entre el 80/89%. Los otros dos dígitos restantes se refieren a la TC y nos indica, en este caso, que se trata de 4000K, es decir, blanco neutro.



Figura 31. Variedad de TC dentro de la gama de los 80 para tubos fluorescentes. Fuente: <http://www.portalpez.com/iluminacion-en-el-acuario-plantado-vt66755.html>

De esta manera, dentro de la gama de los 80, encontraríamos las siguientes temperaturas de color.

Dentro de los tubos fluorescentes T8 nos podemos mover en el siguiente rango de potencias nominales.

15-18-25-30-36-38-**58**-70 W

En cuanto al **IRC** de los tubos fluorescentes suele oscilar entre el 65% hasta el 98%.

La **eficacia luminosa** de los tubos T12 ronda las 60 lm/W, los tubos T8 entre 80 y 100 lm/W y los tubos T5 entre 70 y 104 lm/W.

La **vida útil** de los tubos fluorescentes oscila desde 2000h hasta las 20.000h.

2.7.2- Lámparas LED

Un **LED (Light Emitting Diode)** se trata de un dispositivo formado por varias capas de material semiconductor que emite luz cuando es atravesado por una corriente eléctrica. La luz se genera en una de estas finas capas llamadas **capa activa**. Está unido a dos terminales denominados **ánodo** y **cátodo**, de manera que, cuando circula la corriente eléctrica a través de ellos, se origina un efecto de **electroluminiscencia** por el que la energía eléctrica se transforma en luz visible.

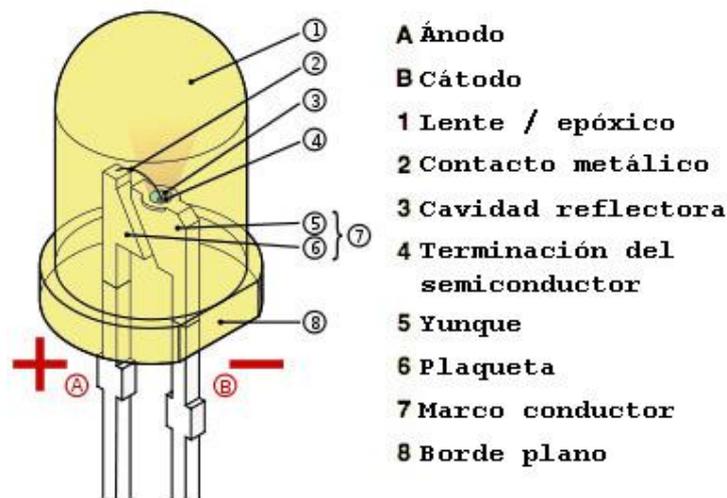


Figura 32. Partes de un diodo LED. Fuente: <http://www.prodisei.es/wp/sabias/sabias-acerca-de-la-iluminacion-led/>

Un LED emite prácticamente una luz monocromática. Sin embargo, el color se produce mediante las diversas mezclas de los materiales semiconductores.

La luz blanca no puede ser generada directamente por un material de LED, sino que se debe conseguir mezclando varios colores únicos. Existen dos métodos para conseguirlo:

- **Mezclando la luz que emite un chip azul, uno rojo y uno verde, de forma que la suma resultante sea la luz blanca.** Es un método que exige un elevado coste y un rendimiento de color muy pobre.



Figura 33. Mezcla aditiva de colores. Fuente: Guía sobre tecnología LED en el alumbrado

- **Utilizar un chip azul con una capa de fósforo, aplicando el mismo principio de la fluorescencia.** Variando la proporción de los fósforos se obtienen diversas temperaturas de color. Utilizando fósforos amarillos se obtiene un LED blanco frío con una Ra en torno a 70. Utilizando fósforos rojos y verdes se obtiene un LED cálido que, pese a tener un Ra superior al caso anterior y en torno a 80, logra un menor flujo luminoso.



Figura 34. Chip azul + Fósforo amarillo. Fuente: Guía sobre tecnología LED en el alumbrado

La vida de un LED, al igual que la de un fluorescente, no termina de forma abrupta sino que su flujo va depreciándose. Si su flujo luminoso cae por debajo del 50% del flujo inicial, se considera el final de la vida del LED.

Los LED son una tecnología novedosa y muy avanzada basada en una **gran eficacia luminosa (superior a 100 lm/W)** y una **enorme vida útil (entre 50.000 y 100.000 horas)**. Todo esto unido al **bajo consumo energético** de este tipo de lámparas, permiten una amortización de la inversión en un periodo reducido de tiempo.

Otras ventajas son un **tamaño reducido, una escasa generación de calor, gran resistencia mecánica frente a vibraciones y golpes, la ausencia de radiaciones ultravioletas e infrarrojas, un alto rendimiento de color, encendido instantáneo y una amplia posibilidad de regulación y control de todo el sistema.**

Para poder usar en iluminación la tecnología LED es necesario integrarlos en sistemas de iluminación completos. Un sistema de alumbrado LED se define como aquel que incorpora la tecnología LED para formar una luminaria que en su interior integre una fuente de luz LED con todos los componentes necesarios para su funcionamiento y la protección de los mismos, junto con los circuitos auxiliares y una adecuada conexión a la red de alimentación eléctrica. Los cinco elementos principales de una luminaria LED son los siguientes:

- El **Chip** está fabricado con un material semiconductor, normalmente carburo de silíceo o galio, de 5 mm de grosor y que genera la luz cuando se aplica corriente eléctrica. Es

la parte principal de la luminaria LED. Sobre la base de ésta, es donde se depositan diversos materiales como el **fósforo** que dan lugar a los diferentes colores y calidades de la luz. Este chip está protegido por una capa de policarbonato o resina semirrígida. Existen dos tipos, los **SMD (Surface Mounted Device)** y los **COB (Chip on Board)** que poseen un rendimiento lumínico mayor, disipan mejor el calor y tienen una luz más uniforme que los primeros.



Figura 35. Diferentes tipos de Chips LED. Fuente: <http://www.plusopto.co.uk/led-products/high-power.aspx>

- El **Driver o fuente de alimentación** se trata de un dispositivo que transforma la corriente de alterna (CA) a continua (CC) y adapta el voltaje de salida a los requisitos de los LED, ya que que no pueden conectarse directamente a la corriente. Este elemento influye en la estabilidad y eficiencia de la luminaria. Puesto que el objetivo es asegurar la menor cantidad de pérdidas de energía, se estima que un driver de calidad tenga un valor del factor de potencia sea superior a 0.9. Puede ser **externo o interno**.

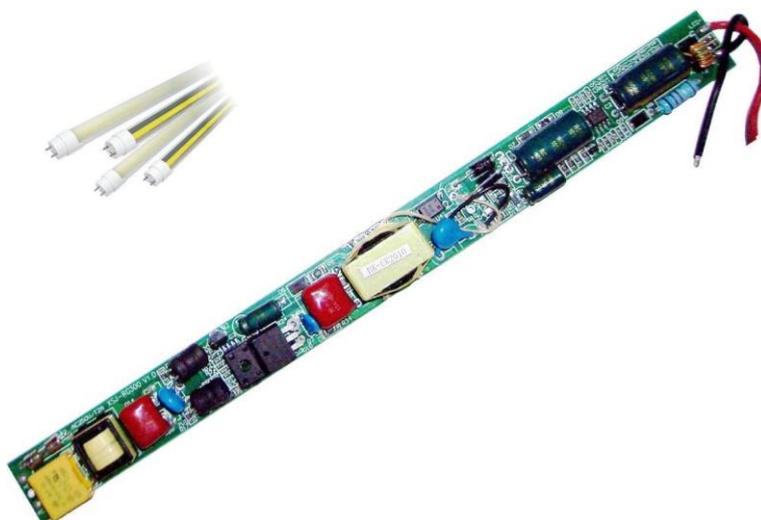


Figura 36. Driver interno para tubo LED T8. Fuente: <http://www.shoptronica.com/driver-led-tubos-t5-t8/3154-driver-led-mdht8g02-t5-t8-220vac-16w320ma.html>

- La **Placa Base o PCB (Printed Circuit Board)** es una placa de circuito impreso que sirve para soportar las conexiones de los componentes electrónicos, principalmente las conexiones del chip o las vías de disipación del calor. Según la forma en que elimine el calor, puede estar formado de diferentes capas y materiales tales como cobre y aluminio.

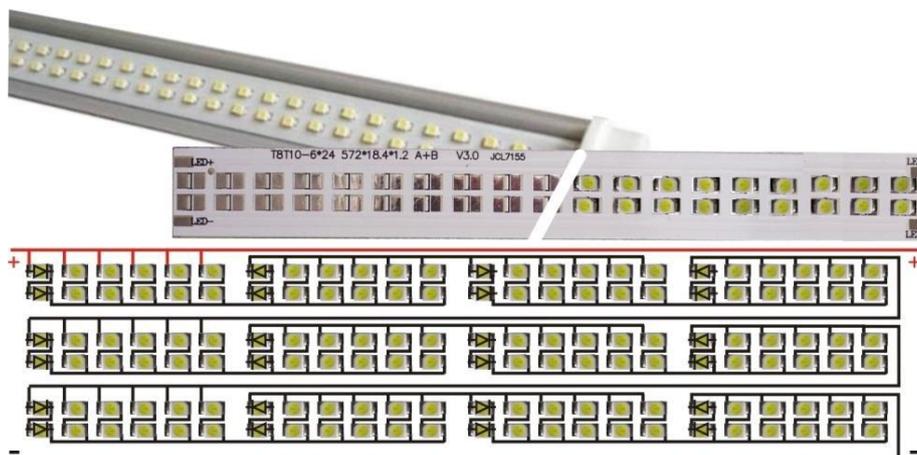


Figura 37. Placa base o PCB en línea para tubo LED T8. Fuente: <http://www.shoptronica.com/tiras-rigidas-de-led/1755-pcb-en-linea-para-tubos-led-t5-t8-t10-144-led-3528.html>

- El **Sistema de Gestión Térmica** que disipa el calor y se fabrica con materiales como el cobre, el aluminio y la cerámica. Poseen amplias superficies y alas que facilitan la disipación del calor. En un LED el calor es generado en la dirección contraria a la luz y puede influir en la durabilidad, el color y la calidad de la luz, de ahí la gran importancia de una buena disipación.

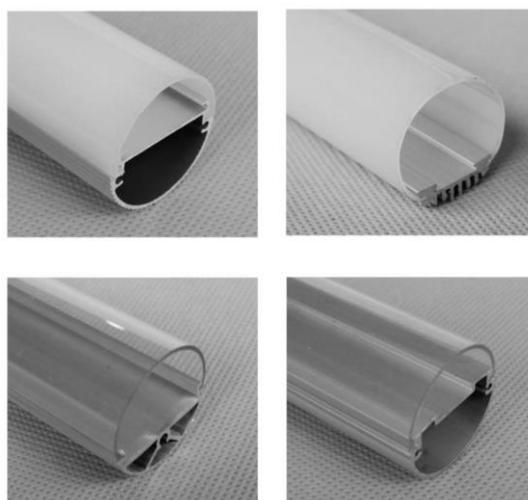


Figura 38. Diferentes tipos de disipadores de calor de aluminio para tubos LED T8. Fuente: http://spanish.everychina.com/f-z52e591c/p-103243873-electronics_led_aluminum_heat_sinks_aluminum_alloy_6000_series.html

- La **óptica** que se trata del conjunto de lentes que regulan la distribución de la luz emitida por un LED. Su composición

y forma puede variar en función de las necesidades de la iluminación y del tipo de distribución que se requiera.



Figura 39. Cubierta acrílica para tubo LED T8. Fuente: <http://es.aliexpress.com/item/OD20X2X1000MM-Extruded-Acrylic-Clear-Tubes-Perspex-Tubing-Pmma-Plastic-Pipes-Have-Any-Size/32516763021.html?spm=2114.43010408.3.13.fsJpnP>

En lo relativo a los sistemas de control y regulación del alumbrado que permiten su gestión en cualquier tipo de instalación, es preciso apuntar que existen diversos tipos. Sin embargo, al igual que en los fluorescentes, sólo se tendrán en cuanto el sistema de regulación analógico 1-10V explicado en el punto 2.7.1. El uso o no de estos sistemas de control y regulación dependerá de si el driver LED es compatible.

Este tipo de tecnología se usará como estrategia de mejora en el estudio del modelo de aula, en sustitución de las lámparas fluorescentes actuales. Los LED, pese a presentar una inversión inicial superior a los fluorescentes, permiten un mayor ahorro energético que permitirá recuperar las pérdidas en un breve periodo de tiempo. A parte de esto, las ventajas frente a los fluorescentes es muy amplia y queda palpable a través de la siguiente comparativa:

	Fluorescente	LED
Contiene mercurio y metales pesados	SI	NO
Usa cebador	SI/NO (HFP)	NO
Usa balasto	SI	NO
Genera energía reactiva	SI	NO
Consume con tubo fundido	SI	NO
Potencia tubo 60cm	18W	9W
Potencia tubo 120cm	36W	18W
Potencia tubo 150cm	58W	22W
Consumo balasto/driver 1x60cm	3W-7W	1W
Consumo balasto/driver 1x120cm	5W-7W	2W
Consumo balasto/driver 1x150cm	7W-11W	3W
Emite infrarrojos (IR)	SI	NO
Emite ultravioleta (UV)	SI	NO
Temperatura de superficie	80°	40°
Rango de temperatura de trabajo	5° a 45°	-20° a 60°
Peligro de rotura	SI	NO
Tensión de trabajo	240V	12V
Riesgo eléctrico	SI	NO
Vida útil	6.000/20.000	50.000
Decolora/Oscurece techos	SI	NO
Parpadeo durante el uso	SI	NO
Encendido instantáneo	NO	SI
Encendido a plena luminosidad	NO	SI
Sobre consumo por encendidos múltiples	SI	NO
Degradación lumínica por cada 3.000 horas	30%	2%

Tabla 2. Ventajas de la tecnología LED frente a los fluorescentes

2.8- Dialux Evo

Para llevar a cabo la recreación del escenario que vamos a estudiar y obtener valores para su análisis y posteriores estrategias, usaremos el software libre llamado *Dialux Evo* en su versión 6.1.

Se trata de un programa de cálculo de iluminación, tanto natural como artificial, ya sea en interiores o exteriores, y gratuito. Este software permite visualizar en gráficos tridimensionales los diagramas polares de distribución luminosa de las luminarias usadas (sólido fotométrico), permite representar gráficamente mediante colores y líneas los diferentes niveles de iluminancia y permite calcular los niveles de deslumbramiento o UGR.

La forma en que *Dialux Evo* modela las luminarias y lámparas es a través de los catálogos interactivos que ofrecen los fabricantes de las mismas. Una vez seleccionadas y colocadas dentro del escenario modelado con este programa o importado de otros como SketchUp o Autocad, el programa se encargará de realizar los cálculos y verificar los resultados en función de las normas vigentes que son la UNE-EN 12464-1:2011, DIN V 18599 y DB-HE 3.

Las principales funcionalidades de la interfaz que usa este programa son las siguientes:

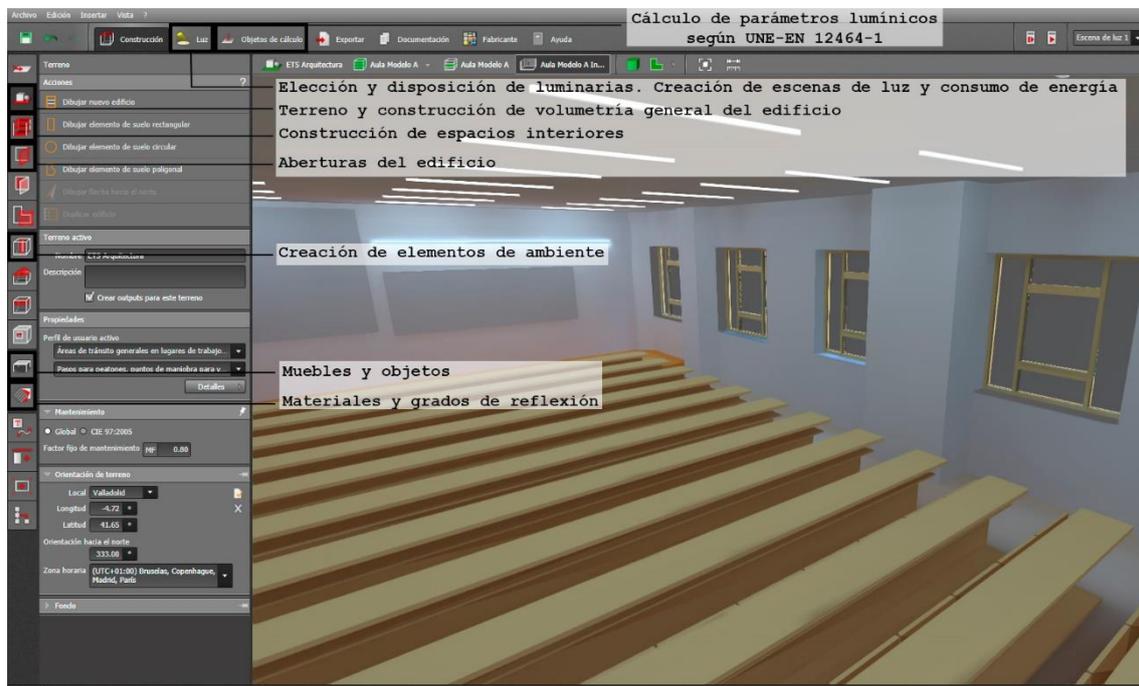


Figura 40. Funcionalidades del interfaz de Dialux Evo. Fuente: Elaboración propia

3- Objeto de estudio

3.1- Emplazamiento y descripción

Como anteriormente se ha mencionado, el estudio se llevará a cabo en un modelo de aula de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid (ETSAV). Se sitúa en la Avenida Salamanca, 18, Valladolid, España, y corresponde a las coordenadas geográficas 41°39'01"N 4°44'26"O, de especial importancia a la hora de situar el edificio en la recreación dentro del software *Dialux Evo*.



Figura 41. Situación y fases de construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid. Fuente: Elaboración propia

Se trata de una edificación proyectada en varias fases. La primera parte del edificio, proyectada por Antonio Fernández de Alba, se trata de un bloque lineal con un eje de simetría en fachada y orientado al NE-SO. En su inicio contaba con aulas a ambos lados separadas por un gran pasillo central. Fue materializada entre 1974 y 1979 y actualmente corresponde al ala de despachos académicos.

La ampliación, proyectada por el mismo arquitecto en 1980, inició su construcción en 1989. Se trata de un edificio de mayores dimensiones que su predecesor, con una geometría cuadrada, un vacío central y un perímetro de aulas docentes.

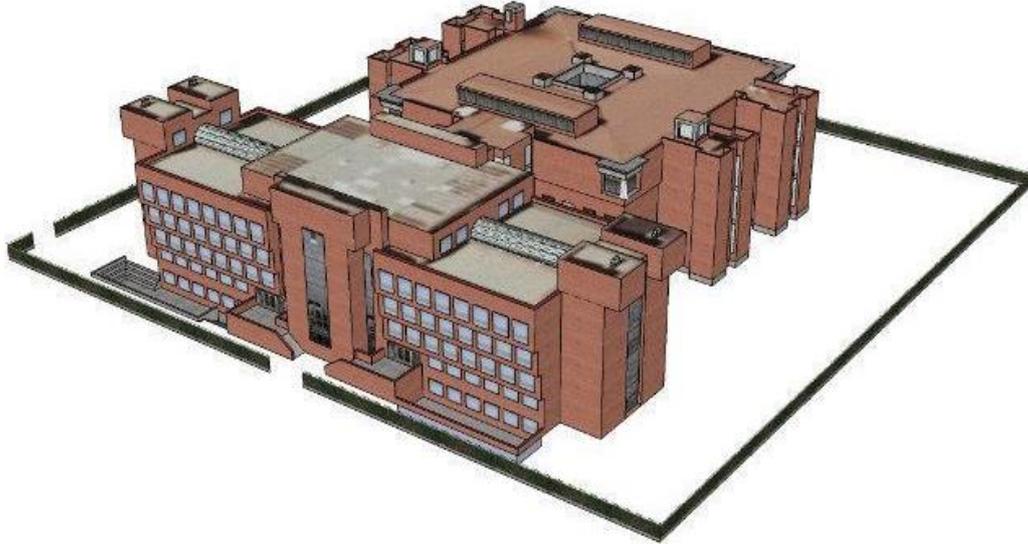


Figura 42. Axonométrica de las fases 1 y 2 de la ETSAV. Fuente: <http://wikimapia.org/3510441/es/Escuela-Tecnica-Superior-de-Arquitectura>

El estudio consistirá en la auditoría energética y propuesta de estrategias de mejora de un modelo de aula perteneciente a este perímetro de la ampliación del edificio. La ampliación cuenta con varias plantas en las que se van repitiendo diferentes tipologías de aula, de las que se elige una que será el objeto de este estudio.

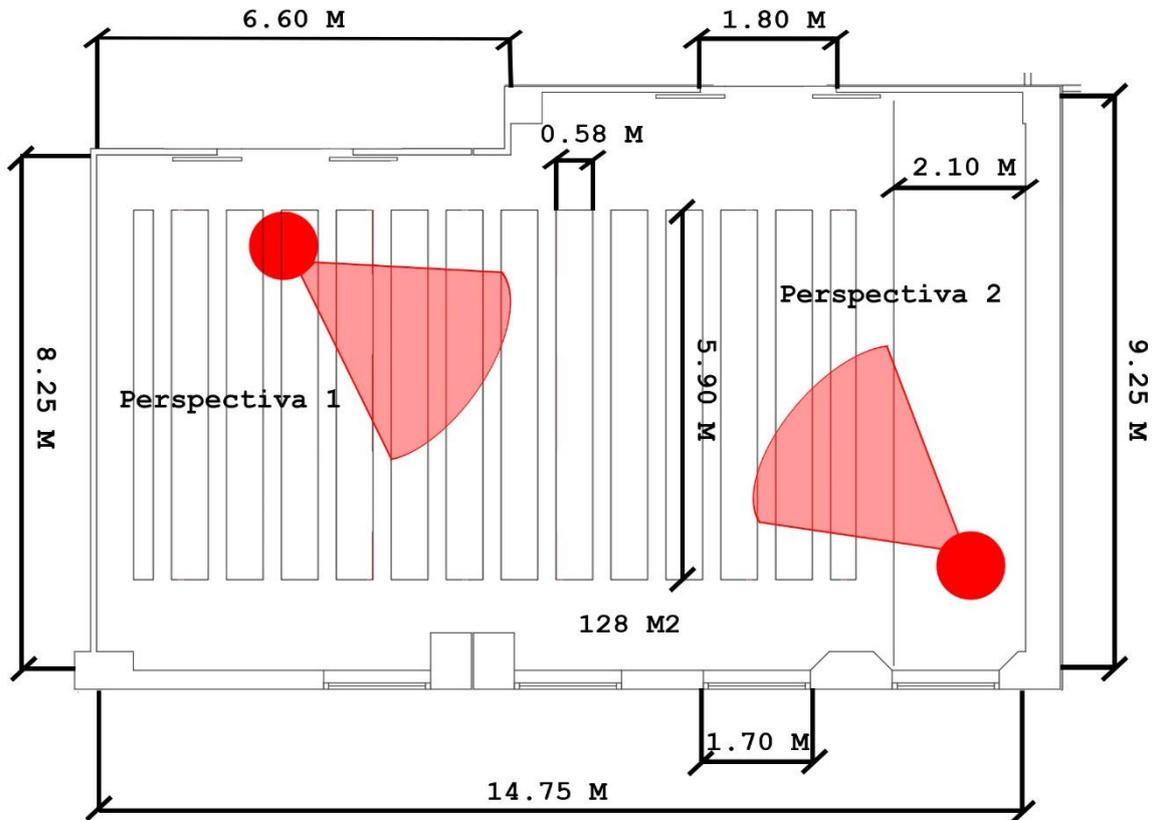


Figura 43. Modelo de aula a estudiar dentro de la ETSAV. Fuente: Elaboración propia



Figura 44. Perspectiva 1 del modelo de aula. Fuente: Elaboración propia



Figura 45. Perspectiva 2 del modelo de aula. Fuente: Elaboración propia

Se eligen las aulas de la planta 0, puesto que son las más desfavorables respecto a la luz solar debido a la altura total del edificio que estaría, aún siendo variable, alrededor de los 16 metros. Una vez seleccionada la planta y el modelo de aula a estudiar, se realizarán diversos casos en función de la orientación del aula dentro del edificio, concretamente los siguientes:

Planta 0

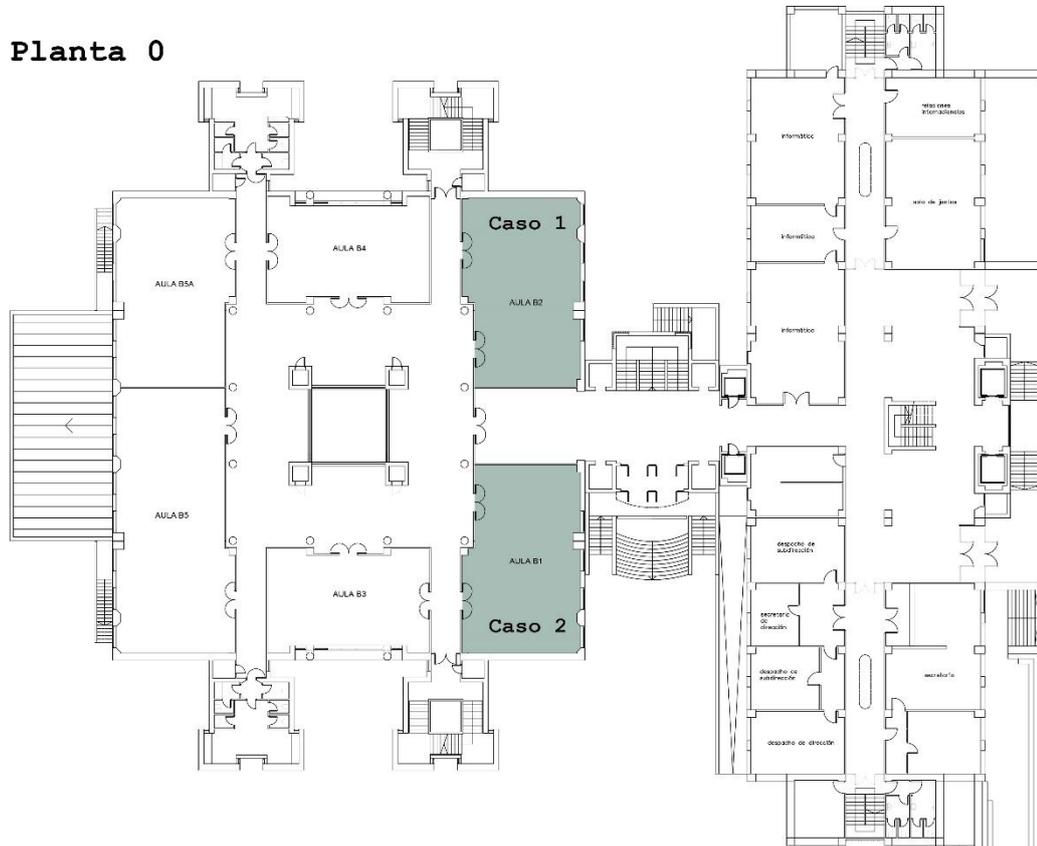


Figura 46. Diferentes casos de estudio a auditar en la planta 0 de la ETSAV. Fuente: Elaboración propia

En el caso 1 se estudiará el modelo de aula en Planta 0 con orientación noreste.

En el caso 2 se estudiará el modelo de aula en Planta 0 con orientación sureste.

Posteriormente, en el año 2010, se lleva a cabo la construcción de un nuevo edificio que cumple las funciones de nuevo aulario de la facultad y que comparte espacio con otros usos como son la Biblioteca Pública del Barrio, el Centro Cívico Jose Luis Mosquera y Centro de mayores.

El **modelo de aula seleccionado** se trata de un espacio destinado a un aula universitaria de enseñanza teórica dotada con una pizarra de dimensiones 3.6 x 1.25 m a una altura de 1.2 m y un proyector con una pantalla de dimensiones 3 x 2.3m a una altura de 1.3 m. Este proyector se encuentra a una distancia de 3.5 metros respecto

de la pantalla a la que da servicio y se trata del modelo 3M X36, con una intensidad de 3200 lm.



Figura 47. Proyector 3M X36. Fuente: Elaboración propia

Constructivamente, el local tiene una superficie de 128 m² y una altura de local de 3.7 m.

La iluminación se basa en una parte natural y una parte artificial. La parte natural se realiza a través de cuatro ventanas situadas en una de las paredes longitudinales del aula. El resto de ventanas que dan a espacios comunes del edificio se considerarán irrelevantes durante el cálculo.



Figura 48. Perspectiva ventanas modelo de aula. Fuente: Elaboración propia

DIALux

Aula Modelo Interior



Sistemas de fachada/Ventana para tejado

Nº	Ventana	Elementos de la fachada
1	0.900 m x 0.400 m	Cristal
2	0.900 m x 1.350 m	Cristal
3	0.450 m x 1.750 m	Cristal
4	0.450 m x 1.750 m	Cristal
5	0.900 m x 1.350 m	Cristal
6	0.450 m x 1.750 m	Cristal
7	0.450 m x 1.750 m	Cristal
8	0.900 m x 0.400 m	Cristal
9	0.900 m x 1.350 m	Cristal
10	0.450 m x 1.750 m	Cristal
11	0.450 m x 1.750 m	Cristal
12	0.900 m x 0.400 m	Cristal
13	0.900 m x 1.350 m	Cristal
14	0.450 m x 1.750 m	Cristal
15	0.450 m x 1.750 m	Cristal
16	0.900 m x 0.400 m	Cristal

Figura 49. Dimensiones de los acristalamientos para luz diurna en el modelo de aula. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la parte artificial, el aula cuenta con 9 filas transversales de 3 luminarias cada una, haciendo un total de 27 luminarias de superficie sobre techo para iluminación general. Estas luminarias son de distribución directa, intensiva y simétrica y se encuentran situadas en la superficie del techo a una altura aproximada de 3.7 metros respecto del nivel del suelo. No cuenta con ningún tipo de difusor o filtro.

Las especificaciones técnicas de este tipo de luminarias son las siguientes:

Luminaria (Emisión de luz)

Lámpara: 1xTLD 58W/84
Grado de eficacia de funcionamiento: 95.67%
Flujo luminoso de lámparas: 5200 lm
Flujo luminoso de las luminarias: 4975 lm
Potencia: 69.0 W
Rendimiento lumínico: 72.1 lm/W
Temperatura de color: 4000 K
Índice de reproducción de color: 79



Figura 50. Especificaciones técnicas de la Luminaria. Fuente: Elaboración propia

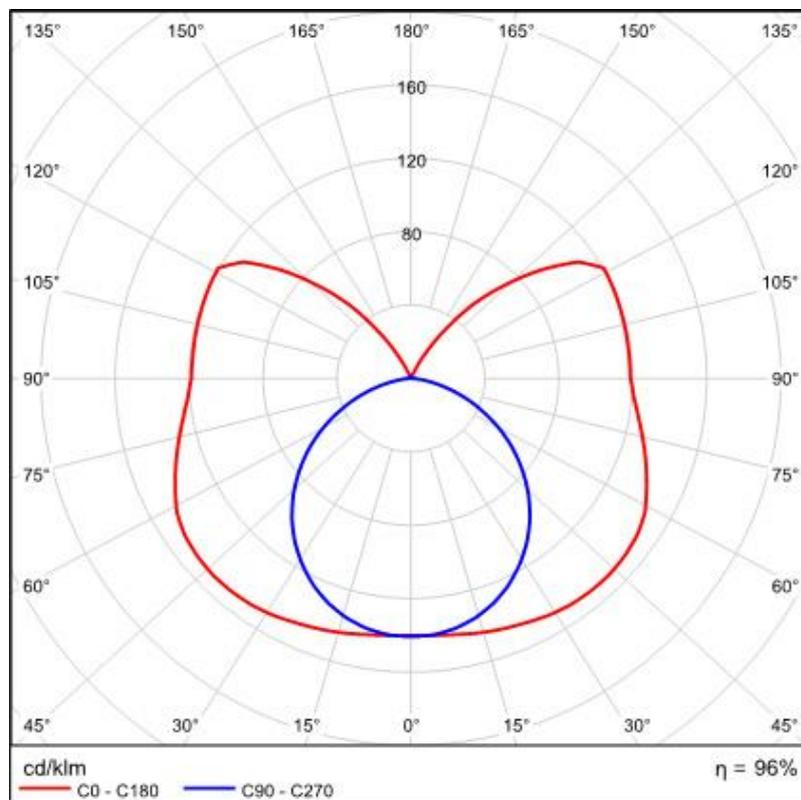


Figura 51. Diagrama de distribución en dos planos lámpara fluorescente T8 58W/ 840 OSRAM con plano C0-C180 y plano C90-C270. Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/lamparas/lamparas-fluorescentes/lamparas-fluorescentes-t8/lumilux-t8/index.jsp



Figura 52. Luminaria con una lámpara fluorescente Lumilux T8 58W/840 OSRAM. Fuente: Elaboración propia

La puesta en marcha de estas luminarias se realiza a través de interruptores situados en la pared, habiendo uno por cada línea de 3 luminarias en la dirección transversal del aula. En total, hay 9 interruptores destinados a este tipo de luminarias. Cada luminaria cuenta con una sola lámpara y las lámparas utilizadas se tratan, como previamente se ha comentado, de tubos fluorescentes Lumilux (Fósforo de tres bandas) T8 de 26 mm de diámetro y casquillo G13, 58W/840 de la marca OSRAM con las siguientes especificaciones técnicas:

Datos eléctricos

Potencia nominal	58,00 W
Eficacia lámpara (condición estándar)	90 lm/W
Potencia nominal	58,00 W

Datos Fotométricos

Índice de reproducción cromática Ra	≥80
Flujo luminoso	5200 lm
Flujo luminoso a 25 °C	5200 lm
Tono de luz	840
Temperatura de color	4000 K
Flujo luminoso nominal	5200 lm
Tono de luz (denominación)	LUMILUX Cool White
Factor manten. lumen lámpara 2.000 h	0,95
Factor manten. lumen lámpara 4.000 h	0,92
Factor manten. lumen lámpara 6.000 h	0,91
Factor manten. lumen lámpara 8.000 h	0,90
Factor manten. lumen lámpara 12.000 h	0,89
Factor manten. lumen lámpara 16.000 h	0,90
Factor manten. lumen lámpara 20.000 h	0,89

Dimensiones y peso

Diámetro del tubo	26 mm
Largo	1500 mm
Temperatura ambiente máx.flujo luminoso	25,0 °C

Duración de vida

Vida útil	18000 h ¹⁾
Duración	20000 h ¹⁾
Factor supervivencia 2.000 h	0,99
Factor supervivencia 4.000 h	0,99
Factor supervivencia 6.000 h	0,99
Factor supervivencia 8.000 h	0,99
Factor supervivencia 12.000 h	0,90
Factor supervivencia 16.000 h	0,90
Factor supervivencia 20.000 h	0,50
Modo de operación LLMF/LSF	50 Hz
Vida útil lámpara	20000 h
Vida útil nominal lámpara	20000 h

¹⁾ ECE con arranque en caliente

Datos adicionales del producto

Casquillo (denominación estándar)	G13
Contenido mercurio lámpara	2,5 mg
Elimin. residuos conf. directiva RAEE	Sí

Capacidades

Regulable	Sí
Apto para interiores	Sí

Certificados & Normas

Clase de eficiencia energética	A
Consumo de energía	68 kWh/1000h

Figura 53. Especificaciones técnicas tubo fluorescente lumilux T8 58W/840 OSRAM. Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/lamparas/lamparas-fluorescentes/lamparas-fluorescentes-t8/lumilux-t8/index.jsp

Este modelo de aula también cuenta con 3 luminarias de pared (una lámpara por luminaria) para iluminación localizada, con difusor opal liso de metacrilato. Se encuentran situadas en la zona superior de la pizarra y las lámparas utilizadas son también tubos fluorescentes Lumilux T8 de 26 mm de diámetro y casquillo G13 de la marca OSRAM, 58W/840. En las especificaciones técnicas de este tipo de luminaria se ha considerado que tienen una distribución

luminosa simétrica, directa e intensiva y se estima que el difusor opal absorbe un 30% del flujo luminoso de la lámpara. Por tanto si el flujo de la lámpara es 5200 lm se considera que solo 3640 lm son emitidos a través del difusor de cada luminaria.

Luminaria (Emisión de luz)

Lámpara: 1x 58W/84
Grado de eficacia de funcionamiento: 95.67%
Flujo luminoso de lámparas: 5200 lm
Flujo luminoso de las luminarias: 3640 lm
Potencia: 69.0 W
Rendimiento lumínico: 50.5 lm/W
Temperatura de color: 4000 K
Índice de reproducción de color: 79

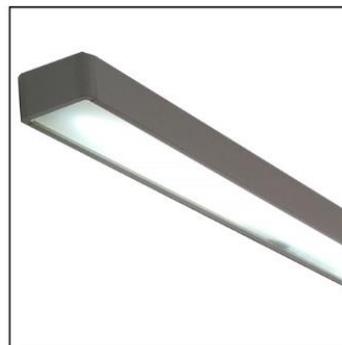


Figura 54. Especificaciones técnicas de la luminaria de pared. Fuente: Elaboración propia

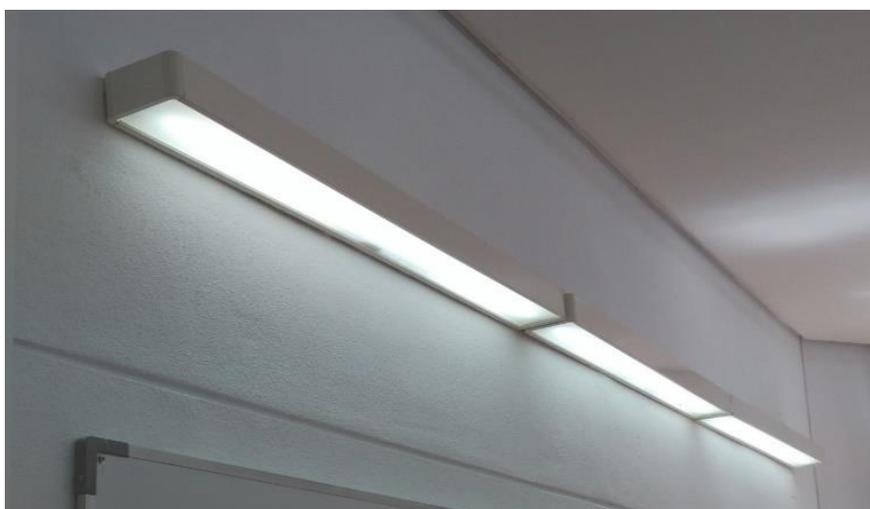


Figura 55. Luminarias con una lámpara fluorescente Lumilux T8 OSRAM 58W/840 en pared. Fuente: Elaboración propia

La puesta en marcha de éstas se realiza a través de un interruptor situado en la pared.

Por tanto, el número total de luminarias que se encuentran en este modelo de local, despreciando en el cálculo aquellas destinadas a emergencia, son 30 luminarias. El número total de interruptores que accionan todas las líneas de luminarias son 10.

Centrándonos en el mobiliario, el aula también cuenta con 13 filas de mesas con 10 asientos cada una y destinadas a estudiantes, haciendo una capacidad total de 130 estudiantes por aula. La altura de estas mesas es 0.80 m. También dispone de una mesa para el profesor situada en un suelo a una cota de 0.25 m respecto al suelo donde se encuentran las mesas de los estudiantes. La superficie de las mesas de los estudiantes será considerada como plano de trabajo y será el punto de partida para la toma de datos y recreación del escenario.

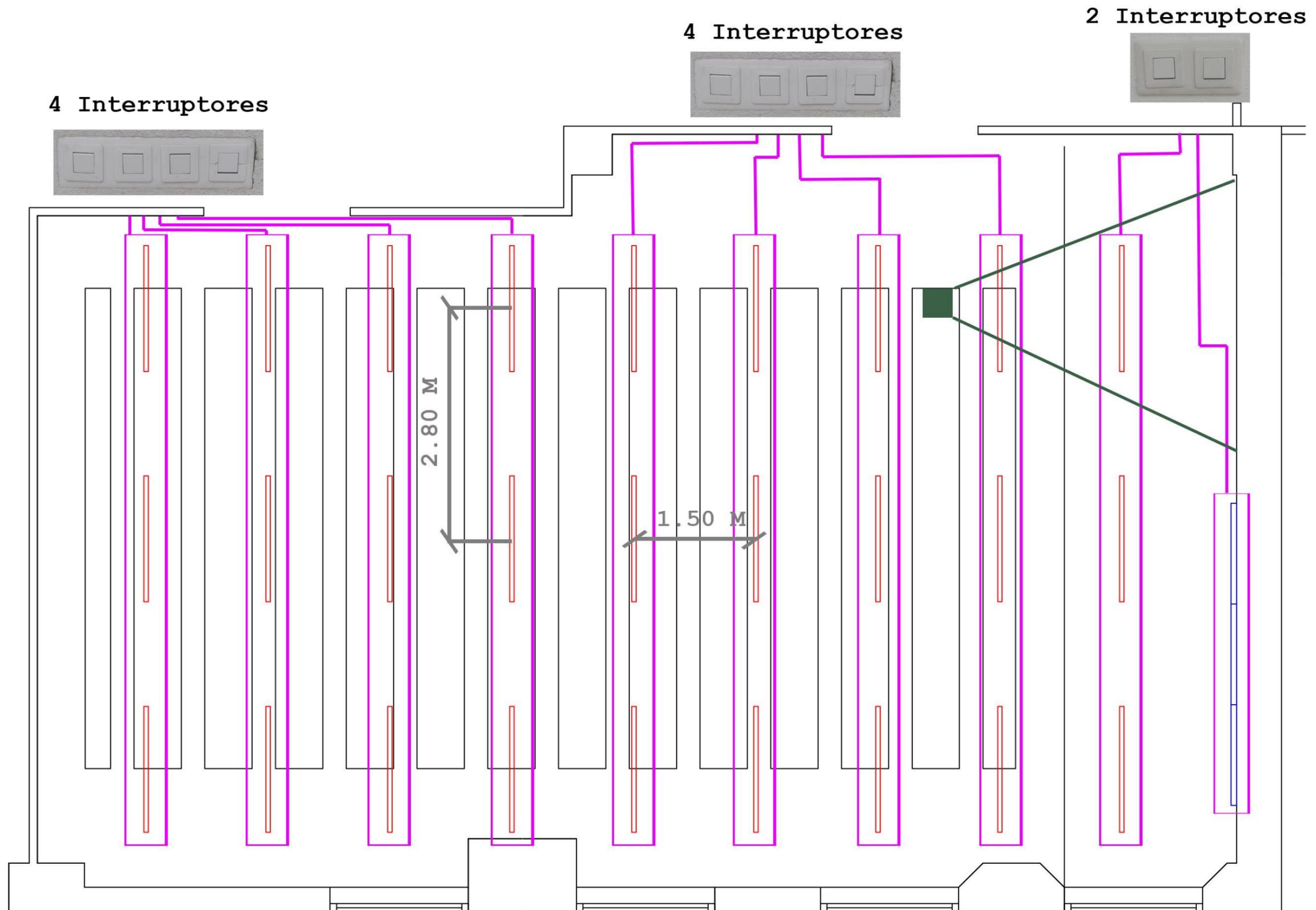


Figura 56. Grupos de luminarias, posición e interruptores de las aulas modelo en el estado inicial. Fuente: Elaboración propia

Se debe considerar que, en las aulas modelo, los circuitos de las luminarias fluorescentes cuentan con balastos electromagnéticos, cebadores y condensadores, por tanto, no existe un control y regulación de la iluminación, es decir, solo se pueden encender o apagar las luminarias a través de los interruptores. Esto conlleva grandes inconvenientes a la hora de reducir el consumo, puesto que no existe ninguna regulación.

3.2- Modelado y recreación del escenario con *Dialux Evo*

Como se ha comentado anteriormente, para llevar a cabo el modelado del escenario de las aulas objeto de estudio de este trabajo, se utilizará el software *Dialux Evo* en su versión 6.1 y cuyo funcionamiento se ha explicado en el punto 2.7.

Para realizar la representación de la escena se ha partido de los planos de situación en formato CAD para obtener las medidas generales y las áreas de cálculo. A partir de estos planos, se construye la volumetría general de todo el edificio con su correspondiente altura que influirá a la hora de recibir luz natural en las aulas a través de las ventanas.

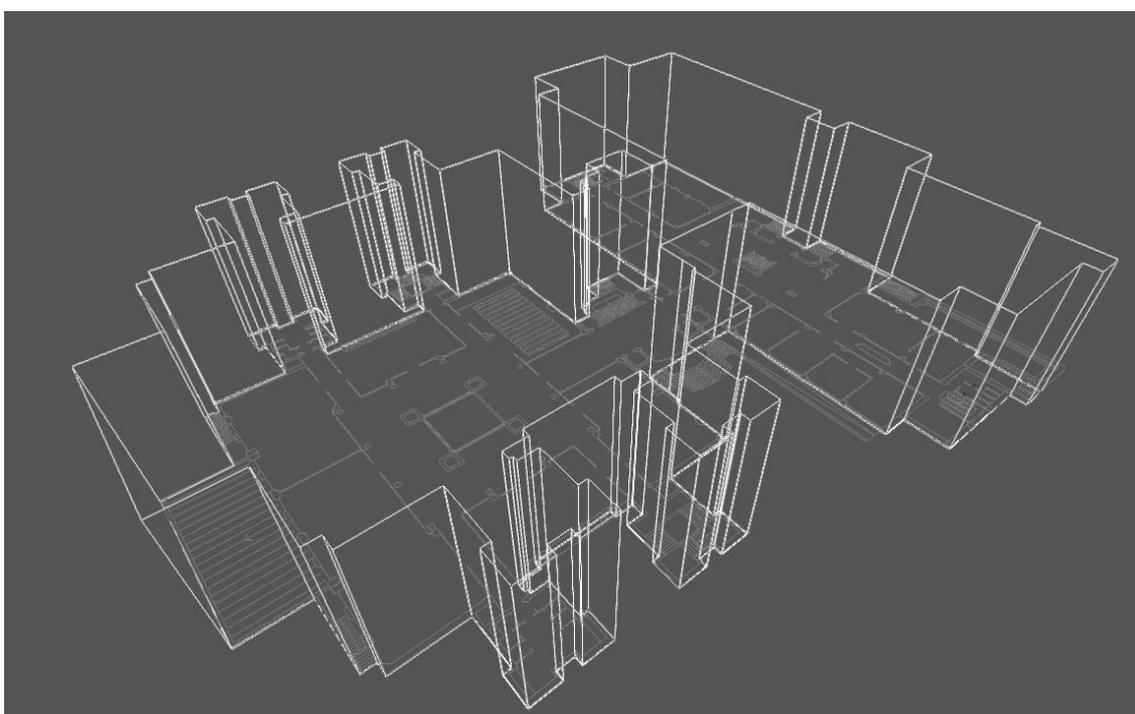


Figura 57. Vista en rejilla de la volumetría general de la E.T.S.A. Valladolid. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se han realizado varias mediciones in situ de las aulas para comprobar sus medidas en los planos CAD, así como las alturas de los diferentes elementos de las aulas y la posición y dimensiones del mobiliario como pueden ser las mesas de estudiantes, las puertas o las ventanas. A partir de este momento, se procede a la construcción interior de las aulas con todos sus elementos dentro de la volumetría general del edificio.

Una vez realizado el escenario, se procede a ubicarlo geográficamente introduciendo las coordenadas exactas del edificio dentro de la ciudad de Valladolid y eligiendo la zona horaria correcta. De esta manera quedarían los siguientes datos:



Figura 58. Datos orientación de la E.T.S.A. Valladolid. Fuente: Elaboración propia

La orientación respecto del norte, en el software *Dialux Evo*, se debe introducir en función del número de grados de desfase en sentido antihorario respecto de la línea del norte. En este caso concreto el valor sería 333° como se puede observar en la imagen aérea del edificio.



Figura 59. Desfase de la E.T.S.A.V. respecto a la línea del norte. Fuente: Elaboración propia

Tras construir el modelo e insertarlo en su zona horaria y geográfica, se procede a ajustar sus parámetros para que los resultados de las simulaciones se parezcan lo mayor posible a la situación real. Estos ajustes se realizan a partir de los datos de iluminancia obtenidos por el luxómetro en las mediciones in situ de los dos casos del modelo de aula.

Las **mediciones** se realizaron para los dos casos del modelo de aula (Aulas B1 y B2) con un **estado de cielo despejado** en el **mes de julio**. Se llevaron a cabo **tres fases**, tomando datos cuando **solo las luminarias se encontraban encendidas** y sin participación de la luz solar, tomando datos **solo de la luz solar** y tomando datos de la **mezcla entre luminarias y luz solar**. La toma de datos cuando solo las luminarias se encuentran encendidas se realizó una vez en uno de los casos de las aulas modelo, ya que que la orientación de estas no influye en este caso.

Datos Luxómetro 05/07/20016 12:00 Caso 1 Aula B2

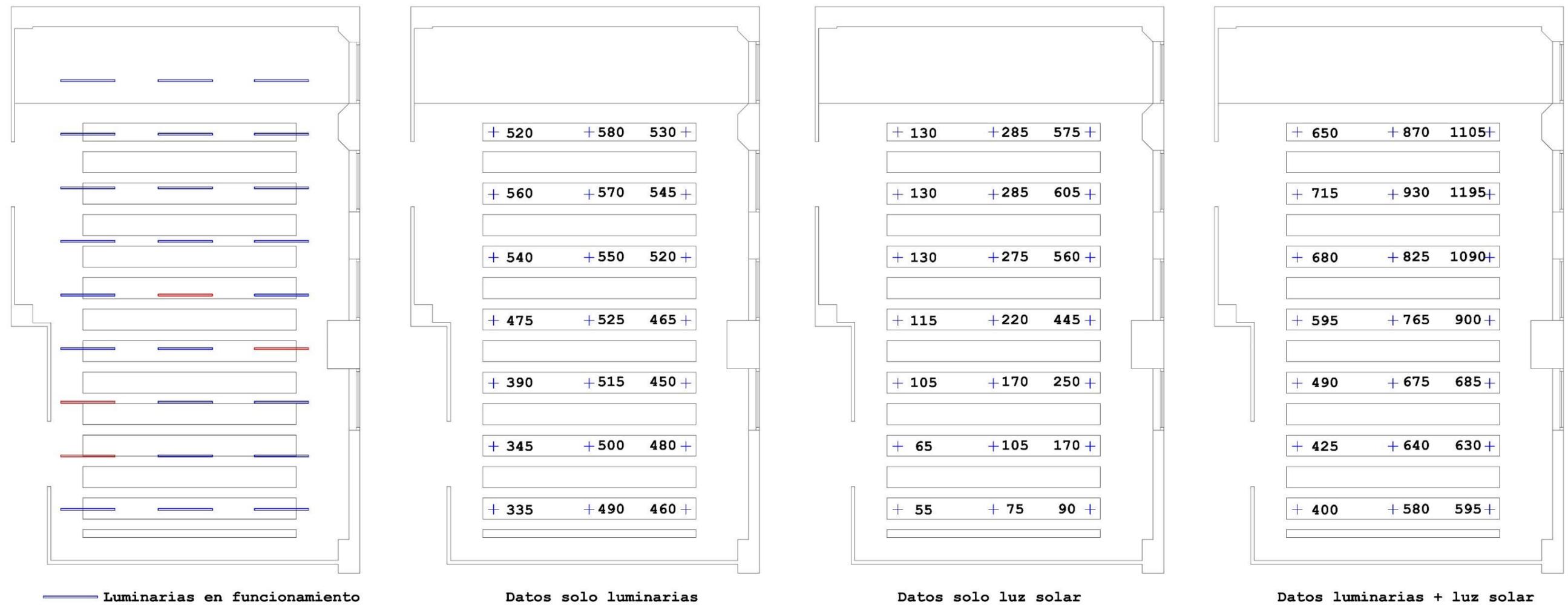


Figura 60. Datos de iluminancia tomados con el luxómetro para el caso 1 aula B2. Medidas en lúxeles. Fuente: Elaboración propia

Datos Dialux Evo 25/07/20016 12:30 Caso 2 Aula B1

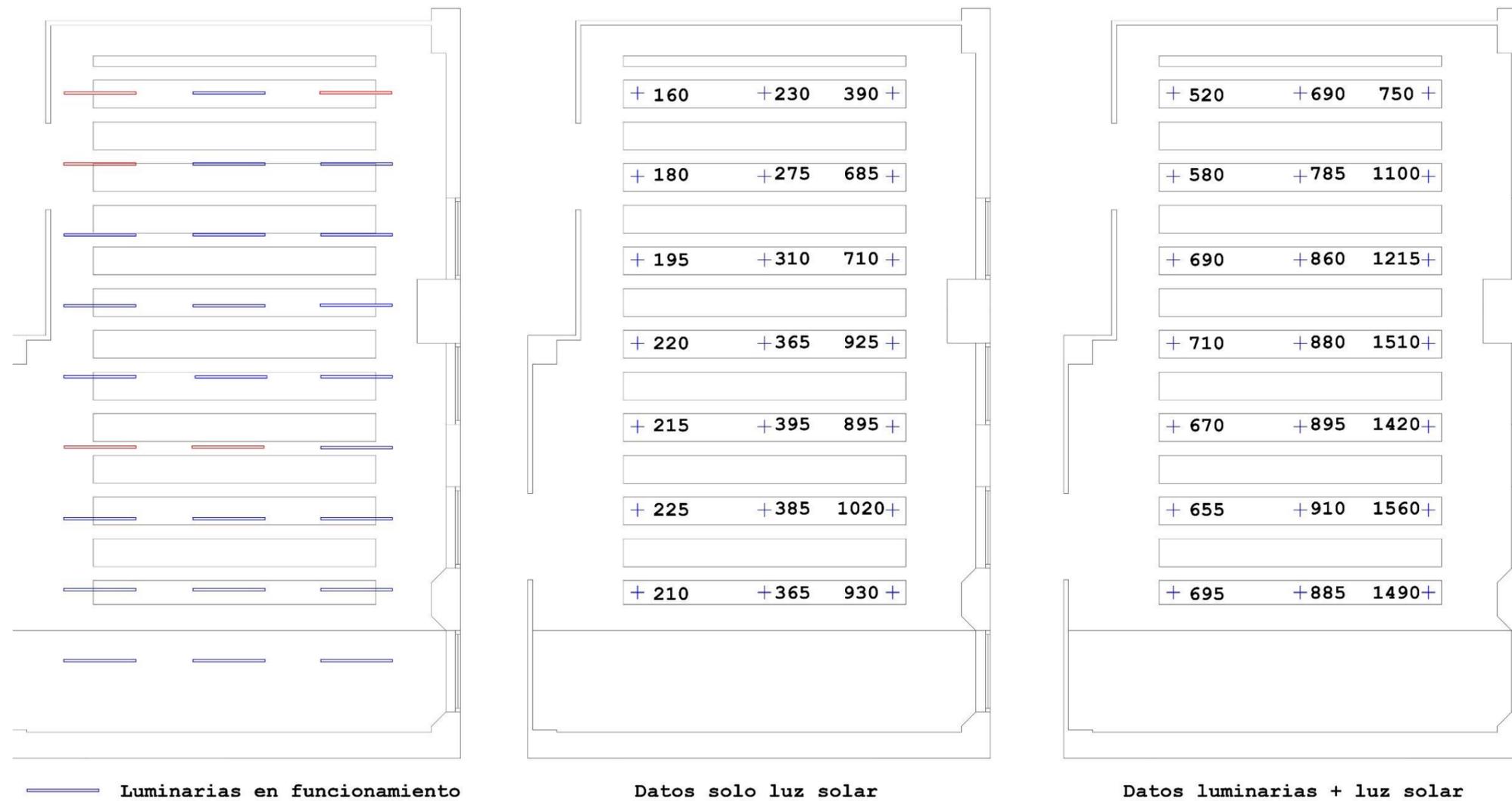


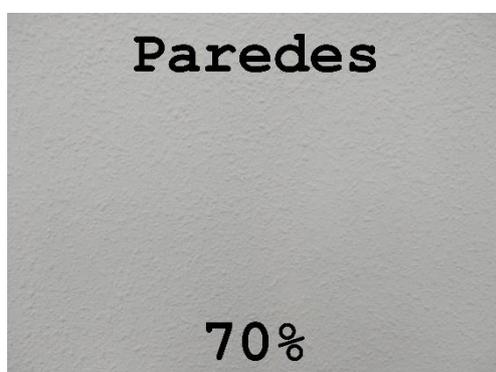
Figura 61. Datos de iluminancia tomados con el luxómetro para el caso 2 aula B1. Medidas en lúxeles. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, dependiendo del tipo de material y color de los elementos del modelo de aula, se ajustan los coeficientes de reflexión y se introducen texturas en el modelo obteniendo los siguientes resultados:

Cambiar grados de reflexión de superficies de local		
Techos	58.5	%
Paredes	68.6	%
Pisos	56.7	%

Figura 62. Grados de reflexión medios de las superficies de las aulas. Fuente: Elaboración propia

- La superficie de las mesas de trabajo, de color crema, se consideran con un 60% de grado de reflexión.
- El material de las puertas y la mesa del profesor, tipo madera, se consideran con un 30% de grado reflexión.
- El suelo de baldosas, también color crema claro, se considera con un 60% de grado de reflexión, mientras que el suelo situado por encima del escalón y en la zona del profesor, tipo marmol, se considera con un 40% de grado de reflexión.
- Las paredes de un blanco más claro que el techo se consideran con un 70% de grado de reflexión, mientras que el techo de un blanco más oscuro, casi gris, se considera con un 60%.
- Los marcos de las ventanas que dan al exterior, aluminio marrón oscuro, se consideran con un 20% de grado de reflexión mientras que los de las ventanas que dan a interior, aluminio blanco, con un 70%.
- La pizarra, de color blanco, se considera con un 50% de grado de reflexión.



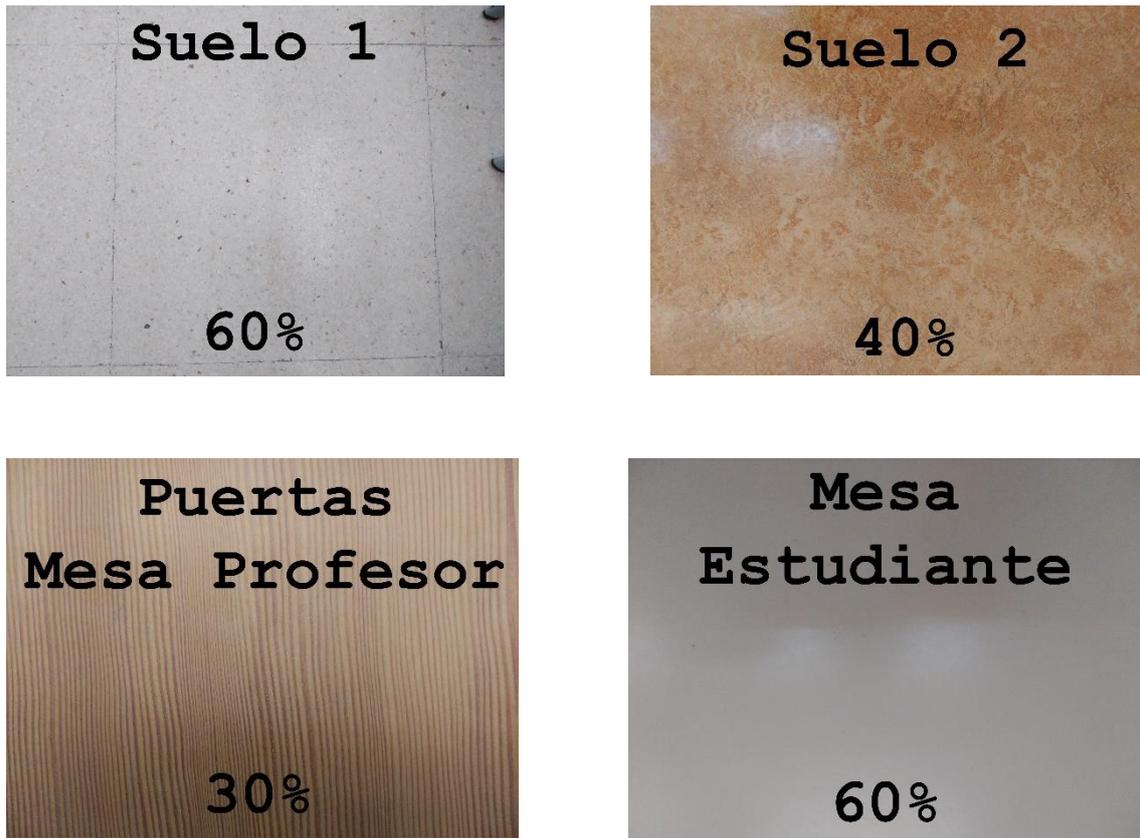


Figura 63. Grados de reflexión de los elementos del aula según materiales y colores. Fuente: Elaboración propia

También se ajusta la transmisión y reflexión de los vidrios de las ventanas a fin que los datos medidos correspondan lo más posible a la simulación. Los datos que se introducen son los siguientes:



Figura 64. Reflexión y transmisión de los vidrios que conforman las ventanas de las aulas. Fuente: Elaboración propia

Como factor de mantenimiento se utiliza 0.8, considerando un nivel de suciedad normal.

Será con este modelo ajustado con el que se realizarán diferentes estrategias de mejora.

De esta manera, tras introducir todos los parámetros anteriores, el modelado y recreación de las aulas quedaría de la siguiente manera:



Figura 65. Recreación final del escenario de las aulas Modelo – Perspectiva 1. Fuente: Elaboración propia



Figura 66. Recreación final del escenario de las aulas Modelo – Perspectiva 2. Fuente: Elaboración propia

Tras modelar el escenario en *Dialux Evo*, se obtienen los valores de iluminancia media horizontal en los mismos puntos donde se tomaron los valores con el luxómetro y en las mismas circunstancias. Los datos arrojados por *Dialux Evo* de iluminancia media horizontal para las dos casos, con sus tres fases, fueron los siguientes:

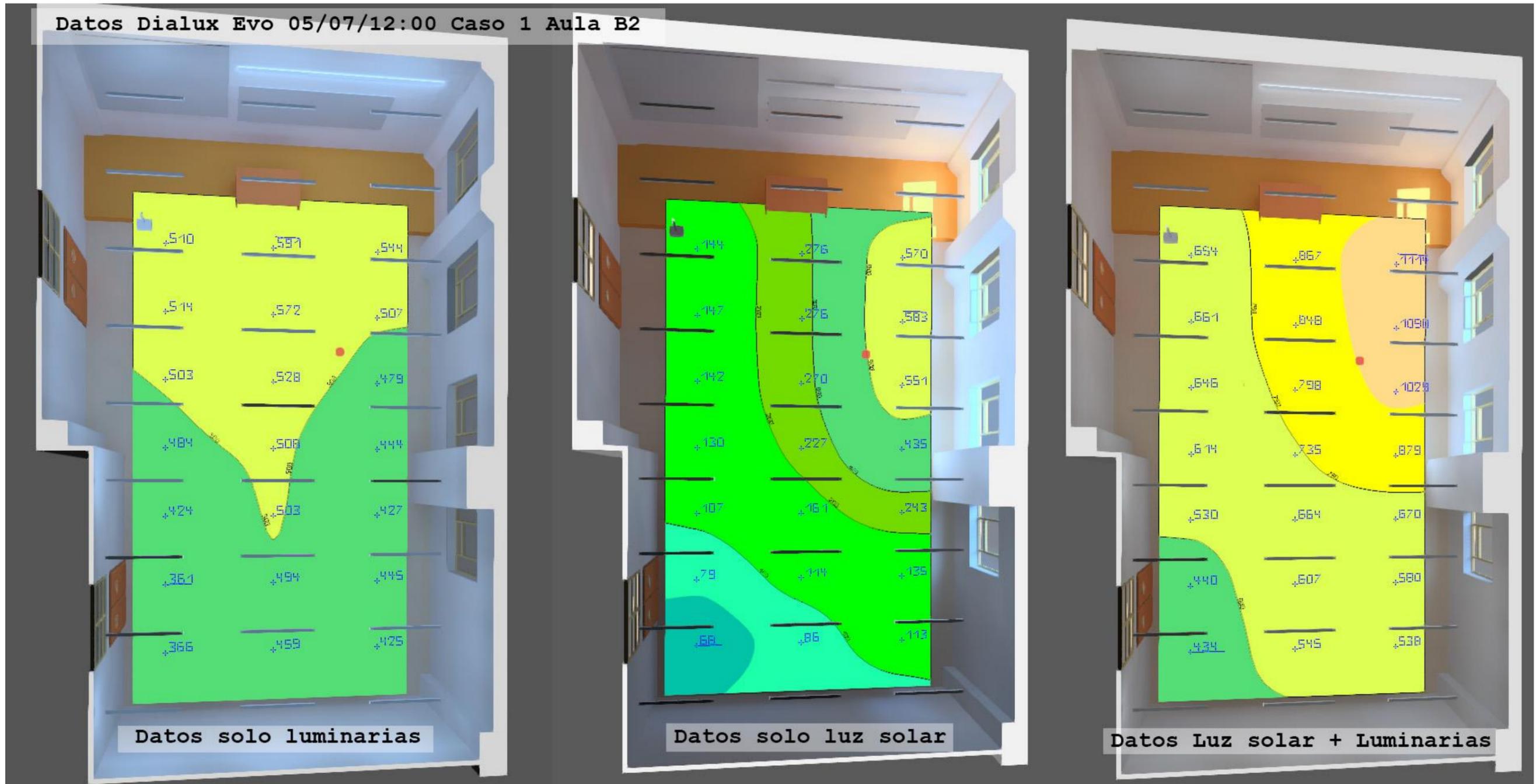


Figura 67. Datos iluminancia media horizontal del caso 1 aula B2 obtenidos con Dialux Evo. Fuente: Elaboración propia

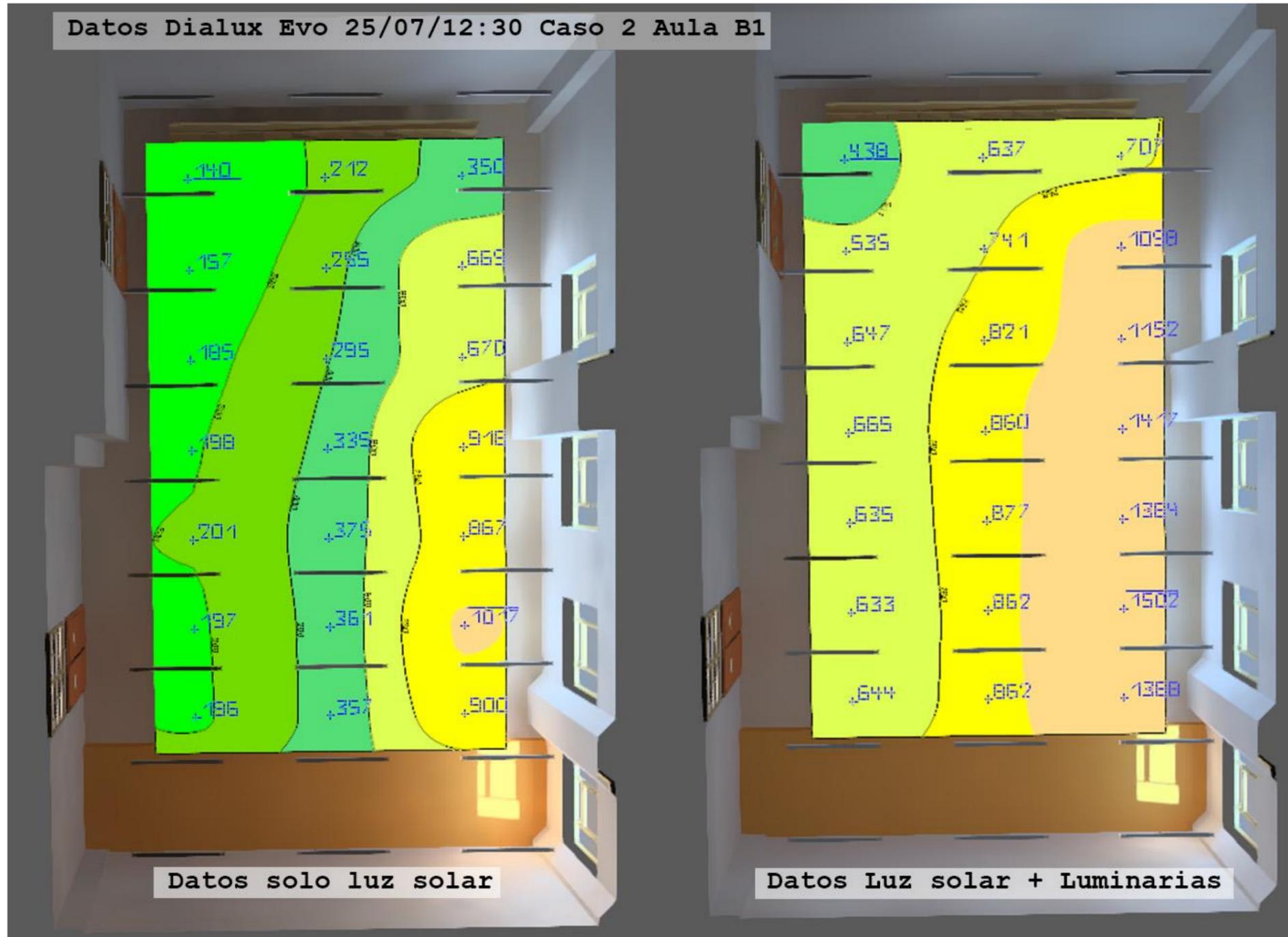


Figura 68. Datos iluminancia media horizontal del caso 2 aula B1 obtenidos con Dialux Evo. Fuente: Elaboración propia

Se concluye que, a través de la comparativa de los datos obtenidos con el luxómetro y los datos arrojados por *Dialux Evo*, los resultados de los casos 1 y 2 del modelo de aula son lo suficientemente aproximados como para validar la simulación.



Figura 69. Comparativa de valores de iluminancia entre los datos obtenidos con el luxómetros y aquellos obtenidos con *Dialux Evo* para el caso 1 aula B2. Fuente: Elaboración propia

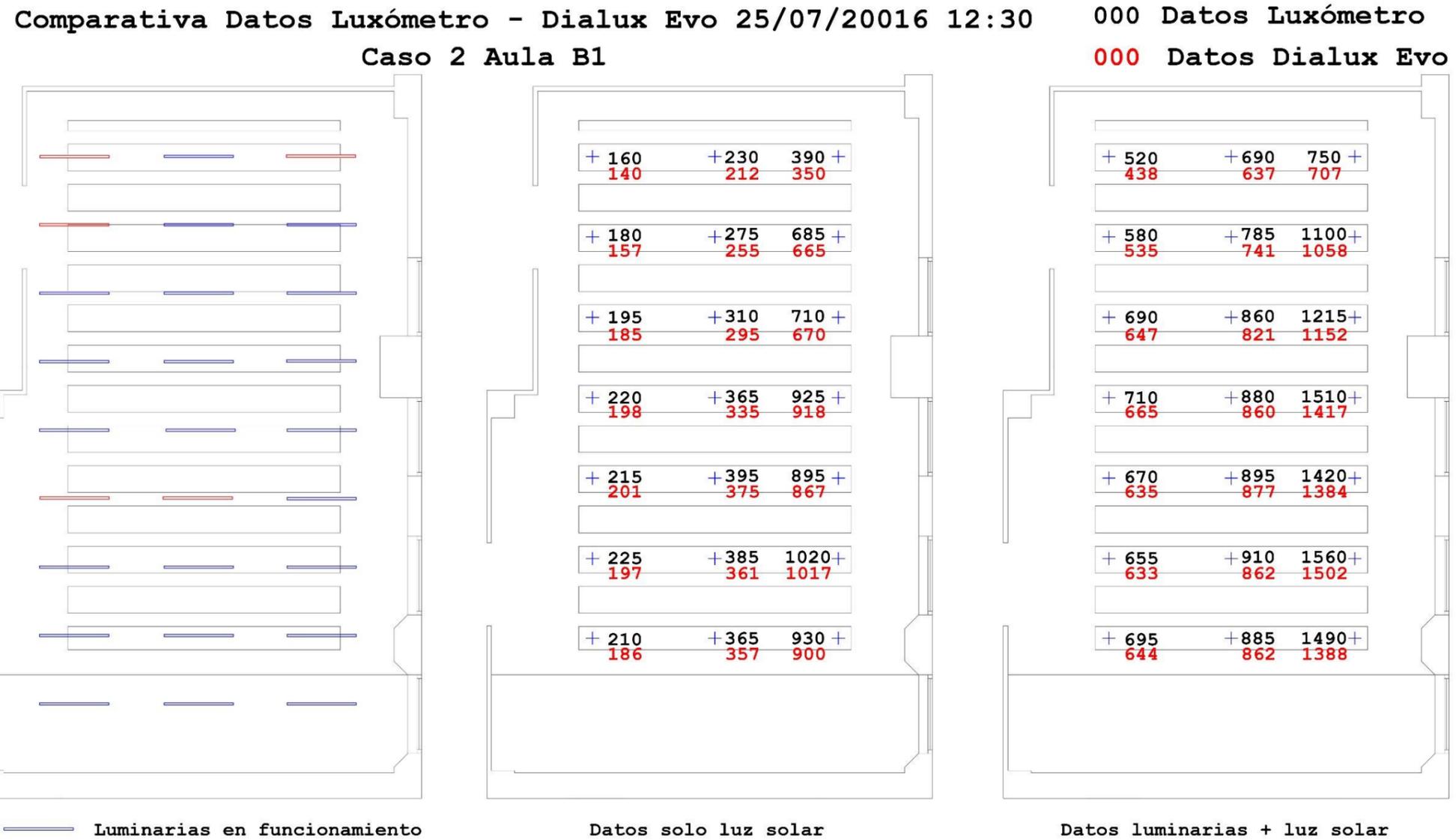


Figura 70. Comparativa de valores de iluminancia entre los datos obtenidos con el luxómetros y aquellos obtenidos con Dialux Evo para el caso 2 aula B1. Fuente: Elaboración propia

3.3- Análisis de la situación inicial del sistema de iluminación y criterios de diseño

Las instalaciones luminotécnicas en aulas se deben diseñar proporcionando unas condiciones adecuadas para una correcta percepción y visión, permitiendo cambiar la mirada entre la cercana superficie de la mesa del estudiante y la lejana superficie de la pizarra o el propio entorno del alumno sin molestias. Todo ello se debe llevar a cabo a lo largo de una serie de horas sin que se produzca fatiga visual.

A partir de la descripción y de los datos mencionados en el punto 3.1, se comprobarán las anteriores premisas de diseño a través del análisis de los principales criterios de iluminación que marcan las normas en la situación inicial de los dos casos del modelo de aula a estudiar. Esta situación inicial se estudiará de forma que todas las luminarias se encuentren en funcionamiento y el aporte de luz natural sea nulo, pues sería el caso más desfavorable.

La cuantificación y colocación de las luminarias así como del mobiliario están descritos en el punto 3.1.

La normativa a cumplir que servirá de guión para el análisis de los diversos parámetros queda descrita en el punto 2.3.

Las luminarias usadas en la situación inicial son simétricas, directas e intensivas. Cada luminaria cuenta con una lámpara de tubo fluorescente Lumilux T8 58W/840, por lo que el **Ra es 80 y cumple la norma UNE-EN 12464-1**. Además la **temperatura de color de estas lámparas es 4000K**, una luz fría que proporciona un ambiente similar al aire libre, evitando la sensación de fatiga producida por la permanencia durante un tiempo prolongo por parte de los estudiantes en las aulas.

El resto de parámetros se obtendrán a través de la recreación generada en el programa *Dialux Evo*.

La norma UNE-EN 12464-1 permite comprobar el cumplimiento de los parámetros de iluminación en función de dos planteamientos.

Un primer planteamiento se basa en la comprobación de los parámetros luminotécnicos, considerando la totalidad de la superficie del aula como zona de trabajo y a una altura de plano útil de 0.80m. Esta altura corresponde con la superficie de las mesas de los estudiantes. Los parámetros se obtendrán considerando una malla regular de 72 puntos de cálculo.

Un segundo planteamiento sería la comprobación de los parámetros a la misma altura de plano útil de 0.80m, pero utilizando una zona de trabajo correspondiente solamente al área de las mesas de los estudiantes. Posteriormente, se comprobarán los parámetros de las áreas circundantes a la zona de trabajo a nivel de las dos alturas de suelo. En este estudio se obtendrán los datos en función de los

dos planteamientos como comprobación de cumplimiento de la norma en ambos casos.

Sin embargo, a la hora de considerar diversos casos de trabajo y de aportar estrategias de mejora, se usarán como modelo los cálculos obtenidos en la totalidad de la superficie del aula, puesto que son más restrictivos. Es más difícil cumplir la normativa en la superficie total del aula que en una superficie más pequeña destinada a las mesas de los estudiantes. Además, si en algún momento se quisiese modificar la distribución del mobiliario se podría realizar, ya que la norma cumpliría en toda la superficie del aula.

También se obtendrán los datos de iluminancia en la superficie de la pizarra blanca, de la pantalla del proyector y de la mesa del profesor. Esto nos permitirá generar futuras estrategias para conseguir un contraste adecuado y una correcta visualización de estos elementos.

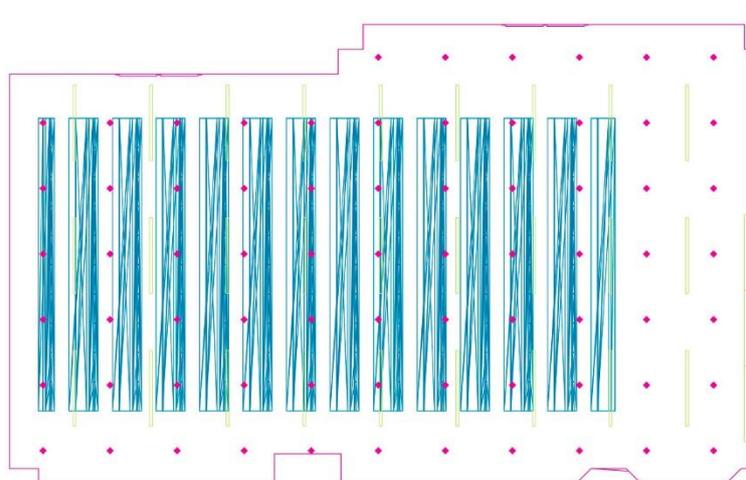
En cuanto a la **iluminancia media horizontal mantenida (Em)**, a una altura de **plano útil** correspondiente a **0.80m** y en la **totalidad de la superficie del aula**, el software *Dialux Evo* arrojó **547 lx**, cifra superior a los 300 exigidos por la norma, por tanto, **se cumple la norma UNE-EN 12464-1**. Aunque la cantidad mínima exigida sea 300, se recomienda una iluminancia superior a 500 lx. En consecuencia, esta situación de iluminación podría ser óptima considerando este parámetro, aunque en la realidad sería necesario controlar los deslumbramientos tanto directos como reflejados.

En lo relativo a la uniformidad media (Uo), en la **totalidad de la superficie del aula** y a una altura de **0.80m**, *Dialux Evo* arrojó el dato **0.67**, cifra superior al 0.6 exigido por la norma, por tanto, también **cumple la norma UNE-EN 12464-1**.

El **UGR** que se sitúa a una altura de 1.2 m correspondiente a la visión de una persona sentada, tiene un valor exigido por la norma de 19. En este caso, el dato arrojado por *Dialux Evo* es de **27.3**, por tanto, se trata de una cifra muy superior a la que exige la norma. Por consiguiente, se producen grandes deslumbramientos al usuario debido a las luminarias y, por tanto, **no cumple la norma UNE-EN 12464-1**. Esto es debido, en gran medida, a la ausencia de uso de difusores que permiten la visión directa de las lámparas.

DIALux

Casos 1 y 2 Aulas B2 y B1



Altura del local: 3.700 m, Grado de reflexión: Techo 59.1%, Paredes 69.9%, Suelo 56.7%, Factor de degradación: 0.80

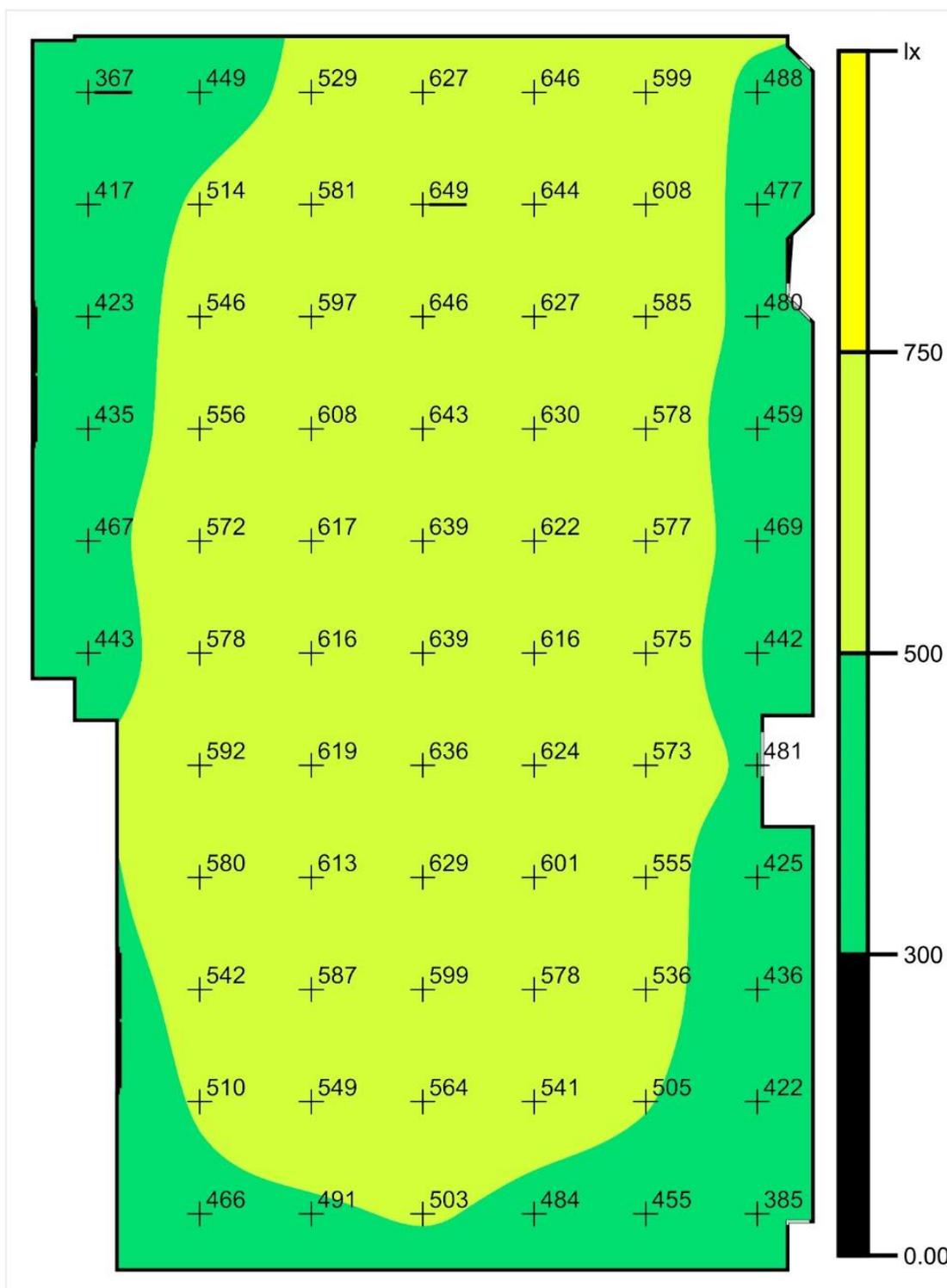
General

Superficie	Resultado	Media (nominal)	Min	Max	Mín./medio	Mín./máx.
1 Plano_Útil_0.80m	Intensidad lumínica horizontal [lx]	547	367	649	0.67	0.57

Evaluación del deslumbramiento

Superficie	Resultado	Min	Max	Valor límite
1 Plano_Útil_0.80m	UGR	<10	27.3	>19.0

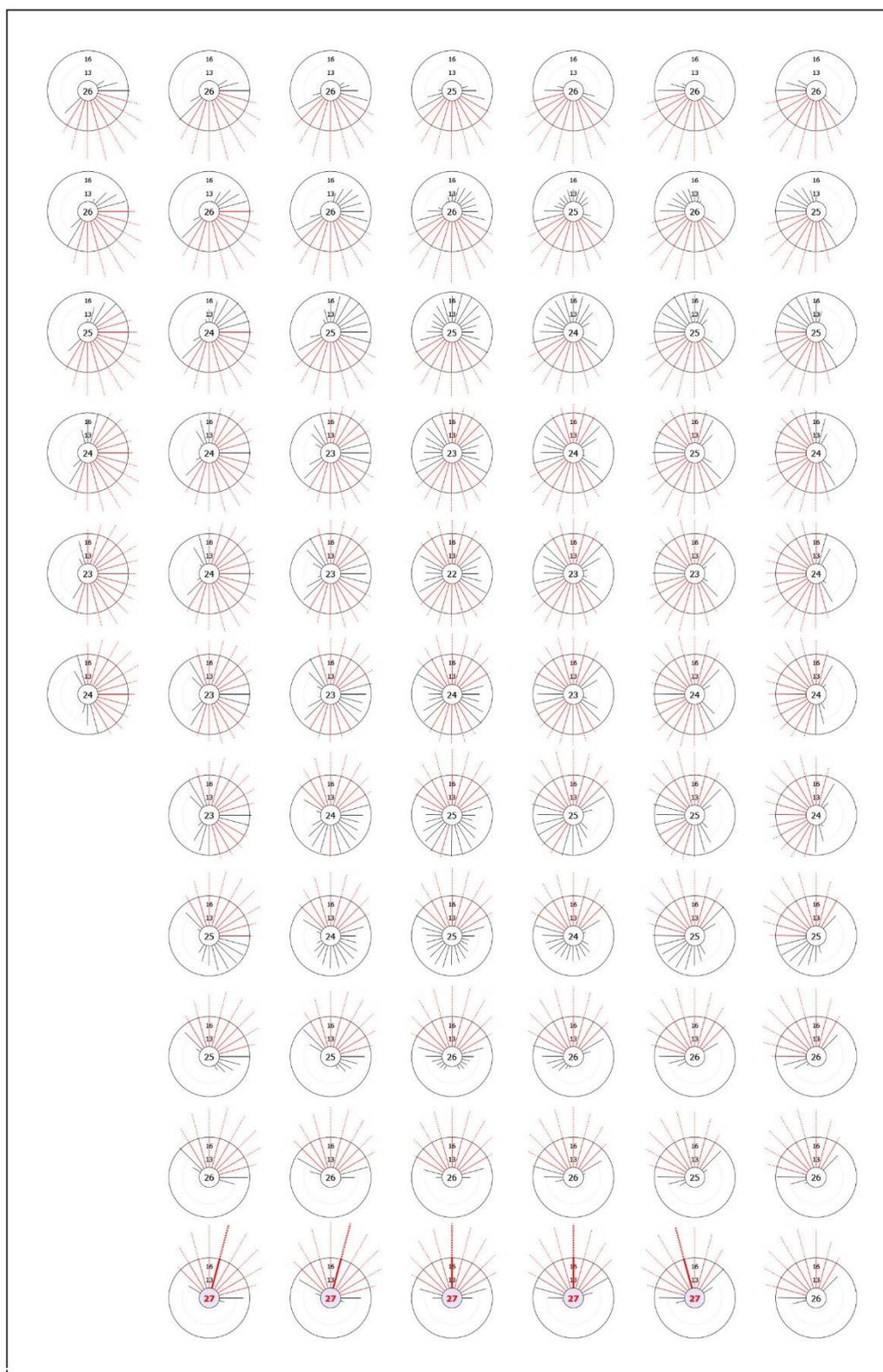
Figura 71. Iluminancia media horizontal y UGR en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 1. Fuente: Elaboración propia



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 547 lx, Min: 367 lx, Max: 649 lx, Mín./medio: 0.67, Mín./máx.: 0.57

Figura 72. Trama de 72 puntos de cálculo de iluminación horizontal en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 1. Fuente: Elaboración propia



UGR (Trama)

Max: >19.0, Área del ángulo visual: 0.0° - 360.0°, Amplitud de paso: 15.0°, Valor límite: >19.0, Máx. deslumbramiento a: 75.0°

Figura 73. Valores UGR en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 1. Fuente: Elaboración propia

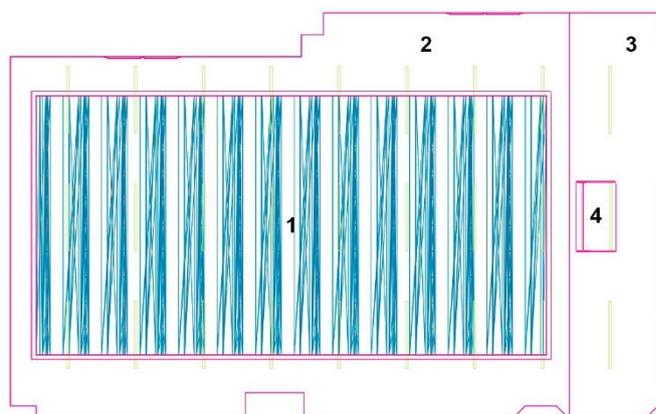
Posteriormente, se procede a calcular los parámetros considerando el segundo planteamiento. Por tanto, en lugar de considerar como **zona de trabajo** toda la superficie del aula, **solo se considerará la superficie de las mesas de los estudiantes**. De esta manera, se comprobará si con la disposición actual del mobiliario también se cumple la norma.

Como se relata en el punto 2.3, la normativa exige una **iluminancia media horizontal mantenida** de 300 lx en el caso de las **zonas de trabajo en aulas**, y de 200 lx, a nivel de suelo, en las áreas circundantes. Los datos arrojados por *Dialux Evo* a través de una **mall regular de 50 puntos de cálculo**, sitúan la Em de la zona de trabajo en **585 lx**. También sitúan, a través de una **mall regular de 31 puntos de cálculo**, la **menor de las Em de las áreas circundantes** en **351 lx**. Por tanto, **en ambos casos, se cumple holgadamente la norma UNE-EN 12464-1**.

También se calcula la iluminancia puntual sobre la superficie de la mesa del profesor en caso de que éste necesite usarla. *Dialux Evo* arroja un valor de 663 lx que, pese a generar buena iluminación, podría llegar a generar un deslumbramiento reflejado.

DIALux

Casos 1 y 2 Aulas B2 y B1

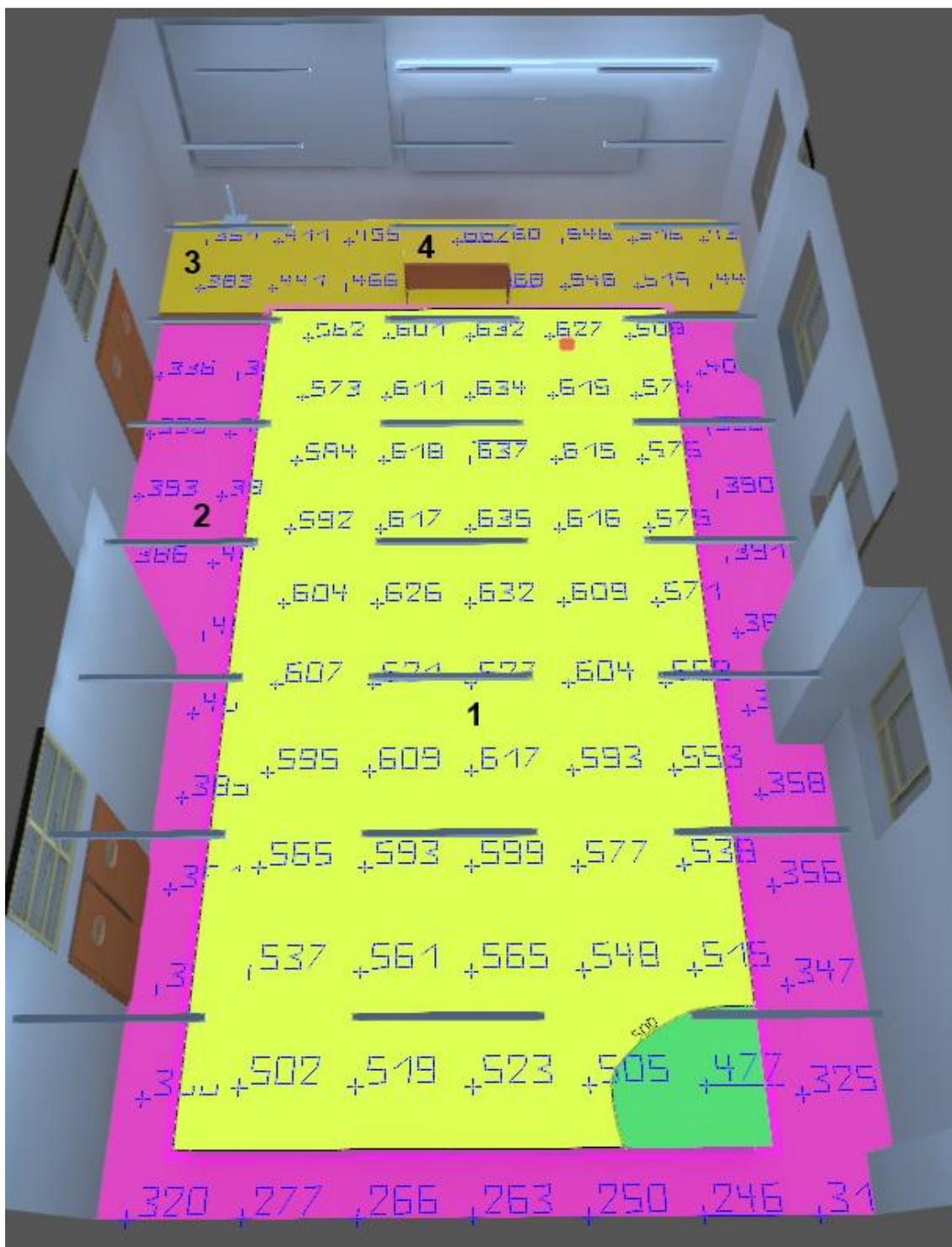


Altura del local: 3.700 m, Grado de reflexión: Techo 58.5%, Paredes 68.7%, Suelo 56.7%, Factor de degradación: 0.80

EN 12464-1

Superficie	Resultado	Media (nominal)	Min	Max	Mín./medio	Mín./máx.
1 Área_Trabajo_Mesas_Estudiantes	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	585 (300)	477	637	0.82	0.75
2 Área circundante	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	351 (200)	246	409	0.70	0.60
3 Área_Circundante_Pedestal	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	433	150	552	0.35	0.27
4 Mesa_Profesor	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	663	625	693	0.94	0.90

Figura 74. Iluminancia media horizontal en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 2. Fuente: Elaboración propia



Superficie	Resultado	Media (nominal)	Min	Max	Min./medio	Min./máx.
1 Área_Trabajo_Mesas_Estudiantes	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	585 (300)	477	637	0.82	0.75
2 Área_circundante	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	351 (200)	246	409	0.70	0.60
3 Área_Circundante_Pedestal	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	433	150	552	0.35	0.27
4 Mesa_Profesor	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	663	625	693	0.94	0.90

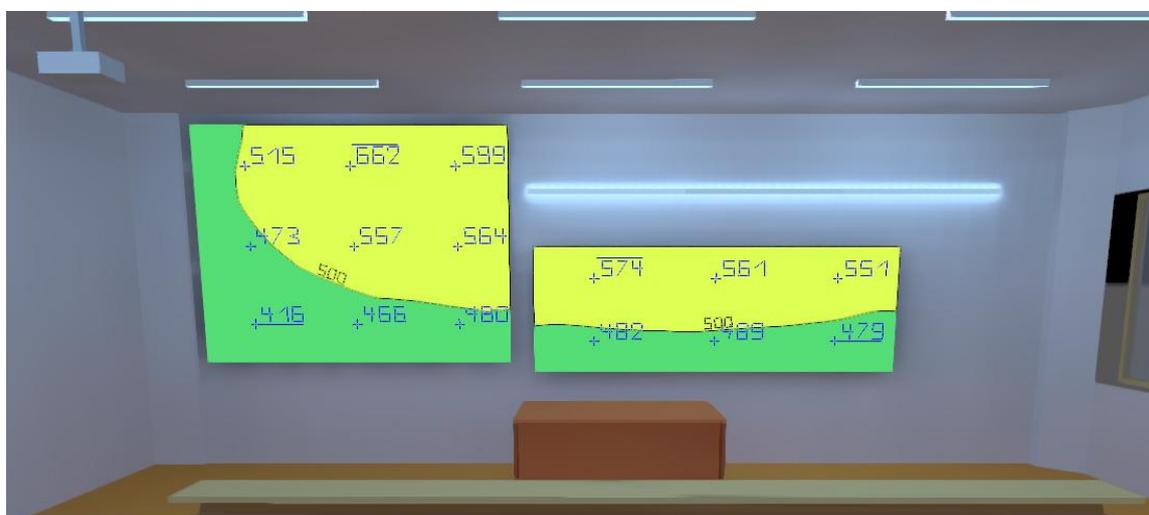
Figura 75. Trama de puntos de cálculo de iluminación horizontal en el modelo de aula a estudiar para el planteamiento 2. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la **pizarra blanca** y a la **pantalla del proyector**, se obtienen, con todas las luminarias en funcionamiento y en ausencia de luz natural, los valores de **iluminancia media perpendicular** siendo **524 lx** y **525 lx** respectivamente. La norma exige una **Em mínima para pizarras que debe ser superior a 500 lx**. En este caso **se cumpliría la norma UNE-EN 12464-1**. Debe existir una gran iluminancia en la pizarra para evitar reflejos que impidan su adecuada visualización.

Otro requisito a cumplir para la pizarra es que la **relación de iluminancia vertical mínima/media** sea mayor que 1/1.5. El valor arrojado por *Dialux Evo* es **0.75** por tanto **se cumpliría la norma UNE-EN 12464-1**.

En cuanto al proyector, se realizarán, en el punto 3.4, varias estrategias para un adecuado contraste y una correcta visualización de la pantalla cuando se usa este aparato.

Un punto a favor del sistema de iluminación de la situación inicial es el uso de un alumbrado localizado e independiente. Se realiza mediante 3 luminarias de pared situadas por encima de la pizarra y en toda su longitud que, en parte, evitan que el alumbrado general y del exterior generen reflejos que dificulten la visión parcial o total sobre ésta. Sin embargo, las luminarias utilizadas tienen una distribución simétrica cuando lo idóneo sería asimétrica, evitando un despilfarro de energía.



General

Superficie	Resultado	Media (nominal)	Min	Max	Mín./medio	Mín./máx.
Pizarra	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	524	459	615	0.88	0.75
Pantalla Proyector	Intensidad lumínica perpendicular [lx]	525	390	671	0.74	0.58

Figura 76. Iluminancia media perpendicular para la pantalla del proyector y la pizarra en el modelo de aula a estudiar. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al **cálculo de la potencia total de toda la instalación**, se debe apuntar que este modelo de aula cuenta con 30 luminarias. Cada luminaria cuenta con una lámpara fluorescente de 58W de potencia nominal y cada circuito está compuesto por un balasto

electromagnético, un cebador y un condensador. Estos tres elementos, junto con sus fotos y funcionamiento, quedan descritos en el apartado 2.7.1.

Para conocer la potencia que necesita cada luminaria, es decir, la de la lámpara más su equipo auxiliar, se deben tener en cuenta las especificaciones técnicas del balasto electromagnético marca ELT Serie Plana siendo las siguientes:



Figura 77. Especificaciones técnicas del balasto electromagnético ELT Serie Plana de la situación inicial.
Fuente: Elaboración propia

Por tanto la potencia necesaria para cada luminaria será:

$$0.67A \times 0.47 \times 220V = 69W \text{ por luminaria}$$

Si la potencia consumida por cada lámpara es de 58W, quiere decir que el **equipo auxiliar consume un 19% más de potencia.**

Y la potencia total para las 30 luminarias será:

$$69W \times 30 = 2070W \text{ total}$$

Flujo luminoso total de lámparas: 151320 lm, Flujo luminoso total de luminarias: 144771 lm, Potencia total: 2070.0 W, Rendimiento lumínico: 69.9 lm/W

Figura 78. Datos de la instalación inicial extraídos de Dialux Evo. Fuente: Elaboración propia

La **DB-HE3** exige una **potencia máxima instalada** de 15W/m² para un edificio de uso docente. En el caso de este modelo de aula será:

$$2070W / 128 \text{ m}^2 = 16.17 \text{ W/m}^2 \text{ Por tanto no cumple la norma DB-HE3.}$$

Esta última norma también exige un **VEEI** límite de 3.5 para aulas y laboratorios. En el caso de este modelo de aula será:

$$VEEI = (2070W \times 100) / (128\text{m}^2 \times 547 \text{ lx}) = 2.95 \text{ Por tanto si cumple la norma DB-HE3.}$$

Al tratarse de un centro de enseñanza universitaria se estima una duración de actividad de 8 horas diarias, 5 horas de mañana y 3 horas de tarde. Esto significa la siguiente **duración anual**:

$$8h \times 22 \text{ días} \times 9 \text{ meses} = 1584 \text{ horas al año}$$

Suponiendo un coste de **0.30 € cada kWh** se estima un consumo entre **2100 y 3300 kWh al año** con un coste **entre 630 y 984 € anuales** respectivamente.

The screenshot displays a software interface with the following sections and data:

- Consumo de energía y coste:**
 - Consumo 2100 - 3300 kWh/a
 - LENI 8 - 13 kWh/a/m²
 - Coste 630 - 984 €/a
- Tiempos de uso:**
 - Día: 1584 Horas por año
 - Noche: 0 Horas por año
 - Factor de ausencia: 0.00
 - Perfil de usuario activo:
 - Centros de formación (dropdown)
 - Aulas, salas de seminarios (dropdown)
 - Buttons: Info icon, Detalles
- Características de tacómetro:**
 - Mostrar energía de tacómetro
 - Tipo de visualización: Three icons (bar chart, line graph, pie chart)
 - Límite establecido: 0.000 €/a
 - Precio por kWh: 0.300 €
 - Unidad monetaria: €

Figura 79. Consumo de energía y coste de la situación inicial.

Fuente: Elaboración propia

En el aspecto cuantitativo se observa, a través del análisis de los resultados, que este modelo de aula cuenta con una instalación lumínica en la que, debido al exceso de iluminancia y deslumbramiento directo, se concluye que podría existir un número excesivo de luminarias sin ningún tipo de difusor y/o que la potencia instalada es demasiado elevada. Esto es debido a que el número elevado de luminarias directas e intensivas, sin ningún tipo de difusor y con una potencia muy elevada, generan grandes deslumbramientos directos para los estudiantes que se encuentran sentados en el aula.

En cuanto a la dirección de la luz, las luminarias siempre deberían tener su eje paralelo al frente de las ventanas. La disposición de los asientos de trabajo se debería configurar de forma que la dirección de la mirada también sea paralela al frente de las ventanas y al eje de las luminarias. De esta manera, se consiguen sombras suaves y equilibradas que facilitan la visión y el correcto modelado de los objetos.

Con estas premisas se puede afirmar que la actual instalación lumínica tiene un inadecuado diseño, puesto que, pese a que la disposición de los asientos permite una mirada paralela al frente de las ventanas, los ejes de las luminarias son perpendiculares al frente de las ventanas y a las líneas de asientos. Ésta es otra de las causas actuales de los grandes deslumbramientos directos y

de la dificultad de visualización de la pizarra y la pantalla del proyector.

También se debe apuntar que la superficie de las mesas de los estudiantes tienen un acabado con cierto brillo que podría provocar un deslumbramiento reflejado. Este deslumbramiento reflejado está influido, sobre todo, por el color y acabado de las superficies que observa el usuario en su campo de visión, por lo que sería conveniente que todas las superficies tuviesen un acabado mate.

Normalmente, para los acabados de las superficies de los paramentos y del mobiliario se recomiendan colores suaves que influyan positivamente en el aspecto psicológico de profesores y alumnos. Algunos de estos colores podrían ser un verde claro, una azul celeste, un gris perla, un amarillo pálido o un blanco en toda su gama.

Como se puede observar en este modelo de aula, es adecuado el uso del blanco, tanto en paredes como en el techo, que genera una adecuada reflectancia. El color crema, tanto del suelo como de las mesas de los estudiantes, es adecuado por generar buena reflectancia y por ser suave y agradable para la vista; sin embargo, debería ser un poco menos brillante y tener un acabado más mate que evite reflejos.

Otro punto a tener en cuenta, descrito en el apartado 3.1, son los grupos de luminarias asignados a cada interruptor. En este aula existen 10 interruptores, cada uno de los cuales acciona una línea transversal de luminarias. Esta disposición transversal no permite el aprovechamiento de la luz natural, pues el frente de ventanas se desarrolla en sentido longitudinal. Otro de los factores que no permiten el aprovechamiento de la luz natural es la ausencia de un equipo de control y regulación que permita regular el nivel de intensidad de las luminarias.

Además, la potencia total instalada resulta excesiva y superior a la que marca la norma. Esto produce que anualmente el consumo de kWh sea muy alto y en consecuencia el coste económico.

En el apartado 3.4 se buscará, a través de diversas estrategias de mejora, conseguir unas condiciones de confort lumínico adecuadas para el correcto desempeño de las actividades desarrolladas en las aulas. Esto se conseguirá mediante la búsqueda de unos niveles de iluminancia óptimos con unos consumos de potencia menores y que no produzcan deslumbramientos.

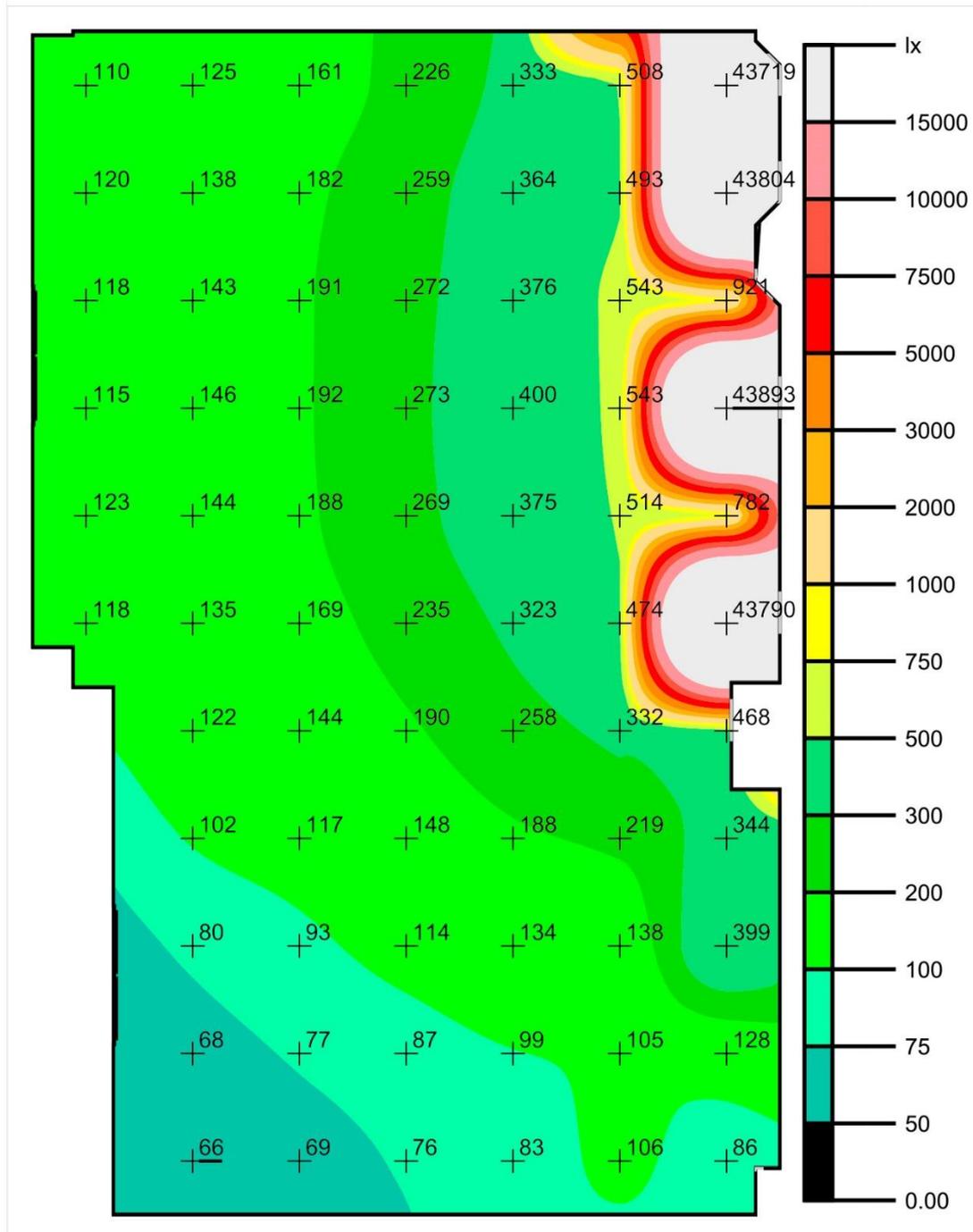
También se buscará la creación de grupos de luminarias en el sentido longitudinal que, junto con dispositivos de control y regulación, permitan un máximo aprovechamiento de la luz natural, que repercutirá en un menor consumo y un mayor ahorro energético.

No se debe olvidar también que una mala gestión de la iluminación repercutirá negativamente en el rendimiento de los estudiantes. Tanto una iluminación muy escasa como un exceso de luz natural

puede producir fatiga visual, por lo que será necesario encontrar un equilibrio.

Se procede a obtener los valores de iluminancia horizontal aportados solo por la luz natural en distintos meses y en distintas situaciones meteorológicas para los casos 1 y 2 del modelo de aula a estudiar. Esto permitirá analizar los niveles de iluminación en función de la época del año y comprobar hasta que punto es necesario un sistema de control y regulación que permita modificar la intensidad de las luminarias en función del aporte de luz natural.

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Despejado

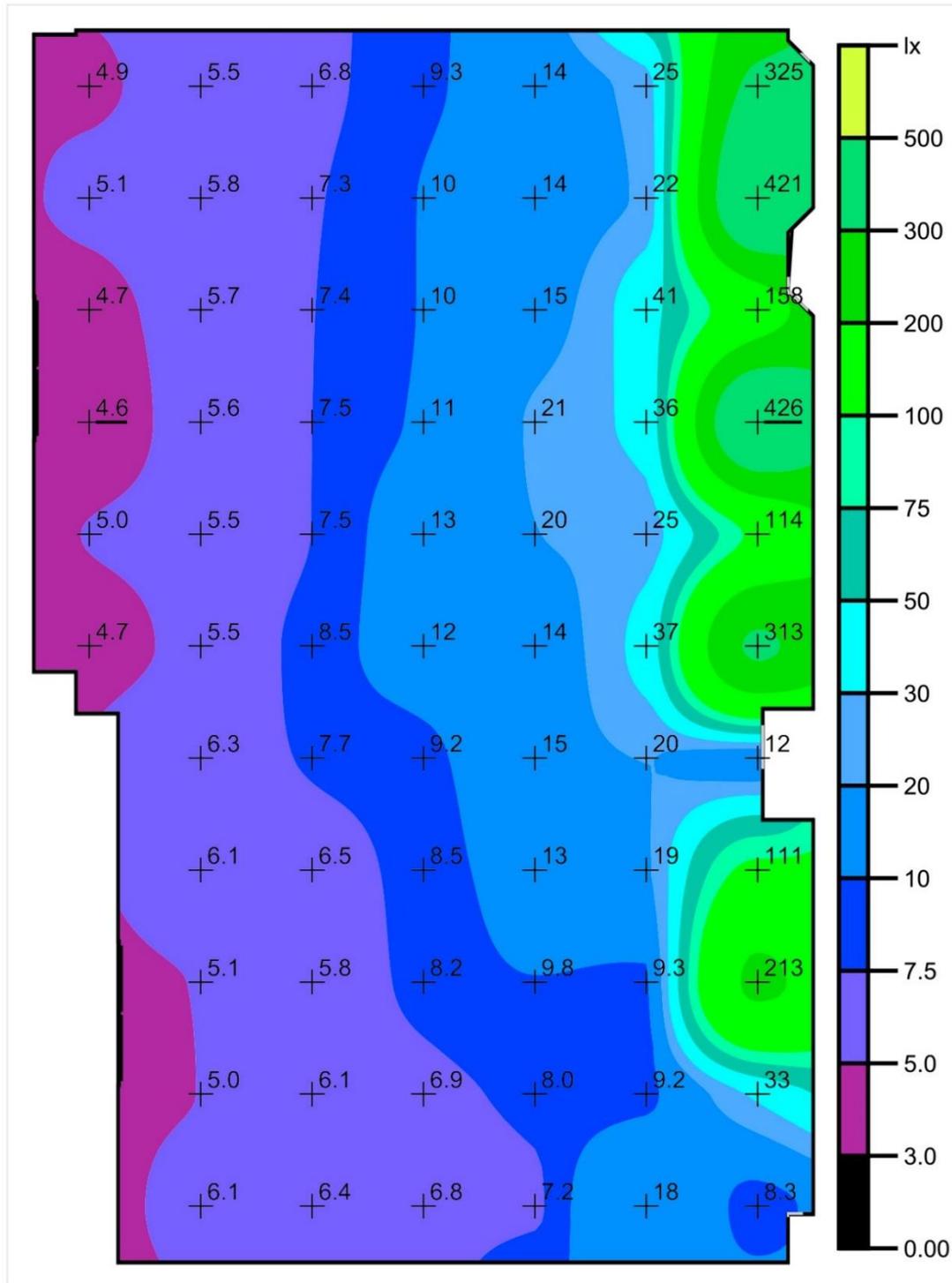


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 2652 lx, Min: 65.7 lx, Max: 43893 lx, Mín./medio: 0.02, Mín./máx.: 0.00

Figura 80. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Cubierto

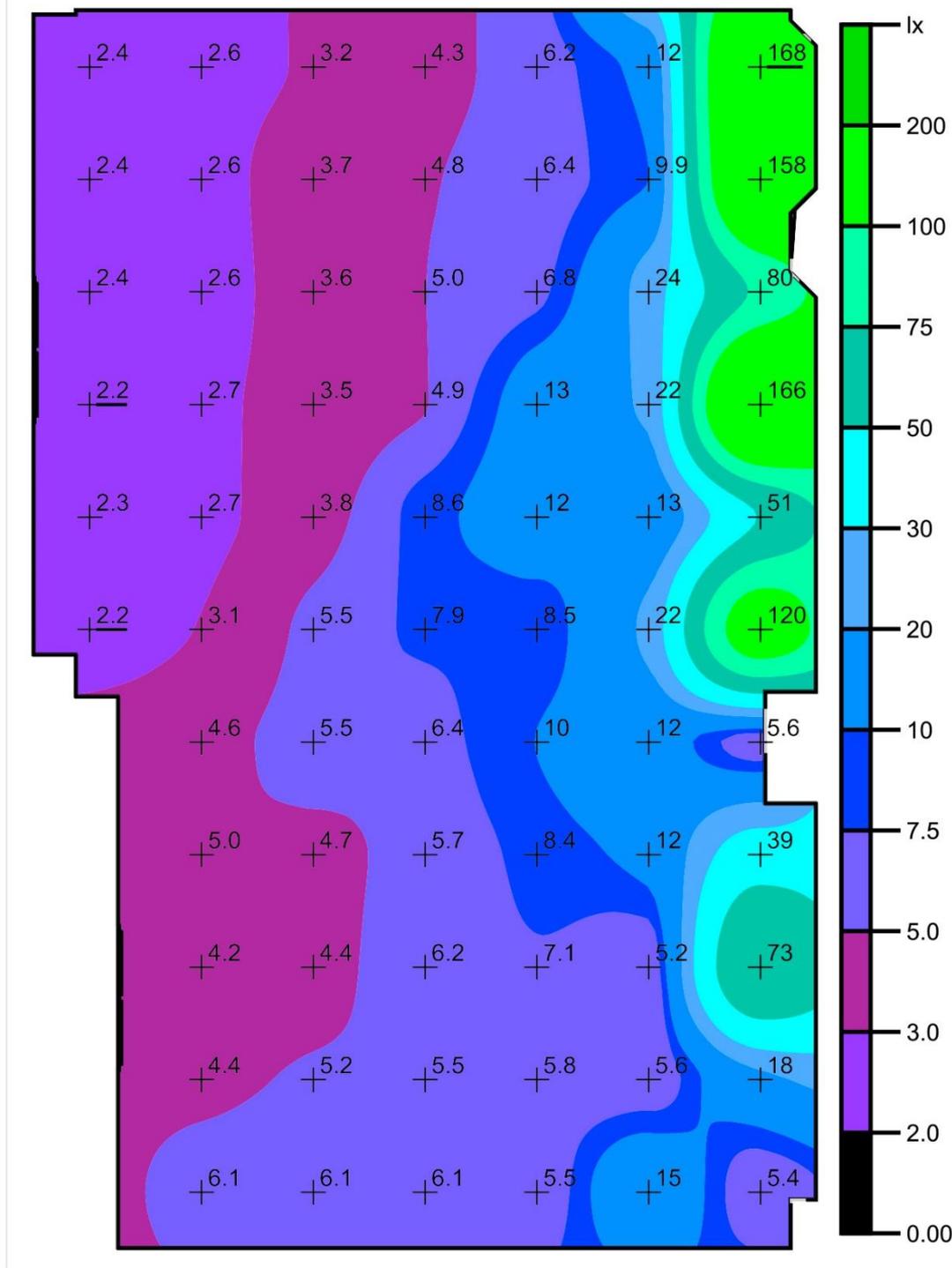


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 39.2 lx, Min: 4.56 lx, Max: 426 lx, Mín./medio: 0.12, Mín./máx.: 0.01

Figura 81. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Despejado

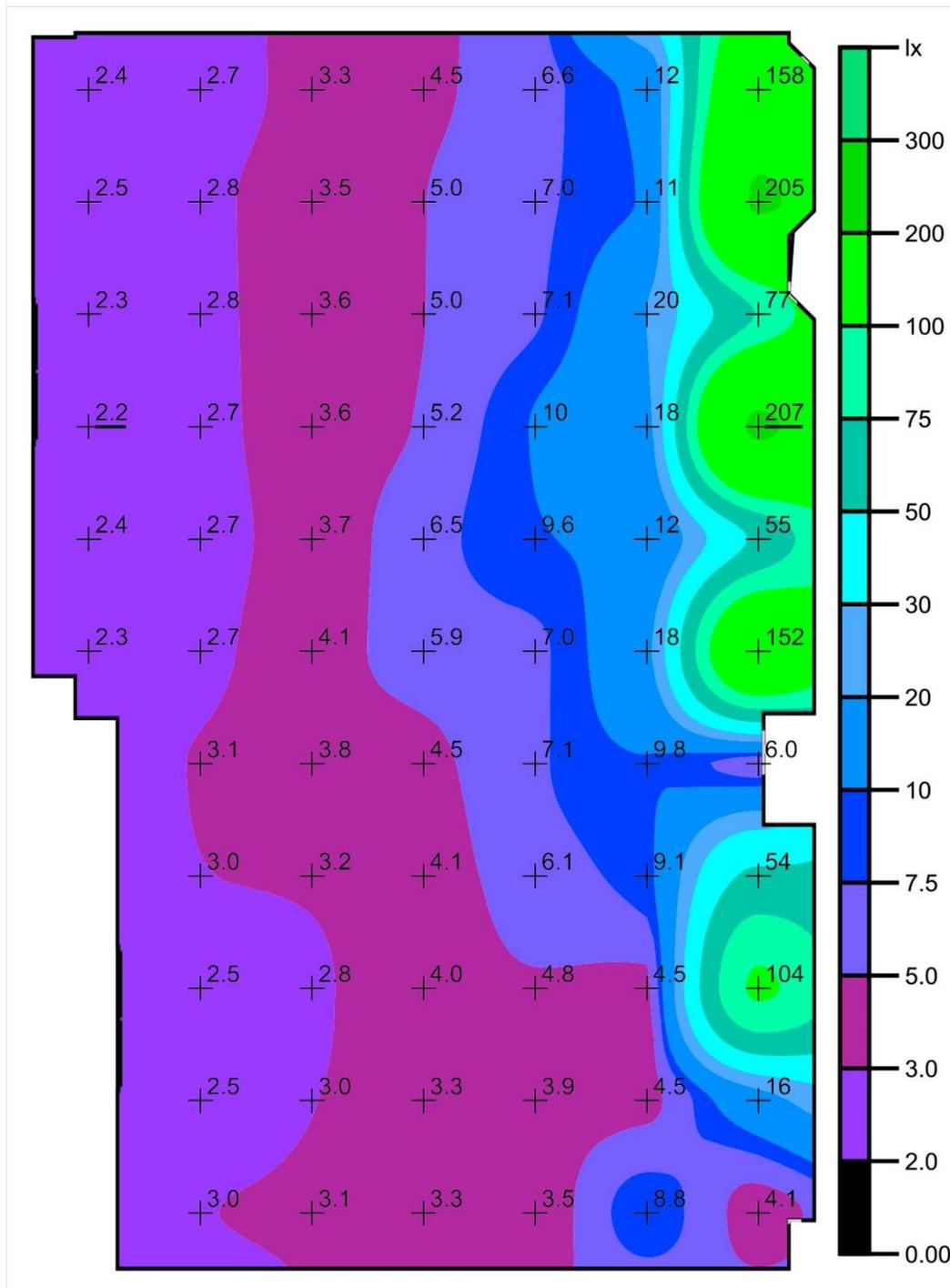


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 18.0 lx, Min: 2.18 lx, Max: 168 lx, Mín./medio: 0.12, Mín./máx.: 0.01

Figura 82. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo despejado en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Cubierto

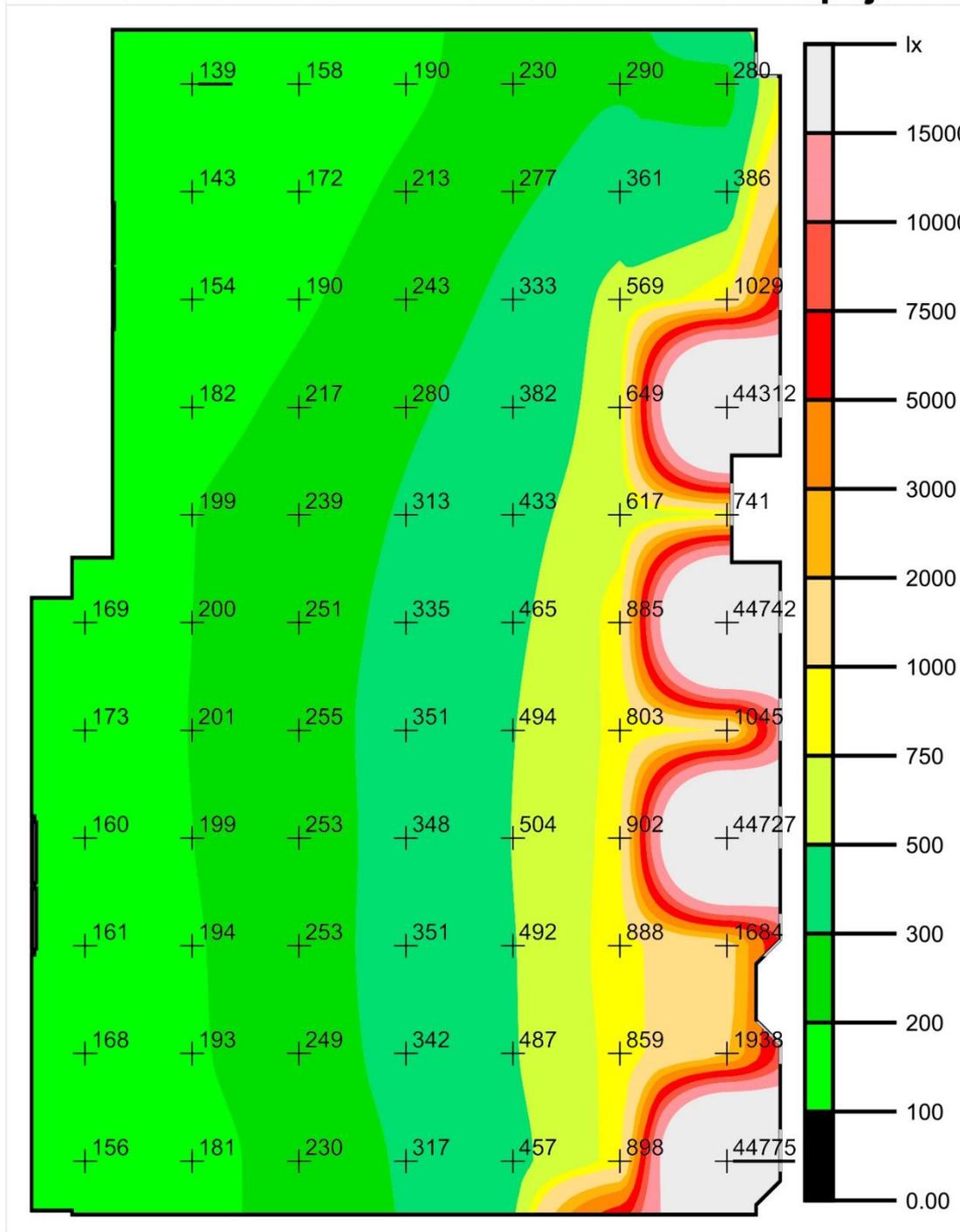


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 19.0 lx, Min: 2.21 lx, Max: 207 lx, Mín./medio: 0.12, Mín./máx.: 0.01

Figura 83. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Despejado

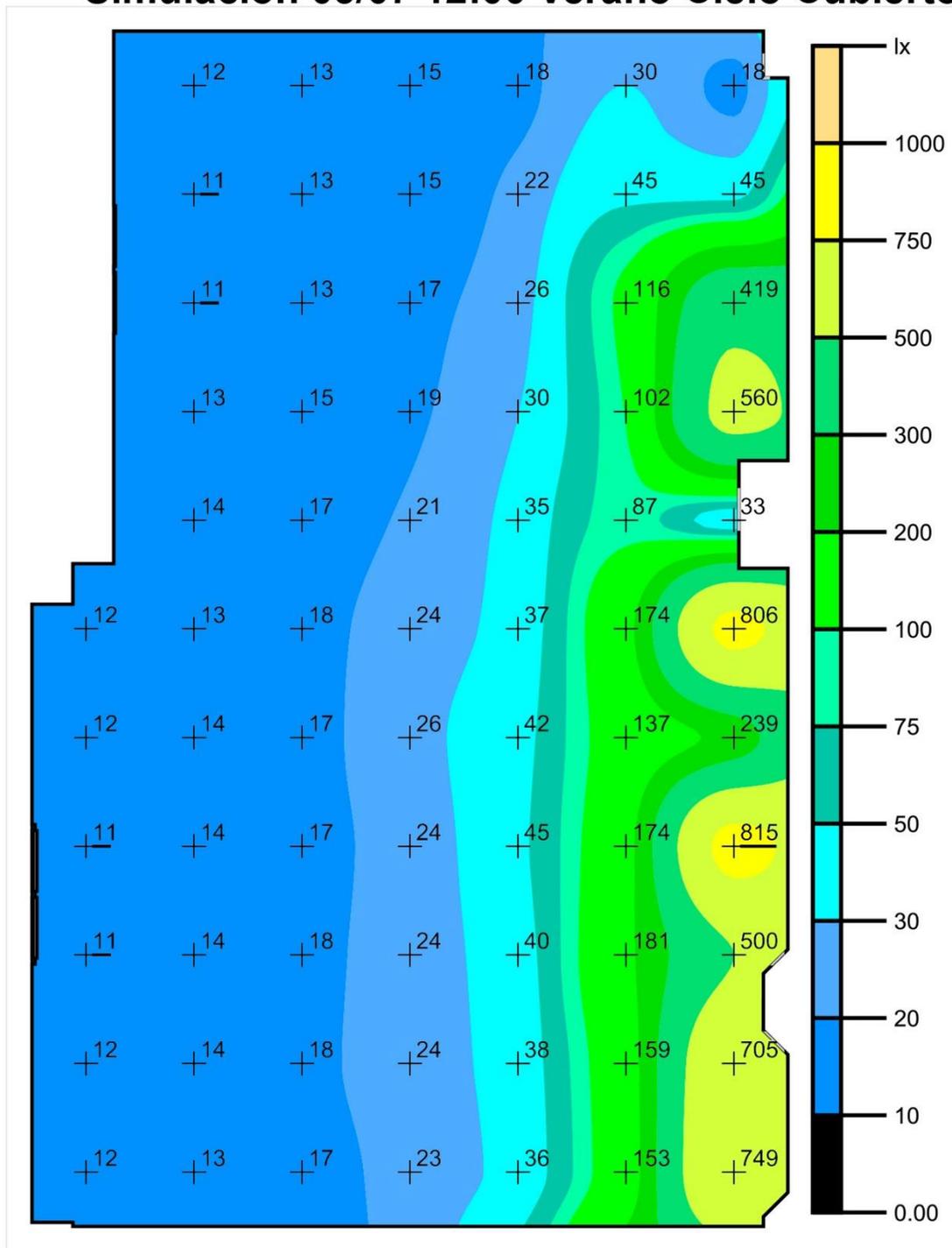


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 2870 lx, Min: 139 lx, Max: 44775 lx, Mín./medio: 0.05, Mín./máx.: 0.00

Figura 84. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Cubierto

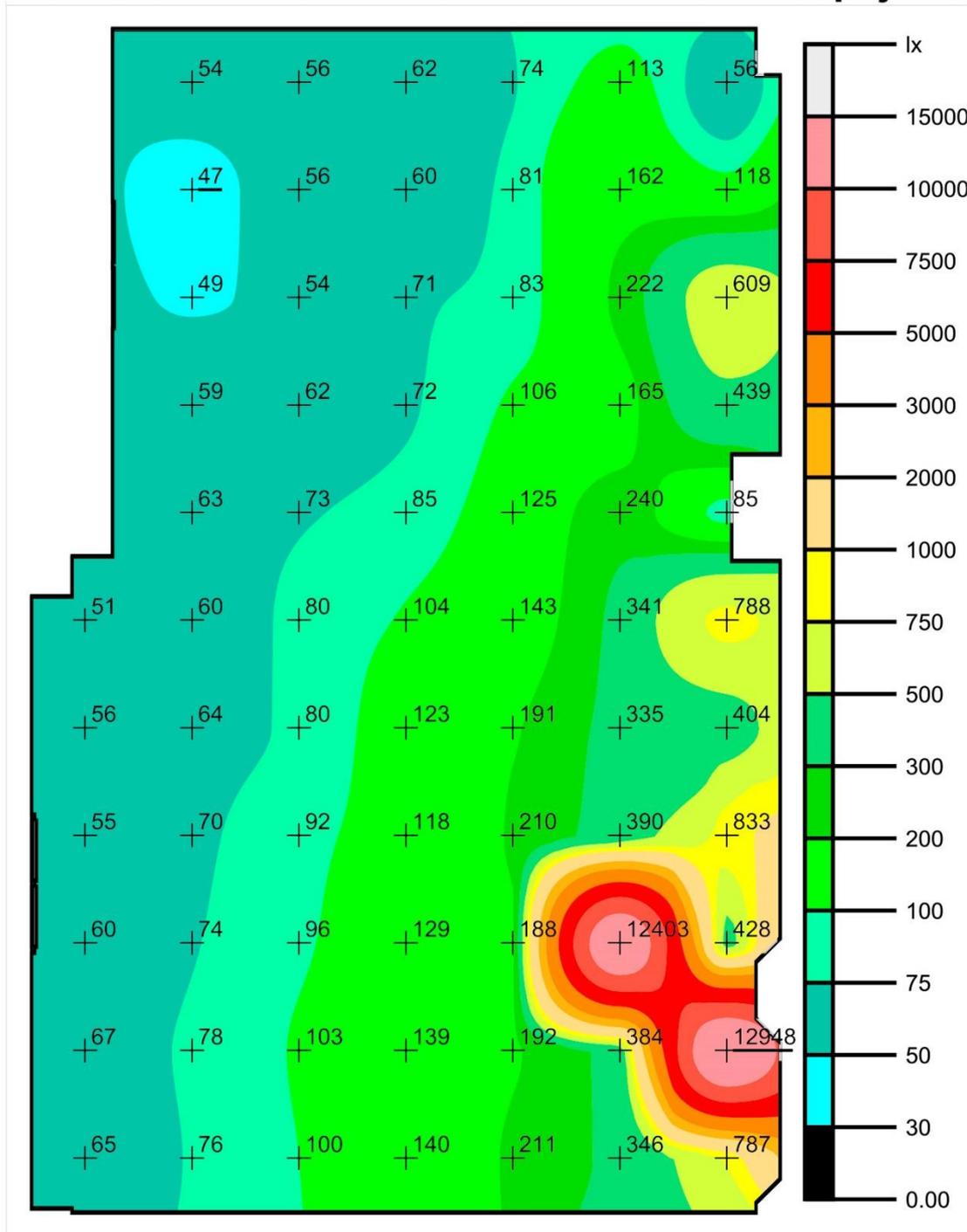


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 100 lx, Min: 10.6 lx, Max: 815 lx, Mín./medio: 0.11, Mín./máx.: 0.01

Figura 85. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Despejado

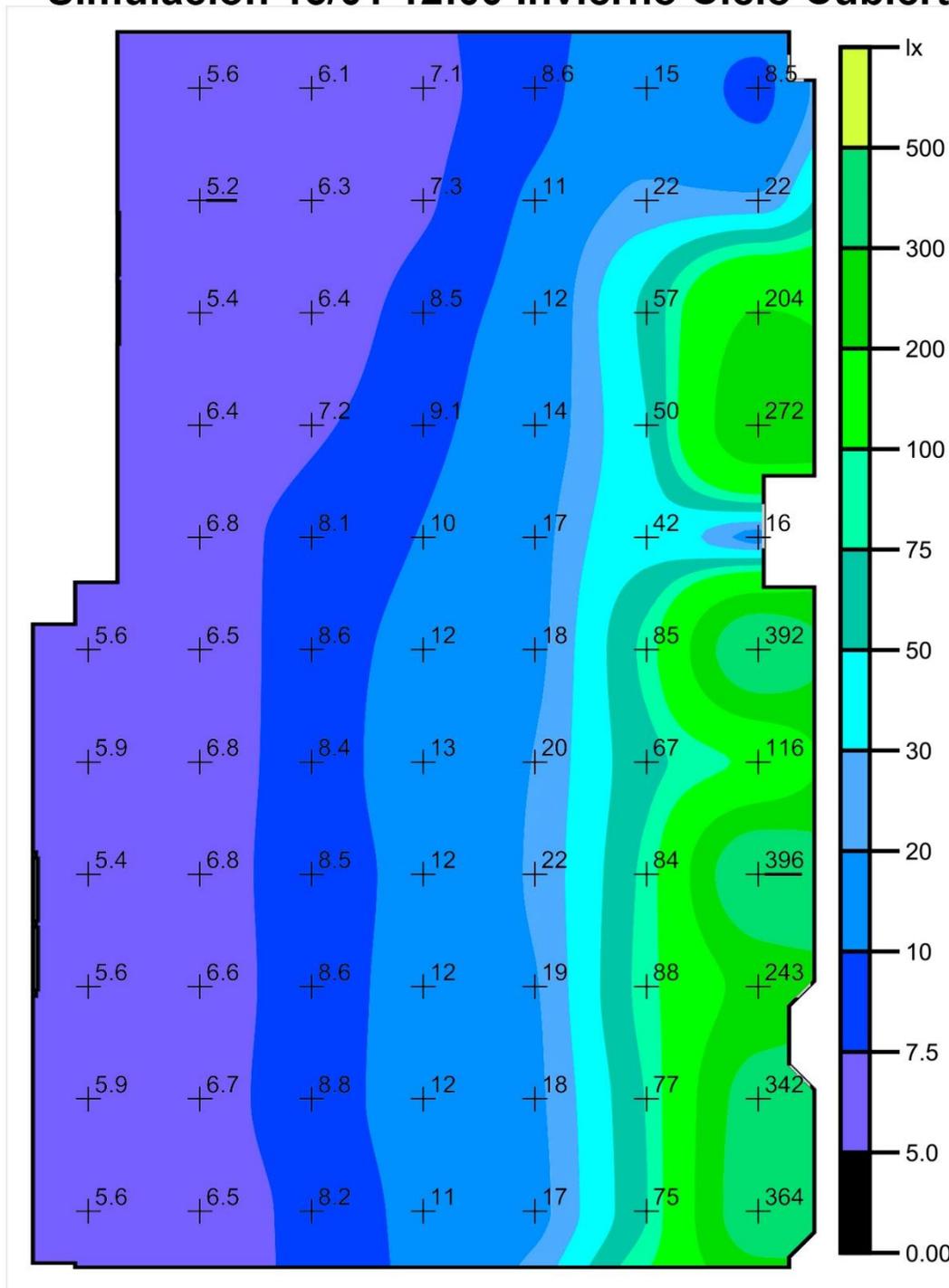


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 517 lx, Min: 46.8 lx, Max: 12948 lx, Mín./medio: 0.09, Mín./máx.: 0.00

Figura 86. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo despejado en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Cubierto



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 48.8 lx, Min: 5.17 lx, Max: 396 lx, Mín./medio: 0.11, Mín./máx.: 0.01

Figura 87. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

La comparativa entre los valores de los casos 1 y 2, en las diferentes situaciones, denota que existen ligeras diferencias entre ellas. Esto es debido a que la orientación y el resto de la volumetría del edificio influyen notablemente a la hora de recibir la luz natural.

Fijándonos en los diferentes meses se observa que, tanto en el caso 1 como en el 2, existen grandes diferencias de iluminancia entre el verano y el invierno. Mientras en verano existe una gran iluminancia en ambos casos que permitiría que al menos la primera línea de luminarias situadas en el frente de las ventanas no tenga que estar funcionando para alcanzar los niveles adecuados de iluminancia, en invierno la iluminancia en ambos casos es baja y sería necesario el funcionamiento de todas las luminarias.

Centrándonos en las condiciones meteorológicas, vemos como en el caso 2, tanto en verano como en invierno, se puede apreciar que existe una gran diferencia de iluminancia entre un cielo despejado y uno cubierto. No obstante, en el caso 1, existe una gran diferencia de iluminancia en verano mientras que en invierno apenas existe diferencia entre un cielo despejado y uno cubierto. Por tanto, los sistemas de control y regulación que se propondrán en las estrategias de mejora, deberán ser capaces de adaptarse a las diferentes situaciones que producen las condiciones meteorológicas en función de las diferentes orientaciones.

Como conclusión se observa que, dentro de cada caso específico, existen grandes irregularidades en los niveles de iluminancia, dependiendo de la estación del año y de las condiciones meteorológicas. Estas variables indican que es absolutamente obligatorio el uso de sistemas de control y regulación que aprovechen la enorme cantidad de luz solar que llega según que orientaciones y momentos y regulen el flujo luminoso de las luminarias en función de ello.

3.4- Estrategias de mejora y análisis de los resultados

Una vez expuesta la parte teórica y normativa junto con los datos obtenidos a través del estudio energético del sistema de iluminación en su fase inicial, se procederá a aportar una serie de modificaciones o estrategias que irán desde el menor hasta el mayor impacto en la instalación inicial, es decir, desde algunas modificaciones hasta el cambio total de la instalación. Las estrategias de mejora por orden de menor a mayor impacto en la instalación, inversión económica inicial y ahorro energético serán las siguientes:

- **Estrategia 1. Creación de grupos de luminarias en sentido longitudinal.**

Como se ha explicado en el punto 3.3, el sistema inicial está distribuido en líneas transversales de luminarias, de manera que solo es posible apagarlas o encenderlas en este sentido.

Con esta primera estrategia se propondría eliminar el sistema anterior y crear una nueva agrupación de luminarias en sentido longitudinal, de forma que se pudiera aprovechar la luz natural apagando la línea longitudinal más cercana al frente de las ventanas.

- **Estrategia 2. Sustitución de lámparas de tubos fluorescentes por lámparas de tubo LED.**

Esta modificación permitiría, eliminando el balasto electromagnético, el cebador y el condensador, usar la misma instalación inicial obteniendo niveles similares de iluminancia, pero con una menor potencia consumida y un menor deslumbramiento directo.

Es cierto que esta estrategia podría suponer una cierta inversión económica inicial, ya que los tubos LED son bastante más caros que los tubos fluorescente; no obstante, gracias a la menor potencia consumida, se podría llegar a recuperar la inversión en un periodo de tiempo a medio o largo plazo.

Cabe destacar también la sencillez para llevar a cabo esta estrategia, pues sólo sería necesario eliminar del circuito el equipo auxiliar necesario para el funcionamiento de los tubos fluorescentes y sustituir estos directamente por tubos LED de las mismas dimensiones.

Sin embargo, esta estrategia no sería compatible con sistemas de control y regulación, pero se combinaría con la creación de grupos de luminarias en sentido longitudinal de

forma que se puedan encender o apagar en función del aprovechamiento de la luz natural.

- **Estrategia 3. Sustitución del equipo auxiliar formado por balasto electromagnético, cebador y condensador por un balasto electrónico regulable.**

Esta estrategia, en un primer momento, no tendría una repercusión directa sobre los parámetros de iluminación, sin embargo, permitiría un encendido inmediato de las luminarias y la eliminación del efecto estroboscópico que puede causar fatiga visual.

También produciría un gran ahorro energético porque, como hemos visto en el punto 3.3, el balasto convencional supone un gasto de un 19% más de potencia mientras que con un balasto electrónico el consumo de potencia debido al equipo auxiliar se podría llegar a reducir al 0%.

Esta estrategia sería compatible con sistemas de control y regulación que, combinados con la estrategia de creación de líneas longitudinales de luminarias, también implicaría un gran ahorro energético, permitiendo encender, apagar o regular la línea o líneas cercanas a las ventanas según el aporte de luz natural.

- **Estrategia 4. Sustitución total del sistema de luminarias fluorescentes de superficie por un sistema de luminarias LED empotrables con difusor.**

Se trata del cambio total de las luminarias fluorescentes del sistema inicial por una nueva disposición, número y tipo de luminarias LED empotrables y extensivas, que otorguen adecuados niveles de iluminancia e uniformidad con potencias menores y sin deslumbramientos.

Con esta medida se pretende cumplir todos los criterios que dictan las normativas.

Cabe mencionar que la primera de las estrategias siempre será necesaria llevarla a cabo para poder desarrollar una de las otras tres estrategias con todo su potencial. La elección entre una de estas otras tres propuestas dependerá, en gran medida, de la inversión económica inicial que se quiera realizar. Esta elección también dependerá de las ventajas que aporten unas estrategias sobre otras. La comparación entre las diferentes estrategias se realizará en el punto 4 de conclusiones.

3.4.1- Estrategia 1. Creación de grupos de luminarias en sentido longitudinal

El aula, en su situación inicial, cuenta con un total de 30 luminarias de las que 27 de ellas están agrupadas en 9 filas transversales de 3 luminarias cada una. Las 3 luminarias restantes dan servicio a la pizarra.

El sistema inicial cuenta con 10 interruptores de los cuales 9 de ellos accionan las 9 líneas transversales de luminarias. El interruptor restante acciona la línea de luminarias de la pizarra.

La primera de las estrategias de mejora propuestas implica modificar los grupos de luminarias agrupados en líneas transversales para convertirlos en grupos de luminarias agrupados en líneas longitudinales.

Según este razonamiento, se propone generar 3 filas de luminarias longitudinales de 9 luminarias cada una. De esta forma, se propondría dejar 6 interruptores divididos en parejas. Cada pareja accionaría la parte delantera, compuesta por 5 luminarias, y la trasera, compuesta por 4 luminarias, de una línea longitudinal. El conjunto de las 3 parejas accionaría las 3 líneas longitudinales. A parte de estos 6 interruptores, se añadiría 1 interruptor más que accionase la línea de luminarias de la pizarra.

El hecho de crear grupos de luminarias longitudinales permitiría, por ejemplo, apagar la línea o líneas de luminarias más próximas a las ventanas cuando el aporte de luz solar sea muy grande.

La idea de utilizar 2 interruptores por cada línea longitudinal, uno para la parte delantera y otro para la parte trasera, permitiría solo accionar la parte delantera de las 3 líneas longitudinales cuando el número de estudiantes en el aula sea reducido, permitiendo un gran ahorro energético.

El esquema de distribución de grupos de luminarias y sus elementos de control para esta primera estrategia quedaría de la siguiente manera:

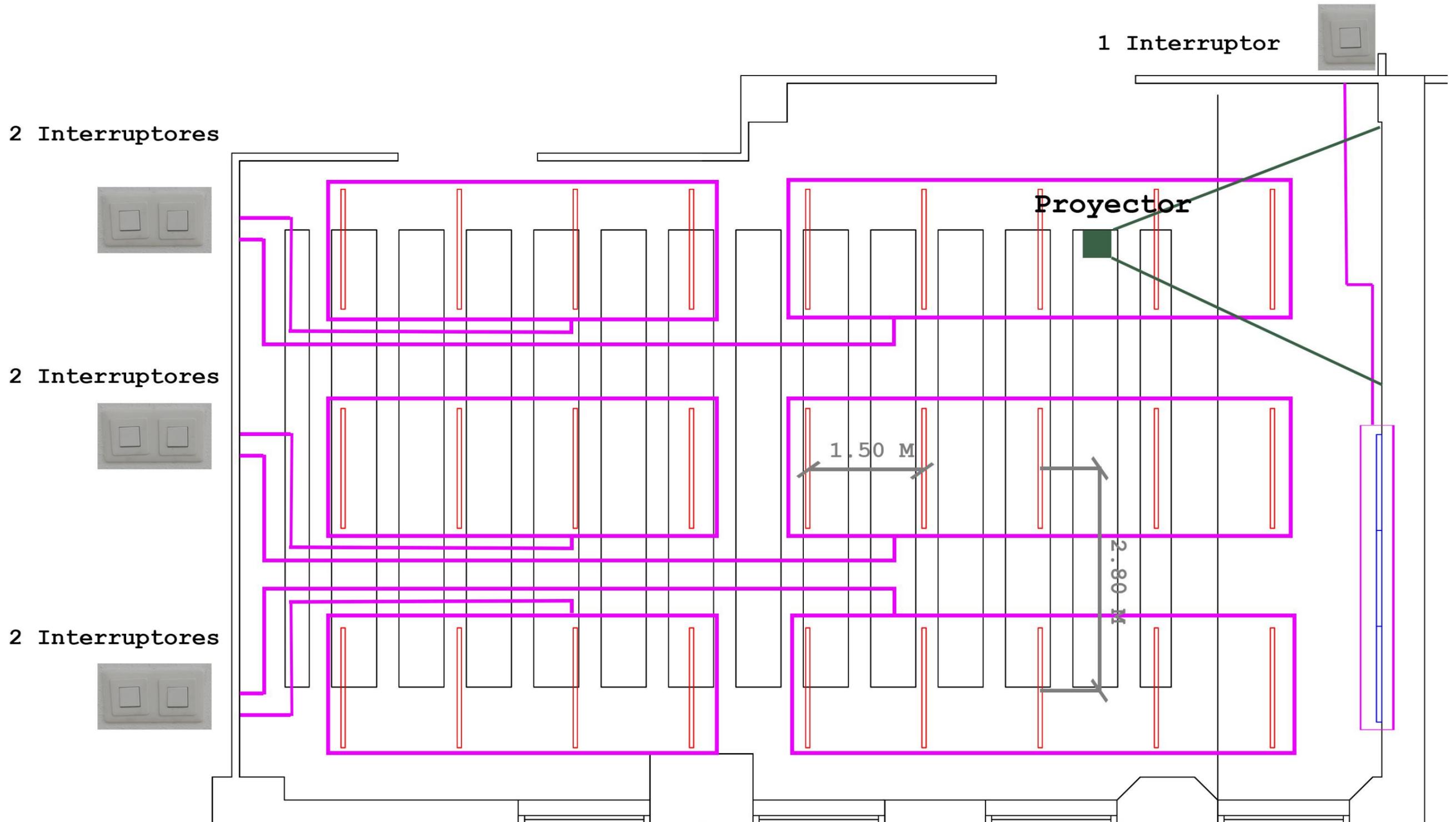


Figura 88. Grupos de luminarias, interruptores, reguladores y sensores de las aulas modelo A con la primera estrategia de mejora. Fuente: Elaboración propia

A continuación se procede a analizar, a modo de ejemplo, dos situaciones que se pueden originar mediante este sistema de grupos de luminarias longitudinales en uno de los casos concretos.

- Aula con la mitad de ocupación.
- Aula con gran aporte de luz natural.

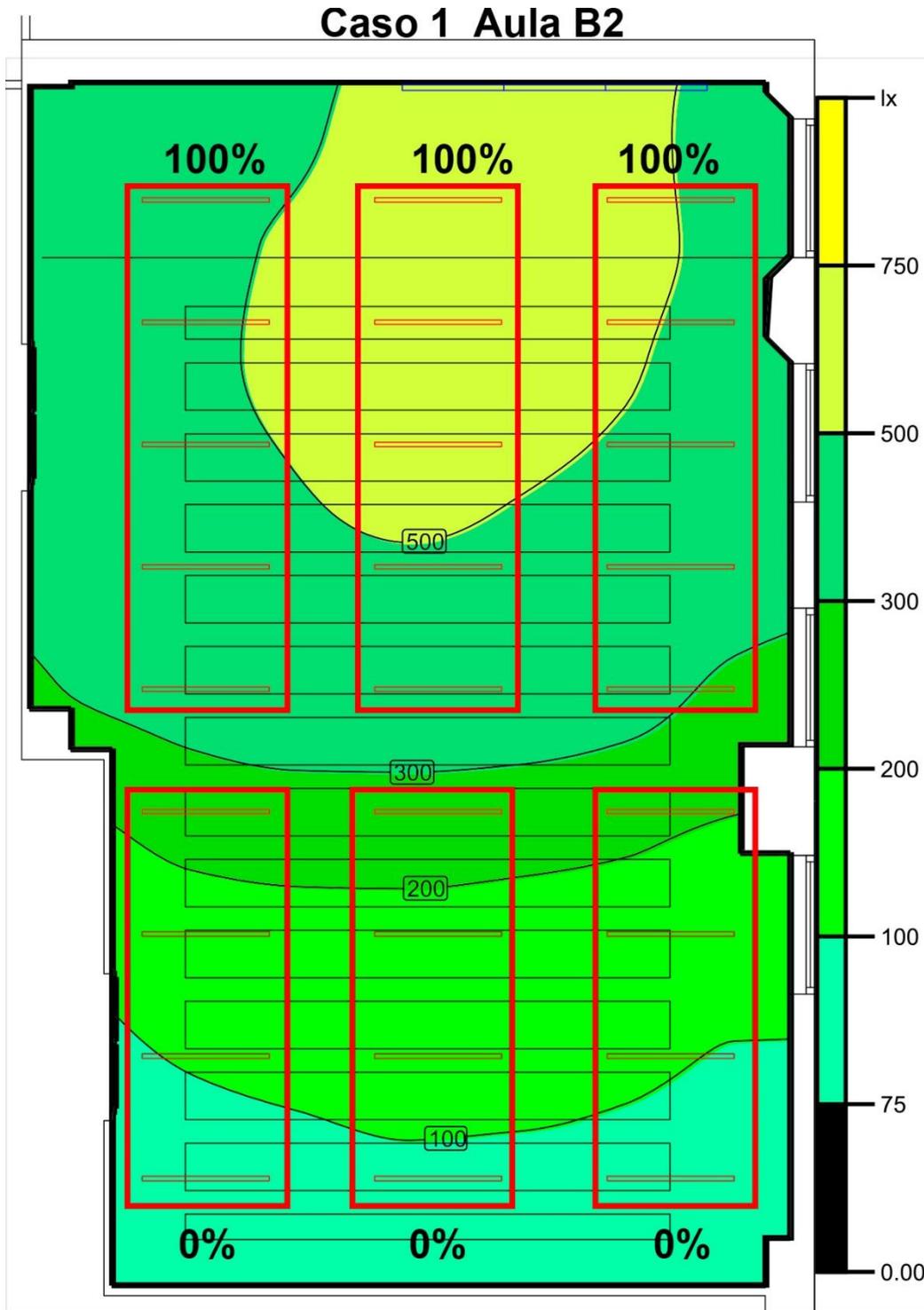
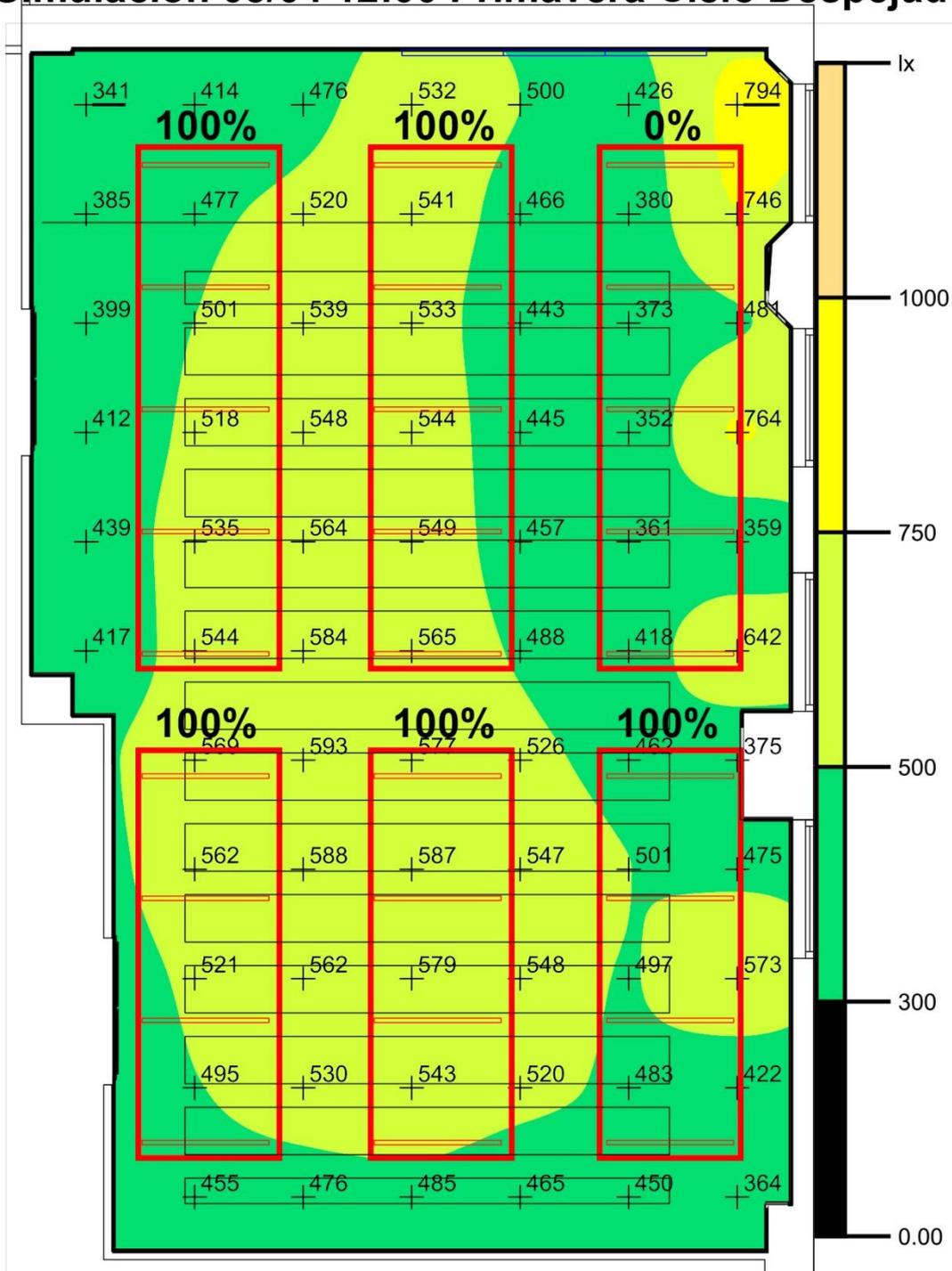


Figura 89. Situación aula caso 1 con mitad de ocupación. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 05/04 12:00 Primavera Cielo Despejado



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 501 lx, Min: 341 lx, Max: 794 lx, Mín./medio: 0.68, Mín./máx.: 0.43

Figura 90. Situación aula caso 1 con gran aporte de luz natural. Fuente: Elaboración propia

En la primera de las situaciones, analizada en el caso 1, se comprueba que sólo activando la parte delantera de las líneas longitudinales se obtienen niveles de iluminancia adecuados (por encima de 300 lx) en la parte delantera del aula (7 filas de mesas), que pueden ser suficientes para desenvolver la actividad cuando el local se encuentra a la mitad de ocupación y sin aporte de luz natural. Esto supondría un ahorro energético del 50% en aquellos momentos en los que pocos estudiantes estén usando el aula.

En la segunda de las situaciones, cuya simulación corresponde al caso 1 con orientación noreste el 05/04 a las 12:00 con un cielo despejado, se comprueba que es posible apagar la parte delantera de la línea longitudinal de luminarias próximas a la ventana cuando el aporte de luz natural sea muy alto. El valor arrojado por *Dialux Evo* para la Em es de 501 lx, cumpliendo la norma sobradamente. Además la Uo arrojada es de 0.68 siendo también superior a la que marca la norma. Se trata de una medida parcial que, no mejorando la situación de la instalación en términos de confort lumínico, permite un ahorro entre el 15 y el 30% del consumo energético en aquellos momentos donde el aporte de luz solar sea muy abundante.

Es difícil obtener unas cifras concretas de consumo energético y ahorro económico anual suponiendo estas situaciones, ya que no es posible conocer cuantas horas las aulas tendrán la mitad de ocupación o cuantas horas habrá suficiente aporte de luz solar como para apagar completamente una de las líneas longitudinales de luminarias, pues depende en gran medida de las condiciones meteorológicas.

Sin embargo, se estima que se podría alcanzar hasta el **10% de ahorro energético del consumo total anual**. El consumo estimado en la situación inicial era entre 2100 y 3300 kWh con un costo entre 630 y 984 €, por tanto, con esta estrategia se podría alcanzar un **consumo de entre 1890 y 2970 kWh con un coste entre 567 y 911 €**.

En las diferentes estrategias que se van a llevar a cabo no se tendrá en cuenta el coste de la mano de obra para su instalación. Por lo tanto, en esta primera estrategia, la inversión inicial sería nula y la amortización inmediata, puesto que directamente obtendríamos un ahorro energético y de coste.

3.4.2- Estrategia 2. Sustitución de lámparas de tubos fluorescentes por lámparas de tubo LED

En esta segunda estrategia se procederá a sustituir las lámparas de tubos fluorescentes de la situación inicial por lámparas de tubos LED con las mismas dimensiones. Además, esta estrategia se combinará con la anterior de creación de grupos de luminarias longitudinales, que permitan el aprovechamiento de la luz natural.

Su instalación es muy sencilla, simplemente sería necesario quitar el tubo fluorescente, anular la reactancia, cebador y condensador y colocar el nuevo tubo LED.



Figura 91. Esquema de eliminación del equipo auxiliar del circuito eléctrico. Fuente: <http://blog.ledbox.es/informacion-led/instalacion-de-luminarias/cambiar-un-tubo-fluorescente-por-un-tubo-led>

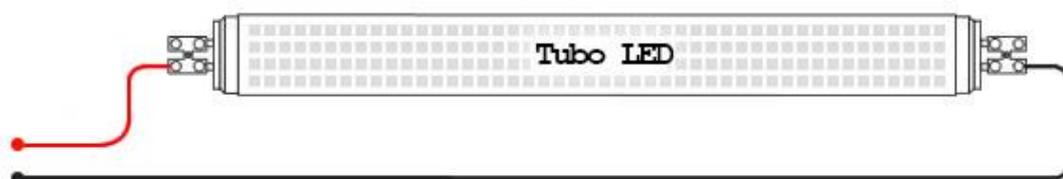


Figura 92. Esquema de montaje del tubo LED. Fuente: <http://blog.ledbox.es/informacion-led/instalacion-de-luminarias/cambiar-un-tubo-fluorescente-por-un-tubo-led>

La gran ventaja de los tubos LED frente a los fluorescentes es que **no requieren ningún tipo de dispositivo adicional para su encendido**, convirtiéndolos en altamente eficaces en términos energéticos. Otras ventajas frente a los tubos fluorescentes son las siguientes:

- **Vida útil.** Los **tubos fluorescentes OSRAM 58/840** de la instalación inicial tienen una vida útil de **20.000 horas** frente a las **50.000 horas** del **tubo LED T8 24/840 SubstiTUBE**

Advanced Ultra de la marca OSRAM que se instalará en esta segunda estrategia.

- **Consumo.** Los tubos fluorescentes tienen un consumo mucho mayor que los tubos LED. En este caso los **tubos fluorescentes 58/840 de OSRAM consumen, junto al equipo auxiliar, un total de 69W** de potencia frente a los **24W que consumiría el tubo LED T8 24/840 SubstiTUBE Advanced Ultra de la marca OSRAM.**
- **Arranque.** Los tubos LED tienen un arranque instantáneo frente a los tubos fluorescentes que tienen un tiempo para arrancar y el número de encendidos afecta a su vida útil.
- **Resistencia.** Los tubos LED aguantan muchos más golpes y vibraciones que los tubos fluorescentes. Incluso pueden ser reparados.
- **Contaminación.** Los tubos fluorescentes están contruidos con componentes de mercurio y argón que son altamente peligrosos para la salud humana y medioambiental mientras que los tubos LED no necesitan ninguno de estos compuestos.

Como se ha citado anteriormente, se instalarían los tubos LED T8 24/840 SubstiTUBE Advanced Ultra de la marca OSRAM que tienen las siguientes especificaciones técnicas:

Datos eléctricos

Potencia nominal	24,00 W
Potencia nominal	24,00 W
Tensión nominal	220...240 V
Frecuencia de funcionamiento	50...60 Hz
Corriente nominal	0,109 A
Tipo de corriente	Corriente alterna (AC)
Max. tube no. on circuit break. 10 A (B)	55 / 12 / 60 ¹⁾
Max. tube no. on circuit break. 16 A (B)	90 / 20 / 95 ¹⁾
Factor de potencia λ	> 0,90
Eficacia lámpara (condición estándar)	150 lm/W

¹⁾ Operated with conventional control gear / Operated with conventional control gear incl. compensation capacitor / Operated with direct mains connection (220...240 V)

Datos Fotométricos

Tono de luz (denominación)	Cool White
Temperatura de color	4000 K
Flujo luminoso nominal	3600 lm
Flujo luminoso	3600 lm
Índice de reproducción cromática Ra	>80
Desviación estándar de ajuste de color	≤4 sdc

Datos técnicos de iluminación

Tiempo de arranque	< 0,5 s
Tiempo de precalentamiento (60 %)	< 0,50 s
Áng. de haz nom. (valor de medio pico)	150,00 °

Capacidades

Regulable	No
Longitud total	1513 mm
Long. con casq pero sin pitones/conexión	1499.00 mm
Diámetro del tubo	27,3 mm
Diámetro casquillo	27,3 mm
Peso del producto	339,00 g
Diámetro máximo	28,0 mm

Temp. y condiciones de funcionamiento

Margen de temperatura ambiente	-20...+50 °C
Temp. máx. en el punto de prueba tc	75 °C ¹⁾

¹⁾ Máximo en el Punto Tc

Duración de vida

Vida útil nominal lámpara	50000 h
Vida útil lámpara	50000 h
Factor manten.lumen final vida útil nomi	0,70
Número de ciclos de encendidos	200000

Datos adicionales del producto

Casquillo (denominación estándar)	G13
Libre de mercurio	Sí

Certificados & Normas

Tipo de protección	IP20
Normas	CE; VDE
Clase de eficiencia energética	A++
Consumo de energía	24 kWh/1000h

Figura 93. Especificaciones técnicas del tubo LED T8 24/840 SubstiTUBE Advanced Ultra de la marca OSRAM. Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/lamparas/lamparas-led/tubos-led/substitube-t8-em/substitube-advanced-ultra-output/index.jsp

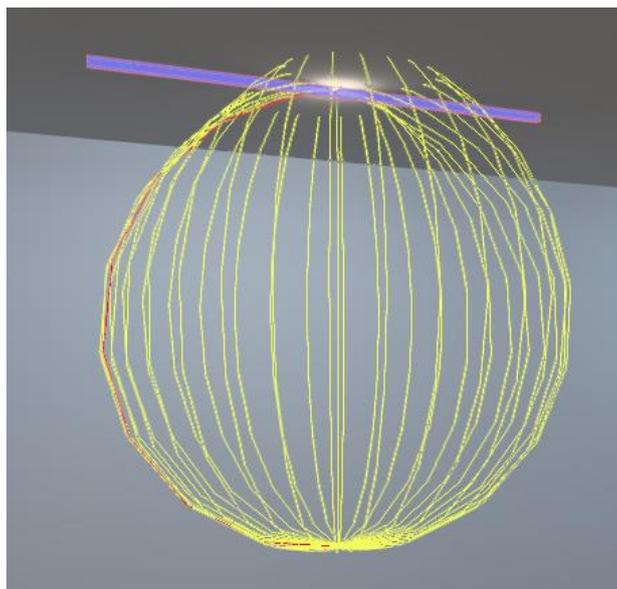


Figura 94. Sólido fotométrico tubo LED T8 24/840 SubstiTUBE Advanced Ultra OSRAM.
Fuente: Elaboración propia



Figura 95. Tubo LED T8 24/840 1500 mm SubstiTUBE Advanced Ultra de la marca OSRAM.
Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/lamparas/lamparas-led/tubos-led/substitube-t8-em/substitube-advanced-ultra-output/index.jsp

El único inconveniente de la sustitución directa de los tubos fluorescentes por tubos LED, frente a todas las ventajas citadas anteriormente, sería la incompatibilidad con un sistema de control y regulación que permita modificar la intensidad de las luminarias.

En la siguiente propuesta descrita en el punto 3.4.3, en cambio, no se sustituiría las lámparas fluorescentes por lámparas LED sino que se cambiaría el equipo auxiliar usado por las lámparas fluorescentes, por un balasto electrónico que, en este caso, si sería compatible con los sistemas de control y regulación.

Aunque no se cuente con un sistema de regulación sí que se crearían los grupos de luminarias longitudinales de la primera estrategia para que, al menos, sea posible apagar la línea de luminarias más próximas a las ventanas en caso de que el aporte de luz natural sea grande o apagar las partes traseras de las líneas cuando la ocupación del aula se encuentre a la mitad. De esta manera, la distribución de grupos de luminarias e interruptores sería la misma que en la estrategia anterior:

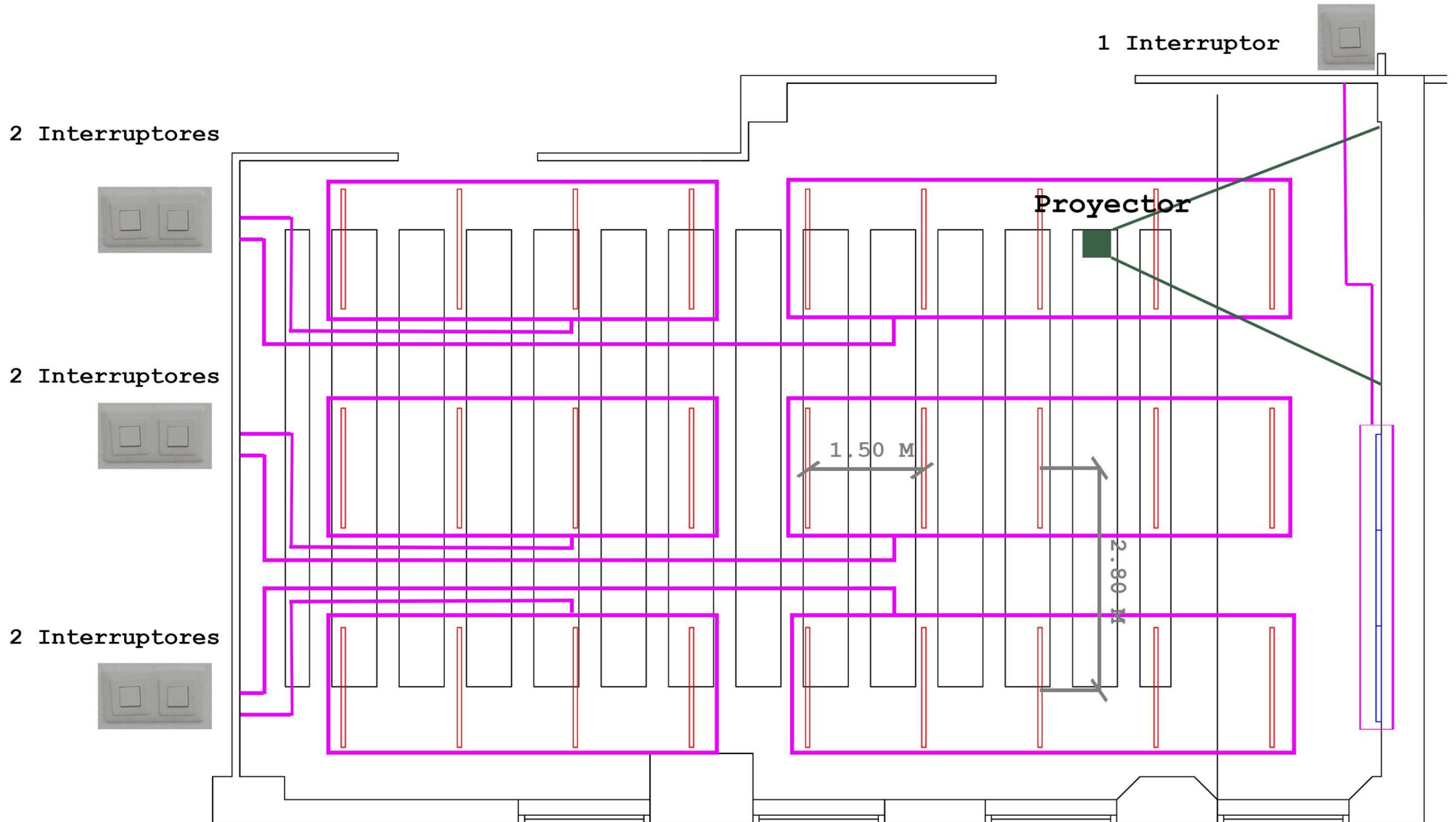
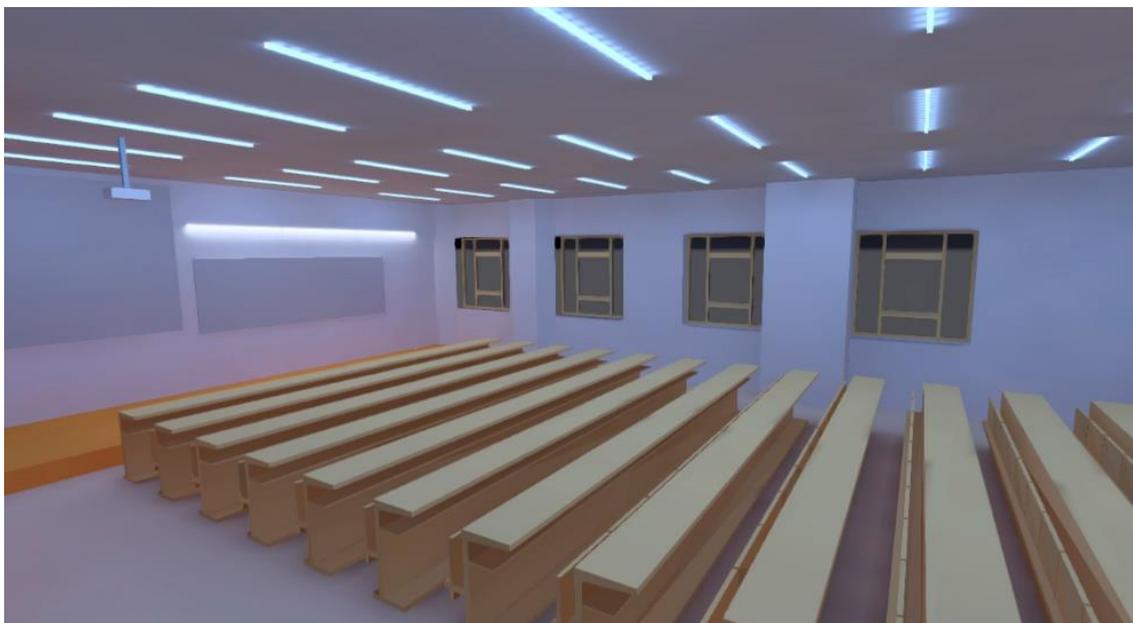


Figura 96. Grupos de luminarias e interruptores de las aulas modelo con la segunda estrategia de mejora. Fuente: Elaboración propia

En definitiva, la recreación del modelo de aula en el espacio *Dialux Evo* usando el tipo de lámparas LED expuestas anteriormente resultaría de la siguiente forma:



*Figura 97. Perspectiva 1 del modelo de aula con la implantación de lámparas de tubo LED como segunda estrategia.
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 98. Perspectiva 2 del modelo de aula con la implantación de lámparas de tubo LED como segunda estrategia.
Fuente: Elaboración propia*

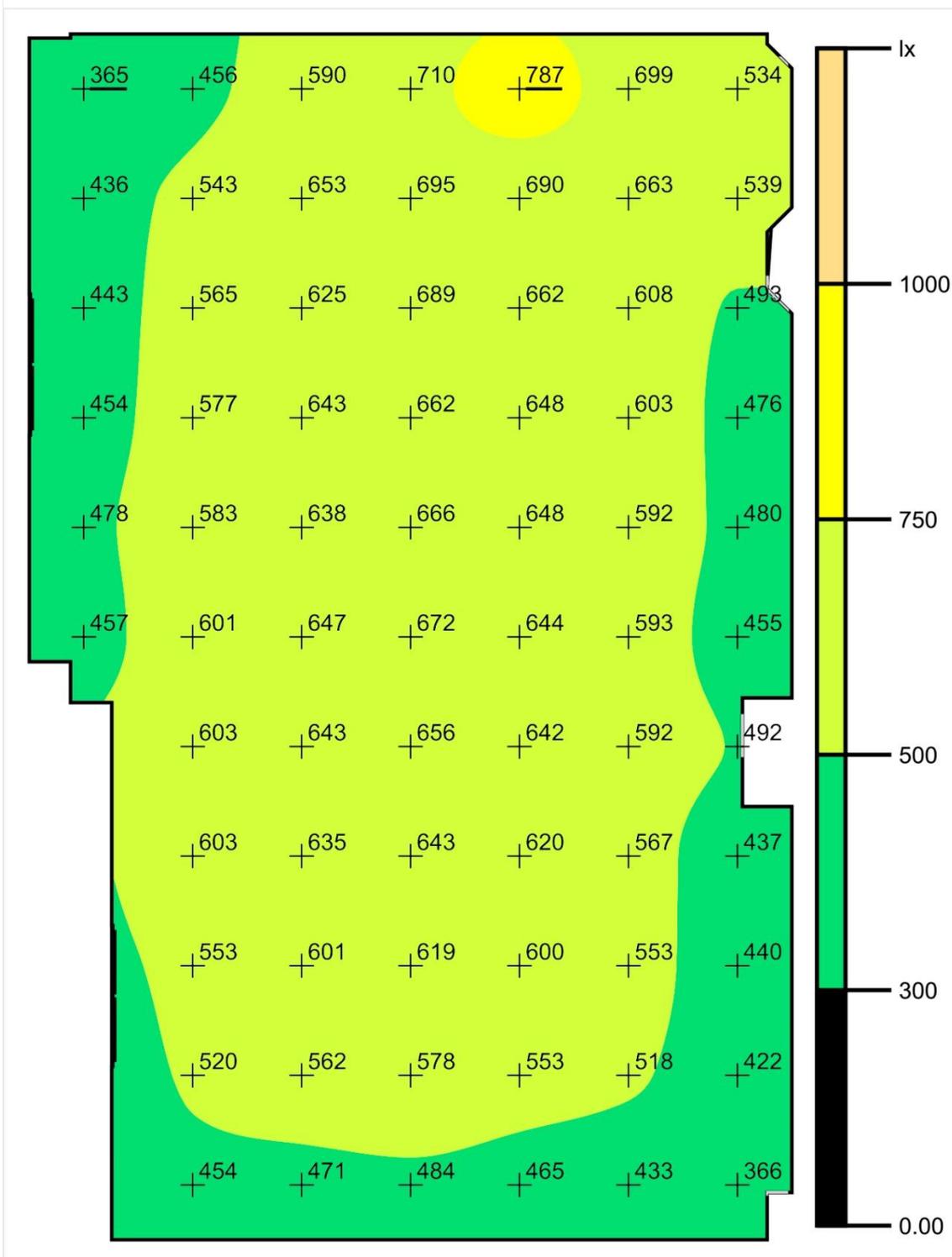
Se procederá a analizar nuevamente los parámetros marcados por las normas UNE-EN 12464 y DB-HE3 en el modelo de aula para comprobar el cumplimiento de la instalación con las lámparas LED y ver si mejora en alguno de los criterios con respecto a la instalación inicial.

El **Ra** de este tipo de tubo LED es **84**, superior al 80 del tubo fluorescente del estado inicial y, por tanto, **cumple la norma UNE-EN 12464 y mejora la instalación inicial.**

En cuanto a la **iluminancia media horizontal mantenida (Em)**, a una altura de **plano útil** correspondiente a **0.80m** y en la **totalidad de la superficie del aula**, el software *Dialux Evo* arrojó **569 lx**, cifra superior a los 547 lx del sistema inicial con tubos fluorescentes y superior a los 300 exigidos por la norma, en consecuencia, **se cumple sobradamente la norma UNE-EN 12464-1 y mejora la instalación inicial.**

En lo relativo a la uniformidad media (Uo), en la **totalidad de la superficie del aula** y a una altura de **0.80m**, *Dialux Evo* arrojó el dato **0.64**, cifra inferior a los 0.67 del sistema inicial. No obstante, es superior al 0.6 exigido por la norma, por tanto, también **cumple la norma UNE-EN 12464-1 aunque no mejora la instalación inicial.**

El **UGR** que se situa a una altura de 1.2 m correspondiente a la visión de una persona sentada, tiene un valor exigido por la norma de 19. En este caso, el dato arrojado por *Dialux Evo* es de **22.7**, cifra muy inferior a los 27.4 del sistema inicial con lámparas fluorescentes. Aunque aún **no cumple la norma UNE-EN 12464-1, se produce un notable descenso del deslumbramiento directo con el uso de lámparas LED con respecto al sistema inicial.**



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 569 lx, Min: 365 lx, Max: 787 lx, Mín./medio: 0.64, Mín./máx.: 0.46

Figura 99. Trama de 72 puntos de cálculo de iluminancia horizontal en el modelo de aula a estudiar para la segunda estrategia. Fuente: Elaboración propia



UGR (Trama)
Max: >19.0, Área del ángulo visual: 0.0° - 360.0°, Amplitud de paso: 15.0°, Valor límite: >19.0, Máx. deslumbramiento a: 75.0°,

Figura 100. Valores UGR en el modelo de aula a estudiar para la segunda estrategia. Fuente: Elaboración propia

Se analizará el **grado de ahorro energético del sistema con lámparas LED respecto al sistema inicial con lámparas fluorescentes con equipo auxiliar convencional.**

La potencia necesaria para cada luminaria sería 24W, es decir, la potencia nominal de cada lámpara LED, ya que que no necesitan de ningún equipo auxiliar para su funcionamiento.

Se puede comprobar, en primera instancia, que los 24W de potencia que consume cada luminaria LED es muy inferior a los 69W usados por cada lámpara fluorescente y su equipo auxiliar.

La potencia total para las 30 luminarias sería:

24W x 30 = 720W totales de potencia para las luminarias LED frente a los 2070W empleados para el funcionamiento de todas las luminarias fluorescentes con equipo auxiliar convencional en el sistema inicial.

Suponiendo la misma **duración anual de la actividad de 1584 horas** y el mismo **coste de 0.30€ cada kWh** que en el estudio del punto 3.3 de la situación inicial de la instalación, se estimaría un **consumo entre 750 y 1150 kWh al año con un coste entre 219 y 342 €**. El consumo estimado en la situación inicial era entre 2100 y 3300 kWh con un costo entre 630 y 984 €, por tanto, se estaría hablando de un **ahorro energético anual de entre 1350 y 2150 kWh y un ahorro económico anual comprendido entre 411 y 642 €**. Estas cantidades supondrían un **ahorro energético y económico en torno al 65%**.

Consumo de energía y coste	
Consumo	750 - 1150 kWh/a
LENI	3 - 4 kWh/a/m ²
Coste	219 - 342 €/a

Tiempos de uso	
Día	1584 Horas por año
Noche	0 Horas por año
Factor de ausencia	0.00

Perfil de usuario activo	
Centros de formación	▼
Aulas, salas de seminarios	▼

Características de tacómetro	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mostrar energía de tacómetro
Tipo de visualización	
Límite establecido	0.000 €/a
Precio por kWh	0.300 €
Unidad monetaria	€

Figura 101. Consumo de energía y coste con la segunda estrategia.
Fuente: Elaboración propia

Como se ha comentado en la estrategia anterior, dentro del coste inicial de la instalación no se tendría en cuenta la mano de obra. Se instalarían 30 tubos LED T8 24/840 SubstiTUBE Advanced Ultra de la marca OSRAM que tendría un precio por unidad, según el catálogo de la empresa, de 47.10 €. Por tanto, la inversión económica inicial total para esta estrategia sería:

30 x 47.10 € = 1.413 € de inversión económica inicial.

Si el ahorro económico anual estaría entre 411 y 642 € significa que **la instalación, para esta segunda estrategia, se amortizaría al cabo de entre 2 a 3 años.**

Recordemos que la DB-HE3 exige una potencia máxima instalada de 15W/m² para edificios de uso docente. En la situación inicial con lámparas fluorescentes y equipo auxiliar convencional no cumplía la norma. En la instalación con lámparas LED se procede a comprobar si esta medida sería suficiente para el cumplimiento de la norma:

720W / 128 m² = 5,625 W/m² Si cumpliría sobradamente la norma DB-HE3.

Esta última norma también exige un VEEI límite de 3.5 para aulas. En la situación inicial ya se cumplía la norma y, por tanto, con lámparas LED también se cumpliría, pero con un valor inferior que indicaría que se trata de una instalación más eficiente energéticamente respecto a la anterior:

VEEI = (720W x 100) / (128m² x 569 lx) = 0.98 Por tanto también cumpliría sobradamente la norma DB-HE3 y demuestra que se trataría de una instalación muy eficiente energéticamente.

En este tipo de estrategia no se analizará la situación de iluminación para la pantalla de un proyector, puesto que el sistema no permite ningún tipo de regulación y la única solución para su visualización adecuada sería el apagado de las luminarias.

En cuanto a la pizarra se obtiene, a través de *Dialux Evo*, una **iluminancia media perpendicular de la pizarra de 476 lx** y una **uniformidad media de 0.92**, por tanto, **no se cumpliría la norma UNE-EN 12464-1.**



Figura 102. Iluminancia media perpendicular de la pizarra con la segunda estrategia. Fuente: Elaboración propia

3.4.3- Estrategia 3. Sustitución del equipo auxiliar formado por balasto electromagnético, cebador y condensador por un balasto electrónico regulable

La medida fundamental de esta tercera estrategia sería la eliminación del equipo auxiliar convencional de la instalación fluorescente por un balasto electrónico regulable. En este estudio también se combinaría la estrategia de creación de grupos de luminarias longitudinales con la instalación de un balasto electrónico regulable, de manera que se obtenga una instalación más eficiente y con un mayor ahorro energético.

El sistema en líneas longitudinales, junto con el uso de un balasto electrónico regulable, permitiría el total aprovechamiento de la luz natural, pues el frente acristalado se desarrolla en sentido longitudinal.

La descripción y características de este tipo de balasto ya han sido explicadas en el punto 2.7.1, sin embargo, se remarcarán brevemente algunos de los beneficios que aporta frente al balasto electromagnético:

- **Mejoran la eficiencia del sistema, utilizando una frecuencia de entrada comprendida entre 20 y 50 kHz en lugar de los 60Hz de un balasto convencional.** Al usar estas altas frecuencias se puede producir el mismo flujo luminoso que un balasto electromagnético, pero con una reducción del consumo entre el 12 y el 25%.
- **Encendido instantáneo y eliminación del efecto estroboscópico.**
- **Alto factor de potencia.** Normalmente superior a 0.9.
- **Baja temperatura de funcionamiento.** Funcionan con temperaturas menores que los balastos electromagnéticos, lo que permite alargar la vida de las luminarias.
- **Mayor duración.** La vida de un balasto electrónico es de 3 a 5 veces mayor que el de uno convencional gracias a factores como la menor temperatura.
- **Bajo ruido audible.** El ruido producido por los balastos electrónicos es inferior a 30 decibelios mientras que en los balastos convencionales es mucho mayor.
- **Menor peso y mayor compacidad.** Todos los elementos necesarios para el arranque y funcionamiento de las lámparas se encuentran en una misma unidad. Además, al ser componentes

electrónicos, se reduce mucho el peso en comparación con los balastos electromagnéticos.

- **Permiten la regulación del flujo luminoso ya sea por medios analógicos o digitales.**

A la hora de la instalación del balasto electrónico se debe tener en cuenta una serie de premisas:

- No debe compartir circuito con el equipo auxiliar convencional formado por balasto electromagnético, cebador y condensador. Por tanto, estos elementos deben ser removidos antes de la instalación del balasto electrónico.
- Es recomendable que el balasto electrónico se coloque en una zona dentro de la luminaria donde la concentración de calor sea pequeña, es decir, situándolo lo más lejos posible de los filamentos de la lámpara.
- Es obligatorio colocar el conductor de tierra por razones de seguridad.
- Es obligatorio respetar las indicaciones de los cables cortos. En el marcado del balasto electrónico, debe aparecer unas indicaciones de cableado hacia la lámpara en las que se muestran que dos pares de conductores deben ser más cortos, pues son los encargados de transportar la alta tensión que se aplica a la lámpara en el arranque.

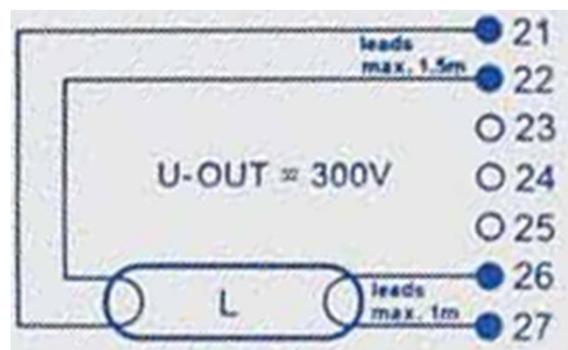


Figura 103. Conexiones balasto electrónico. Fuente: Elaboración propia

- Es necesario respetar el límite de la temperatura de operación (T_c max). La temperatura de trabajo depende fundamentalmente de la calidad y del material con el que esté construida la luminaria, del ambiente y de la

Temp.-Test
 $t_c = 75^\circ\text{C}$

Figura 104. Temperatura máxima de operación del balasto electrónico. Fuente: Elaboración propia

ventilación. Esta temperatura está establecida en grados Celsius.

Se plantearía la instalación de un balasto electrónico para lámparas fluorescentes con regulación mediante un protocolo analógico 1-10V, ya explicado en el punto 2.7.1. Se utilizaría el modelo de la marca OSRAM QUICKTRONIC DIM T8.



Figura 105. OSRAM QUICKTRONIC DIM T8 regulable desde 1 a 10 V. Fuente:

http://www.osram.es/osram_es/productos/balastos-y-transformadores-para-lamparas/equipos-de-conexion-electronicos-para-iluminacion-tradicional/ece-para-lamparas-fluorescentes-y-fluorescentes-compactas/ece-para-fluorescentes-y-cfl%2c-regulable-desde-1....10-v/quicktronic-dim-t8/index.jsp?productId=ZMP_1025340

Este tipo de balasto contaría con las siguientes especificaciones técnicas:

Duración

Nombre del producto	Grupo de lámparas				
QT 1X58 DIM	L 58 W	ECE temperatura de ambiente [ta]	40	50	60
		temperatura en el punto tc [°C]	55	65	75
		vida [h]	100000	100000	90000

Capacidades

Interfaz DIM	1...10 V
Margen de regulación	1...100 % ¹⁾
Regulable	Sí
Protección contra sobrecalentamiento	Sí
Apto para luminarias con clase de prot.	I
Fin vida útil de la lámp., desco. seg.	EOL T.2

¹⁾ Flujo luminoso

Certificados & Normas

Símbolos de homologación	VDE / VDE-EMC / Aprobación E1
Normas	Según EN 55015; EN 55022/Según EN 61547/Según IEC 1000-3-2/EN 61000-3-2
EEL - Etiqueta energética	A1 BAT
Tipo de protección	I
Tipo de protección	IP20

Datos eléctricos

Tensión de entrada	198...264 V
Tensión nominal	220...240 V
Frecuencia de red	50...60 Hz
Tensión cc	154...276 V
Frecuencia de funcionamiento	44...120 kHz
Nº de ECE máximos con automático 10 A (B)	17 ¹⁾
Nº de ECE máximos con automático 16 A (B)	28 ¹⁾
Corriente de encendido IP	24 A

¹⁾ Type B

Datos técnicos de iluminación

Tiempo de arranque	0,6 s ¹⁾
--------------------	---------------------

¹⁾ Arranque en caliente optimizado

Dimensiones y peso

Largo	360,0 mm
Ancho	30,0 mm
Alto	21,0 mm
Distancia entre taladros longitud	350,0 mm
Peso del producto	237,00 g

Temp. y condiciones de funcionamiento

Margen de temperatura ambiente	-20...+60 °C
Humedad en el aire	5...85 %

Duración de vida

ECE vida útil	100000 h ¹⁾
---------------	------------------------

¹⁾ En tcase = 65°C a tc punto / 10 % índice de fallos

Figura 106. Especificaciones técnicas del balasto electrónico OSRAM QUICKTRONIC DIM T8. Fuente: http://www.osram.es/osram_es/productos/balastos-y-transformadores-para-lamparas/equipos-de-conexion-electronicos-para-iluminacion-tradicional/ece-para-lamparas-fluorescentes-y-fluorescentes-compactas/ece-para-fl-y-cfl%2c-regulable-desde-1....10-v/quicktronic-dim-t8/index.jsp?productId=ZMP_1025340

Se instalaría a su vez un **sistema de control y regulación basado en una regulación automática a través de un sensor conjunto de luminosidad y de movimiento**. Dicho sensor sería capaz de detectar el movimiento de las personas al entrar al aula y activar la iluminación cuando la zona pase a estar ocupada. En un primer momento, el equipo activaría todas las luminarias al 100% de su intensidad. Progresivamente, la parte de control de la luminosidad

del sensor analizaría el aporte de luz natural existente y regularía el flujo de las luminarias en función de ello. De esta forma, se crearía un nivel de iluminación óptimo y se disminuiría el consumo energético. El apagado de las luminarias se produciría si tras un periodo de tiempo el sensor no detecta movimiento.

El **sensor de luz y movimiento** utilizado sería el DIM MULTI de la marca OSRAM y tendría una zona de **detección de 12m² y un ángulo de detección de 110°**. Estaría **situado en las proximidades del frente acristalado, en un punto clave del aula que permitiese una buena detección de la luminosidad y del movimiento de las personas**. Dicho sensor regularía, con el mismo valor, todas las luminarias pertenecientes a una misma línea longitudinal, por tanto, la regulación se produciría modificando cada una de las tres líneas longitudinales.

En este sistema también se instalaría una **línea de control auxiliar que desconectase el sensor de luminosidad y permitiese realizar una regulación manual mediante pulsadores**. Cada línea de luminarias longitudinales contaría con un pulsador doble, uno para las 5 luminarias de la parte delantera y el otro para las 4 luminarias de la parte trasera. Estos pulsadores permitirían el apagado, encendido y regulación de la intensidad de las luminarias en función del tiempo que se presione.

Cuando se accionase alguno de estos pulsadores, el sistema configuraría la entrada en modo manual. El nivel de luz ajustado en función de estos pulsadores permanecería constante hasta que las luminarias se apagasen por ausencia de movimiento. Cuando se volviesen a encender, el sistema se configuraría nuevamente a modo automático mediante la regulación en función de la luz natural.

La situación de regulación manual podría ser útil frente a la regulación mediante el sensor de luz, cuando se necesitase crear niveles de iluminancia más bajos para generar gran contraste cuando el proyector del aula esté encendido.

También se instalaría un sistema de regulación manual mediante un pulsador individual asociado a la línea de luminarias sobre la pizarra, que permitiría controlar manualmente el flujo luminoso de las luminarias según las necesidades de los usuarios. Esto evitaría reflejos y se conseguiría una adecuada visión del plano de la pizarra.

La regulación que permitiría este tipo de balasto sería del 1 al 100%.



Figura 107. Sensor de luz DIM MULTI OSRAM.

Fuente:

http://www.osram.es/osram_es/productos/balastos-y-transformadores-para-lamparas/sistemas-de-gestion-de-luz/sensores-individuales/dim-multi/index.jsp



Figura 108. Pulsador doble Rocker Switch

RETROTOUCH. Fuente:

<http://www.retrotouch.co.uk/rockers.html>

Por tanto la distribución de los grupos de luminarias y sus elementos de control y regulación quedarían de la siguiente manera:



Situación Normal: Regulación automática con Sensor de Luz
Situación Auxiliar: Regulación manual con Pulsadores

Figura 109. Grupos de luminarias, interruptores, reguladores y sensores del modelo de aula en la tercera estrategia de mejora. Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente, la recreación del modelo de aula en el espacio *Dialux Evo* usando el balastro electrónico explicado anteriormente resultaría de la siguiente forma:



Figura 110. Perspectiva 1 del modelo de aula con la implantación del balastro electrónico como tercera estrategia.
Fuente: Elaboración propia

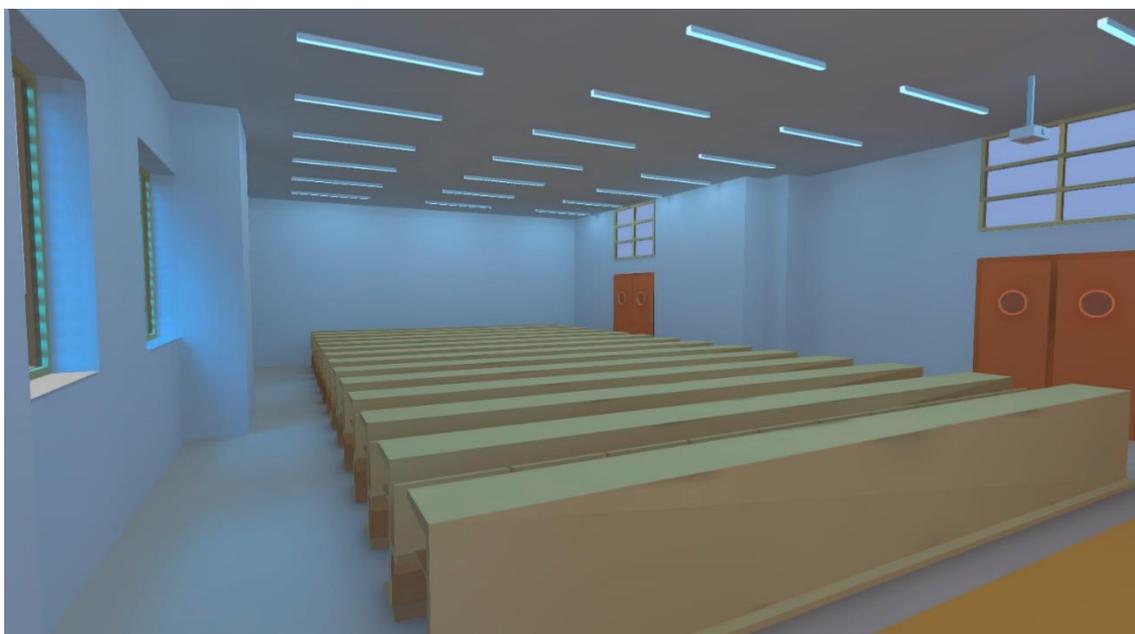


Figura 111. Perspectiva 2 del modelo de aula con la implantación del balastro electrónico como tercera estrategia.
Fuente: Elaboración propia

Se analizará el **grado de ahorro energético del balasto electrónico respecto al sistema inicial con equipo auxiliar convencional** en el modelo de aula a estudiar. La potencia consumida por los equipos de control y regulación es tan pequeña que se considerarán despreciables en el cálculo. Las especificaciones técnicas del balasto electrónico para los cálculos de potencia son las siguientes:

lamp	U_n [V]	I_n [A]	f_n [Hz]	λ	t_a [°C]
1xL58W	220...240	0.25	0; 50...60	0.99	-20...50

Figura 112. Especificaciones técnicas del balasto electrónico regulable QUICKTRONIC DIM T8 de la marca OSRAM. Fuente: Elaboración propia

La potencia necesaria para cada luminaria sería:

$$0.25A \times 0.99 \times 220V \approx 58W \text{ por luminaria}$$

Como la potencia que debería consumir una lámpara es de 58W quiere decir que el balasto electrónico es tan eficiente que no consume más potencia que la propia de la lámpara.

En el caso inicial **con el equipo auxiliar convencional, la potencia necesaria para cada luminaria era de 69W**, por tanto, con este nuevo balasto electrónico **se consumiría un 16% menos de potencia**.

Y la potencia total para las 30 luminarias sería:

58W x 30 = 1740W totales de potencia para las luminarias con balasto electrónico frente a los 2070W empleados para el funcionamiento de todas las luminarias con equipo auxiliar convencional.

Suponiendo la misma **duración anual de la actividad de 1584 horas** y el mismo **coste de 0.30€ cada kWh** que en el estudio del punto 3.3 de la situación inicial de la instalación, se estimaría un **consumo entre 1750 y 2750 kWh al año con un coste entre 529 y 827 €**. El consumo estimado en la situación inicial con equipo auxiliar convencional era entre 2100 y 3300 kWh con un coste entre 630 y 984 €, por tanto, se estaría hablando de un **ahorro energético anual entre 350 y 550 kWh y uno económico anual comprendido entre 99 y 157 €**. En consecuencia, se estaría produciendo un **ahorro energético y económico del 15%**.

Consumo de energía y coste	
Consumo	1750 - 2750 kWh/a
LENI	7 - 11 kWh/a/m ²
Coste	529 - 827 €/a

Tiempos de uso	
Día	1584 Horas por año
Noche	0 Horas por año
Factor de ausencia	0.00
Perfil de usuario activo	Centros de formación
	Aulas, salas de seminarios

Características de tacómetro	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mostrar energía de tacómetro
Tipo de visualización	[Bar chart icon] [Sun icon] [Gears icon]
Límite establecido	0.000 €/a
Precio por kWh	0.300 €
Unidad monetaria	€

Figura 113. Consumo de energía y coste con la tercera estrategia.
Fuente: Elaboración propia

Se procederá a analizar nuevamente solo los parámetros marcados por la norma DB-HE3 en el modelo de aula, puesto que son los que afectan a términos de potencia.

Recordemos que la **DB-HE3** exige una **potencia máxima instalada** de 15W/m² para edificios de uso docente. En la situación inicial con equipo auxiliar convencional no cumplía la norma. Con la instalación del balasto electrónico se procede a comprobar si esta medida sería suficiente para el cumplimiento de la norma:

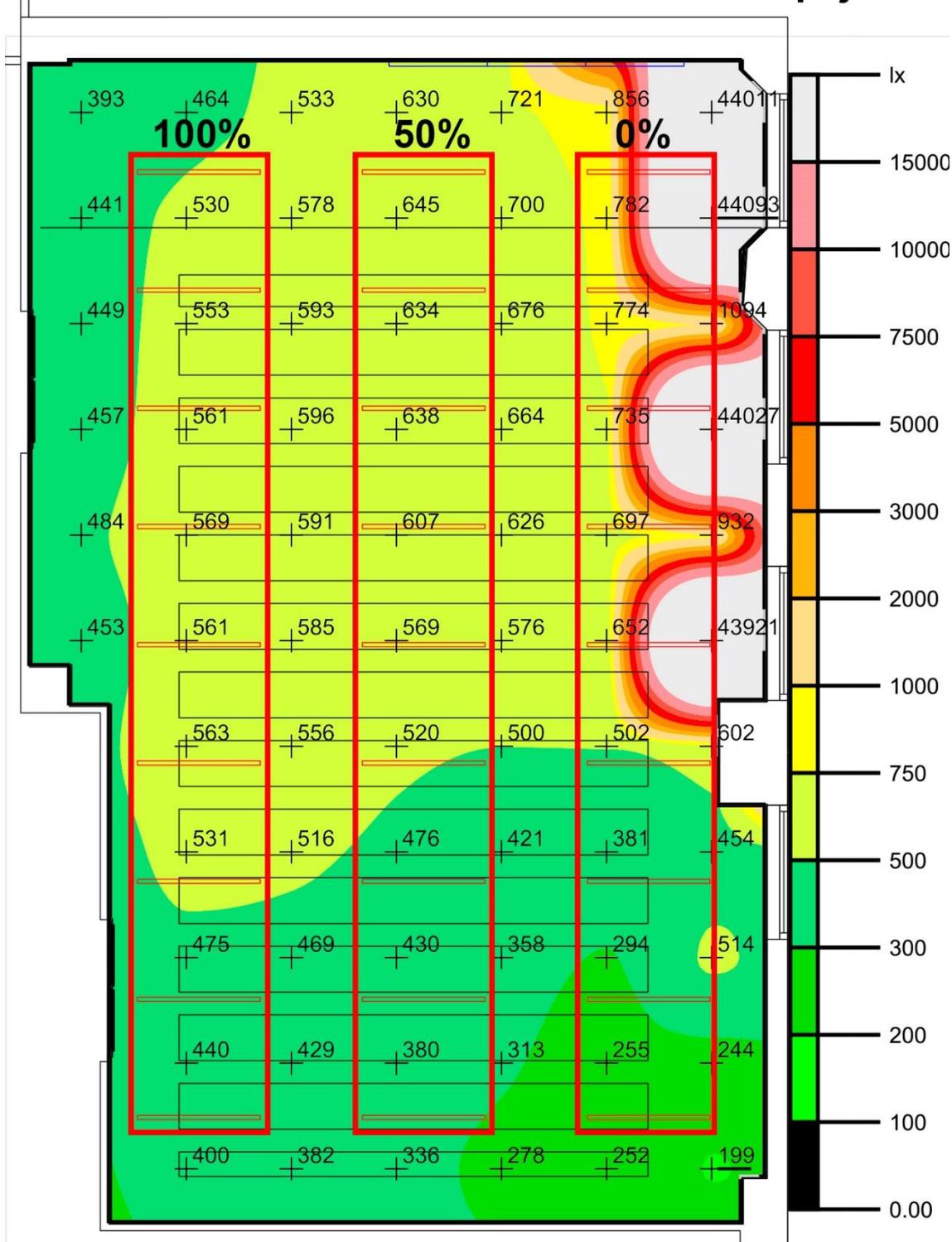
1740W / 128 m² = 13,59 W/m² Si cumpliría la norma DB-HE3.

Esta última norma también exige un **VEEI** límite de 3.5 para aulas. En la situación inicial ya se cumplía la norma y, por tanto, con el balasto electrónico también se cumplirá, pero con un valor inferior que indicará que se trata de una instalación más eficiente que la anterior:

VEEI = (1740W x 100) / (128m² x 547 lx) = 2.48 Por tanto también cumple la norma DB-HE3.

Se proponen tres de las situaciones analizadas en el punto 3.3 para comprobar cual sería la regulación que haría el sensor de luz respecto al flujo luminoso de las luminarias en las distintas líneas longitudinales y cual sería el ahorro energético y económico. Estas tres situaciones se estudiarán para los dos casos que tiene el modelo de aula.

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Despejado

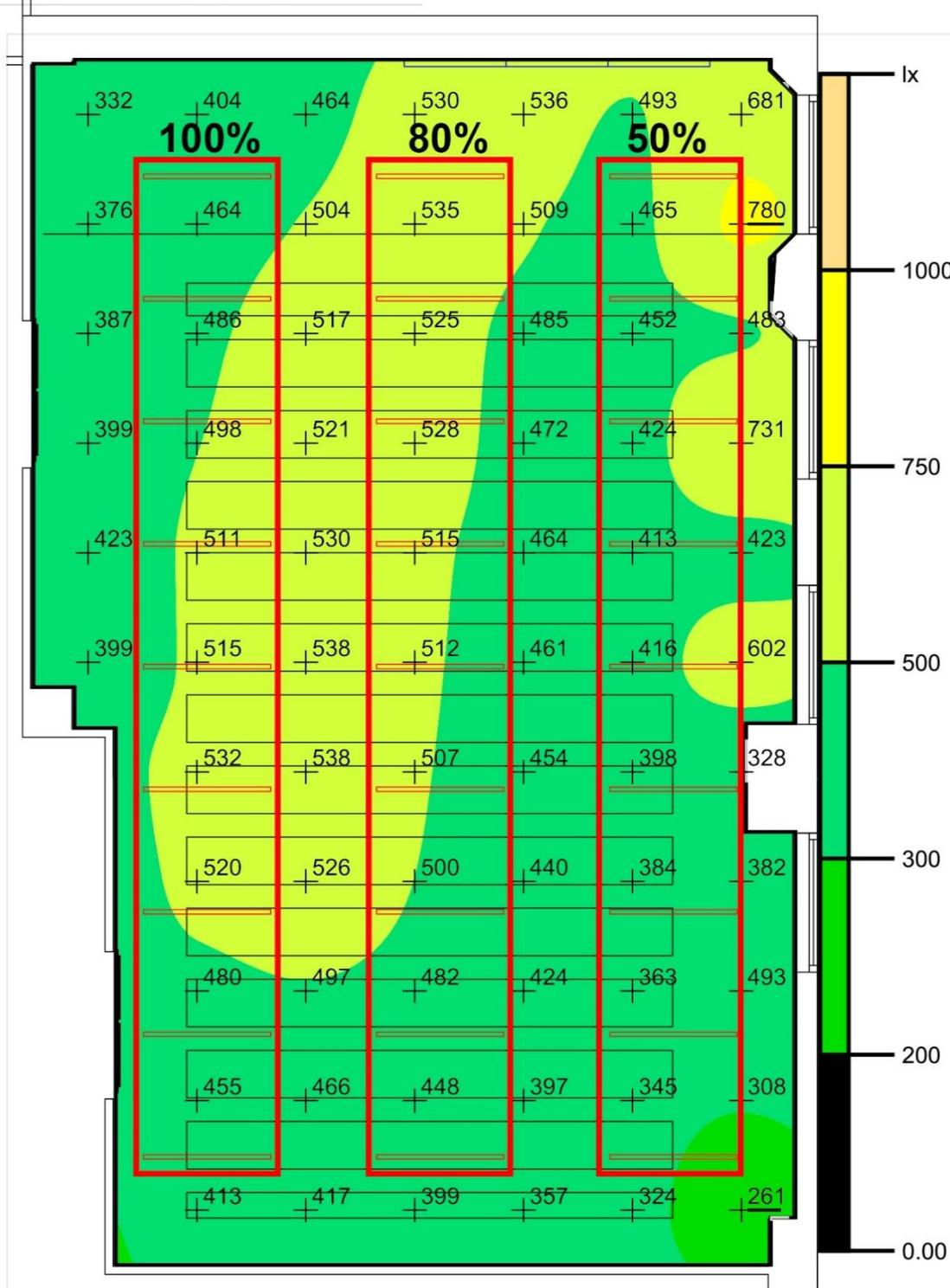


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 2946 lx, Min: 199 lx, Max: 44093 lx, Mín./medio: 0.07, Mín./máx.: 0.00

Figura 114. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Cubierto

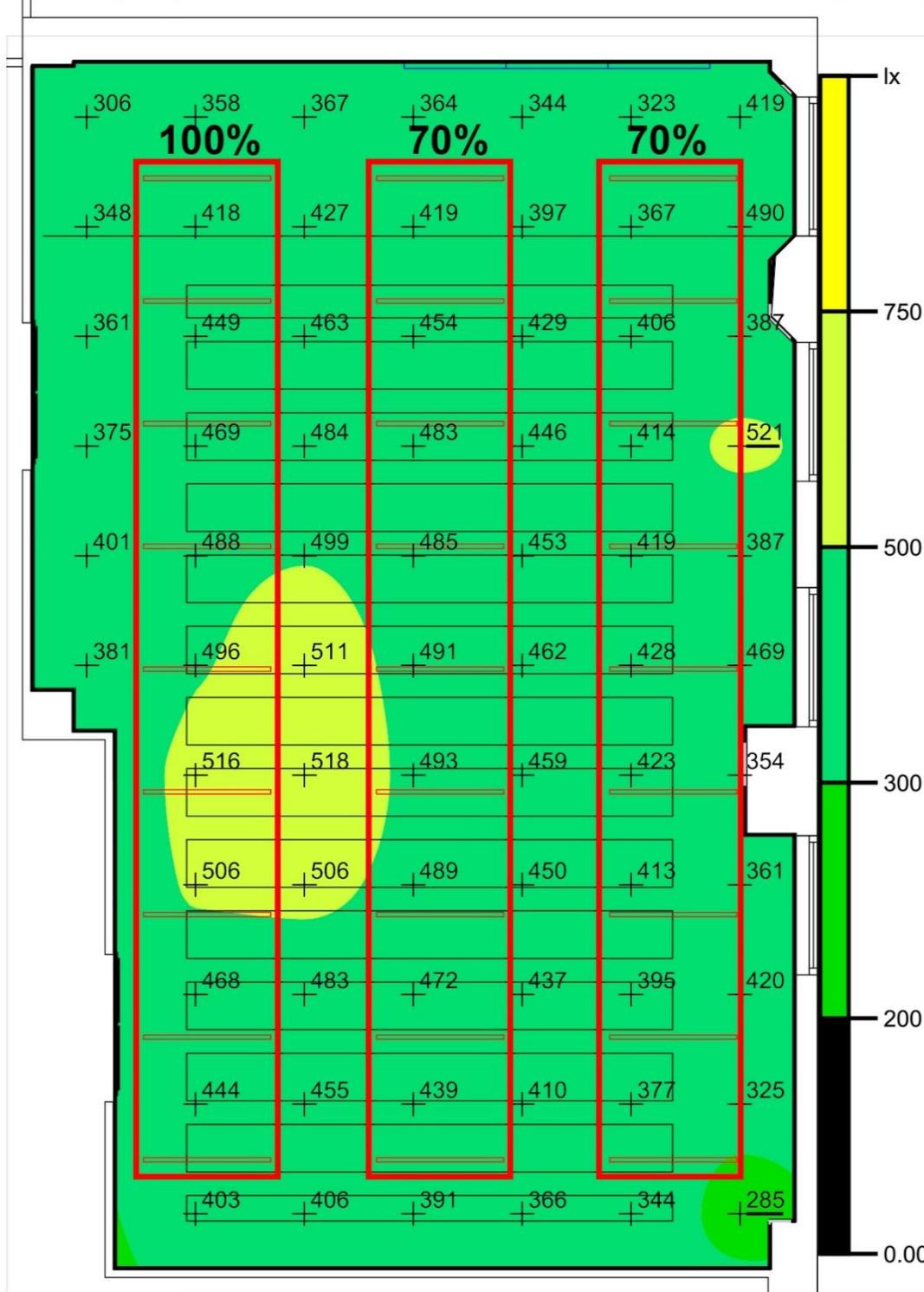


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 466 lx, Min: 261 lx, Max: 780 lx, Mín./medio: 0.56, Mín./máx.: 0.33

Figura 115. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Cubierto



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 426 lx, Min: 285 lx, Max: 521 lx, Mín./medio: 0.67, Mín./máx.: 0.55

Figura 116. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

A partir de las situaciones recreadas con *Dialux Evo* para el caso 1 con orientación noreste en el día 5/07/2016 a las 12:00, se puede comprobar las grandes diferencias de demanda de flujo luminoso de las luminarias en función de si es cielo despejado o cubierto.

Con el cielo despejado comprobamos que, para crear unos niveles adecuados de iluminancia en el aula, basta con que la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas esté funcionando al 100% y la línea central al 50%. Debido a la cantidad de luz solar que llega al aula, la línea longitudinal más próxima a las ventanas se encontraría funcionando al 0% y se recomienda el uso de algún sistema de control en las ventanas, como persianas de lamas orientables, que permitan controlar el exceso de lúmenes que llegan en las zonas circundantes.

Para esta situación concreta, el uso del sensor de luz natural conseguiría un ahorro del 50% de toda la energía consumida con respecto al sistema inicial donde estarían funcionando el 100% de las luminarias.

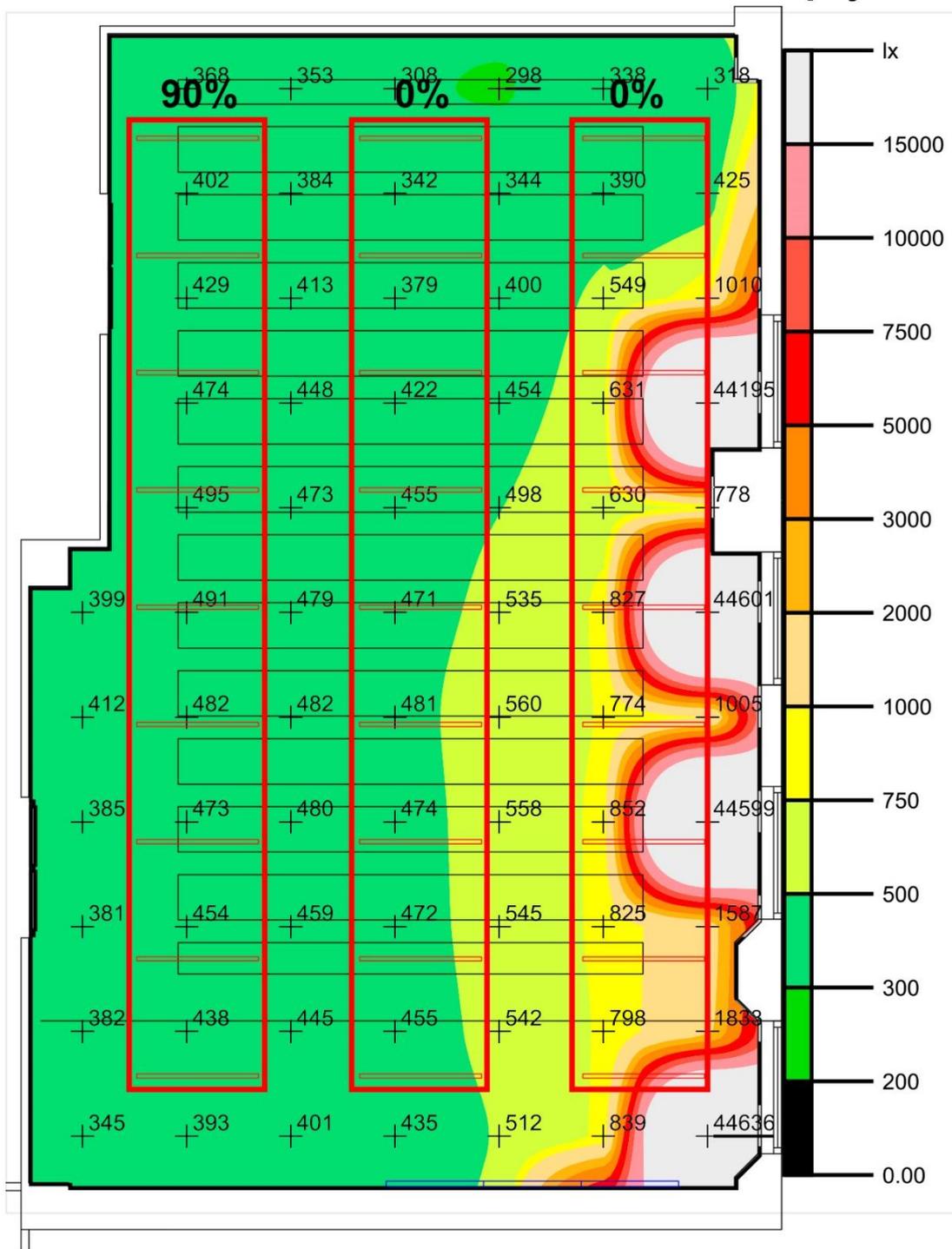
Con el cielo cubierto se obtendrían unos niveles adecuados de iluminancia con el funcionamiento al 100% de la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas, al 80% de la línea central y al 50% de la línea próxima a las ventanas.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 30% respecto al sistema inicial.

Se analiza también una simulación en el día 15/01/2016 a las 12:00 que muestra que para obtener unos niveles de iluminancia adecuados en una estación como invierno con el cielo cubierto, sólo es necesario que la línea longitudinal más alejada de las ventanas esté funcionando al 100%, la línea central al 70% y la línea próxima a las ventanas al 70%.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 25% respecto al sistema inicial.

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Despejado

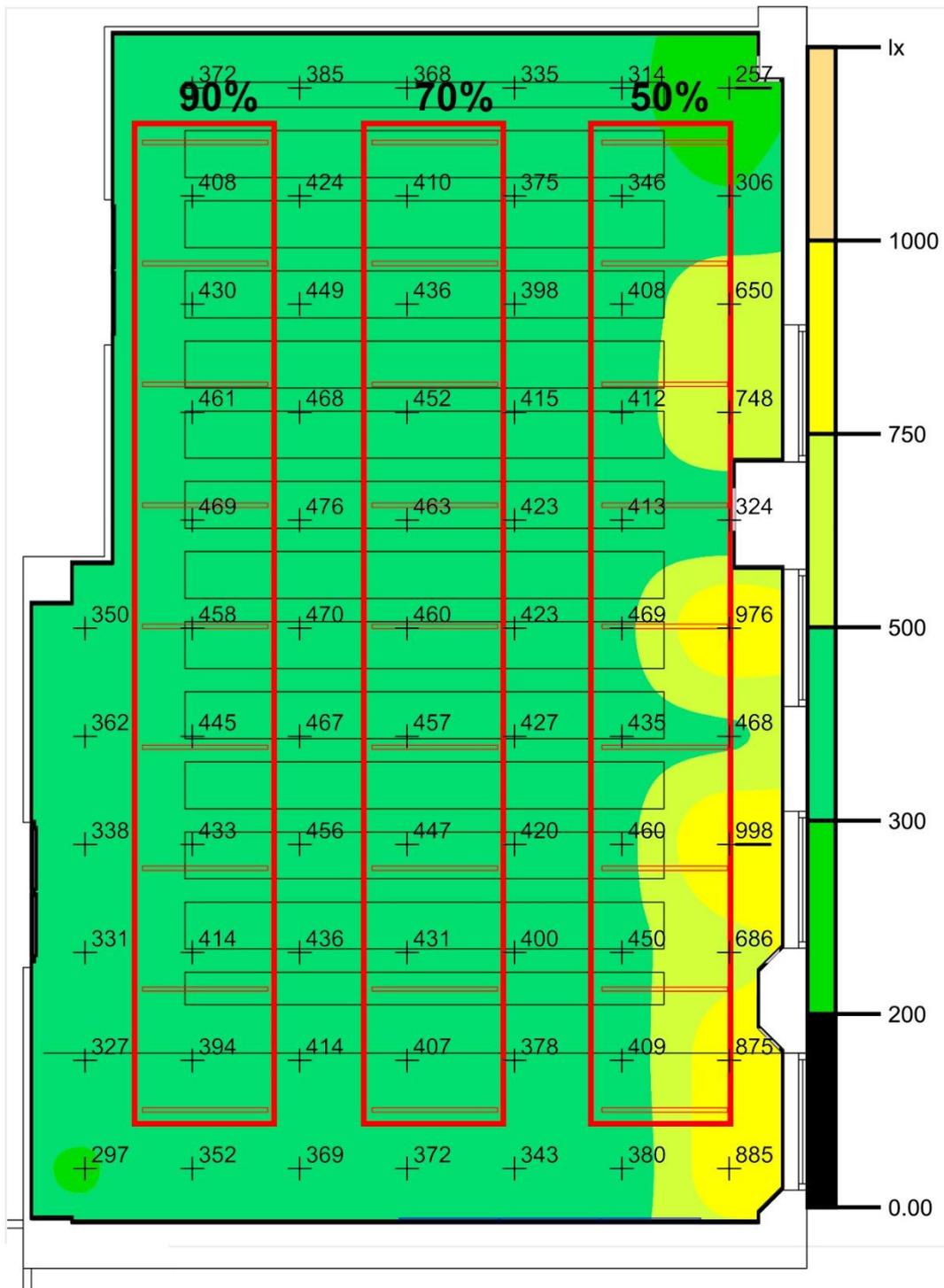


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 2978 lx, Min: 298 lx, Max: 44636 lx, Mín./medio: 0.10, Mín./máx.: 0.01

Figura 117. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Cubierto



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 447 lx, Min: 257 lx, Max: 998 lx, Mín./medio: 0.57, Mín./máx.: 0.26

Figura 118. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Cubierto



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 437 lx, Min: 279 lx, Max: 656 lx, Mín./medio: 0.64, Mín./máx.: 0.43

Figura 119. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las situaciones recreadas para el caso 2 con orientación sureste en el día 5/07/2016 a las 12:00, se puede comprobar que, al igual que en el caso 1, existen grandes diferencias de demanda de flujo luminoso en función de si es cielo despejado o cubierto.

Con el cielo despejado comprobamos que, para crear unos niveles adecuados de iluminancia en el aula, basta con que la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas esté funcionando al 90%. La línea más próxima a las ventanas y la línea central se encontrarían funcionando al 0%.

Para esta situación concreta el sensor de luz natural conseguiría un ahorro del 70% de toda la energía consumida con respecto al sistema inicial donde estarían funcionando el 100% de las luminarias.

Con el cielo cubierto se obtendrían unos niveles adecuados de iluminancia con el funcionamiento al 90% de la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas, al 70% de la línea central y al 50% de la línea próxima a las ventanas.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 30% respecto al sistema inicial.

Se analiza también una simulación en el día 15/01/2016 a las 12:00 que muestra que, para obtener unos niveles de iluminancia adecuados en una estación como invierno con el cielo cubierto, sólo es necesario que la línea longitudinal más alejada de las ventanas esté funcionando al 100%, la línea central al 70% y la línea próxima a las ventanas al 60%.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 30% respecto al sistema inicial.

Comparando el caso 1 y el caso 2 se observa que la orientación influirá de forma muy notable a la hora de regular el flujo luminoso, de ahí la importancia de instalar un sistema que admita sensores de luz natural que regulen el flujo luminoso de las luminarias.

Analizando el porcentaje de ahorro energético que se produce en las diferentes orientaciones, fechas y situaciones meteorológicas se deduce que, con este sistema de regulación del flujo luminoso de las luminarias en función del sensor de luz natural, el ahorro energético medio será de un 40%.

Esta regulación del flujo luminoso en función de la luz natural, combinada con la menor potencia consumida por luminaria gracias al uso del balasto electrónico, repercutirá en un gran ahorro energético que a su vez generará un gran ahorro económico.

Anteriormente se citaba que, **con el uso del balasto electrónico** y suponiendo todas las luminarias funcionando constantemente, **el consumo anual por aula estaba entre 1750 y 2750 kWh con un gasto económico anual entre 529 y 827 €.** Ahora, añadiendo una media

anual de un 40% de ahorro energético gracias a la regulación que realiza el sensor de luz natural, el consumo anual real estaría entre 1050 y 1650 kWh con un gasto económico real anual entre 318 y 497 € por aula.

Esto quiere decir que el ahorro energético y económico anual final por aula con respecto al sistema inicial, que tenía un consumo anual entre 2100 y 3300 kWh con un gasto económico anual entre 630 y 984 €, sería de entre 1050 y 1650 kWh por parte del consumo y de entre 312 y 487 € por parte del gasto, es decir, en torno al 50% de ahorro económico.

Como se ha comentado en las dos estrategias anteriores, dentro del coste inicial de la instalación no se tendrá en cuenta la mano de obra. Se instalarían 30 balastos electrónicos QUICKTRONIC DIM T8 de la marca OSRAM que tendrían un precio por unidad, según el catálogo de la empresa, de 32.00 €. También se instalaría el sensor de luz y movimiento DIM MULTI cuyo precio sería 175.00 € según el catálogo de la empresa. Los 6 pulsadores dobles Rocker Switch RETROTOUCH, que darían servicio a las líneas longitudinales, tendrían un precio por unidad de 22.22 € y el pulsador individual de la misma marca anterior, que daría servicio a las luminarias de la pizarra, tendría un precio de 19.87 €. Por tanto, la inversión económica inicial total para esta estrategia sería:

$(30 \times 32.00 \text{ €}) + 175.00 \text{ €} + (6 \times 22.22 \text{ €}) + 19.87 \text{ €} = 1.288 \text{ €}$ de inversión económica inicial.

Si el ahorro económico anual estaría entre 312 y 487 € significa que **la instalación, para esta tercera estrategia, se amortizaría al cabo de entre 2 a 4 años.**

Como caso especial se analizará una situación en la que, sin aporte de luz natural y mediante regulación manual, se adapten los niveles de iluminancia del aula modelo con el fin de poder visualizar la pantalla del proyector adecuadamente. Se debe destacar que el modelo de proyector usado en las aulas es el 3M X36 que tiene una intensidad de 3200 lm, por lo que el flujo luminoso de las luminarias del aula se debe adaptar de tal manera que permita visualizar correctamente el flujo emitido por el proyector.

En este estudio se ha creído adecuado **atenuar el flujo de las luminarias a un 20% de su funcionamiento para la correcta visualización de la pantalla del proyector, obteniendo un valor de 104 lx para la iluminancia media horizontal del aula.**

En cuanto a la iluminancia media perpendicular al plano de la pantalla del proyector, se obtiene un valor de 245 lx.

Esta relación de iluminancias permitirá visualizar correctamente la pantalla del proyector, generando un adecuado **contraste 2:1** y permitirá también un nivel de iluminación mínimo para los estudiantes que necesiten tomar datos de las proyecciones sobre soportes de papel en las mesas.

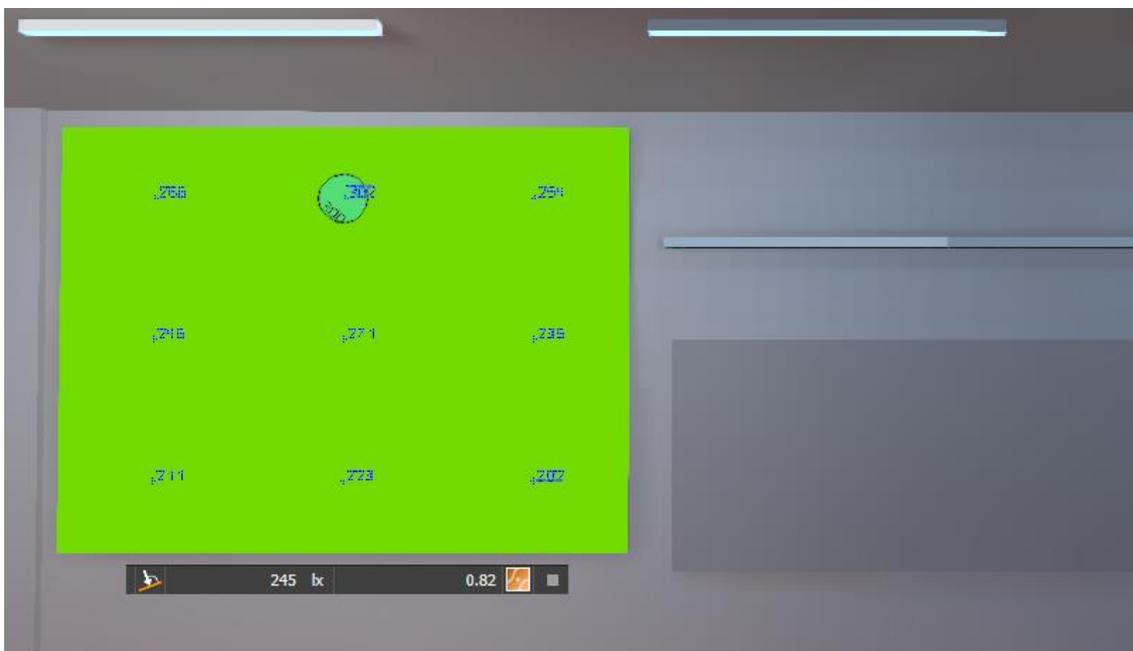
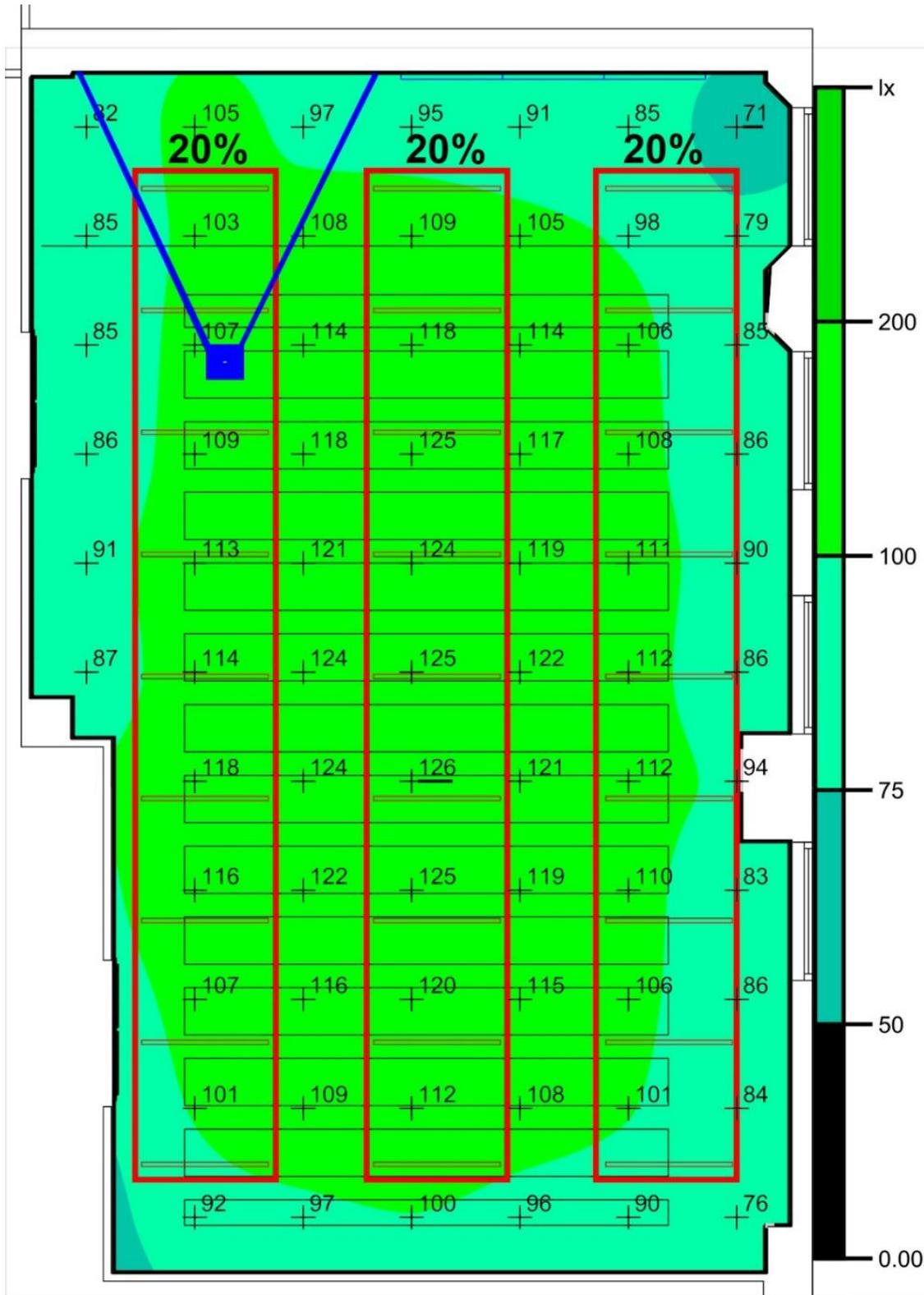


Figura 120. Niveles de iluminancia para la pantalla del proyector 3M X36 para la tercera estrategia. Fuente: Elaboración propia



Figura 121. Simulación de niveles de iluminación para la visualización del proyector para la tercera estrategia. Fuente: Elaboración propia



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 104 lx, Min: 70.6 lx, Max: 126 lx, Mín./medio: 0.68, Mín./máx.: 0.56

Figura 122. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de visualización del proyector en la tercera estrategia.
Fuente: Elaboración propia

3.4.4- Estrategia 4. Sustitución total del sistema de luminarias fluorescentes de superficie por un sistema de luminarias LED empotrables con difusor

En esta cuarta y última estrategia se llevaría a cabo una remodelación integral de todo el sistema inicial, combinando la creación de grupos de luminarias en sentido longitudinal, el uso de sistemas de control y regulación en función de la luz natural y el uso de luminarias LED con difusor en todo el aula. Estas luminarias LED, con mayor flujo luminoso y menor potencia que las luminarias fluorescentes, disminuirían en número con respecto al sistema inicial.

Por tanto, en esta estrategia, se implantarían 21 luminarias LED empotradas y de forma rectangular. También contarían con un difusor que evitaría el deslumbramiento directo y su distribución luminosa sería directa, simétrica y extensiva.

Estas 21 luminarias LED estarían repartidas en 3 filas longitudinales de 7 luminarias cada una. El eje de las luminarias estaría dispuesto de forma paralela al frente de las ventanas y a la mirada de los estudiantes evitando deslumbramientos directos.

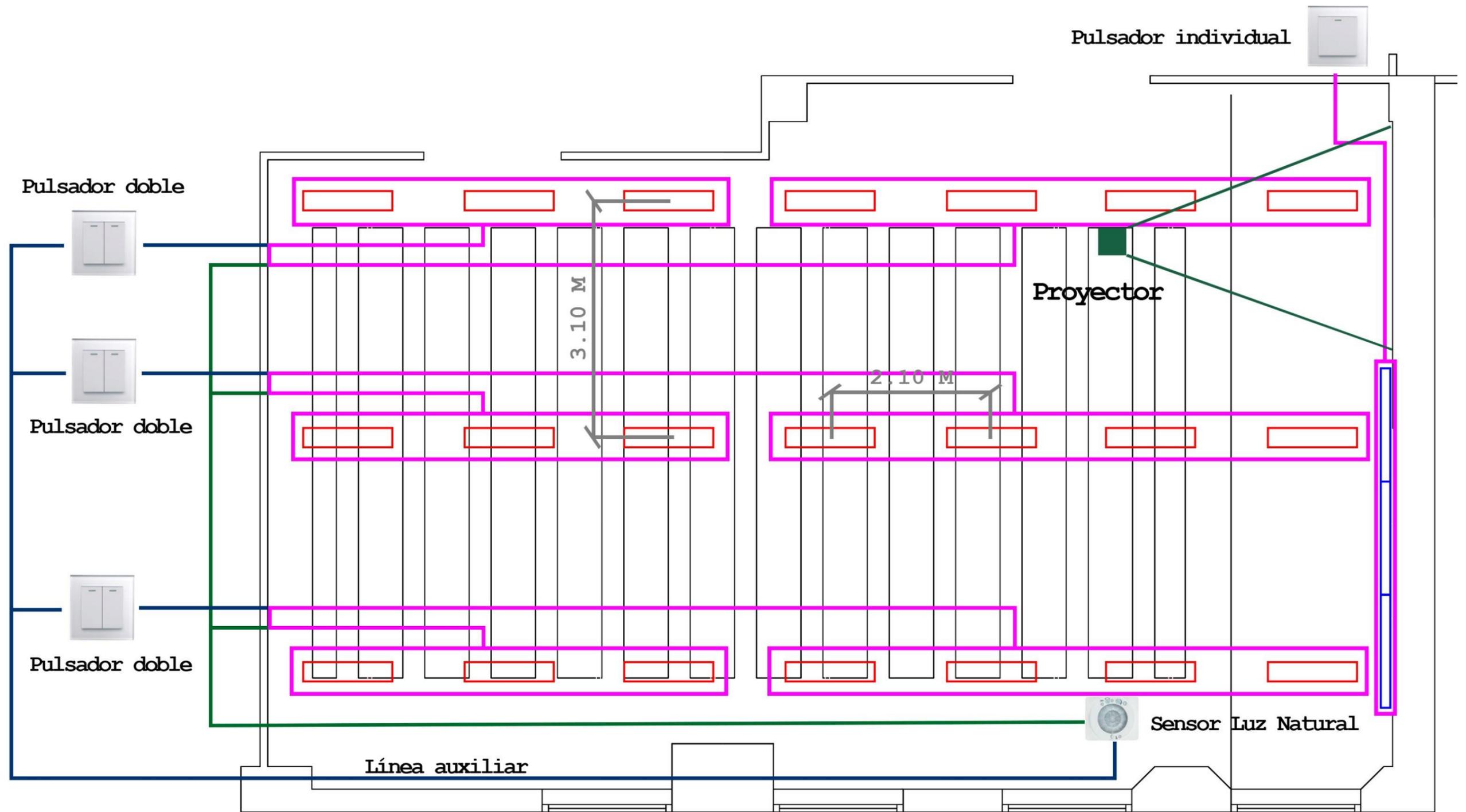
Al igual que en la estrategia anterior, se implantaría el mismo sistema de control y regulación mediante un sistema de regulación automático con un sensor lumínico y de movimiento. También se instalaría una línea auxiliar que permitiría la regulación manual mediante tres pulsadores dobles. Cada pulsador doble controlaría la parte delantera, que agruparía 4 luminarias, y la parte trasera, que agruparía 3 luminarias, de cada fila longitudinal.

También se instalaría una línea de 3 luminarias LED de pared con distribución asimétrica sobre la pizarra, a una altura de 3 metros, generando una iluminación localizada sobre su superficie para una correcta visualización sin reflejos por parte de los alumnos. Esta línea sólo tendría una regulación manual independiente por parte de un pulsador individual.

En esta estrategia, aunque no sea cuantificable, también se aconseja la instalación de un sistema de lamas orientables para regular el flujo de la luz natural a través de las ventanas y así poder evitar deslumbramientos por parte de la luz natural. Unido a esto, también se aconseja dar al mobiliario un acabado mate evitando brillos y reflejos.

Cabe destacar que se trataría de la estrategia en la que mayor inversión económica inicial se debería hacer, pero también la que mayor ahorro energético y económico produciría a largo plazo.

Según lo comentado anteriormente, los grupos de luminarias y sus elementos de control y regulación se instalarían según el siguiente esquema:



Situación Normal: Regulación automática con Sensor de Luz
Situación Auxiliar: Regulación manual con Pulsadores

Figura 123. Grupos de luminarias, interruptores, reguladores y sensores del modelo de aula en la cuarta estrategia de mejora. Fuente: Elaboración propia

El tipo de luminaria empotrable con difusor que se instalaría sería el modelo U25M1/LEDN40S de la marca ETAP con las siguientes especificaciones técnicas:

Alumbrado

U25M1/LEDN40S

luminaria empotrada - difusor - rectangulares - RAL9210-blanco
 Carcasa en chapa de acero lacado, IP40 cara inferior
 luminaria individual
 flujo luminoso de la luminaria: 4047 lm
 flujo luminoso específico de la luminaria: 134 lm/W

► Características mecánicas

dimensiones: (lxbxh) 1196 mm x 296 mm x 85 mm
 modulación de techo: M300
 peso: 7.3 kg

► Óptica

con difusor - MesoOptics de alta eficiencia y distribución de la luz

► Lámpara

tipo de la lámpara: LED LP
 temperatura de color: 4000K / blanco neutro

► Eléctrico carcasa

S: driver no regulable
 tensión: 220-240V
 frecuencia: 50-60Hz AC
 conexión Wieland: Conector Wieland 1x3 polos con cable incluido
 consumo de potencia: 30.3 W
 factor de potencia >= 0.9
 seguridad fotobiológica: IEC/TR 62778 : riesgo grupo 0 ilimitado

► Intensidad luminosa

► Esquema

Intensidad luminosa en cd/klm

gamma	C 0	C 45	C 90
0°	512	512	512
5°	508	508	508
10°	500	500	500
15°	488	488	488
20°	486	486	486
25°	439	439	439
30°	405	405	405
35°	358	358	358
40°	291	291	291
45°	218	218	218
50°	181	181	181
55°	120	120	120
60°	92	92	92
65°	70	70	70
70°	51	51	51
75°	34	34	34
80°	17	17	17
85°	4	4	4
90°	0	0	0

Figura 124. Especificaciones técnicas luminaria empotrable con difusor LED U25M1/LEDN40S ETAP. Fuente: <http://www.etaplighing.com/products/productdetail.aspx?code=U25M1/LEDN40S&l=es>

El tipo de luminaria de pared que se instalaría para la pizarra sería el modelo R750R1/LEDN3645SX2 de la marca ETAP con las siguientes especificaciones técnicas:

Alumbrado

R750R1/LEDN3645SX2

luminaria adosada - lente - rectangulares - gris
 carcasa en chapa de acero lacado
 diseño : EER design
 luminaria individual
 flujo luminoso de la luminaria: 4700 lm
 flujo luminoso específico de la luminaria: 134 lm/W

▶ Características mecánicas

dimensiones: (lxbxh) 1500 mm x 150 mm x 50 mm
 peso: 6.1 kg

▶ Óptica

lente - LED+LENS

▶ Lámpara

tipo de la lámpara: LED HP
 temperatura de color: 4000K / blanco neutro

▶ Eléctrico carcasa

tensión: 220-240V
 frecuencia: 50-60Hz AC
 consumo de potencia: 35.2 W
 factor de potencia >= 0.9
 seguridad fotobiológica: IEC/TR 62778 : riesgo grupo 1 ilimitado

▶ Intensidad luminosa

▶ Esquema

Intensidad luminosa en cd/klm					
gamma	C 0	C 45	C 90	C 135	C 180
0°	269	269	269	269	269
5°	314	305	281	245	227
10°	371	359	307	227	188
15°	432	427	340	211	145
20°	482	495	373	188	101
25°	510	559	395	158	68
30°	524	617	399	124	50
35°	501	658	390	98	44
40°	438	688	370	77	45
45°	339	644	339	62	44
50°	259	585	294	51	39
55°	209	498	232	41	32
60°	159	404	165	34	23
65°	104	274	85	23	14
70°	25	115	31	10	4
75°	5	15	14	4	2
80°	1	1	2	1	0
85°	0	0	0	0	0
90°	0	0	0	0	0

Figura 125. Especificaciones técnicas luminaria pared R750R1/LEDN3645SX2 ETAP. Fuente: <http://www.etaplighting.com/products/productdetail.aspx?code=R750R1/LEDN3645SX2&l=es>

Por tanto, la recreación del modelo de aula en el espacio Dialux Evo usando la distribución y tipo de luminarias LED expuestas anteriormente, resultaría de la siguiente forma:



Figura 126. Perspectiva 1 del modelo de aula con luminarias LED empotrables con difusor para la cuarta estrategia.
Fuente: Elaboración propia

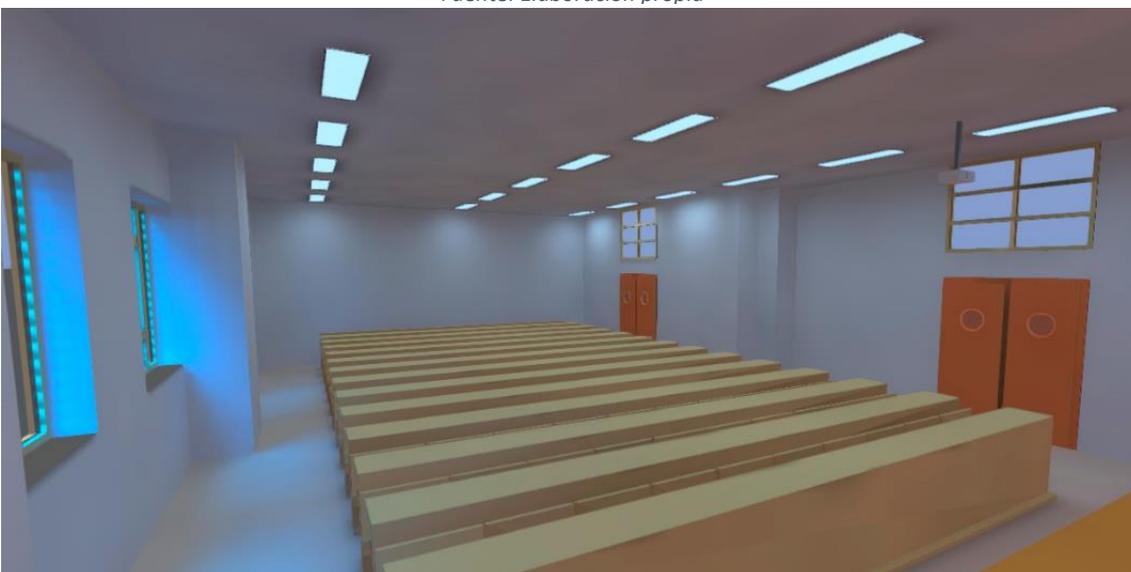


Figura 127. Perspectiva 2 del modelo de aula con luminarias LED empotrables con difusor para la cuarta estrategia.
Fuente: Elaboración propia

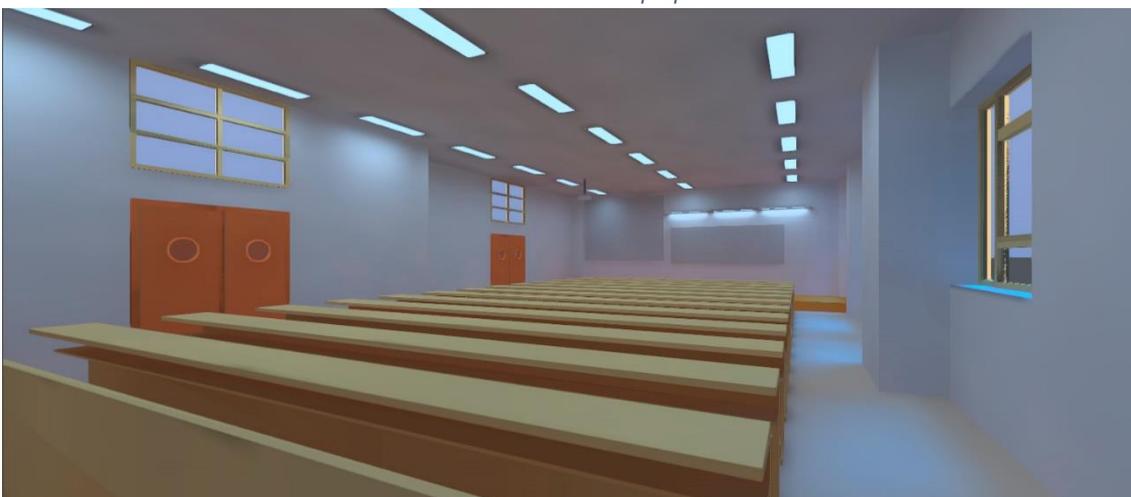


Figura 128. Perspectiva 3 del modelo de aula con luminarias LED empotrables con difusor para la cuarta estrategia.
Fuente: Elaboración propia

Ambos tipos de luminarias cuentan con un driver o fuente de alimentación que permitiría su regulación mediante el protocolo 1-10V.

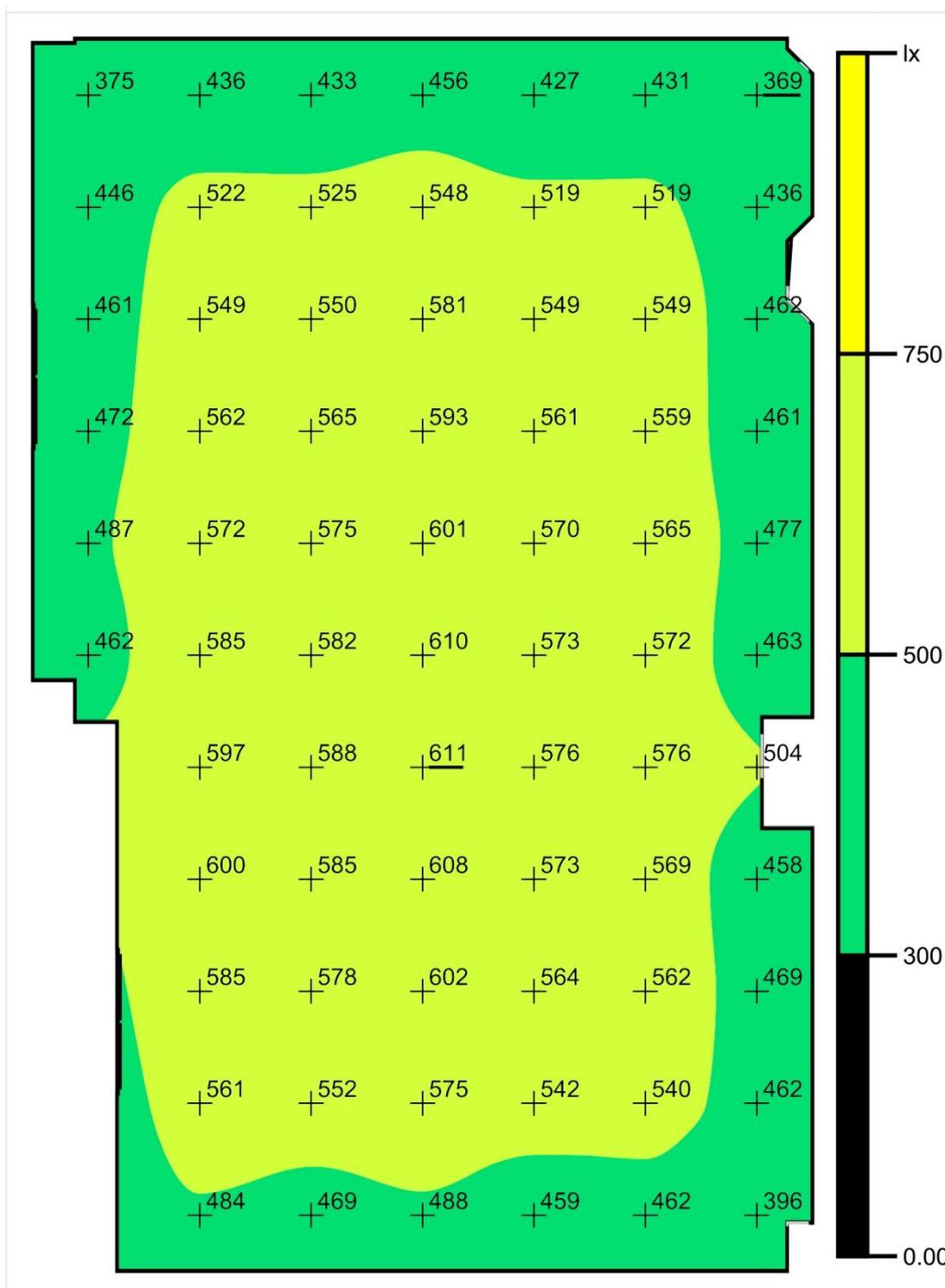
Se procederá a analizar nuevamente los parámetros marcados por las normas UNE-EN 12464 y DB-HE3 en el modelo de aula para comprobar el cumplimiento de la instalación con las lámparas LED empotrables con difusor y ver si mejora en alguno de los criterios con respecto a la instalación inicial.

El **Ra** de este tipo de tubo LED es **85**, superior al 80 del tubo fluorescente del estado inicial y, por tanto, **cumple la norma UNE-EN 12464**

En cuanto a la **iluminancia media horizontal mantenida (Em)**, a una altura de **plano útil** correspondiente a **0.80m** y en la **totalidad de la superficie del aula**, el software *Dialux Evo* arrojó **525 lx**, cifra que, siendo inferior a los 547 lx del sistema inicial con tubos fluorescentes, es superior a los 300 exigidos por la norma y, por tanto, **se cumple sobradamente la norma UNE-EN 12464-1 aunque no mejora la instalación inicial.**

En lo relativo a la uniformidad media (Uo), en la **totalidad de la superficie del aula** y a una altura de **0.80m**, *Dialux Evo* arrojó el dato **0.70**, cifra superior a los 0.67 del sistema inicial y superior al 0.6 exigido por la norma, por tanto, también **cumple la norma UNE-EN 12464-1 y mejora la instalación inicial.**

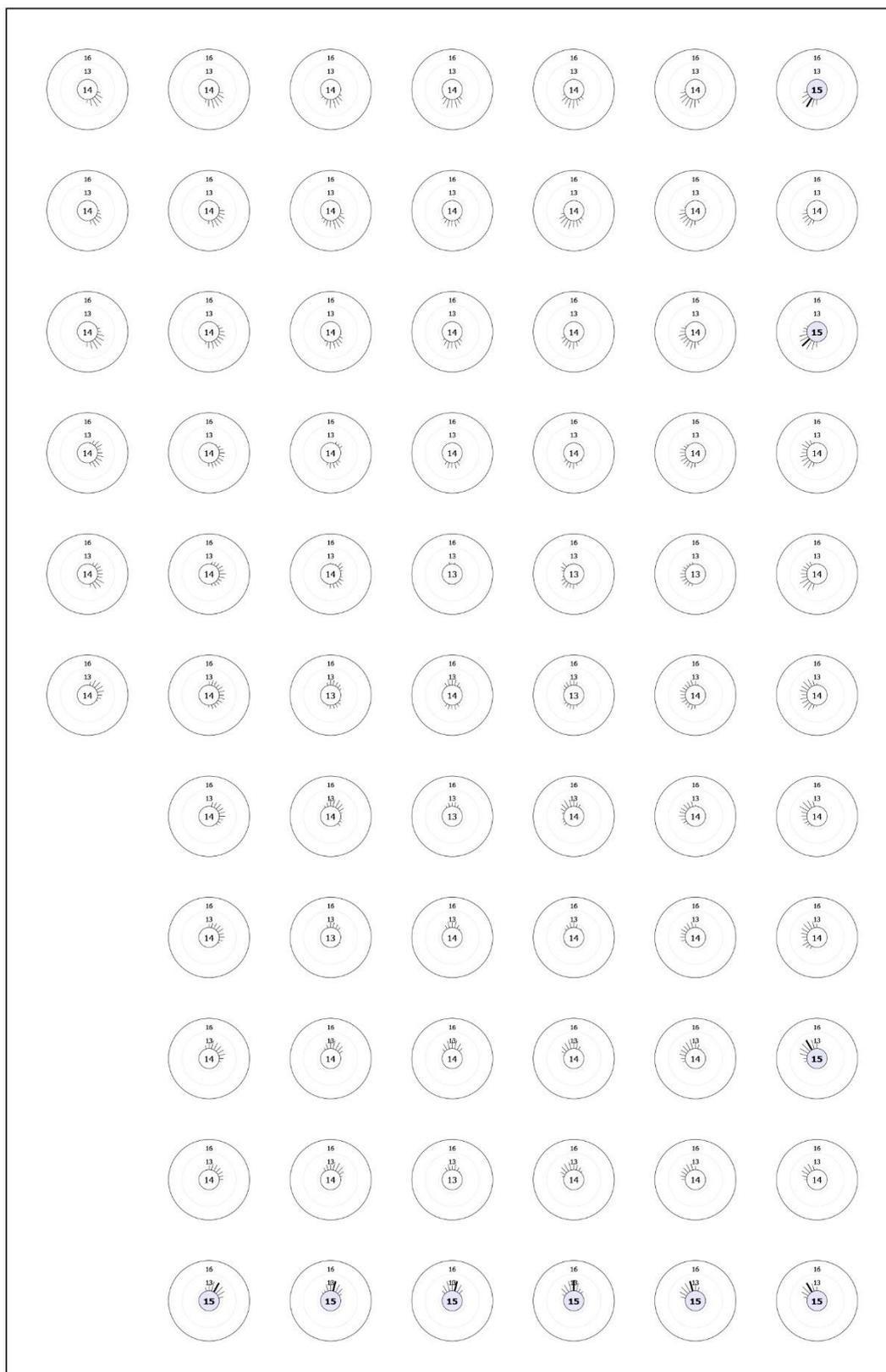
El **UGR** que se sitúa a una altura de 1.2 m correspondiente a la visión de una persona sentada, tiene un valor exigido por la norma de 19. En este caso, el dato arrojado por *Dialux Evo* es de **14.7**, cifra muy inferior a los 27.4 del sistema inicial con lámparas fluorescentes. Además **cumple la norma UNE-EN 12464-1, evitando totalmente el deslumbramiento directo con el uso de estas luminarias LED.**



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 525 lx, Min: 369 lx, Max: 611 lx, Mín./medio: 0.70, Mín./máx.: 0.60

Figura 129. Trama de 72 puntos de cálculo de iluminancia horizontal en el modelo de aula a estudiar para la cuarta estrategia. Fuente: Elaboración propia



UGR (Trama)

Max: 14.7, Área del ángulo visual: 0.0° - 360.0°, Amplitud de paso: 15.0°, Valor límite: 19.0, Máx. deslumbramiento a: 120.0°.

Figura 130. Valores UGR en el modelo de aula a estudiar para la cuarta estrategia. Fuente: Elaboración propia

Se analizará el grado de **ahorro energético del sistema con luminarias LED empotrables con difusor respecto al sistema inicial con lámparas fluorescentes con equipo auxiliar convencional.**

La potencia necesaria para cada luminaria de techo sería 30.3W y para cada luminaria de pared sería 35.2W.

La potencia total para las 21 + 3 luminarias sería:

$30.3W \times 21 + 35.2W \times 3 = 742W$ totales de potencia para las luminarias LED frente a los 2070W empleados para el funcionamiento de todas las luminarias fluorescentes con equipo auxiliar convencional en el sistema inicial.

Suponiendo la misma **duración anual de la actividad de 1584 horas** y el mismo **coste de 0.30€ cada kWh** que en el estudio del punto 3.3 de la situación inicial de la instalación , se estimaría un **consumo entre 750 y 1200 kWh al año con un coste entre 231 y 357 €.** El consumo estimado en la situación inicial con equipo auxiliar convencional era entre 2100 y 3300 kWh con un costo entre 630 y 984 €, por tanto, se estaría hablando de un **ahorro energético anual de entre 1350 y 2100 kWh y un ahorro económico anual comprendido entre 399 y 627 €.** Estas cantidades supondrían un **ahorro energético y económico en torno al 65%.**

Consumo de energía y coste	
Consumo	750 - 1200 kWh/a
LENI	3 - 5 kWh/a/m ²
Coste	231 - 357 €/a

Tiempos de uso	
Día	1584 Horas por año
Noche	0 Horas por año
Factor de ausencia	0.00

Perfil de usuario activo	
Centros de formación	▼
Aulas, salas de seminarios	▼

Características de tacómetro	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mostrar energía de tacómetro
Tipo de visualización	
Límite establecido	0.000 €/a
Precio por kWh	0.300 €
Unidad monetaria	€

Figura 131. Consumo de energía y coste con la cuarta estrategia.
Fuente: Elaboración propia

Recordemos que la **DB-HE3** exige una **potencia máxima instalada** de 15W/m² para edificios de uso docente. En la situación inicial con lámparas fluorescentes y equipo auxiliar convencional no cumplía la norma. En la instalación con este tipo de luminarias LED se procede a comprobar si esta medida sería suficiente para el cumplimiento de la norma:

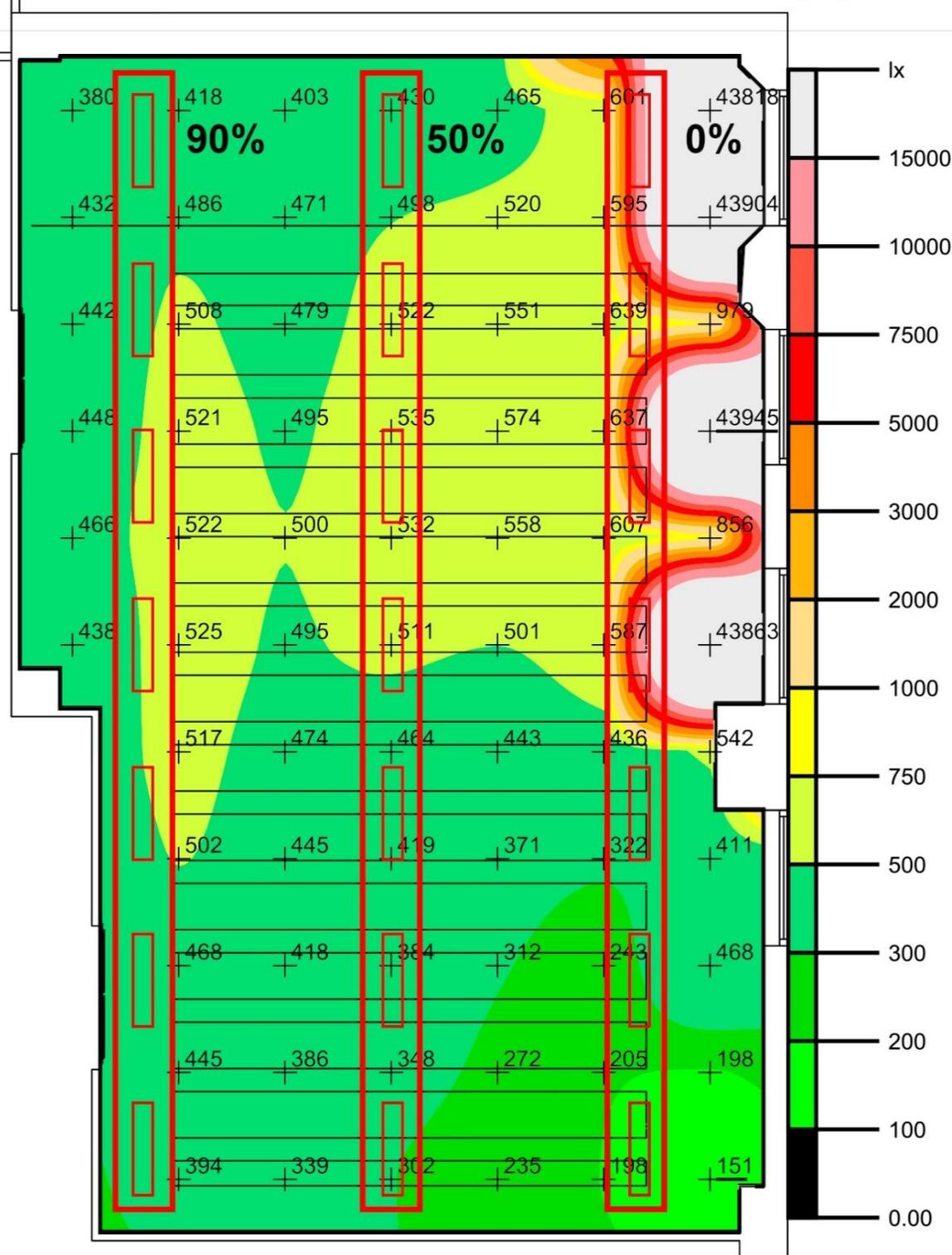
742W / 128 m² = 5,796 W/m² Si cumpliría sobradamente la norma DB-HE3.

Esta última norma también exige un **VEEI** límite de 3.5 para aulas. En la situación inicial ya se cumplía la norma y, por tanto, con lámparas LED también se cumplirá, pero con un valor inferior que indicará que se trata de una instalación más eficiente energéticamente respecto a la anterior:

VEEI = (742W x 100) / (128m² x 492 lx) = 1.17 Por tanto también cumple sobradamente la norma DB-HE3 y demuestra que se trataría de una instalación muy eficiente energéticamente.

Al igual que en la estrategia anterior, se proponen tres de las situaciones analizadas en el punto 3.3 para comprobar cual sería la regulación que haría el sensor de luz respecto al flujo luminoso de las luminarias en las distintas líneas longitudinales y cual sería el ahorro energético y económico. Estas dos situaciones se estudiarán para los dos casos que tiene el modelo de aula.

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Despejado

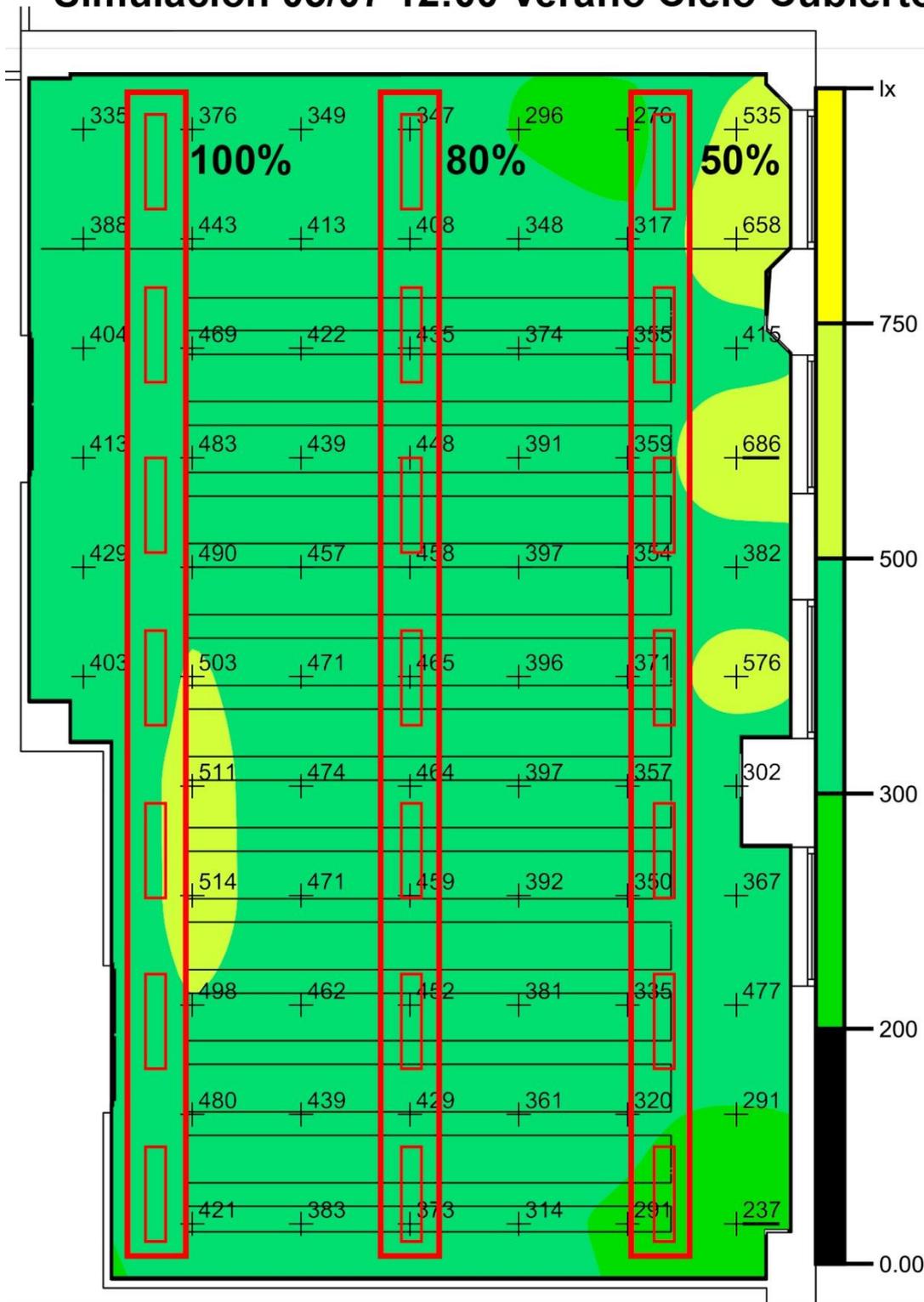


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 2872 lx, Min: 151 lx, Max: 43945 lx, Mín./medio: 0.05, Mín./máx.: 0.00

Figura 132. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Cubierto

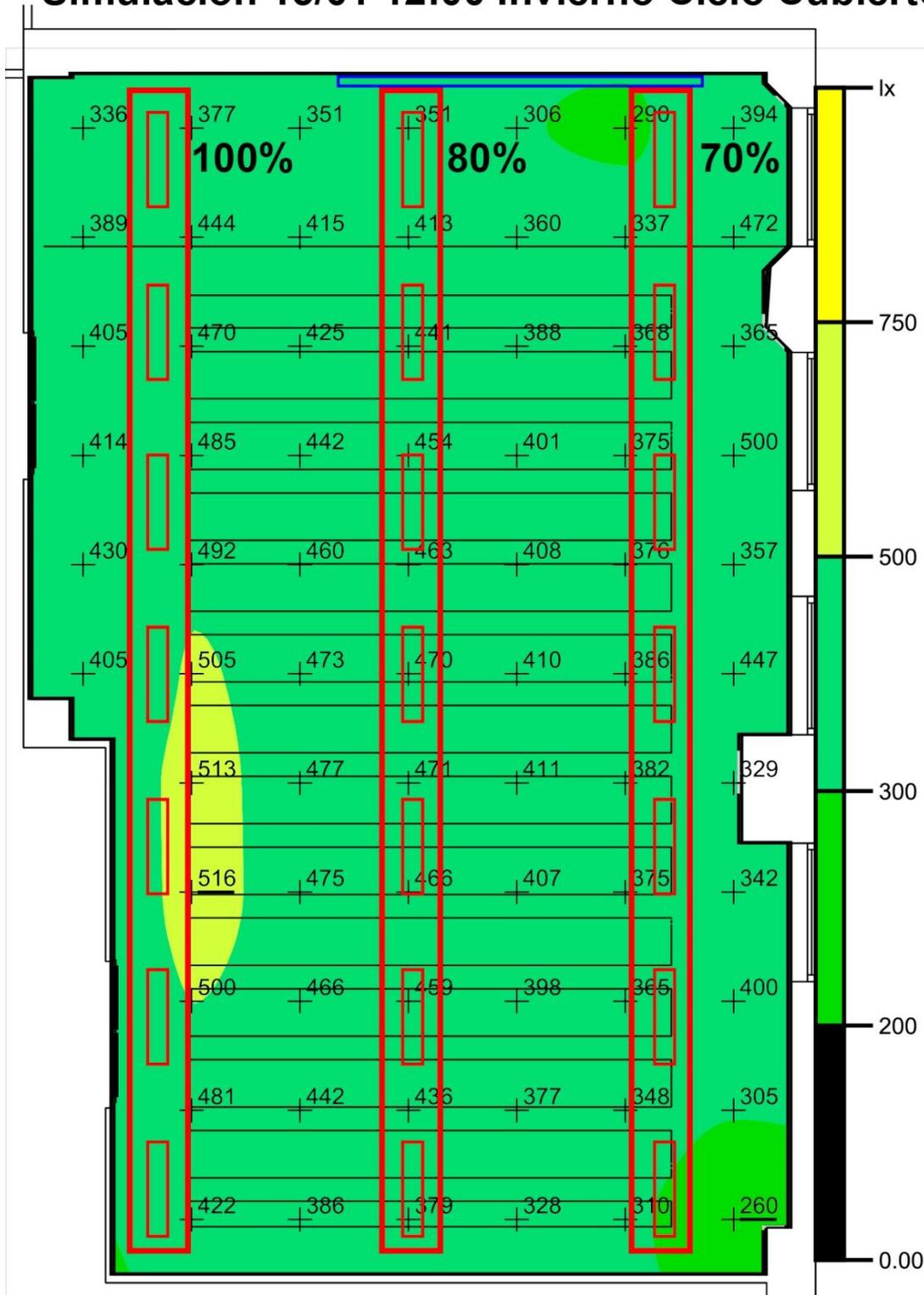


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 413 lx, Min: 237 lx, Max: 686 lx, Mín./medio: 0.57, Mín./máx.: 0.35

Figura 133. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

Caso 1. Aula B2. Orientación Noreste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Cubierto



Escala: 1 : 100

Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 409 lx, Min: 260 lx, Max: 516 lx, Mín./medio: 0.64, Mín./máx.: 0.50

Figura 134. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 1. Fuente: Elaboración propia

A partir de las situaciones recreadas con *Dialux Evo* para el caso 1 con orientación noreste en el día 5/07/2016 a las 12:00, se puede comprobar que, como en la estrategia anterior, existen grandes diferencias de demanda de flujo luminoso de las luminarias en función de si es cielo despejado o cubierto.

Con el cielo despejado comprobamos que, para crear unos niveles adecuados de iluminancia en el aula, basta con que la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas esté funcionando al 90% y la línea central al 50%. Debido a la cantidad de luz solar que llega al aula, la línea longitudinal más próxima a las ventanas se encuentra funcionando al 0% y se recomienda, al igual que en la estrategia del balasto electrónico, el uso de algún sistema de control en las ventanas como persianas de lamas orientables que permitan controlar el exceso de lúmenes que llegan en las zonas circundantes.

Para esta situación concreta, el uso del sensor de luz natural conseguiría un ahorro del 55% de toda la energía consumida con respecto al sistema inicial donde estarían funcionando el 100% de las luminarias.

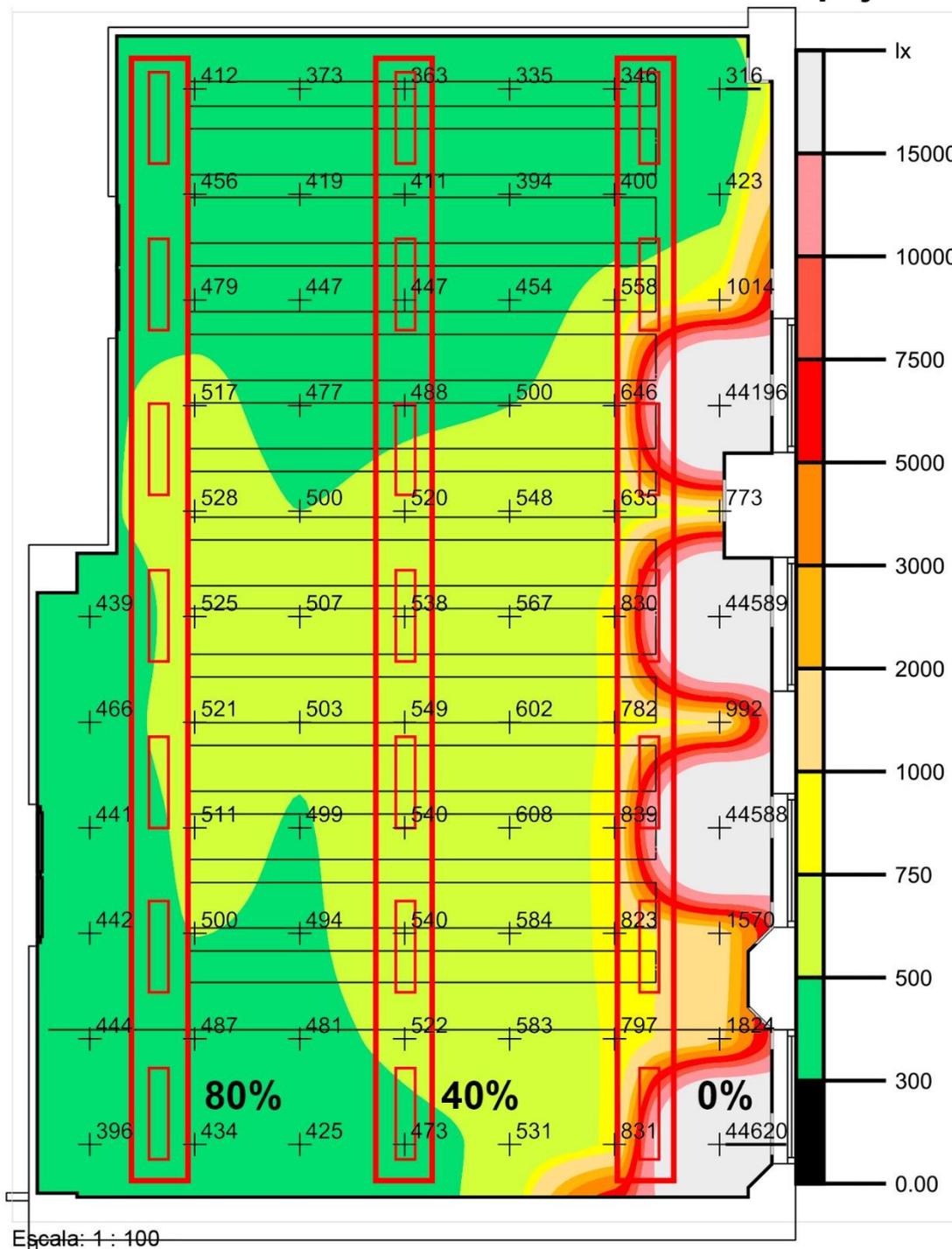
Con el cielo cubierto se obtendrían unos niveles adecuados de iluminancia con el funcionamiento al 100% de la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas, al 80% de la línea central y al 50% de la línea próxima a las ventanas. Esta situación coincide totalmente con la de la estrategia anterior.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 30% respecto al sistema inicial.

Se analiza también una simulación en el día 15/01/2016 a las 12:00 que muestra que, para obtener unos niveles de iluminancia adecuados en una estación como invierno con el cielo cubierto, sólo es necesario que la línea longitudinal más alejada de las ventanas esté funcionando al 100%, la línea central al 80% y la línea próxima a las ventanas al 70%.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 20% respecto al sistema inicial.

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Despejado

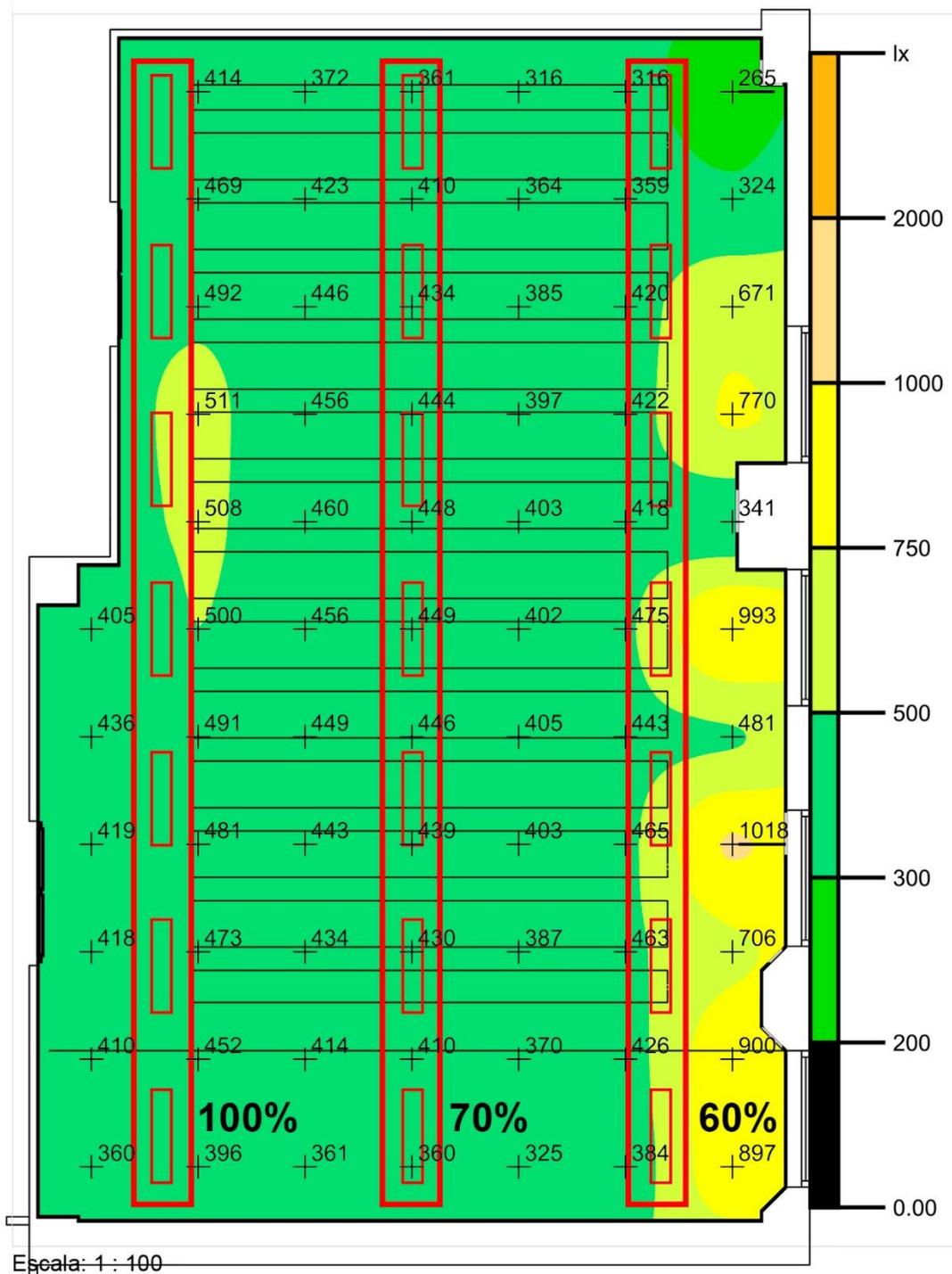


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 3008 lx, Min: 316 lx, Max: 44620 lx, Mín./medio: 0.11, Mín./máx.: 0.01

Figura 135. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo despejado en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 05/07 12:00 Verano Cielo Cubierto

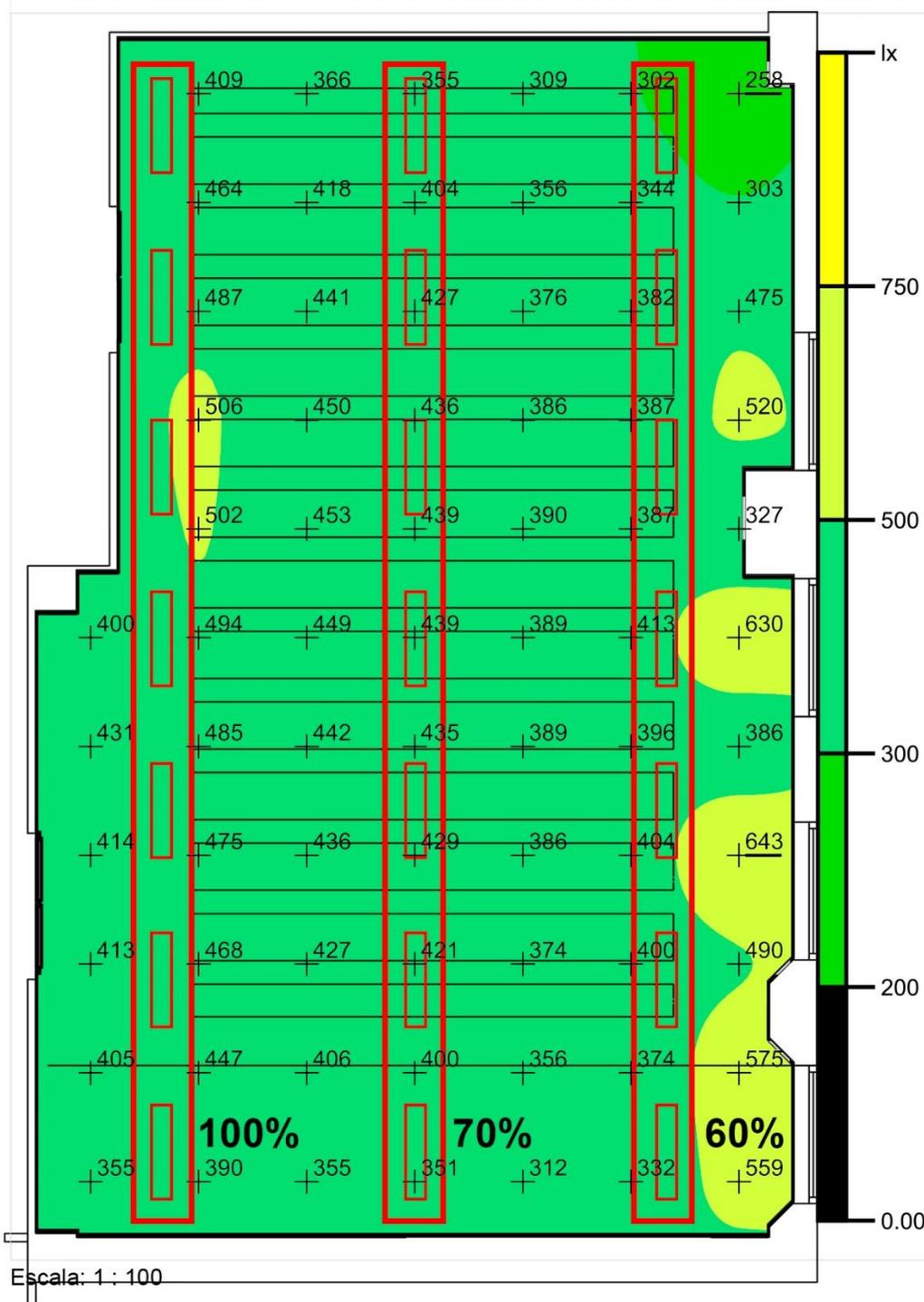


Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 460 lx, Min: 265 lx, Max: 1018 lx, Mín./medio: 0.58, Mín./máx.: 0.26

Figura 136. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en verano con cielo cubierto en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

Caso 2. Aula B1. Orientación Sureste Simulación 15/01 12:00 Invierno Cielo Cubierto



Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 417 lx, Mín: 258 lx, Max: 643 lx, Mín./medio: 0.62, Mín./máx.: 0.40

Figura 137. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de horario de mañana en invierno con cielo cubierto en el caso 2. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las situaciones recreadas para el caso 2 con orientación sureste en el día 5/07/2016 a las 12:00, se puede comprobar que, al igual que en el caso 1, existen grandes diferencias de demanda de flujo luminoso en función de si es cielo despejado o cubierto.

Con el cielo despejado comprobamos que, para crear unos niveles adecuados de iluminancia en el aula, basta con que la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas esté funcionando al 80%. La línea central estaría funcionando al 40% mientras que línea más próxima las ventanas se encontraría funcionando al 0%.

Para esta situación concreta el sensor de luz natural conseguiría un ahorro del 60% de toda la energía consumida con respecto al sistema inicial donde estarían funcionando el 100% de las luminarias.

Con el cielo cubierto se obtendrían unos niveles adecuados de iluminancia con el funcionamiento al 100% de la línea longitudinal más alejada del frente de ventanas, al 70% de la línea central y al 60% de la línea próxima a las ventanas.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 25% respecto al sistema inicial.

Se analiza también una simulación en el día 15/01/2016 a las 12:00 que muestra que, para obtener unos niveles de iluminancia adecuados en una estación como invierno con el cielo cubierto, sólo es necesario que la línea longitudinal más alejada de las ventanas esté funcionando al 100%, la línea central al 70% y la línea próxima a las ventanas al 60%. Esta situación coincide totalmente con la de la estrategia anterior.

Con esta situación se estaría hablando de un ahorro energético en torno al 30% respecto al sistema inicial.

Comparando el caso 1 y el caso 2 se observa que la orientación influirá de forma muy notable a la hora de regular el flujo luminoso, de ahí la importancia de instalar un sistema que admita sensores de luz natural que regulen el flujo luminoso de las luminarias.

Analizando el porcentaje de ahorro energético que se produce en las diferentes orientaciones, fechas y situaciones meteorológicas se deduce que, con este sistema de regulación del flujo luminoso de las luminarias en función del sensor de luz natural, el ahorro energético medio será de un 30%.

Este ahorro es un 10% inferior al de la estrategia con balasto electrónico, pues el flujo luminoso de lámparas LED de esta estrategia es menor que el de las lámparas fluorescente. Por consiguiente, se necesitará de más intensidad en las luminarias para alcanzar los mismos niveles lumínicos y, por tanto, menor ahorro.

Anteriormente se citaba que, suponiendo todas las luminarias funcionando constantemente, el consumo anual por aula estaba entre 750 y 1200 kWh con un gasto económico anual entre 231 y 357 €. Ahora, añadiendo una media anual de un 30% de ahorro energético gracias a la regulación que realiza el sensor de luz natural, el consumo anual real estaría entre 525 y 840 kWh con un gasto económico real anual entre 162 y 250 € por aula.

Esto quiere decir que el ahorro energético y económico anual final por aula, con respecto al sistema inicial que tenía un consumo anual entre 2100 y 3300 kWh con un gasto económico anual entre 630 y 984 €, sería de entre 1575 y 2460 kWh por parte del consumo y de entre 468 y 734 € por parte del gasto, es decir, en torno al 75% de ahorro económico anual.

Como se ha comentado en las tres estrategias anteriores, dentro del coste inicial de la instalación no se tendrá en cuenta la mano de obra. Se instalarían 21 luminarias LED empotrables con difusor de la marca ETAP que tendrían un precio aproximado por unidad, según el catálogo de la empresa, de 227.00 € y 3 luminarias LED+LENS de pared también de la marca ETAP que tienen un precio aproximado por unidad, según el catálogo de la empresa, de 189.00 €. También se instalaría el sensor de luz y movimiento DIM MULTI cuyo precio sería de 175.00 € según el catálogo de la empresa. Los 6 pulsadores dobles Rocker Switch RETROTOUCH que darían servicio a las líneas longitudinales, tendrían un precio por unidad de 22.22 € y el pulsador individual de la misma marca anterior, que da servicio a las luminarias de la pizarra, tendría un precio de 19.87 €. Por tanto, la inversión económica inicial total para esta estrategia sería:

$(21 \times 227.00 \text{ €}) + (3 \times 189 \text{ €}) + 175.00 \text{ €} + (6 \times 22.22 \text{ €}) + 19.87 \text{ €} = 5.662 \text{ €}$ de inversión económica inicial.

Si el ahorro económico anual estaría entre 468 y 734 € significa que **la instalación, para esta cuarta estrategia, se amortizaría al cabo de entre 7 a 12 años.**

De igual manera que en la estrategia anterior se analizará una situación en la que, sin aporte de luz natural y mediante regulación manual, se adapten los niveles de iluminancia del aula modelo con el fin de poder visualizar la pantalla del proyector adecuadamente. Se debe destacar que el modelo de proyector usado en las aulas es el 3M X36 que tiene una intensidad de 3200 lm, por lo que el flujo luminoso de las luminarias del aula se debe adaptar de tal manera que permita visualizar correctamente el flujo emitido por el proyector.

En esta estrategia se ha creído adecuado atenuar el flujo de las luminarias a un 25% de su funcionamiento para la correcta visualización de la pantalla del proyector, dando un valor de 123 lx para la iluminancia media horizontal del aula.

En cuanto a la iluminancia media perpendicular al plano de la pantalla del proyector se obtiene un valor de 240 lx.

Esta relación de iluminancias permitirá visualizar correctamente la pantalla del proyector generando un adecuado **contraste 2:1** y permitirá también un nivel de iluminación mínimo para los estudiantes que necesiten tomar datos de las proyecciones sobre soportes de papel en las mesas.

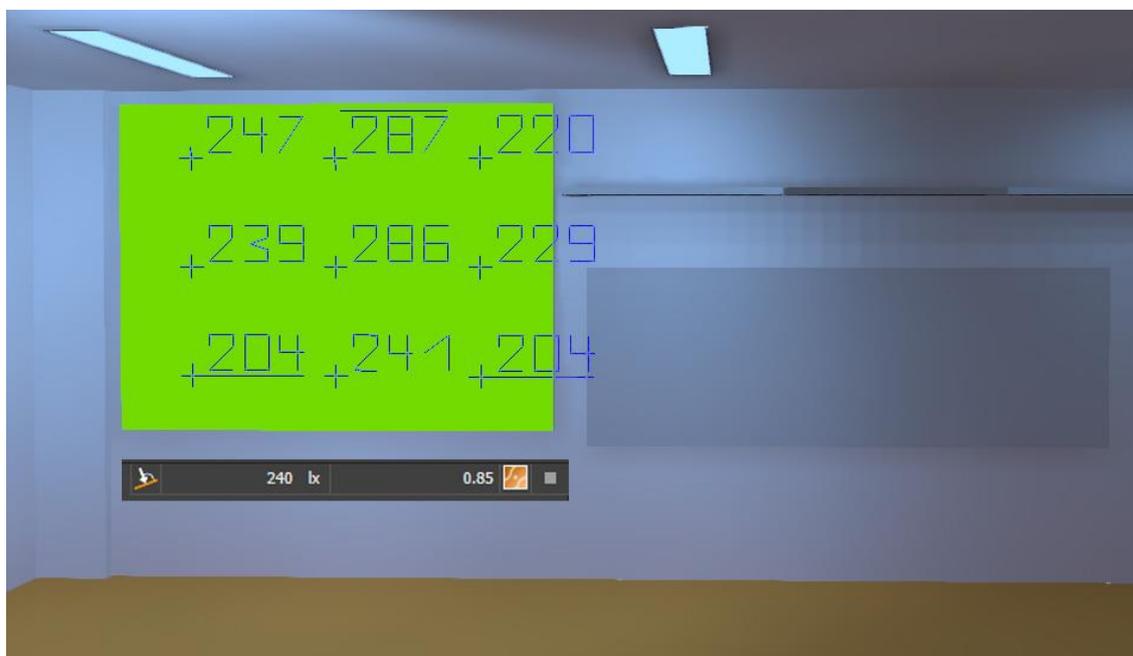
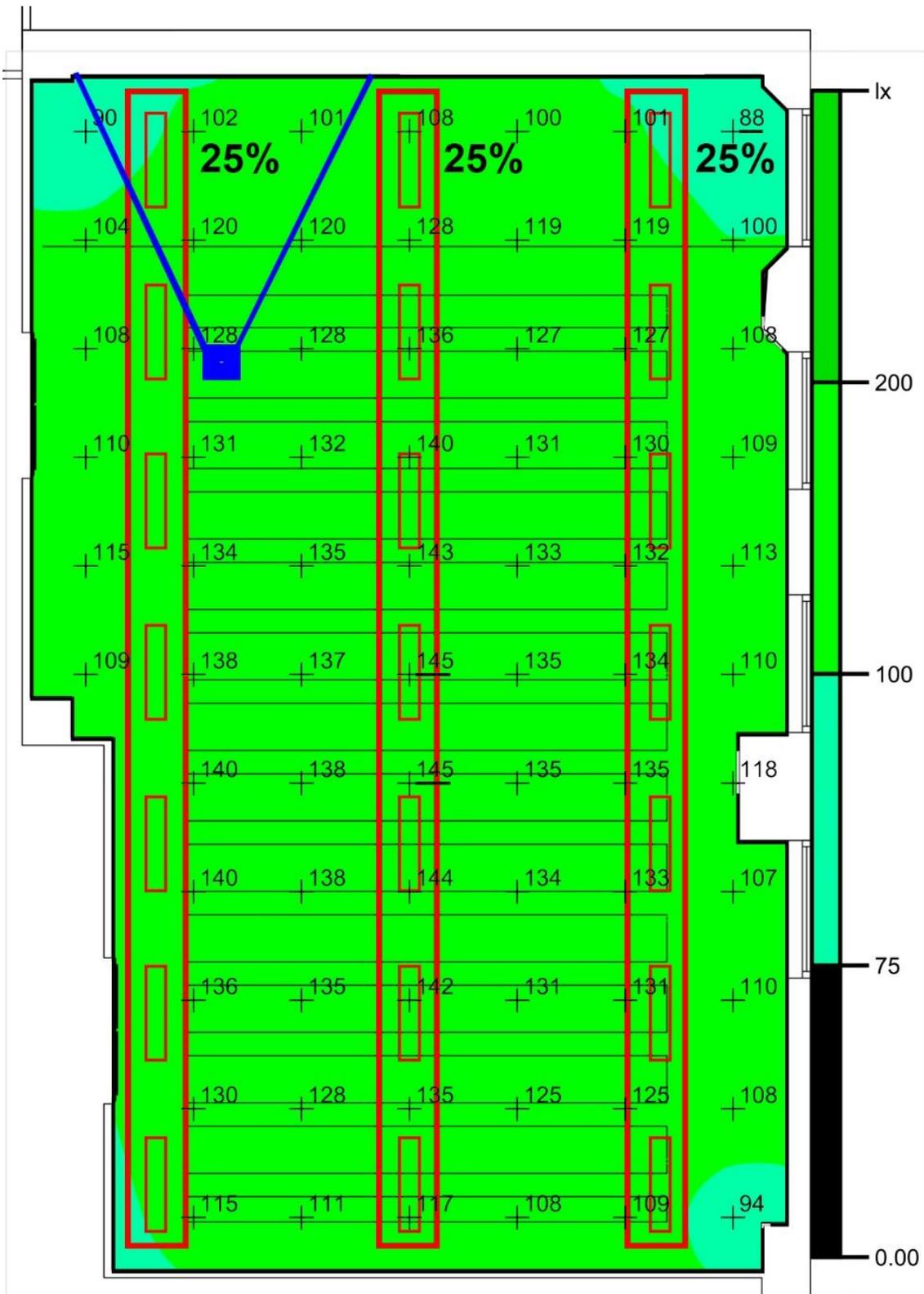


Figura 138. Niveles de iluminancia de la pantalla del proyector 3M X36 para la cuarta estrategia. Fuente: Elaboración propia



Figura 139. Simulación de niveles de iluminación para la visualización del proyector para la cuarta estrategia. Fuente: Elaboración propia



Escala: 1 : 100

Intensidad lumínica horizontal (Trama)

Media (real): 123 lx, Min: 88.1 lx, Max: 145 lx, Mín./medio: 0.72, Mín./máx.: 0.61

Figura 140. Intensidad lumínica horizontal para la simulación de visualización del proyector en la cuarta estrategia.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la pizarra se obtiene, a través de *Dialux Evo*, una **iluminancia media perpendicular de la pizarra** de **530 lx** y una **uniformidad media** de **0.80** , por tanto, **si se cumpliría la norma UNE-EN 12464-1**.

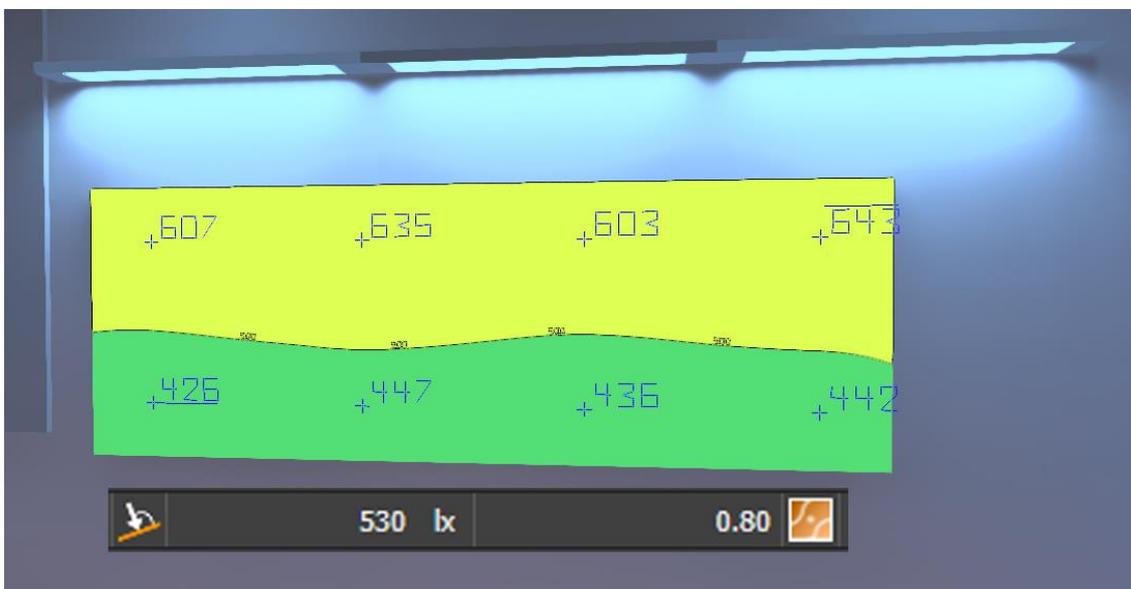


Figura 141. Iluminancia media perpendicular de la pizarra con la cuarta estrategia. Fuente: Elaboración propia

4- Conclusiones

Una vez expuestas y analizadas las cuatro estrategias que se podrían llevar a cabo para optimizar la instalación inicial de iluminación del modelo de aula, ya sea mejorando los criterios lumínicos que marcan la normas o mejorando la eficiencia energética del conjunto, se procederá a realizar una comparativa de los datos obtenidos por las cuatro estrategias para ver los puntos a favor y en contra de cada una de ellas y optar por la elección de una u otra en función de la situación.

	UNE-EN 12464-1				DB HE3	
	Ra	Em	Uo	UGR	Potencia Máxima Instalada	VEEI
Situación inicial	80 (Si)	547 lx (Si)	0.67 (Si)	27.3 (No)	16.17 W/m2 (No)	2.95 (Si)
Estrategia 1	80 (Si)	547 lx (Si)	0.67 (Si)	27.3 (No)	16.17 W/m2 (No)	2.95 (Si)
Estrategia 2	84 (Si)	569 lx (Si)	0.64 (Si)	22.7 (No)	5.625 W/m2 (Si)	0.98 (Si)
Estrategia 3	80 (Si)	547 lx (Si)	0.67 (Si)	27.3 (No)	13.59 W/m2 (Si)	2.48 (Si)
Estrategia 4	85 (Si)	525 lx (Si)	0.70 (Si)	14.7 (Si)	5.796 W/m2 (Si)	1.17 (Si)

Tabla 3. Valores para el cumplimiento de las normas UNE-EN 12464-1 y DB HE3 en la situación inicial y en las cuatro estrategias

	Potencia consumida anual	Gasto económico anual	Porcentaje de ahorro respecto al sistema inicial	Precio de la instalación	Periodo de amortización	Sistema de regulación
Situación inicial	2.100 - 3.300 KWh	630 - 984 €				No
Estrategia 1	1.890 - 2.970 KWh	567 - 911 €	10 %	0 €	0 años	No
Estrategia 2	750 - 1.150 KWh	219 - 342 €	65 %	1.413 €	2 a 3 años	No
Estrategia 3	1.050 - 1.650 KWh	318 - 497 €	50 %	1.288 €	2 a 4 años	Si
Estrategia 4	525 - 840 KWh	162 - 250 €	75 %	5.662 €	7 a 12 años	Si

Tabla 4. Valores anuales de consumo económico y de potencia en la situación inicial y en las cuatro estrategias

Como se puede observar, se parte de una situación inicial formada por luminarias agrupadas de forma transversal con lámparas fluorescentes y equipo auxiliar convencional, en la que se tiene un valor del UGR excesivamente alto y muy lejos de cumplir la norma. Además, la potencia total instalada, siendo también muy excesiva, no cumple la norma y provoca un consumo energético anual muy grande que a su vez implica un gran gasto económico. Asimismo, la orientación y distribución de las luminarias no cumplen un diseño adecuado, puesto que el eje de las mismas no es paralelo a la mirada de los estudiantes, ni al frente en el que se desarrollan las ventanas.

En cuanto a los colores y materiales usados en el modelo de aula, se considerarían en su mayor parte adecuados salvo las mesas de los estudiantes que, debido al brillo, pueden generar ciertos reflejos que dificulten la visión.

La primera estrategia, basada en la creación de grupos de luminarias en sentido longitudinal, permitiría apagar la línea de luminarias próxima al frente de ventanas, generando hasta un 10% de ahorro energético y económico sin ningún tipo de inversión inicial. Por tanto, se considera que esta medida debería adoptarse obligatoriamente y de forma inmediata, pues sólo originaría beneficios.

La segunda y tercera estrategia, ambas en combinación con la primera para desarrollar todo su potencial, necesitarían de una inversión económica inicial similar que se amortizaría en un corto plazo. Debido a su similitud, podrían existir dudas sobre optar por una u otra solución.

Las ventajas de la segunda estrategia serían el uso de unas lámparas LED que, consumiendo menos de la mitad de la potencia de las lámparas fluorescentes de la situación inicial, aportarían un flujo luminoso y generarían una iluminancia similar a las de la situación inicial. También disminuiría el deslumbramiento directo aunque continuaría sin cumplir la norma.

Las ventajas de la tercera estrategia serían la eliminación del consumo de la potencia reactiva y la posibilidad de usar un sistema de regulación gracias al uso del balasto electrónico para las luminarias fluorescentes. Esta estrategia también permitiría atenuar el flujo de las luminarias para una correcta visualización de la pantalla del proyector.

Sin embargo, aunque la tercera estrategia elimine el consumo de potencia reactiva y permita la regulación, continuaría consumiendo más potencia y más gasto económico que la segunda estrategia con lámparas de tubo LED que, aún permaneciendo todas encendidas al 100%, seguirían consumiendo menos potencia y obteniendo un menor gasto económico y un menor deslumbramiento. En definitiva, es preferible decantarse por la tercera estrategia frente a la segunda estrategia.

No obstante, sólo en el caso de que el uso del proyector tuviese mucha presencia en el aula, sería conveniente plantearse llevar a cabo la segunda estrategia que permitiese la regulación de las luminarias.

Si fuese viable realizar una inversión económica mayor con una amortización de la instalación a largo plazo, sería conveniente optar por la cuarta estrategia que, combinándose con la primera, cumpliría todos los requisitos que establecen las normas; mejorando enormemente la uniformidad media y el UGR respecto a la instalación inicial, evitando cualquier tipo de deslumbramiento. Además esta estrategia permitiría un ahorro energético y económico del 75% respecto de la situación inicial, siendo el mayor de todas las estrategias propuestas.

Esta estrategia, a diferencia de las anteriores, también generaría un mejor diseño respecto al sistema inicial. Utilizaría un menor número de luminarias, cuyo eje iría en paralelo con la mirada de los estudiantes y con el frente de ventanas, para obtener unos niveles de confort que cumplan las normas y sean adecuados para los usuarios del aula.

La implementación de alguna de estas estrategias expuestas en otras zonas del centro docente supondría, también, un gran descenso de la potencia consumida, un mayor ahorro económico y una mejora de los niveles de confort de los usuarios.

En el caso de un estudio posterior que explorase la totalidad del centro, sería conveniente el uso de un sistema de control y regulación digital, tipo DALI, que permitiese controlar automáticamente la iluminación de los diferentes ámbitos del edificio aprovechando toda la luz natural que llegue a éste.

5- Bibliografía

- Feijó Muñoz, Jesús, Instalaciones de iluminación en la arquitectura, Valladolid: Universidad, Secretariado de Publicaciones, 1994.
- IDAE y CEI, Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación. Centros docentes, Madrid, Marzo 2001.
- FENERCOM Y ANFALUM, Guía sobre tecnología LED en el alumbrado, Madrid, 2005.
- FENERCOM, Guía de ahorro y eficiencia energética en centros docentes, Madrid, 2011.
- ENERAGEN, Instalaciones de iluminación en edificios en el marco del Código Técnico de la Edificación, Málaga, 2007.
- OSRAM GROUP WEBSITE, Osram [Fecha de consulta: Marzo a Agosto]. Disponible en <http://www.osram.es/osram.es/>
- ETAPLIGHTING, ETAP [Fecha de consulta: Mayo a Agosto]. Disponible en <http://www.etaplighting.com/home.aspx?LangType=1034&id=75&comp=etap>
- LEDTHINK, Tubos LED [Fecha de consulta: 6 de Junio]. Disponible en <http://www.ledthink.com/que-son-tubos-led>
- AULA MOISAN, El consumo en la conexión de los fluorescentes es menor que en su funcionamiento permanente [Fecha de consulta: 12 de Julio]. Disponible en <http://blog.aulamoisan.com/2010/02/el-consumo-en-la-conexion-de-los.html>
- CERTIFICADOS ENERGÉTICOS, Ejemplo paso a paso de cálculo de exigencias del CTE DB HE3 [Fecha de consulta: 20 de Julio]. Disponible en <http://www.certificadosenergeticos.com/ejemplo-paso-paso-calculo-exigencias-cte-db-he3>
- ELT, Sistemas de regulación y control del alumbrado [Fecha de consulta: 26 de Julio]. Disponible en <http://www.elt-blog.com/sistemas-de-regulacion-y-control-del-alumbrado-parte-1/#prettyPhoto>
- AF, Factor de potencia, [Fecha de consulta: 5 de Agosto]. Disponible en http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_factor_potencia/ke_factor_potencia_4.htm
- WIKIPEDIA [Fecha de consulta: Mayo a Agosto]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>

- CTE DB HE-3, septiembre 2013, Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.
- UNE-EN 12464-1:2011. Aplicaciones de iluminación. Iluminación de entornos de trabajo interior.
- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. Anexo IV.
- CTE SU-4. Seguridad frente a riesgo causado por iluminación inadecuada.
- Real Decreto 314/2006, de 17 de Marzo, que desarrolla el Código Técnico de la Edificación (CTE).