



Universidad de Oviedo

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

ÁREA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE LA ILUMINACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE TREN SUBTERRÁ-
NEA MEDIANTE LUZ NATURAL**

D. ALONSO PALMEIRO, Francisco
TUTOR: Dr. Manuel Arsenio Barbón Álvarez
Dr. Luis Froilán Bayón Arnau

FECHA: Julio 2025



ÍNDICE

Nomenclatura	9
1. Introducción	10
1.1 Motivación del proyecto	10
1.2 Objetivos del proyecto	10
1.3 Organización del documento	10
2. Marco general del estudio	12
2.1 Contexto energético actual.....	12
2.2 Situación energética actual en el mundo.....	12
2.3 Situación energética actual en España	18
2.3.1 Dependencia	21
2.3.2 Desarrollo sostenible	22
2.3.3 Medidas para fomentar el ahorro.....	24
2.3.4 Eficiencia energética	25
2.4 Iluminación artificial.....	26
2.4.1 Principios de funcionamiento	27
2.4.2 El papel de la iluminación artificial en el contexto energético actual	30
3. Marco teórico	31
3.1 Definiciones previas	31
3.1.1 Flujo luminoso.....	31
3.1.2 Intensidad luminosa.....	31
3.1.3 Iluminancia y emitancia luminosa.....	32
3.1.4 Rendimiento luminoso.....	32
3.1.5 Luminancia.....	32
3.1.6 Irradiancia e irradiación.....	32
3.1.7 Índice de reproducción cromática.....	32
3.1.8 Diagrama polar	32
3.1.9 Contraste.....	33



3.1.10	Latitud	33
3.1.11	Longitud	33
3.1.12	Ángulo horario y hora UTC	33
3.2	Movimiento del Sol	33
3.3	Cenit y Nadir.....	34
3.4	Polos celestes y ecuador celeste.....	34
3.5	Movimiento anual.....	35
3.6	Sistemas de coordenadas	35
3.6.1	Coordenadas acimutales	35
3.6.2	Coordenadas ecuatoriales	36
3.7	Relaciones solares.....	36
3.7.1	Distancia Tierra – Sol.....	36
3.7.2	Declinación solar	36
3.7.3	Ecuación del tiempo	37
3.7.4	Tiempo solar verdadero.....	38
3.7.5	Posición del Sol relativa a superficies horizontales.....	38
3.8	Irradiación solar	38
3.9	Irradiancia solar	38
3.9.1	Espectro de irradiancia	38
3.10	Eficacia luminosa.....	39
3.10.1	Curva de sensibilidad espectral.....	39
4.	Porque incluir luz natural	40
4.1	Efectos perjudiciales de la luz artificial	40
4.1.1	Efecto flicker	40
4.1.2	Deslumbramiento	40
4.2	Efecto Purkinje	40
4.3	Efectos positivos de la luz natural sobre humanos	41
4.3.1	Efectos físicos.....	41
4.3.2	Efectos psicológicos	41



4.3.3	Efectos sobre la actividad.....	41
4.3.4	Efectos térmicos	41
4.4	Eficiencia energética.....	42
4.4.1	Ahorro económico.....	42
4.4.2	Beneficio ecológico	42
5.	Normativa.....	43
5.1	Normativa aplicada a nuestro caso	43
5.2	Ahorro de energía	43
6.	Sistema de iluminación natural	45
6.1	Fuente de luz natural.....	45
6.2	Concentrador solar.....	45
6.2.1	Reflector lineal Fresnel.....	45
6.3	Sistema de transmisión	46
6.3.1	Ley de Snell.....	46
6.3.2	Reflexión interna total	47
6.3.3	Fibra óptica.....	47
6.3.4	Ángulo de aceptación y apertura numérica	48
6.3.5	Pérdidas	48
6.3.6	Elección del tipo de fibra óptica	48
6.4	Sistema de distribución.....	49
6.5	Sistema de iluminación natural por fibra óptica	49
6.6	Sistema de regulación	50
7.	Simulación.....	51
7.1	Software.....	51
7.2	Ejemplo previo.....	51
7.2.1	Vestíbulo	52
7.2.2	Taller	55
7.2.3	Aula	56
7.2.4	Biblioteca.....	58



7.3	Análisis de la instalación actual	61
7.3.1	Construcción de la estación	61
7.3.2	Creación de objetos para la construcción de la estación.....	73
7.3.3	Iluminación de la estación	79
7.4	Análisis de la iluminación natural	83
7.5	Cálculos	90
8.	Conclusiones y trabajos futuros	93
9.	Bibliografía	94
10.	Anexo	97
10.1	Materiales	97
10.2	Figuras	98
10.3	Tablas.....	¡Error! Marcador no definido.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tabla de generación de potencia mundial en el año 2022 [3].....	13
Tabla 7.1 Alturas y espesores de las plantas tabulados.....	61
Tabla 7.2 Luminarias por nivel	79
Tabla 7.3 características de las luminarias	83
Tabla 7.4 Energía absorbida por la instalación actual en kWh	91
Tabla 7.5 Energía absorbida por la instalación con iluminación natural en kWh.....	91
Tabla 7.6 Ahorro de energía por la iluminación natural en kWh.....	91
Tabla 7.7 Ahorro de energía por iluminación natural de forma porcentual	91
Tabla 7.8 Tabla de estudio económico.....	92
Tabla 10.1 Clasificación de materiales	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Progresión de la generación total a nivel mundial [3]	14
Figura 2.2 Generación por fuente de energía a nivel mundial en 2022 [3]	14
Figura 2.3 Progresión de la generación por fuente de energía a nivel mundial [3]	15
Figura 2.4 Generación por fuente de energía en China en 2023 [5]	15
Figura 2.5 Progresión de la generación por fuente de energía en China [5]	16
Figura 2.6 Progresión de la generación total a nivel europeo [4]	16
Figura 2.7 Generación por fuente de energía a nivel europeo en 2022 [4]	17
Figura 2.8 Progresión de la generación por fuente de energía a nivel europeo [4]	17
Figura 2.9 Generación por fuente de energía a nivel nacional en 2023 [6]	19
Figura 2.10 Progresión de la generación por fuente de energía a nivel nacional [6]	19
Figura 2.11 Consumo por sector a nivel nacional [6]	20
Figura 2.12 Progresión del consumo por sector a nivel nacional [6]	20
Figura 2.13 Importación de energía a nivel nacional. [6]	20
Figura 2.14 Turbinas hidráulicas Kaplan (A), Pelton (B) y Francis (C) [9]	22
Figura 2.15 Grafica de elección de turbina hidráulica [8]	23
Figura 2.16 Aerogenerador [11]	23
Figura 2.17 Placa de generación híbrida térmica-solar [14]	26
Figura 2.18 Planta de generación híbrida eólica-solar [15]	26
Figura 2.19 Luminaria incandescente [17]	27
Figura 2.20 Luminaria halógena [18]	28
Figura 2.21 Luminaria fluorescente [20]	28
Figura 2.22 Luminarias de descarga de gas [21]	29
Figura 2.23 Luminaria LED [22]	29
Figura 3.1 Luminaria emitiendo [23]	31
Figura 3.2 Movimiento solar relativo [25]	34
Figura 3.3 Esfera celeste con el movimiento solar [26]	35
Figura 3.4 Esfera celeste con la declinación solar [26]	36
Figura 3.5 Declinación solar con respecto a la tierra. [27]	37
Figura 3.6 Gráfica de la ecuación del tiempo. [28]	37
Figura 3.7 Espectro de irradiancia solar [30]	39
Figura 3.8 Curva de sensibilidad espectral [32]	39
Figura 5.1 Normativa de las estaciones [38]	43
Figura 5.2 Objetivos agenda 2030 [40]	44
Figura 6.1 concentradores solares. [41]	45

Figura 6.2 Reflector solar Fresnel [41]	46
Figura 6.3 Ley de Snell [41].....	46
Figura 6.4 Principio grafico de la RIT [44].....	47
Figura 6.5 Luminaria reflector lineal Fresnel. [41]	49
Figura 7.1 Edificio de ejemplo.....	51
Figura 7.2 visión cenital salas	52
Figura 7.3 vestíbulo.....	53
Figura 7.4 Zona 1 del vestíbulo.....	54
Figura 7.5 Zona 2 del vestíbulo.....	54
Figura 7.6 Luminarias de techo del vestíbulo	55
Figura 7.7 Luminaria de pie del vestíbulo.....	55
Figura 7.8 taller	56
Figura 7.9 Luminarias taller	56
Figura 7.10 aula.....	57
Figura 7.11 Luminarias aula.....	58
Figura 7.12 biblioteca.....	58
Figura 7.13 Zona 1 de la biblioteca.....	59
Figura 7.14 Zona 2 de la biblioteca.....	59
Figura 7.15 Zona 3 de la biblioteca.....	60
Figura 7.16 Luminarias colgantes de la biblioteca.....	60
Figura 7.17 Luminarias de pared de la biblioteca	61
Figura 7.18 Comparativa nivel 0 real vs nivel 0 DIALux.....	62
Figura 7.19 Plano planta 0.....	63
Figura 7.20 Planta 0 real vs planta 0 DIALux.....	64
Figura 7.21 Plano nivel -1	65
Figura 7.22 Plano planta -1	66
Figura 7.23 Vista del nivel -1 y -2	66
Figura 7.24 Planta -1 real vs planta -1 DIALux.....	67
Figura 7.25 Sala de información por dentro.....	68
Figura 7.26 Zona pasarela del entresuelo 2.....	68
Figura 7.27 escaleras de emergencia.....	69
Figura 7.28 Andenes entresuelo 2	70
Figura 7.29 Entresuelo 2 real vs Entresuelo 2 DIALux desde el andén A.....	71
Figura 7.30 Entresuelo 2 real vs Entresuelo 2 DIALux desde el andén B	72
Figura 7.31 Planta -2 real vs planta -2 DIALux.....	73
Figura 7.32 Piezas del ensamblado de las escaleras.....	74
Figura 7.33 Vista del montaje final de una escalera mecánica.....	74



Figura 7.34 Conjuntos de escaleras.....	75
Figura 7.35 Escaleras circulares.....	76
Figura 7.36 Puertas de ascensores.....	77
Figura 7.37 Techos de las escaleras	78
Figura 7.38 Barandillas	78
Figura 7.39 Banco real comparado con el banco del programa.	79
Figura 7.40 planos con la ubicación de las luminarias.....	80
Figura 7.41 Luminaria de techo de Modular Lighting Instruments	81
Figura 7.42 Luminaria del techo nivel -1	81
Figura 7.43 Luminaria focos de alta intensidad	81
Figura 7.44 Luminaria focos de baja intensidad	82
Figura 7.45 Luminaria colgantes.....	82
Figura 7.46 Luminaria fluorescentes.....	82
Figura 7.47 Luminaria sala de información	82
Figura 7.48 Luminaria de la pared	83
Figura 7.49 Entrada con iluminación natural	84
Figura 7.50 Nivel -1 y -2 con iluminación natural.....	84
Figura 7.51 Entresuelo 2 Anden A con iluminación natural.....	85
Figura 7.52 Entresuelo 2 Anden B con iluminación natural	85
Figura 7.53 Planta -2 con iluminación natural	86
Figura 7.54 Anden B Planta -2 con iluminación natural.....	86
Figura 7.55 Curvas fotométricas con iluminación natural	89
Figura 7.56 Focos sustituidos por luminarias de luz natural.....	90



NOMENCLATURA

Luminotecnia. Estudio de la generación, aplicación de la iluminación.

Energías verdes. Son aquellas energías que no liberan a la atmosfera gases de efecto invernadero.

Luminarias. Se les llama a los dispositivos de distribución de luz.

Índice de refracción. Propiedad física de un material que indica cuanto se reduce la velocidad de la luz o de cualquier onda con respecto al vacío. Se denota con la letra n .

Ángulo refracción. Ángulo con el que la luz sale de una superficie refractaria.

Ángulo de incidencia. Ángulo con el que la luz incide en una superficie refractaria.

Ángulo específico crítico. Ángulo a partir del cual se produce reflexión interna total.

Buses de información. Forma de transportar información en sistemas informáticos.

Longitud de onda. La distancia entre dos puntos equivalentes de una onda. Se denota por λ y se mide en metros.

RIT. Reflexión interna total.

CRI. Índice de reproducción cromática. Como de bien reproduce

CCT. Temperatura de color correlacionada.

Cavitación. Fenómeno que se produce cuando se crean cavidades de vapor en un medio.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del proyecto

El siguiente Trabajo de Fin de Grado tiene como motivación analizar la viabilidad de instalar un sistema de híbrido de iluminación, mediante la combinación de iluminación natural y artificial. Para así fomentar una transición ecológica. Justificaremos la necesidad de incorporar dicha iluminación bajo los siguientes criterios: impacto positivo de la iluminación natural en las personas, impacto positivo a nivel energético e impacto positivo a nivel económico. El impacto a nivel ecológico es más difícilmente cuantificable y son datos estimativos, pero el impacto económico, pese a depender de un valor fluctuante de la energía, es fácilmente cuantificable, por eso la necesidad de usarlo tanto como interés, como medida para extrapolar su efecto a otras áreas.

La estación de la que se hace el estudio es la estación de tren subterránea de Llamaquique. Esta estación está situada en la calle Trece rosas, Oviedo, Asturias, en las coordenadas UTM (43.358811,-5.857334). El horario de la estación es de 05:12 a 00:17h de lunes a sábado y de 03:30 a 00:17h los domingos y festivos [1]. La estación propiedad de ADIF fue inaugurada en 2007 convirtiéndose en la primera estación subterránea de Asturias.

1.2 Objetivos del proyecto

El siguiente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo analizar la viabilidad de instalar un sistema de iluminación natural de soporte en una estación de tren subterránea mediante luminarias solares.

Mediante este estudio se analizará incorporar luminarias que usan la luz natural existente para iluminar mediante un colector Fresnel, el cual colecta luz natural y la trasladan mediante cableado de fibra óptica para posteriormente proyectarla con los casquillos de la luminaria. Con esto complementaríamos el sistema existente, pudiendo así hacerlo más eficiente y, mediante su regulación, consumir menos energía y así ser más ecológico y económico.

1.3 Organización del documento

El siguiente documento está organizado de la siguiente manera: empezaremos con un marco general del estudio en el cual se abordará la situación energética actual en para después abordar las formas de iluminación existentes. La siguiente será un marco teórico en el cual se explican conceptos básicos de la luminotecnia y sobre el sol para entender las limitaciones y adaptaciones



de cara a la implementación de la iluminación natural. Después, pasamos a analizar la necesidad de incorporar la luz natural. Proseguimos con la normativa y su necesidad con su aplicación a nuestro caso concreto. El siguiente capítulo será una descripción del sistema de iluminación natural que se pretende hacer la instalación. Seguiremos con el estudio propiamente creado mediante el programa DIALux. Por último, se harán las conclusiones y trabajos futuros en el cual se analizarán los resultados. Concluiremos con la bibliografía y los anexos.

2. MARCO GENERAL DEL ESTUDIO

2.1 Contexto energético actual

En los últimos años hemos visto los efectos del cambio climático y por ello muchos países se han puesto de acuerdo en el impacto negativo del cambio climático, fortaleciendo este acuerdo con diversos tratados como el protocolo de Kioto para favorecer una transición hacia un mundo más sostenible y de esta forma ponerle freno a esta situación. Este protocolo fue aprobado el 11 de diciembre de 1997 con el apoyo de 191 países, este entró en vigor en 2005 y con él se pretende luchar contra el cambio climático mediante la imposición de reducir la contaminación mediante gases de efecto invernadero [2].

2.2 Situación energética actual en el mundo

Puesto a la imperiosa necesidad de cuidar nuestro planeta viendo los avances devastadores del calentamiento global, sumado al constante aumento del coste de la vida, en este mundo cada día es más vigente la necesidad de innovar y en especial en aspectos ecológico.

Por ello es necesario el movimiento que están incorporando cada vez más países en sus políticas ecológicas, especialmente políticas que deben ser pensadas, analizadas y apoyadas para ser eficaces y efectivas. Esto significa utilizar tecnologías existentes con lógica y a su misma vez innovando en dichas tecnologías para hacerlas mejores e investigar otras tecnologías menos verdes, para hacerlas alternativas más viables en caso de ser necesarias.

Dentro de las políticas ecológicas también se deben incluir los avances del almacenamiento energético a gran escala como puedan ser los supercondensadores. Esto nos ayudara a sustituir las fuentes no renovables y darnos un control sobre la demanda ya que, las fuentes renovables no se pueden controlar fácilmente.

En el mundo se generó alrededor de 29269798 *GWh* durante el año 2022 [3]. En la Figura 2.1 se ve una clara tendencia ascendente en la generación de la energía a nivel mundial, ya que hay mucha más demanda de energía por la creciente población y la transición a usar más electricidad y menos combustibles fósiles en transporte, industria, etc. Como se observa en la Tabla 2.1, los países que más energía generan son China, EE. UU, India, Rusia y Japón. Estando los dos primeros en un nivel muy superior al resto y en especial China, ya que EE. UU (4495368 *GWh*) genera más del doble que India (1821867 *GWh*) y a su vez China (8950643 *GWh*) genera cerca del doble de EE. UU []. Por ello y para entender la progresión mundial de energía miraremos hacia China y para hacer un estudio posterior de nuestro país, a Europa.

En Europa concretamente se ve una tendencia más marcada hacia el uso de tecnologías renovables. Particularmente se puede ver que la generación mediante plantas eólicas como se puede ver en la Figura 2.3 en el año 2000 apenas se generaban 23000 *GWh* y para el año 2022 se generaron 556000 *GWh*, también hay un gran avance en la fotovoltaica pasando de 125 *GWh* a 250207 *GWh* en el mismo periodo de tiempo. Esto significa unos incrementos increíbles en el periodo de 22 años [4]. Esto hace pensar que en los siguientes años haya muchos avances en torno a estas tecnologías de generación.

Tabla 2.1 Tabla de generación de potencia mundial en el año 2022 [3]

-	País	Potencia (GWh)
1	CHN	8.950.643,00
2	USA	4.495.368,00
3	IND	1.821.867,00
4	RUS	1.151.155,00
5	JPN	1.017.679,00
6	BRA	677.371,00
7	CAN	658.578,00
8	KOR	624.879,00
9	DEU	578.949,00
10	FRA	473.672,00
11	SAU	418.839,00
12	IDN	397.369,00
13	IRN	367.669,00
14	MEX	346.466,00
15	TUR	328.379,00
16	GBR	325.540,00
17	ESP	292.454,00
18	TWN	288.153,00
19	ITA	283.961,00
20	VNM	276.416,00

Se puede ver que la progresión a nivel mundial, Figura 2.3, se compone a su vez de la progresión en China (Figura 2.5) y Europa (Figura 2.8) a pesar de que ningún país europeo se encuentra entre los que más generan. Esto se debe principalmente a dos motivos. El primer es que Europa genera casi tanto como el segundo país que más genera con 4018742 *GWh* y en segundo lugar porque de los países que más generan tanto Japón como EE. UU son países que están o han estado comprometidos con la transición ecológica, como Europa.

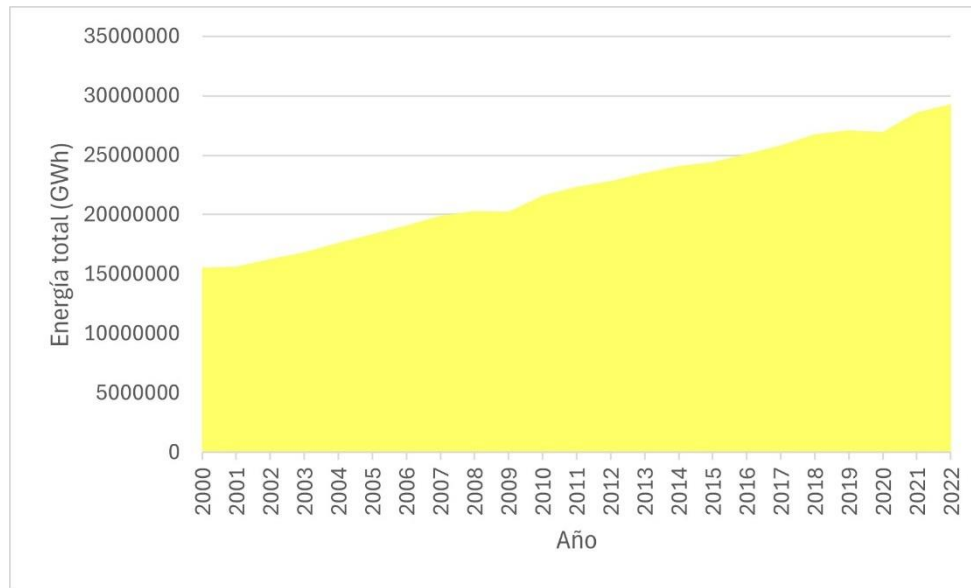


Figura 2.1 Progresión de la generación total a nivel mundial [3]

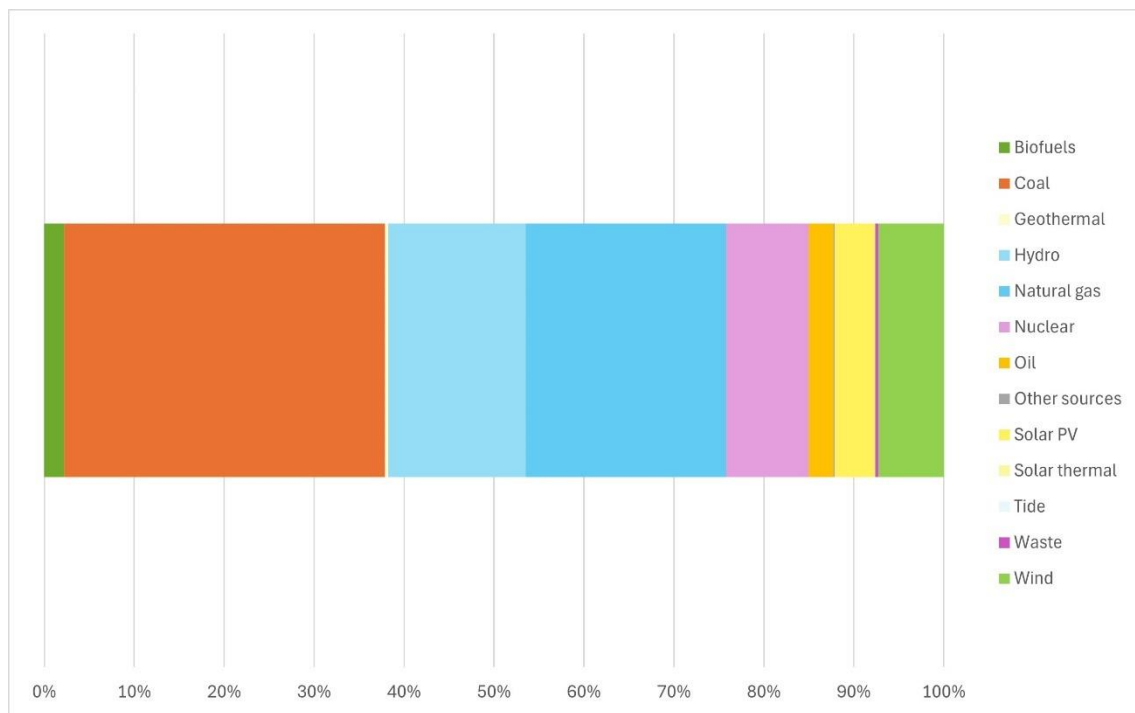


Figura 2.2 Generación por fuente de energía a nivel mundial en 2022 [3]

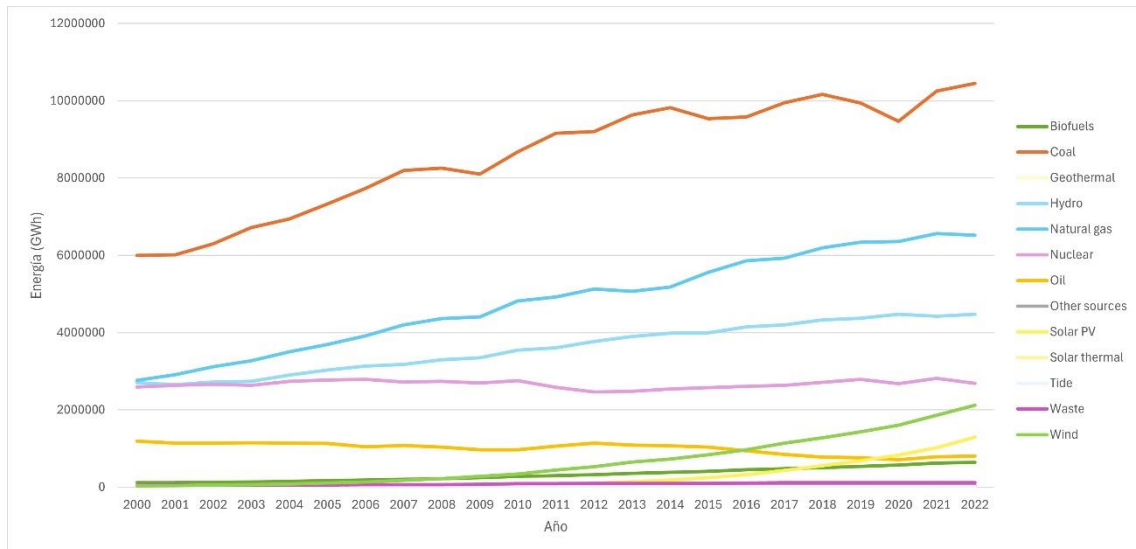


Figura 2.3 Progresión de la generación por fuente de energía a nivel mundial [3]

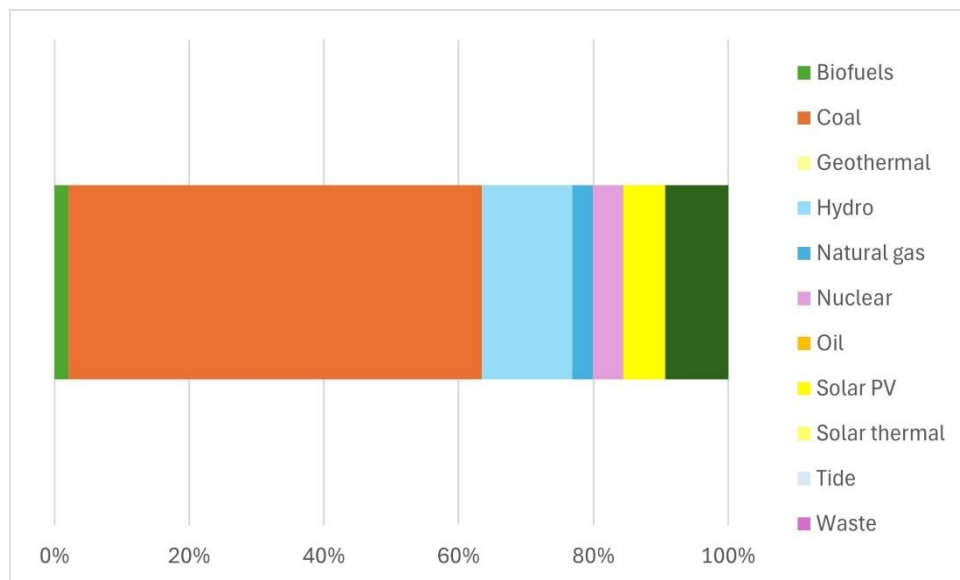


Figura 2.4 Generación por fuente de energía en China en 2023 [5]

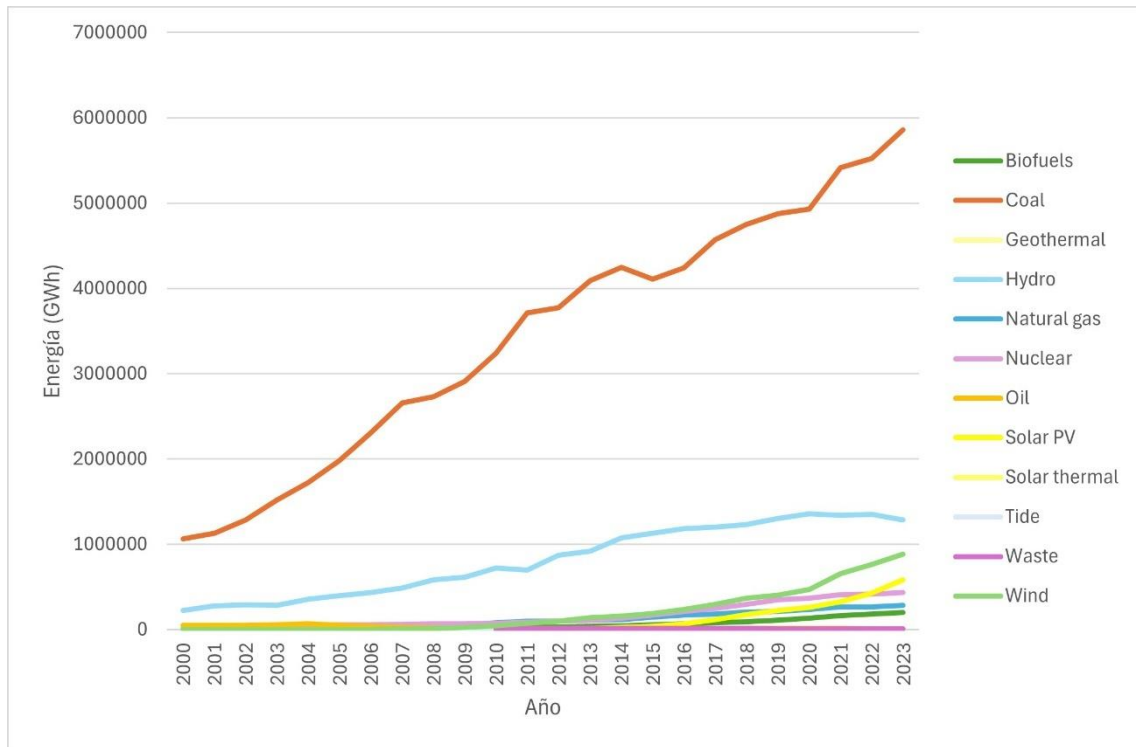


Figura 2.5 Progresión de la generación por fuente de energía en China [5]

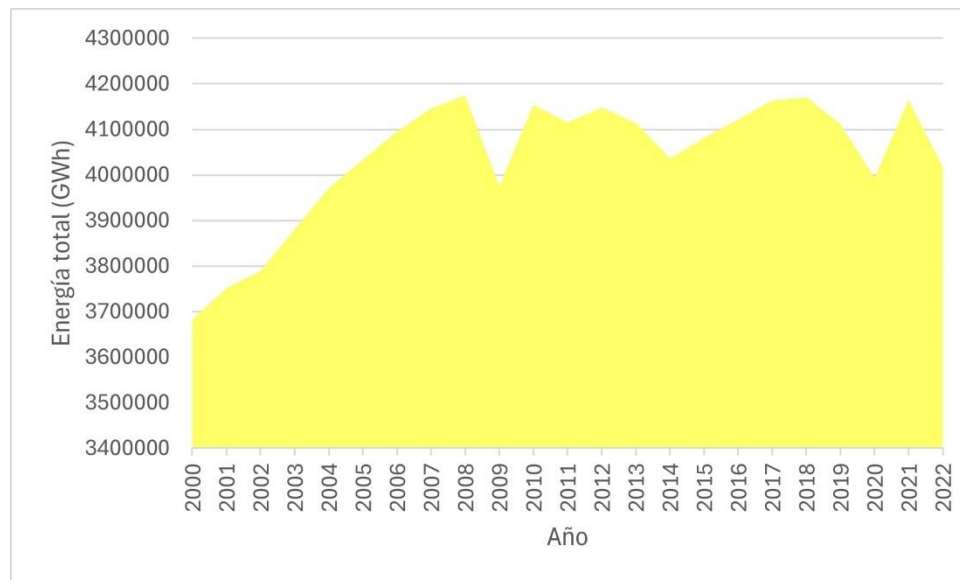


Figura 2.6 Progresión de la generación total a nivel europeo [4]

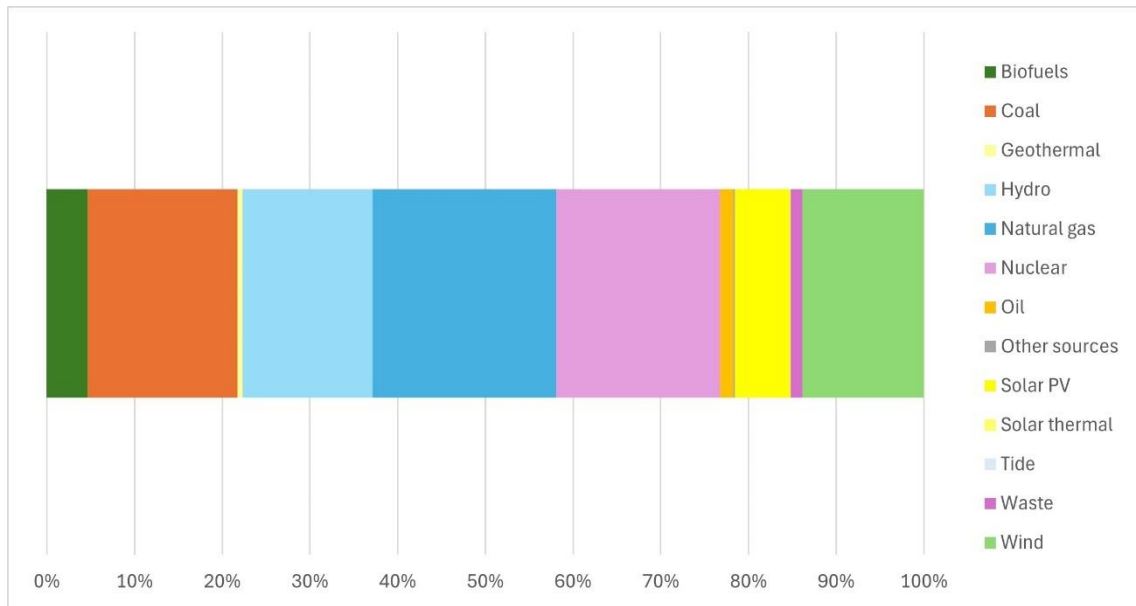


Figura 2.7 Generación por fuente de energía a nivel europeo en 2022 [4]

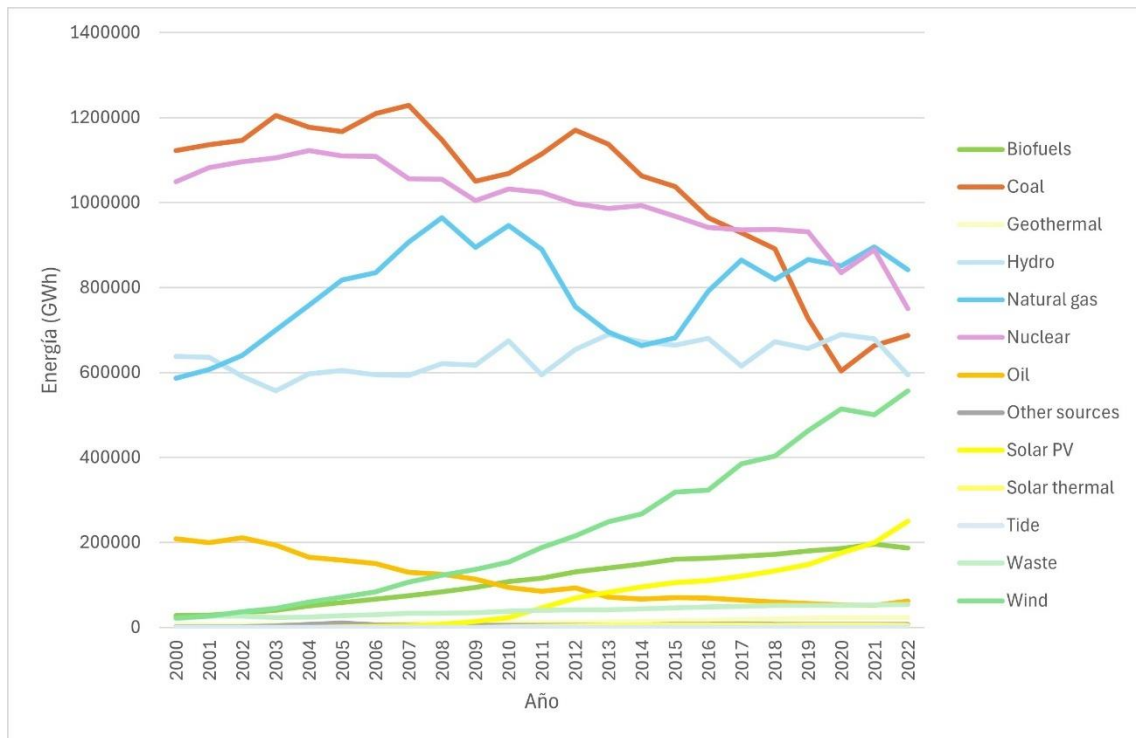


Figura 2.8 Progresión de la generación por fuente de energía a nivel europeo [4]

Cerca de 2010 en la gráfica europea se ve un pequeño repunte en la producción mediante el carbón. Esto es debido a que cerca de dicha fecha ocurrió el desastre de Fukushima, en Japón. Este accidente encendió alarmas en todo el mundo y sobre todo en Alemania, donde se reactivó la cuenca del Ruhr, una de las mayores cuencas mineras del mundo durante mucho tiempo, para decrementar el uso de energía nuclear. Aunque poco a poco se fue realizando una transición hacia fuentes renovables como sustituto del carbón.

También se observa en todas las figuras de progresión anuales una bajada sustancial en cuanto al consumo del año 2020. Este año fue el inicio de la pandemia y debido a las medidas como el confinamiento hubo un bajón en el consumo de energía. Esto se ve especialmente en el transporte, ya que a pesar de la pandemia las industrias seguían siendo necesarias, por eso su bajada más atenuada. Se puede observar que por el mismo motivo hay un descenso en la producción mediante carbón, ya que no había grandes transportes del material y por el confinamiento no hubo grandes extracciones, pues ya que se buscaba consumir menos de este combustible fósil y se lo tachó de no ser imprescindible.

Otro bajón sustancial que se puede observar en las gráficas europeas es en el uso de gas natural debido al conflicto entre Rusia y Ucrania. Al ser Rusia uno de los mayores distribuidores de gas natural, mediante la empresa de distribución Gazprom propiedad del estado ruso, provocó que muchos países cortaran su lazo con esta fuente de energía.

2.3 Situación energética actual en España

En España somos uno de los países que más presente se tiene esta necesidad de implantar medidas verdes. Tanto es así, que estamos a la cabeza en cuanto a porcentaje de generación energética mediante energías renovables. Lo cual no exime de la necesidad de otras tecnologías no renovables, al igual que la compra de energía de respaldo de otros países.

Como se puede ver las gráficas a nivel nacional de generación se comportan de una forma muy parecida a aquellas de Europa, con las mismas depresiones en los mismos puntos. Como se ven en las Figura 2.9 y Figura 2.10 que son muy parecidas a las Figura 2.7 y Figura 2.8.

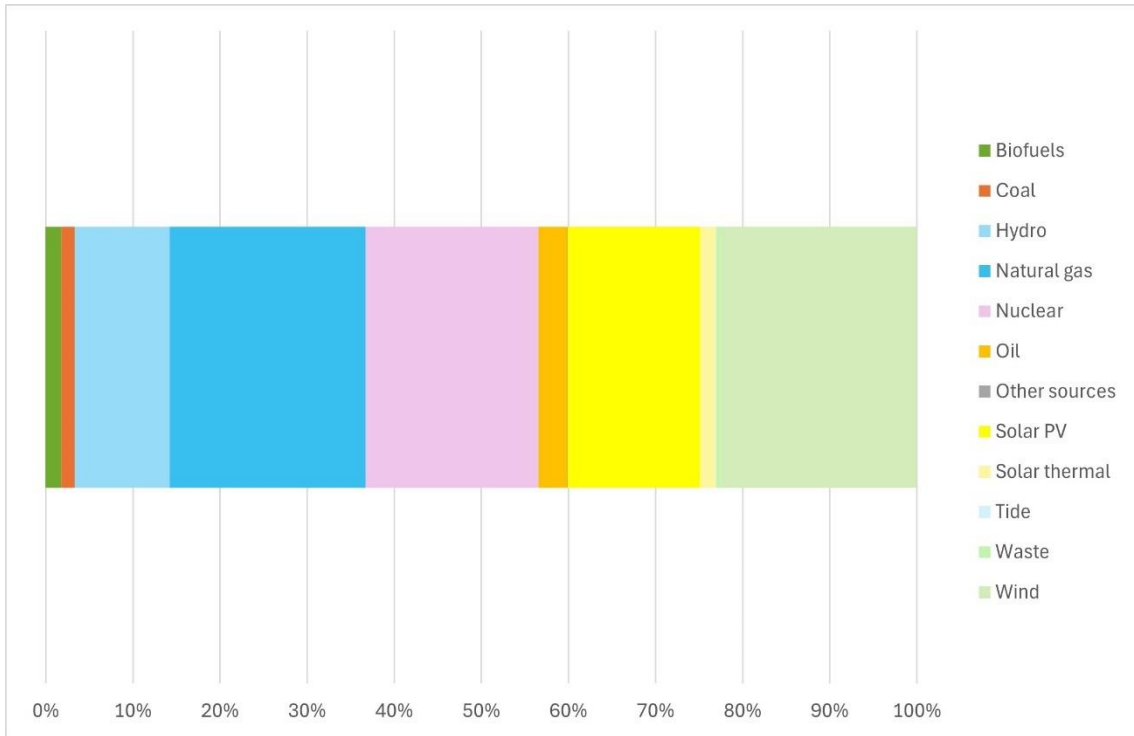


Figura 2.9 Generación por fuente de energía a nivel nacional en 2023 [6]

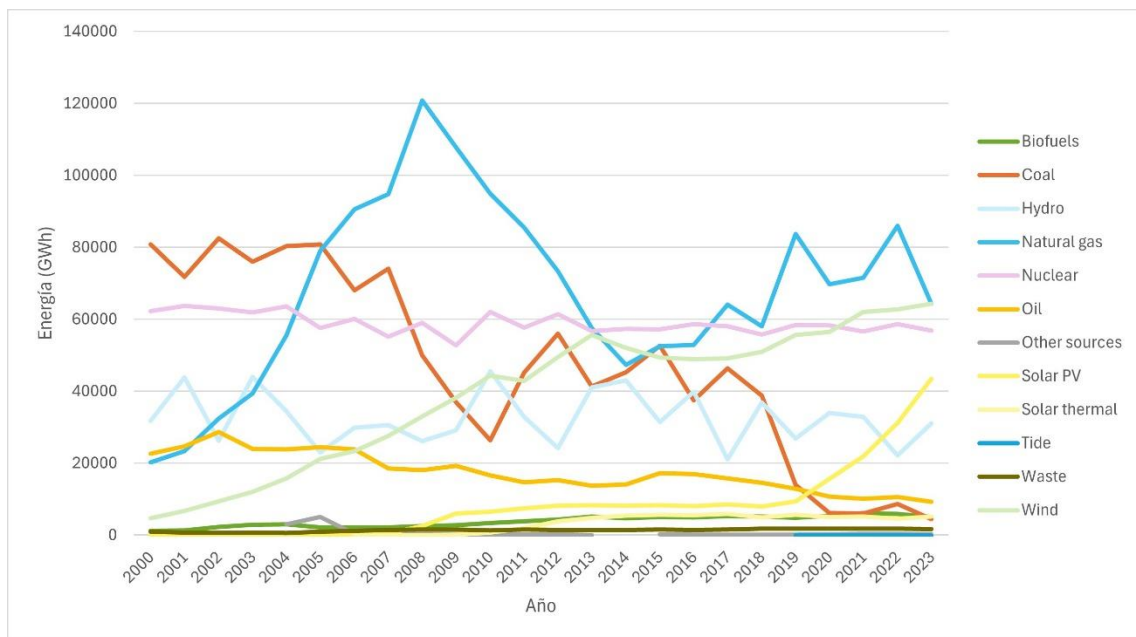


Figura 2.10 Progresión de la generación por fuente de energía a nivel nacional [6]

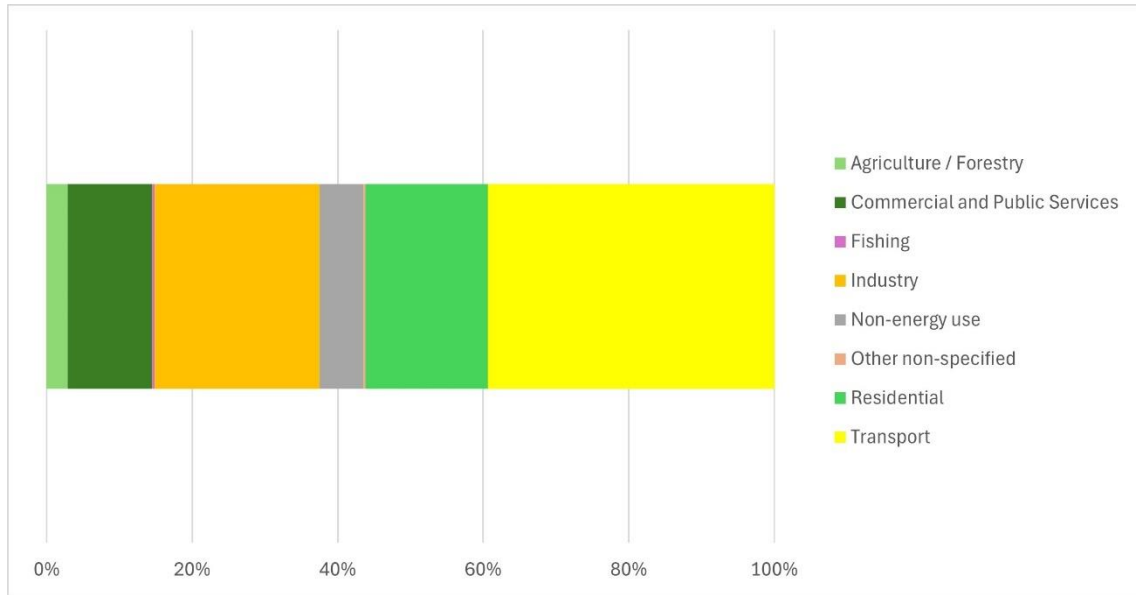


Figura 2.11 Consumo por sector a nivel nacional [6]

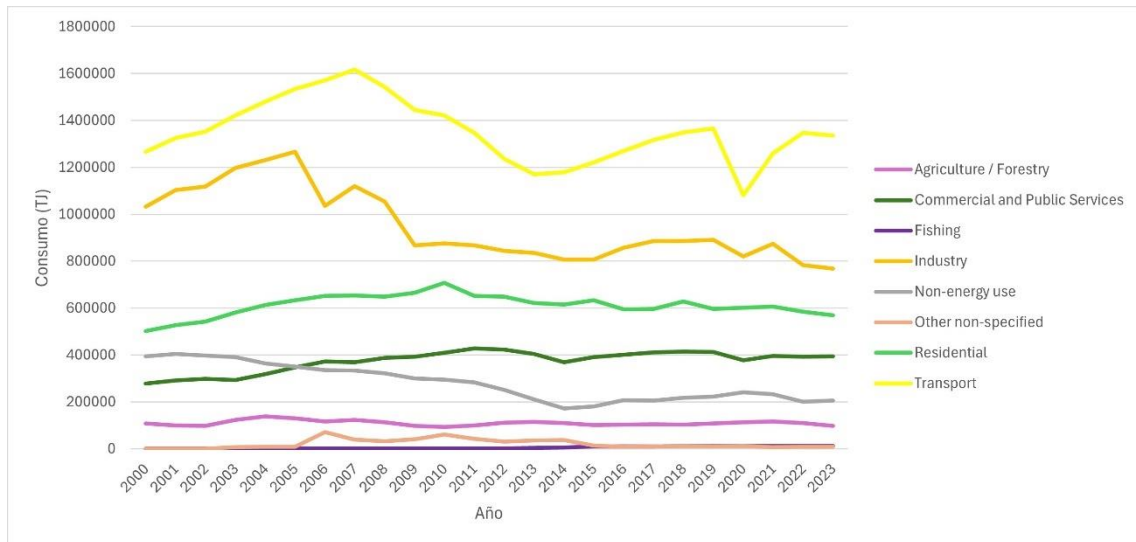


Figura 2.12 Progresión del consumo por sector a nivel nacional [6]

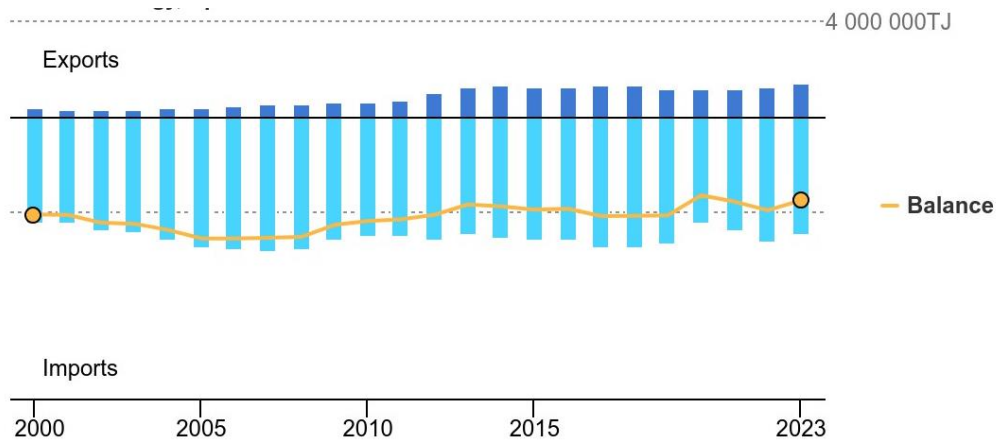


Figura 2.13 Importación de energía a nivel nacional. [6]

Como se puede apreciar en la Figura 2.13 se aprecia el progreso de las importaciones de energía a nivel nacional durante los años. La parte superior de la gráfica (azul oscuro) muestra la exportación de energía, la parte inferior (azul claro) muestra la importación y la línea amarilla muestra el balance, exportaciones menos importaciones. Como era de esperar en el año 2020 hay una importante bajada de 1169477.22 GWh a 932246.38 GWh en el balance de las exportaciones debido a la pandemia [6], lo cual simboliza una bajada del 20.28% respecto al año anterior.

Con una importación de 1469766.11 GWh en el año 2022 España se situaba en sexta posición en cuanto a importaciones entre los países europeos [6]. Esto sumado a que España generó 292454 GWh nos da una dependencia energética sobre las exportaciones del 83.40% siendo más dependientes que el resto de los países que importan más que nosotros en términos absolutos, puesto que dichos países también generan mucho más que nosotros. A pesar de todo esto se ha visto una leve tendencia hacia bajar dicha dependencia.

2.3.1 Dependencia

Las energías renovables son una fuente muy positiva de energía tanto por su impacto positivo sobre el planeta, como por ser fuentes muy económicas en cuanto a materia prima ya que, a diferencia de otras fuentes, es gratuita. Si ven a la hora de la implantación son un poco más costosas luego se amortizan al tener un mantenimiento más fácil y no tener costes de materiales periódicos. A pesar de esto estas fuentes tienen un problema y es que, si bien su mayor fortaleza es que sus recursos son naturales y no contaminantes, estos mismos recursos no son regulables. Esto hace que si, por ejemplo, hay menos horas de sol de las estimadas la generación de las placas fotovoltaicas baja, ídem con los generadores eólicos si hay poco viento.

En España, especialmente Asturias, se ve claro con las centrales de carbón. Estas centrales son más económicas a la hora de construir, al margen de que aportan una energía rápida y controlable. Siendo esto último que podríamos decir que si así lo demandan los usuarios se puede aumentar o disminuir su aportación de una forma mucho más ágil que otras. Sin embargo, esta fuente pese a ser más barata de origen, la necesidad de materia prima hace que se tenga que invertir en extracción del carbón, lo cual es costoso, aparatoso y contaminante, o comprarla a un país distinto lo cual es un aumento de su coste. Al ser esta una fuente de combustión genera gases de efecto invernadero sumado a la impureza del material que baja su eficiencia de combustión y hace que se proyecten a la atmósfera partículas contaminantes.

Todo esto nos demuestra la necesidad de la innovación ya sea mediante hibridación o a mejorar las tecnologías existentes. La hibridación a la hora de generar, tanto una hibridación directa en las centrales que usan varias tecnologías a la vez (eólica-solar, térmica-solar, ...), como una hibridación global como se tiene el sistema actual en el que coexisten varias centrales de generación distintas. Al igual que una necesidad de mejorar las tecnologías existentes y así

mejorar las eficiencias de los equipos principales como las placas fotovoltaicas, pero también es necesario una mejora en la eficiencia de las energías no renovables, ya que cuanto más eficientes son dichas tecnologías menos contaminan.

2.3.2 Desarrollo sostenible

De cara a realizar un desarrollo sostenible ya se están fomentando cada vez más las energías sostenibles como relevo a los combustibles fósiles que son lo más habitual.

En 1882 se implementó la primera planta que generaban energía mediante fuentes renovables, esta fue una central hidroeléctrica a lo largo del río Fox en Wisconsin [7]. A partir de este momento empieza una hoja de ruta a seguir por el resto de países del mundo de cara a una energía limpia. El funcionamiento principal es convertir energía potencial en energía cinética mediante el salto, lo cual significa que para hacer subir el agua se necesita la misma energía que genera al caer. Para distintos saltos hidráulicos se usan diferentes turbinas, las principales son: Pelton, Francis y Kaplan (Figura 2.14). También para saltos muy pequeños se utilizan tornillos de Arquímedes. La elección de que turbina usar depende de la altura del salto y del caudal al que está sometida [8], en la Figura 2.15 se puede ver una gráfica simplificada para la elección de una turbina. A medida que se implantaba más esta tecnología de generación se empiezan a ver sus limitaciones, por ejemplo, la cavitación en las turbinas, el abastecimiento de agua, etc. Dicho abastecimiento se llevaba a cabo mediante diferentes turbinas dependiendo de la altura del salto y al igual que es una limitación también es un punto positivo ya que se puede usar como forma eficiente de almacenamiento de energía. La cavitación se produce cuando no se escoge la turbina de forma adecuada. Esto produce daños muy graves en las turbinas llegando a destrozarlas por completo, ya que este vapor que se genera crea los efectos de unas explosiones dentro de las bombas.

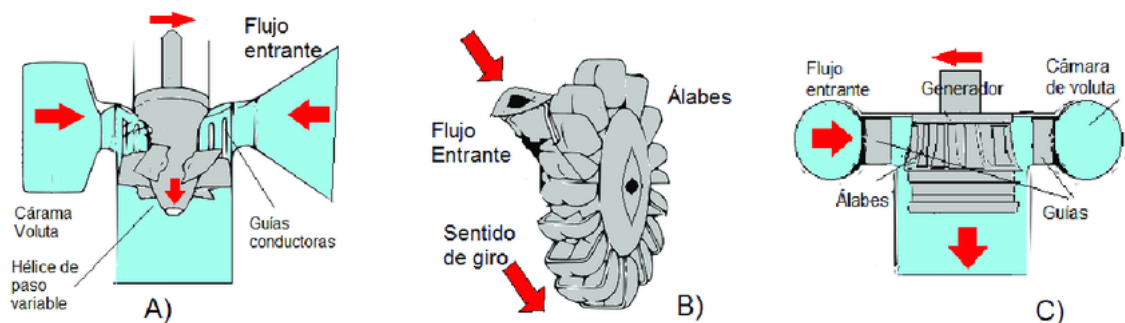


Figura 2.14 Turbinas hidráulicas Kaplan (A), Pelton (B) y Francis (C) [9]

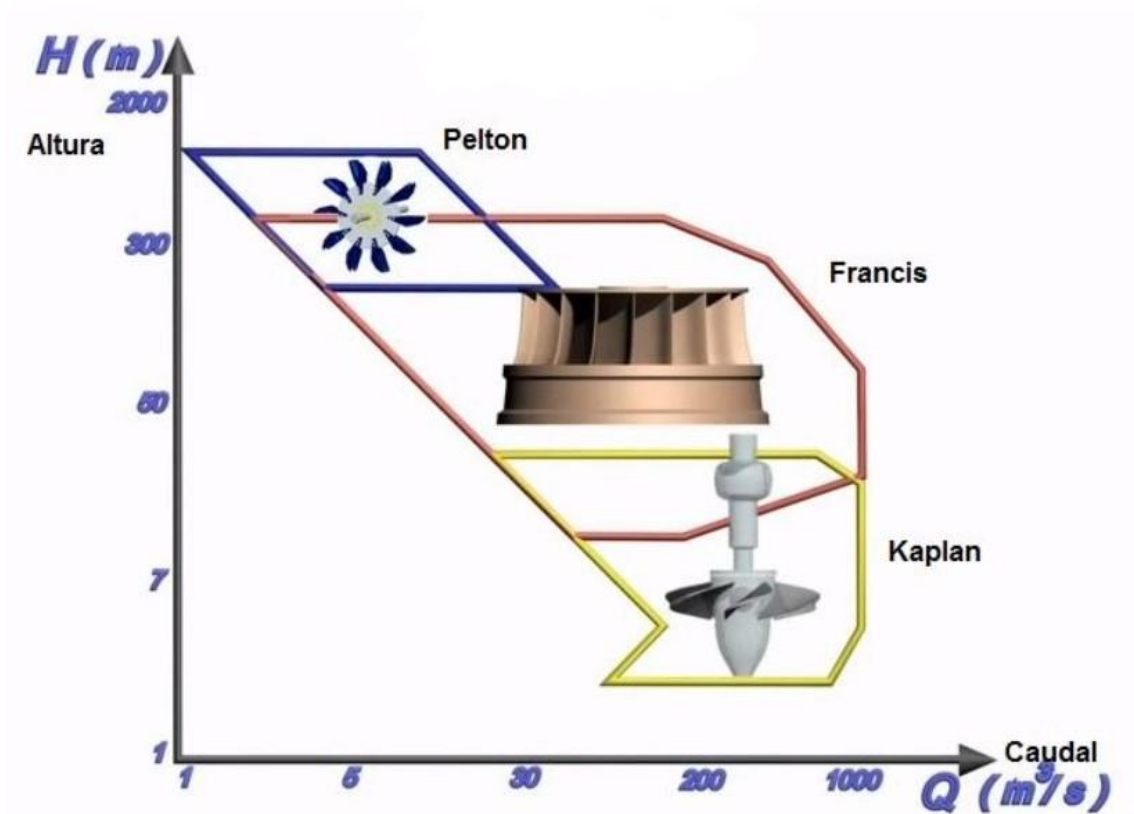


Figura 2.15 Grafica de elección de turbina hidráulica [8]

La siguiente tecnología que se implementó es la generación mediante generadores eólicos. La realidad es que la humanidad lleva mucho tiempo beneficiándose del viento ya sea mediante molinos rudimentarios que se usaban a modo de herramienta o a modo de transporte en barcos. Por ello es lógico que con la llegada de la electricidad también se buscó usar el viento a modo de generación de energía eléctrica y en 1931 se creó el primer aerogenerador [10]. Posteriormente, en esa misma década se empezaron a implementar en mayor medida para generar electricidad.

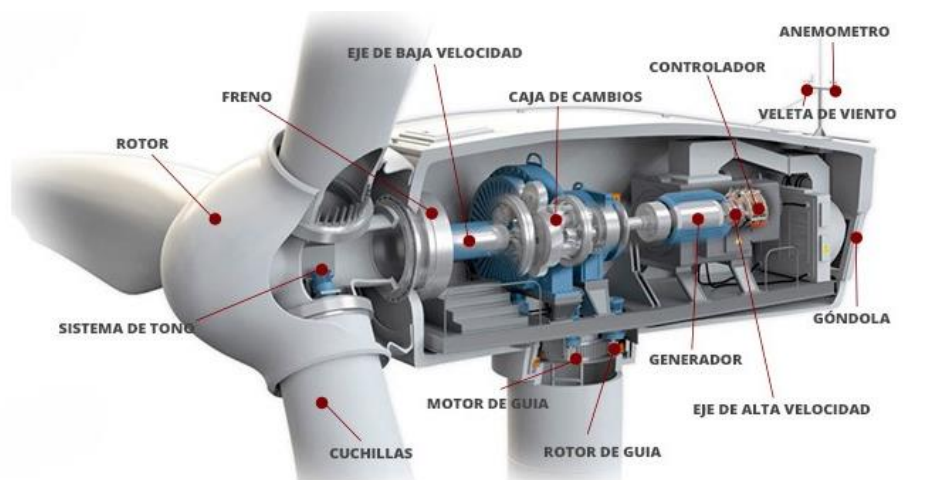


Figura 2.16 Aerogenerador [11]

Después, en 1954, llega la generación fotovoltaica con la llegada de las primeras células fotovoltaicas modernas [12]. Culminando en 1980 con las primeras plantas fotovoltaicas del mundo. En España la primera planta fotovoltaica llegaría poco después y se instaló en Guadalix en 1984 [13]. Su principio de funcionamiento es el inverso al de las luces LED, los diodos reciben luz y generan electricidad.

Estas son las tecnologías más extendidas a nivel mundial, sin embargo, existen otras tecnologías más recientes que están en desarrollo. Estas son: geotérmica, biomasa, mareomotriz, etc. También implementando medidas como la hibridación en plantas, especialmente mediante plantas eólica-solar y térmico-solar.

Por último, cabe mencionar también la energía nuclear que no proviene de una fuente renovable, pero es considerada verde por no emitir gases de efecto invernadero. Esta es una energía muy interesante, ya que tiene una aportación energética muy estable, segura y fácilmente controlable. Aunque tiene unos puntos negativos importantes también, puesto que los residuos que generan son muy difícilmente reciclables y a pesar de que son muy seguras cuando surgen problemas suelen ser problemas de una gravedad importante. Si bien es cierto que las mayores catástrofes de estas plantas han sido por errores humanos dados a una mala planificación (Fukushima) o falta de conocimiento (Chernóbil), también se convierten en objetivos en caso de conflictos.

2.3.3 Medidas para fomentar el ahorro

Las medidas para fomentar el ahorro varían dependiendo del sector comprendidos entre: residencia, oficinas y edificios públicos, industria y transporte.

A nivel residencial son pequeños gestos en cuanto a números singulares, pero que sumado a muchos hogares hacen un gran impacto. Entre estas medidas se puede encontrar medidas como cambiar las luces a luces LED, aprovechar más la luz natural, fachadas ventiladas para emplear menos los sistemas de calefacción y aire acondicionado; también se pueden cambiar los electrodomésticos por electrodomésticos más eficientes y por último se pueden instalar sistemas de placas fotovoltaicas de autoconsumo.

En oficinas y edificios públicos se pueden aplicar varias de las medidas a nivel residencial en cuanto a uso de luz natural, placas de autoconsumo, luces LED, etc. Sumado a un uso de domótica, ya que así se asegura que no se consume electricidad si no es estrictamente necesario y no se quedarían las luces prendidas durante largos periodos de tiempos. También se pueden aprovechar las revisiones periódicas a los sistemas para detectar fallos y corregirlos o actualizar instalaciones obsoletas con eficiencias inferiores.

En el sector de la industria se pueden tomar medidas generales y medidas más personalizadas teniendo en cuenta la especialización de la industria en particular. Como medidas generales se tiene el uso de maquinaria más eficiente o automatizar procesos para ser más dinámico y eficiente.

Por otro lado, dependiendo de la industria se pueden tener medidas adaptadas a ella, por ejemplo, en industrias en las que se genere mucho calor se puede recuperar y aprovechar esas pérdidas.

Por último, como medidas de ahorro aplicadas al sector del transporte se tienen medidas como fomentar el transporte público para aprovechar el mismo trayecto con más gente, fomentar el transporte alternativo sin necesidad de consumir o vehículos eléctricos.

También cabe mencionar el papel de los gobiernos al imponer normativas, proponer incentivos a aquellos que cumplan los objetivos, ayudas para llevar a cabo inversiones y dar visibilidad a esto mediante campañas de sensibilización.

2.3.4 Eficiencia energética

A la hora de ser más eficientes han de hacerse mejoras en las tecnologías y seguir investigando. En este sentido se han hecho avances en varias de las tecnologías de generación renovables. Empezando por avances en hidráulica, como mencionamos anteriormente, se empezó a utilizar como una fuente de almacenamiento a la vez que se utilizaba como generación. Al principio se usaron tornillos de Arquímedes para transportar el agua de vuelta a arriba, pero a medida que había saltos mayores, esto pasó a hacerse con turbinas reversibles de las Francis y Kaplan. En plantas de mayor altura se utilizan bombas específicas para su bombeo.

Al igual que en las hidráulicas se fomentan en plantas fotovoltaicas y eólicas mediante la investigación para mejorar sus eficiencias y mediante la hibridación entre ellas. Como se mencionó antes están la térmico-solar que no se debe confundir una planta térmico-solar con una planta térmica solar, ya que la segunda usa una tecnología idéntica a la de los colectores solares que se analizarán más adelante, pero no es hibridación. De esta forma exploramos dos formas de hibridación distinta, una enfocada a la eficiencia y otra a la complementariedad. La térmico-solar, como se puede ver en la Figura 2.17, está pensada para aprovechar las pérdidas en calor de las placas, mientras que la eólica-solar, de la Figura 2.18, es complementaria ya que usa dos tipos distintos de tecnología que se complementan, ya que en días de menor generación solar es normal ver un incremento en la generación mediante eólico.



Figura 2.17 Placa de generación híbrida térmica-solar [14]



Figura 2.18 Planta de generación híbrida eólica-solar [15]

2.4 Iluminación artificial

En iluminación artificial hay muchos tipos diferente de iluminación, dependiendo de la tecnología que se emplee para generar luz. La primera forma de iluminación fue la iluminación mediante algún tipo de combustible como pueden ser las lámparas de queroseno que, al no depender de electricidad, son la forma más rudimentaria para iluminar de forma fiable. La primera utilización

de la luminotecnia mediante iluminación artificial a gran escala fue en 1882 cuando Nueva York se iluminó por primera vez una calle entera [16] y poco a poco mediante la creación de la normativa y sus posteriores modificaciones buscando la ergonomía y el ahorro llegamos a la actualidad. Los tipos de iluminación son los siguientes:

1. Incandescentes
2. Halógenas
3. Fluorescentes
4. De descarga de gas
5. LED

También se puede distinguir por el tipo de montaje que tienen lo cual, nos da diferente posibilidades y utilidades.

2.4.1 Principios de funcionamiento

Los diferentes tipos de iluminación tienen diferentes funcionamientos y usos.

Incandescentes. Estas luminarias son las más antiguas en funcionar con electricidad. Su funcionamiento es muy simple: se hace pasar una corriente por el filamento de tungsteno encapsulado en un bulbo con gas inerte, haciendo que este se caliente y emita luz. Este método es un método muy simple, pero muy costoso energéticamente por ello está poco a poco cayendo en el desuso.

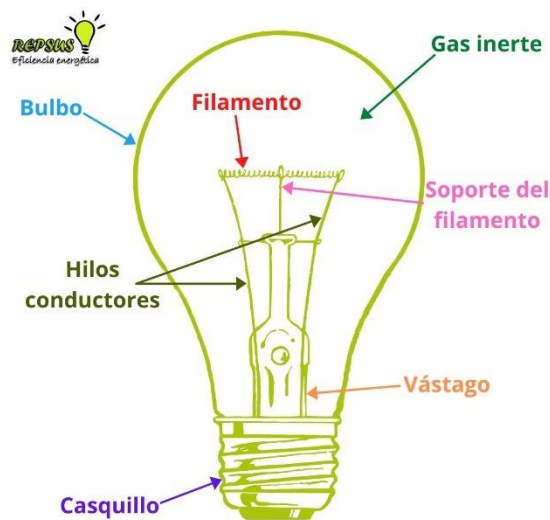


Figura 2.19 Luminaria incandescente [17]

Halógenas. Son una evolución con respecto a la tecnología anterior de las incandescentes, solo que en este caso el bulbo está lleno de gas inerte con mezcla de gas halógeno. Esto permite que la vida útil del filamento aumente ya que está menos exigido y por ello necesita también menos electricidad para la misma cantidad de lúmenes además de alcanzar una luz más fría.

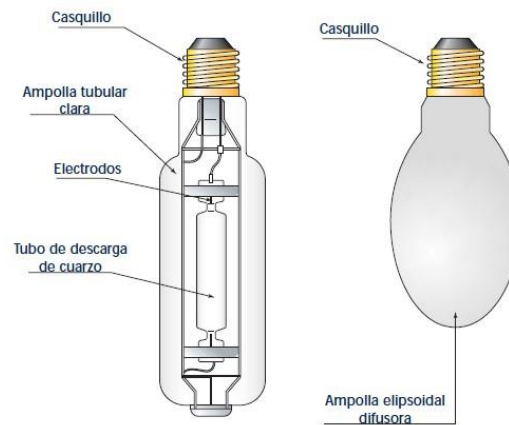


Figura 2.20 Luminaria halógena [18]

Fluorescentes. Las luminarias fluorescentes se componen de un tubo de cristal lleno de un gas inerte y liquido de mercurio, a cada extremo del tubo se encuentran un par de electrodos. Al dar corriente a los electrodos el gas inerte, normalmente argón, conduce y vaporiza el mercurio emitiendo una luz ultravioleta [19]. El borde interior ha sido recubierto de polvo de fosforo el cual al entrar en contacto con la luz ultravioleta reacciona emitiendo luz, este fenómeno se llama fluorescencia y es el que da nombre a este tipo de iluminación. Suministran, sobre todo, luces frías y son mucho más eficientes que las incandescentes o las halógenas.

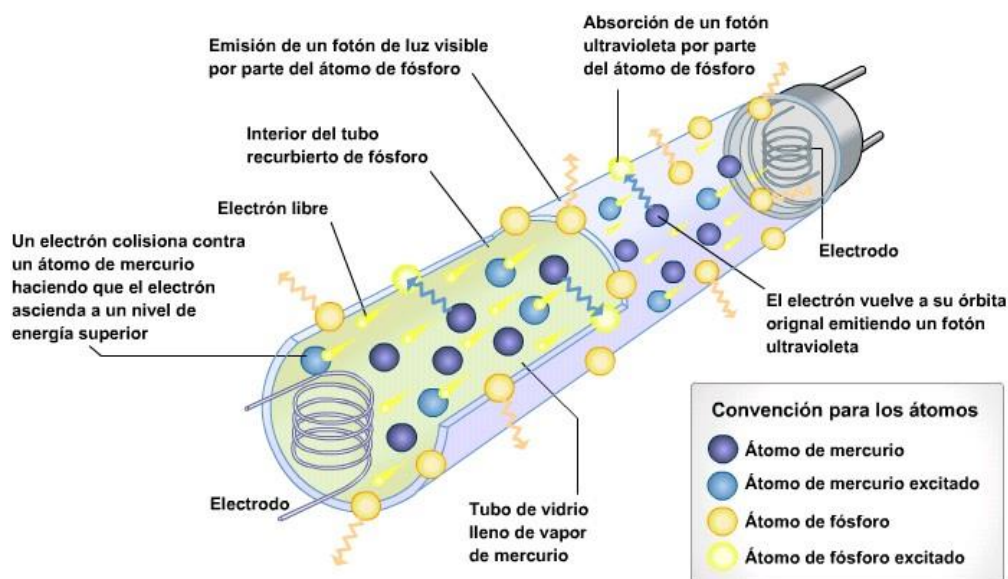


Figura 2.21 Luminaria fluorescente [20]

Luminarias de descarga de gas. Su funcionamiento es una mezcla entre las de incandescentes y las fluorescentes. En este sentido como se ve en las fluorescentes están llenas de un gas, principalmente noble, pero en este caso sería en una especie de plasma o gas ionizado y este gas sustituye el filamento de tungsteno, en el sentido de que, al hacer pasar corriente por el gas, este se excita y emite luz. Estas luminarias emiten tonos cálidos, aunque se puede alterar los colores

según qué gas se introduzca en el tubo junto con el gas conductor. Se distinguen entre alta y baja presión, aunque principalmente se usa las de alta presión.



Figura 2.22 Luminarias de descarga de gas [21]

LED. La tecnología LED (Light Emitting Diode), como su propio nombre indica, se trata de un diodo que emite luz. Esto se consigue porque, si bien es cierto que los diodos pueden absorber luz y suministrar electricidad (funcionamiento en placas fotovoltaicas), también pueden suministrar luz si el flujo de corriente es invertido y la reciben. Aplicado en la iluminación esta propiedad se llama electroluminiscencia. Esta tecnología es la más eficiente y gracias a ello se ha convertido rápidamente en la más utilizada, ya que puede ajustarse a cualquier tipo de uso y cualquier calidez requerida.



Figura 2.23 Luminaria LED [22]



2.4.2 El papel de la iluminación artificial en el contexto energético actual

La iluminación artificial es indispensable en nuestro día a día, sobre todo en el contexto de la edificación para cumplir con las necesidades y normativas para realizar un correcto uso de dichas instalaciones. En los últimos años ha habido grandes avances en la tecnología de la iluminación. Con la llegada de la tecnología LED se ha reducido mucho el consumo energético de la iluminación. Pese a esto todavía hay mucho consumo

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Definiciones previas

En este capítulo repasaremos los conceptos básicos sobre luminotecnia que puedan aparecer más adelante en este documento. empezando por definir lo que es la luminotecnia: es el estudio de la producción, control y aplicación de luz para diferentes aplicaciones mediante fuentes de luz. Las fuentes de luz también las vamos a llamar luminarias. En la Figura 3.1 se puede ver diferentes términos, de izquierda a derecha: flujo luminoso, intensidad luminosa, iluminancia y curva polar.



Figura 3.1 Luminaria emitiendo [23]

3.1.1 Flujo luminoso

Nos referimos al flujo luminoso (Φ) de una luminaria como la potencia emitida por esta en forma de radiación, cantidad de luz emitida. Su unidad de medida es el lumen, cuyo símbolo es lm. El flujo luminoso es la base del resto de parámetros que se analizan en luminotecnia, también es el principal parámetro para el estudio real, ya que es lo que se representa en los diagramas polares de los que hablaremos más adelante.

3.1.2 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa (I) es la cantidad de flujo luminoso emitido únicamente en una dirección por unida de ángulo sólido (ω). Esta se mide en candelas (cd)

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

3.1.3 Iluminancia y emitancia luminosa

La iluminancia y la emitancia luminosa (E) son dos parámetros similares. El primero es el flujo luminoso que incide sobre una superficie mientras que el segundo es el flujo que emite una luminaria dada por unidad de superficie. De la relación se deduce que su unidad serán lm/m^2 , a esto también se le llama lux (lx).

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (2)$$

3.1.4 Rendimiento luminoso

El rendimiento luminoso (η) se refiere a la cantidad de luz que emite una fuente por potencia (P) consumida. Se mide en lm/W .

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (3)$$

3.1.5 Luminancia

Este término se refiere a la cantidad de intensidad luminosa que atraviesa una sección determinada. Se mide en candelas por m^2 .

$$L = \frac{I}{S} \quad (4)$$

3.1.6 Irradiancia e irradiación

La irradiancia es un término que se refiere a la potencia de la radiación por superficie. Se mide en W/m^2 . Mientras que la irradiación es la irradiancia a lo largo del tiempo medida en Wh/m^2 .

3.1.7 Índice de reproducción cromática

El índice de reproducción cromática (IRC) es la capacidad de una fuente de luz para representar colores. Este índice no tiene unidades de medida y está en un rango de 0 a 100, siendo 100 la mejor representación posible de dichos colores correspondiente, por ejemplo, a la luz natural.

3.1.8 Diagrama polar

El diagrama polar o curva polar, es la representación de la emisión lumínica de una luminaria. En estos diagramas se identifican los ángulos y la posición de la luminaria y se representa la forma de la luz emitida por dicha luminaria. Esto nos ayuda a saber que luminaria es más apropiada para diferentes situaciones como puedan ser luminarias que emiten en una dirección concreta angular, que emitan más en el centro que en los laterales, tanto arriba como para abajo, ...

3.1.9 Contraste

El contraste lumínico es la comparación de la capacidad de reflejar luz entre superficies. A diferencia del contraste cromático que es la diferencia en la capacidad de reflejar luz entre diferentes colores [24].

3.1.10 Latitud

La latitud es la distancia angular en grados hacia el norte o hacia el sur en la tierra con respecto del ecuador. El ecuador es el punto 0° y desde ahí medimos, si es al sur se denota con una “S” detrás del número y si es al norte con una “N”.

3.1.11 Longitud

La longitud es la distancia angular en grados hacia este u oeste con respecto al meridiano de Greenwich. El origen es el meridiano de Greenwich y, análogo a la latitud, se denota con una “E” o una “O” detrás del valor.

3.1.12 Ángulo horario y hora UTC

El ángulo horario es el ángulo que mide la distancia entre el meridiano local y el meridiano celeste, siguiendo la línea del ecuador.

La hora UTC es la hora basada en la rotación de la tierra y que sustituye al antiguo sistema centrado en el meridiano de Greenwich. Este horario se expresa como una hora global mundial que dependiendo del meridiano en el que se encuentre se sumaran o se restaran horas completas, por ejemplo, en España es horario UTC+1.

3.2 Movimiento del Sol

Cuando hablamos en el contexto de estudiar la luz que viene del sol proponemos la entelequia de que el sol se mueve. Esto se supone puesto que desde el punto de vista del observador parecerá que, efectivamente, el sol se mueve. Esto es importante ya que a lo largo del día la posición es distinta y también lo es la iluminación que se recibe. Esto se ve representado en la Figura 3.2 en la que se muestra también el efecto de la declinación solar que se verá más adelante.

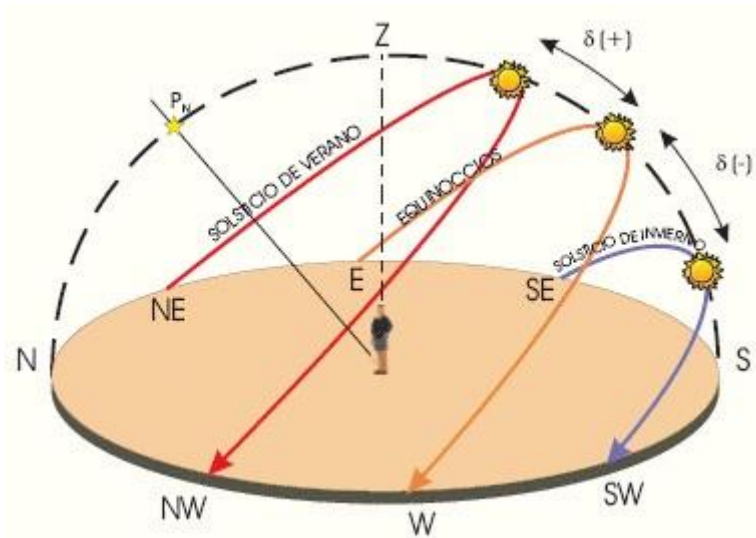


Figura 3.2 Movimiento solar relativo [25]

3.3 Cenit y Nadir

El cenit es el punto más alto del sol, cuando el sol se encuentra directamente encima; mientras que el nadir es el antónimo del cenit, es decir cuando el sol se encuentra directamente opuesto. Es decir, para un mayor aprovechamiento de la radiación solar nos interesa el cenit ya que es cuando los rayos del sol inciden de forma más eficiente sobre la superficie terrestre. Aunque el cenit solar se dé una vez al año, en el solsticio de verano, una vez al día hay un momento en el que el sol está en posición cenital sin ser un cenit solar.

3.4 Polos celestes y ecuador celeste

A la hora de representar tanto las coordenadas del sol relativa como la declinación solar se suelen realizar esferas celestes como las de la Figura 3.3, aplicando el concepto de movimiento del sol, con la tierra como centro y mostrando las trayectorias del sol.

Para realizar dichas esferas se pone en el centro la tierra orientada, pero para orientarla hay que colocarla en el eje de los polos celestes. Estos polos atraviesan la tierra por su norte y sur. también hay que aplicar el concepto de ecuador celeste, el cual es el mismo concepto que los polos celestes, pero pasando este por la línea del ecuador. En la Figura 3.4 se puede ver otro ejemplo de esfera celeste esta vez para la visualización de la declinación solar

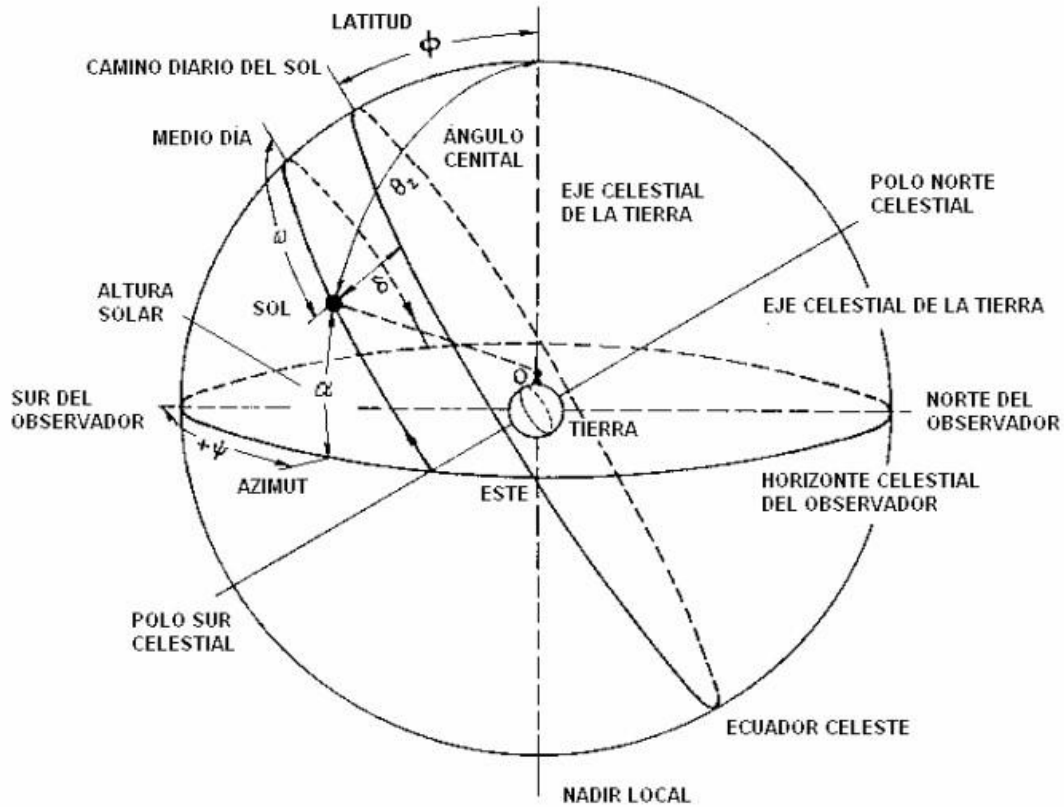


Figura 3.3 Esfera celeste con el movimiento solar [26]

3.5 Movimiento anual

Con el término del movimiento anual nos referimos a la órbita completa alrededor del sol y las alteraciones que esto implica sobre el movimiento del sol aplicando los efectos de la declinación. Buena muestra de esta variación es el efecto que causa sobre el tiempo solar y por ello hay una corrección con respecto al tiempo solar verdadero.

3.6 Sistemas de coordenadas

3.6.1 Coordenadas acimutales

Las coordenadas acimutales son coordenadas que tienen como referencia el acimut y siguen en la distribución de norte, este, sur y oeste. Estas coordenadas varían con la hora del día.

3.6.2 Coordenadas ecuatoriales

Es el sistema de coordenadas más común y tienen como referencia la línea del ecuador. Estas coordenadas no dependen de la hora del día, por eso son más utilizadas, nos dan una mayor estabilidad.

3.7 Relaciones solares

3.7.1 Distancia Tierra – Sol

La distancia entre la tierra y el sol es de aproximadamente 150 millones de kilómetros esto hace que las condiciones en la tierra sean diferentes a otros planetas, no recibe tanta radiación como planetas más cercanos ya que se pierde parte de la radiación por el camino, al ser tanta distancia por recorrer. También se ve afectado por la atmosfera, única en nuestro planeta que filtra ciertos rangos de longitud de onda y los atenúa.

3.7.2 Declinación solar

Otro concepto importante a tener en cuenta es el término de la declinación solar. Este término se refiere a la inclinación del eje de rotación de la tierra. Al igual que con el movimiento del sol se toma la tierra como base y asumiremos que esta inclinación es del sol con respecto al ecuador.

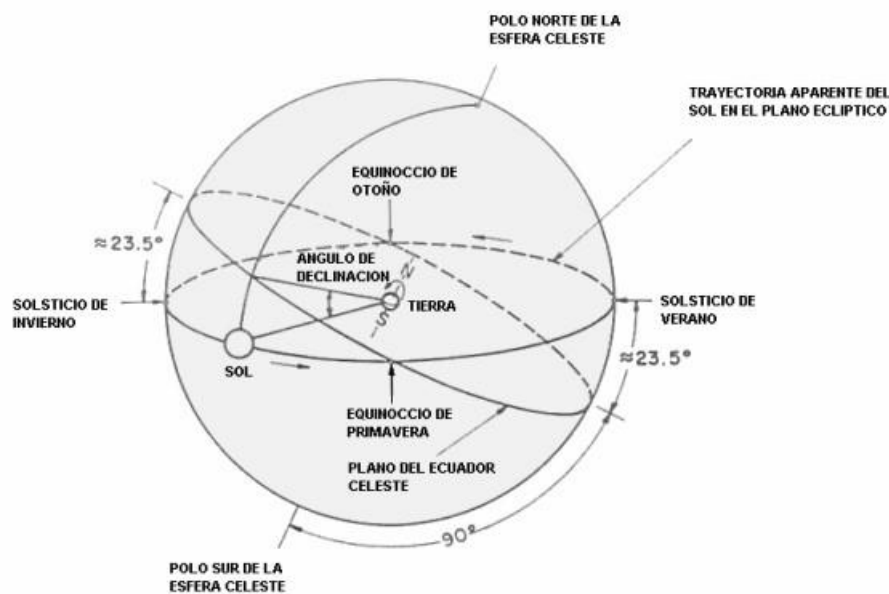


Figura 3.4 Esfera celeste con la declinación solar [26]

La declinación solar depende de la época del año. Este ángulo, que se denota con la letra griega “ δ ”, varía desde 23.45° durante el solsticio de verano, hasta -23.45° en el solsticio de invierno,

pasando por los 0° durante los equinoccios de primavera y de otoño. En la figura se puede ver las configuraciones de los tres puntos clave que se han mencionado previamente.

La variación del ángulo de declinación solar varía a razón de la siguiente fórmula [26]:

$$\delta = -23.45 \times \cos\left(\frac{360}{365} \times (d + 10)\right) \quad (5)$$

Siendo “d” el día del año empezando en el 1 de enero.

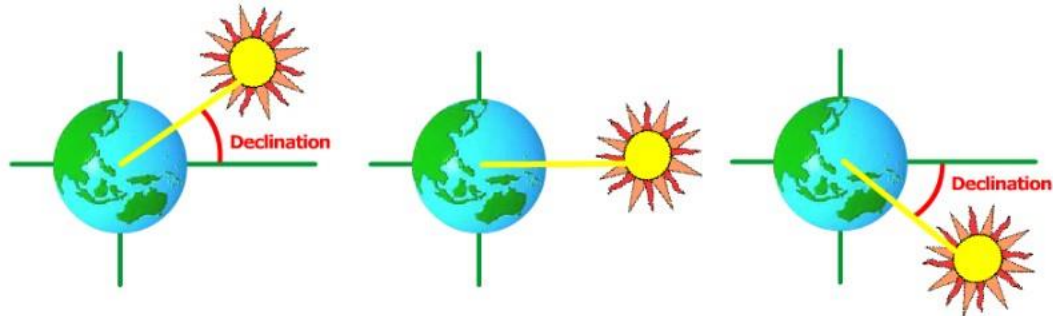


Figura 3.5 Declinación solar con respecto a la tierra. [27]

3.7.3 Ecuación del tiempo

Debido a la órbita de la tierra hay una diferencia entre la hora solar verdadera y la hora solar media. La ecuación del tiempo es la que relaciona estos dos conceptos, de esta forma cuando se desarrolla el gráfico de la Figura 3.6, con el cual se puede calcular la hora solar verdadera con la hora medida por un reloj de sol. En el eje vertical se tiene la corrección de la hora en minutos y en el horizontal los meses del año.

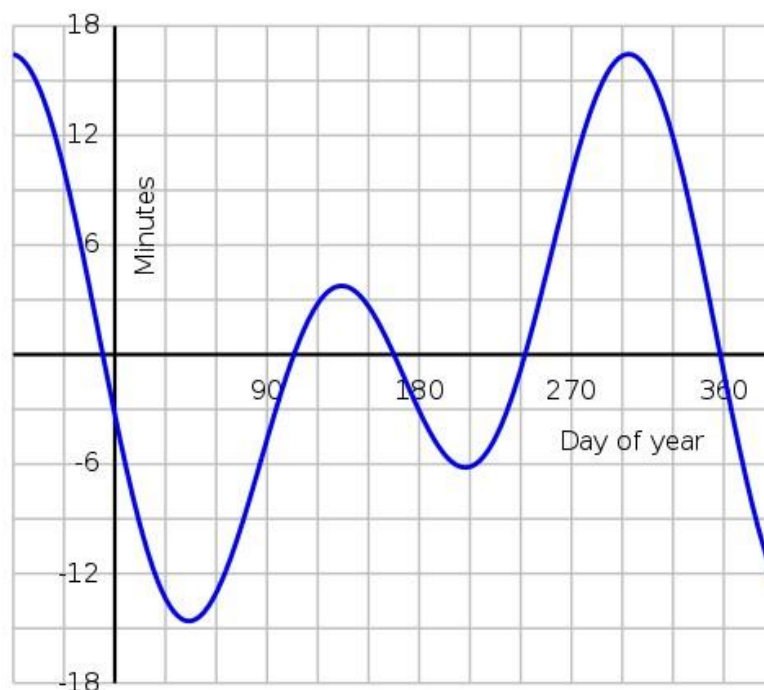


Figura 3.6 Gráfica de la ecuación del tiempo. [28]

Este gráfico está graficado en función de: Tiempo solar verdadero - Tiempo solar medio.

3.7.4 Tiempo solar verdadero

El tiempo solar verdadero corresponde a la hora real del sol en base a su posición real. Esto se puede calcular a partir de la gráfica de la Figura 3.6 usando la hora medida a través de un reloj solar y aplicando el factor de corrección de la gráfica en función del día y mes [29].

3.7.5 Posición del Sol relativa a superficies horizontales

A la hora de calcular la irradiación y la irradiancia solar que llega a las superficies horizontales de la tierra hay que tener en cuenta las relaciones trigonométricas entre la posición del sol en el cielo y a las coordenadas de la superficie esto se puede ver claro en la esfera celestrial que se ve en la Figura 3.3.

3.8 Irradiación solar

Antes vimos lo que significaba el término irradiación y ahora ahondaremos en el término aplicado al sol. La irradiación solar es la cantidad de energía que llega a la tierra procedente del sol que será la que utilizaremos en la generación mediante placas fotovoltaicas.

3.9 Irradiancia solar

Aplicando el concepto previo de irradiancia nos centraremos ahora en aquella irradiancia que viene del sol como fuente natural de iluminación y en su catalogación.

3.9.1 Espectro de irradiancia

El espectro de irradiancia, más conocido como espectro electromagnético, es la forma en la que ordenamos las ondas de luz que irradia el sol en función de su longitud de onda. Este espectro que se puede ver en la Figura 3.7 viene dividido por longitud de onda. En función de la longitud de onda, tiene diferentes utilidades, aunque ciertos rangos no lleguen a la superficie del planeta y necesiten maquinarias específicas para ser proyectadas (rayos X, ...).

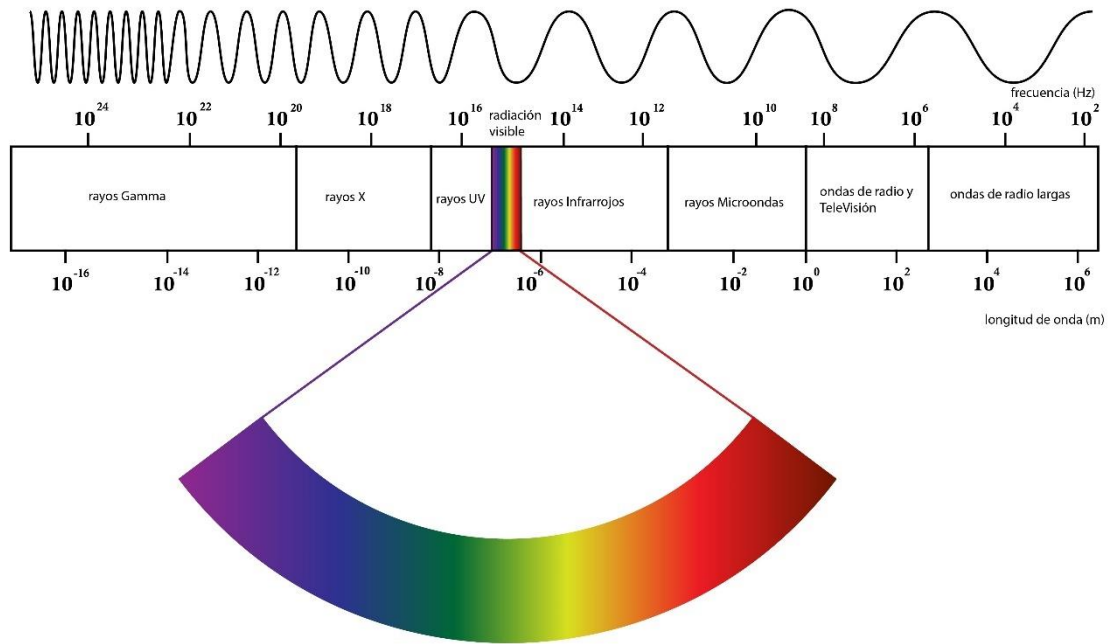


Figura 3.7 Espectro de irradiancia solar [30]

3.10 Eficacia luminosa

Nos es importante saber cómo se divide la luz que viene del sol por sus propiedades físicas, ya que sabiendo esto se puede aplicarlas para su mejor aprovechamiento.

3.10.1 Curva de sensibilidad espectral

Aplicado al espectro de irradiancia solar, la curva de sensibilidad espectral nos da la sensibilidad del ojo humano a las distintas longitudes de onda en las que existe dicha luz. Como se puede ver en la Figura 3.8, el ojo humano promedio puede ver en un rango de [380, 780] nm [31], siendo más sensibles a los rangos intermedios.



Figura 3.8 Curva de sensibilidad espectral [32]

4. POR QUÉ INCLUIR LUZ NATURAL

4.1 Efectos perjudiciales de la luz artificial

Uno de los principales motivos por los cuales es importante incluir luz natural en las zonas de trabajo es porque la iluminación artificial conlleva numerosos efectos perjudiciales. Estos efectos perjudiciales son los que vamos a analizar en este segmento, junto con las causas de dichos perjuicios.

4.1.1 Efecto flicker

El efecto Flicker se refiere al efecto que se produce en las luminarias LED y se refiere a un rápido parpadeo de dicha luminaria debido a una fluctuación en la intensidad. El nombre viene de la palabra inglesa “flick”, que hace referencia al parpadeo, ya que la palabra “flick” referido a un interruptor se refiere al acto de accionarlo. Se debe mayormente a un fallo en la alimentación de la luminaria ya sea por ser de baja calidad o por haber un defecto en la instalación.

Este efecto en las personas puede tener efectos adversos en la salud tales como: Fatiga visual, dolores de cabeza, migrañas y estrés por el ambiente incomodo que provocan.

4.1.2 Deslumbramiento

Cuando una estancia no se ilumina debidamente empiezan las dificultades para ver con claridad, si bien lo más común al dificultar la visión es la falta de iluminación, también su exceso puede causar disminuir la capacidad visual de un individuo o distorsionar la percepción. En el caso de que pase esto por un exceso de iluminación lo se llamará deslumbramiento.

El deslumbramiento se puede distinguir entre fisiológico o psicológico [33]. Si se sus efectos son sobre la capacidad visual será lo que nos referimos como fisiológico, mientras que si afecta a la asimilación de la información. Esto puede causar sensibilidad al deslumbramiento a edades avanzadas o malestar, además de la dificultad en el instante en el que se produce el deslumbramiento.

4.2 Efecto Purkinje

El efecto Purkinje fue descubierto por Jan Evangelista Purkyně, histólogo y fisiólogo checo, en 1819. Para entender el efecto primero hay que comprender que en el ojo hay dos tipos de células distintas: conos y bastones. Los conos son más sensibles a la luz amarilla y los bastones trabajan en niveles más bajos de iluminación, estos son sensibles al espectro más cercano al azul. En esto

se asienta la base del efecto Purkinje, este dice que cuando hay un nivel bajo de iluminación se activan los bastones y tendemos a ver colores como verde o azul [34].

Este efecto nos explica porque somos más sensibles al deslumbramiento a oscuras, porque somos menos receptivos a los colores claros.

4.3 Efectos positivos de la luz natural sobre humanos

La luz natural tiene múltiples efectos beneficiosos sobre el ser humano, por eso es tan importante su implementación en ambientes en los que vayamos a pasar mucho tiempo o bien hacer mucho trabajo.

4.3.1 Efectos físicos

Uno de los aspectos afectados es el aspecto físico de las personas. Mediante la luz natural se favorece la producción de vitamina D, la cual mejora la presión arterial [35]. Según estudios también afecta al ritmo circadiano de los seres humanos, regulándolo de forma positiva.

4.3.2 Efectos psicológicos

Otro aspecto importante es el aspecto psicológico, hay una diversidad de estudios en los que se menciona la segregación de serotonina, entre otros, impactando positivamente en las personas reduciendo el estrés, la depresión, etc. [36] Una prueba de ello es la llamada depresión estacional que se sufre en países que tienen muy pocas horas de sol como los países escandinavos.

4.3.3 Efectos sobre la actividad

La iluminación natural tiene efecto también en la productividad y la concentración de las personas trabajando bajo esas luces. Los estudios nos indican que en oficinas en las que hay una correcta iluminación natural se reduce el absentismo y hay una mayor productividad, al igual que impacta positivamente en el desempeño académico. También mejora el desempeño en la actividad física.[37]

4.3.4 Efectos térmicos

Por último, estudiaremos los efectos térmicos de la iluminación natural. La entrada controlada de luz solar se usa también para regular la temperatura de las estancias en las que incide. Esto nos proporciona un confort térmico.

4.4 Eficiencia energética

Ahora vamos a hablar de la eficiencia energética de la luz natural. Esto tiene sentido desde dos puntos de vista: económico y ecológico.

4.4.1 Ahorro económico

Desde el punto de vista del ahorro económico la iluminación natural es extremadamente eficiente puesto que su consumo energético es nulo. Es inevitable a la larga utilizar iluminación artificial, pero al compaginarla con la luz natural esto nos daría tramos en los que no se tendría coste, reduciendo así el consumo habitual.

4.4.2 Beneficio ecológico

El otro punto a tener en cuenta a la hora de la eficiencia es el ecológico. Si bien como individuos nos interesa el rédito económico que le podamos sacar a la iluminación natural, tanto como individuos como como sociedad nos interesa aún más el punto de vista ecológico. Este punto de vista es muy similar al ahorro económico, ya que también se basa en el concepto de consumir menos electricidad. Al consumir menos muchos individuos la demanda energética baja, con lo cual, si partimos de que el suministro de las energías renovables no es regulable, podríamos bajar el consumo de energías no renovables para ajustar la demanda y con ello contaminar menos.

5. NORMATIVA

La normativa surge por la necesidad de regulación en ciertos sectores concretos y mediante el desarrollo de su actividad se va modificando y adaptando.

5.1 Normativa aplicada a nuestro caso

Aplicando la normativa a la luminotecnía se ve que a medida que se iban desarrollando las tecnologías y salían nuevos informes, esta se iba adaptando. Las adaptaciones iban buscando la ergonomía y los beneficios para la salud de los usuarios. Poco a poco también se empezaron a desglosar en base a su uso dentro de edificios específicos, por ejemplo, las estaciones ya no estaban únicamente englobadas como estaciones, si no que se desglosaban en función del uso de cada una de las salas. En nuestro caso concreto se puede ver en la Figura 5.1 como las necesidades de los diversos edificios (y salas de mismos edificios) son distintas entre sí. Para que no sea excesiva la iluminación con tal de cumplir los requisitos se introduce el VEEL, un factor de eficiencia energética de la instalación.

2. INSTALACIONES FERROVIARIAS						
Nº REF.	TIPO DE INTERIOR, TAREA ACTIVIDAD	E_{mlux}	UGR_L	U_0	R_a	OBSERVACIONES
2.1	ANDENES CUBIERTOS, NÚMERO PEQUEÑO DE PASAJEROS	100	-	0,4	40	Iluminación a nivel de suelo y evitar deslumbramiento
2.2	ANDENES CUBIERTOS, NÚMERO GRANDE DE PASAJEROS	200	-	0,5	60	
2.3	PASOS SUBTERRÁNEOS, NÚMERO PEQUEÑO DE PASAJEROS	50	28	0,5	40	Iluminación a nivel del suelo
2.4	PASOS SUBTERRÁNEOS, NÚMERO GRANDE DE PASAJEROS	100	28	0,5	40	Iluminación a nivel del suelo
2.5	SALA DE TAQUILLAS Y VESTÍBULO	200	28	0,5	40	
2.6	OFICINA DE BILLETES, DE EQUIPAJES Y DE CONTADORES	300	19	0,5	80	
2.7	SALAS DE ESPERA	200	22	0,4	80	

Figura 5.1 Normativa de las estaciones [38]

5.2 Ahorro de energía

Al margen de la ergonomía de los usuarios también se busca, con las adaptaciones de la normativa, el ahorro de energía de tal forma que sea ecológico y ergonómico. Una de estas medidas es con respecto al uso de máquinas cada vez más eficientes y esto viene estandarizado y visible para que se puedan tener en cuenta a la hora de usar estos aparatos.

Las medidas de ahorro de la normativa han ido variando con el tiempo con respecto a acuerdos internacionales. Empezando por el protocolo de Kioto, del que hemos hablado previamente, para después actualizar las necesidades y objetivos en el acuerdo de Paris 2015, el cual condiciona la

normativa para conseguir los nuevos objetivos entre los cuales se encuentra fijar el aumento de la temperatura global en un máximo de 2°C. [39]

En la actualidad nos encontramos en medio de la agenda 2030, lo cual es un paquete de medidas para cumplir unos objetivos fijados para el año 2030, en la Figura 5.2 se puede ver algunos de los objetivos de dicha agenda para un desarrollo sostenible en España.



Figura 5.2 Objetivos agenda 2030 [40]

6. SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL

6.1 Fuente de luz natural

La fuente de luz natural, como es lógico, será el sol. Desde el sol nos llegan ondas del espectro electromagnético que debido a la distancia que tiene que viajar y a las partículas flotantes de nuestra atmósfera se ven afectadas en su llegada a la superficie terrestre. Esta luz será la que aprovechese para nuestra iluminación.

6.2 Concentrador solar

El concentrador solar es el que nos permite llevar a cabo de forma real la complementariedad de la luz natural con la luz artificial. Este dispositivo concentra los rayos solares magnificando su potencia para su posterior transmisión hasta donde es necesaria. Hay diversos tipos de colectores, que se puede ver en la Figura 6.1, que se pueden emplear para utilizar un sistema de iluminación natural: de platos parabólicos (a), de canal parabólico (b), lentes Fresnel (c) o reflector lineal Fresnel (d) [41].

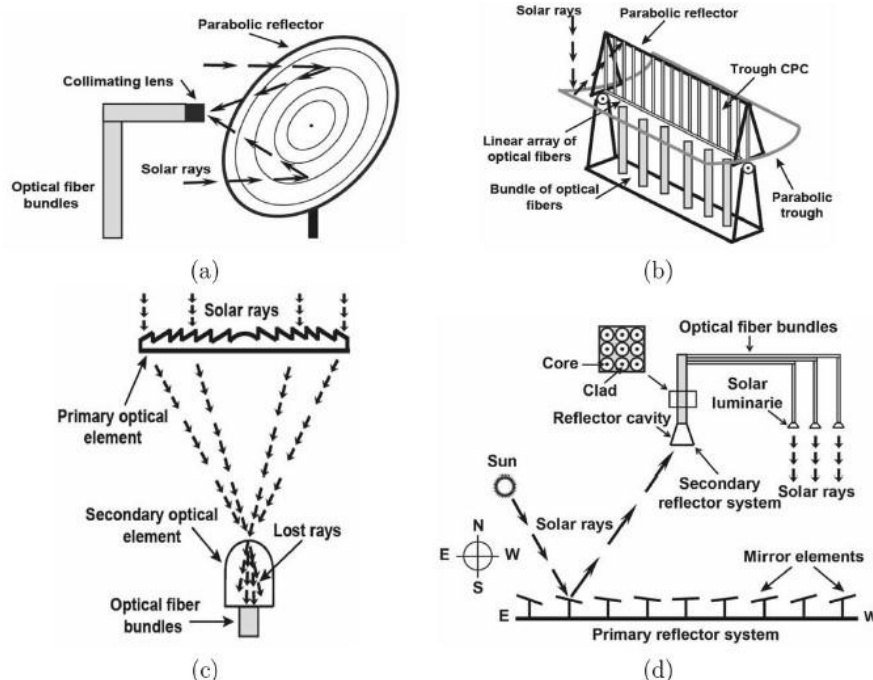


Figura 6.1 concentradores solares. [41]

6.2.1 Reflector lineal Fresnel

En concreto utilizaremos un colector que se llama reflector lineal Fresnel. Su principio de funcionamiento es el siguiente: se tiene un sistema que llamaremos sistema reflector primario

compuesto de espejos orientados para recoger la máxima cantidad de luz posible y reflejarla el reflector secundario el cual es un colector, este colector está conectado a los cables de fibra óptica que van hasta las luminarias y estas a su vez proyectan la luz que les llega a través de los cables de fibra óptica [42]. En la Figura 6.2 se puede ver un reflector lineal Fresnel conectado a una simplificación del sistema de distribución.

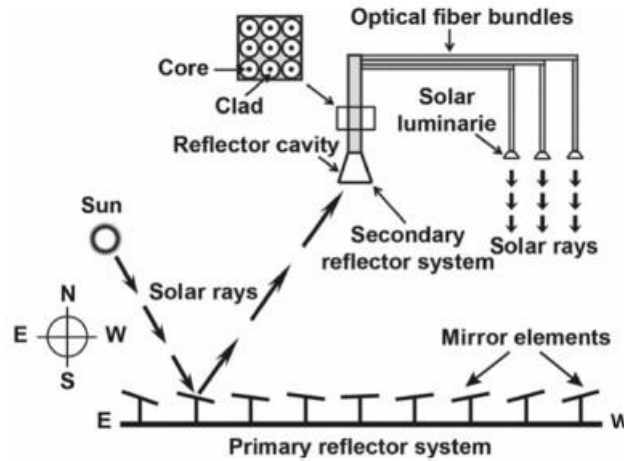


Figura 6.2 Reflector solar Fresnel [41]

6.3 Sistema de transmisión

6.3.1 Ley de Snell

La ley de Snell establece una forma de calcular la trayectoria de la una onda de luz entre dos medios mediante una relación entre sus índices de refracción, su ángulo de incidencia y su ángulo de refracción. Se puede ver una demostración grafica en la Figura 6.3 junto con la relación de la ley de Snell.

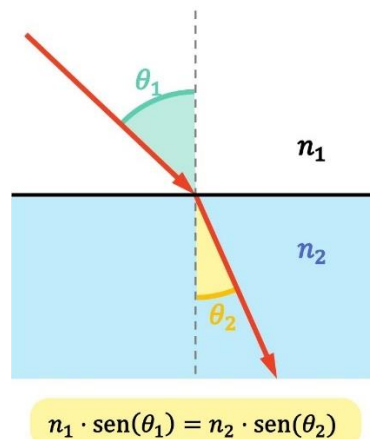


Figura 6.3 Ley de Snell [41]

Siendo la primera parte los parámetros: índice de refracción del primer material y ángulo de incidencia. La segunda parte el índice de refracción del segundo material y el ángulo de refracción. Normalmente queremos el ángulo de refracción para poder crear una trayectoria de la onda.

6.3.2 Reflexión interna total

La reflexión interna total es un fenómeno que se da cuando se tiene una onda electromagnética que cambia entre medios de distinto valor en el índice de refracción y con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico específico, siendo el cambio de índice de refracción de menor a mayor. De esta forma la onda se refleja completamente de vuelta al medio con el índice de refracción mayor y no ocurre transmisión al otro medio, este principio se puede ver en la Figura 6.4 [43]. También se puede ver el cono de aceptación el cual nos indica el rango en el que admite las ondas luminosas.

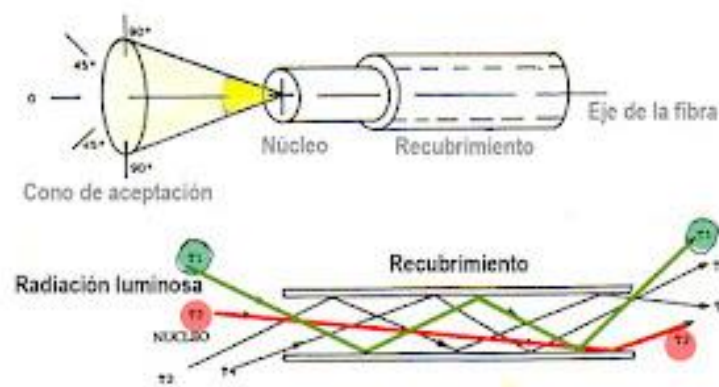


Figura 6.4 Principio grafico de la RIT [44]

6.3.3 Fibra óptica

La fibra óptica es un medio que nos permite transportar ondas en el espectro electromagnético. Similar a los cables de cobre convencionales, pero en vez de transmitir electricidad mediante la excitación de sus electrones, transmite información en ondas de luz. Este cable está compuesto por pequeñas fibras de vidrio embutidas dentro de un plástico aislante para protegerlo. Esta tecnología se usa principalmente en el campo de la telecomunicación, ya que estos cables son ideales para el transporte de buses de información entre servidores. Aunque en los últimos tiempos se está empezando a emplear para transportar la iluminación natural y crear luminarias que puedan suministrar una fuente de luz que pueda cumplir con la normativa vigente. El principio de funcionamiento del cable se basa en el concepto de reflexión interna total. Bajo este principio funcionan los cables de fibra óptica que se usará, el núcleo del cable tiene un índice de refracción

mayor que el del revestimiento para que así se concentren en el centro del cable y haya las mínimas pérdidas posibles.

6.3.4 Ángulo de aceptación y apertura numérica

El ángulo de aceptación (θ_c) es el ángulo máximo con respecto al eje de la fibra para aprovechar la propagación por RIT. Mientras que la apertura numérica (NA) se refiere a la medida de la capacidad de la captación de luz mediante la fibra óptica, a mayor apertura numérica mayor es el rango del ángulo de aceptación. Se relacionan mediante la siguiente fórmula. Figura 6.4

$$NA = \sin(\theta_c) = \sqrt{n_{nucleo}^2 - n_{rev}^2} \quad (6)$$

6.3.5 Pérdidas

Ahora nos centraremos en las pérdidas de la fibra óptica. Los cables de fibra óptica, así como los de cobre, tienen pérdidas tanto por el material como por la energía que por ellos circula. Similar al efecto piel en el cobre, los cables de fibra óptica tienen pérdidas en el material debida a que este está compuesto por múltiples cables de fibra óptica juntos. También hay pérdidas en las ondas electromagnéticas que transporta, al igual que en las líneas de transporte de alta tensión se tienen pérdidas por kilómetro, en los cables de fibra óptica también se tiene pérdidas por kilómetro, solo que en este caso son decibelios (dB) y es dada por el fabricante [4]. Otras pérdidas son en función del ángulo de incidencia sobre la entrada de la fibra óptica.

6.3.6 Elección del tipo de fibra óptica

Para la elección de fibra óptica se deben tener en cuenta los siguientes criterios [45]:

1. Especificaciones del ancho de banda. Se distingue entre fibra monomodo y multimodo. La monomodo es más utilizada como sistema de transmisión de datos, mientras que la multimodo permiten velocidades mayores, lo cual lo hace mejor para sistemas de iluminación.
2. Distancia de transmisión. En este apartado se tiene en cuenta la atenuación, dispersión, amplificadores y regeneradores. La atenuación es la pérdida de la señal medida en dB/km, la dispersión se controla mediante los amplificadores y regeneradores y es menor en el monomodo, esto hace que el monomodo sea mejor para transmisión en largas distancias.
3. Entorno de instalación. Lógicamente, hay que tener en cuenta también si el cable va a estar a la intemperie o no para saber que protecciones debe de tener.
4. Flexibilidad y diámetro. Para transmitir hay que tener en cuenta su tamaño, puesto que no queremos sobredimensionarlo, ya que perderíamos iluminación, ni infra dimensionar

puesto que tampoco transmitiría la cantidad necesaria. También hay que tener en cuenta la flexibilidad, puesto que al ser vidrio tiene un límite para doblarlo sin estropearlo.

5. Largo plazo. Ya que suelen ser instalaciones de larga duración es importante tener en cuenta la durabilidad y sus mantenimientos y la compatibilidad con las futuras tecnologías que se puedan implementar.

6.4 Sistema de distribución

En los últimos tiempos se ha empezado a incluir, en la innovación del campo de la luminotecnia, la iluminación natural mediante luminarias. Mediante la combinación de los concentradores solares Fresnel y de la fibra óptica se puede conseguir imitar un sistema de iluminación convencional de electricidad.

Mediante el concentrador Fresnel se acumula una gran cantidad de luz natural, esa luz es transportada mediante una red de cableado que sustituye los cables normales por cables de fibra óptica que transporta la luz hasta cada una de las luminarias individuales. Posteriormente, en las luminarias se tiene un espejo colocado a tal efecto con la inclinación deseada para que su orientación sea la deseada, ya que desde la fibra óptica que llega a dicha luminaria proyectaremos la luz sobre dicho espejo. Este funcionamiento se puede ver en la siguiente Figura 6.5.

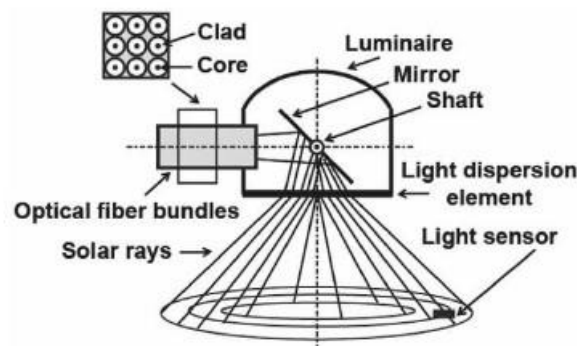


Figura 6.5 Luminaria reflector lineal Fresnel. [41]

6.5 Sistema de iluminación natural por fibra óptica

Similar a como sería una instalación convencional eléctrica mediante un cableado de cobre, en un sistema de iluminación natural por fibra óptica esta sustituirá al cableado convencional de tal forma que con el transportaremos la luz natural hasta las luminarias. La diferencia con respecto a un sistema convencional eléctrico es que la fibra óptica no usa electricidad con lo cual no consume y a su vez hay menos cableado, ya que no hay toma positiva, negativa y tierra, solo un cable de fibra óptica.



6.6 Sistema de regulación

La última parte a tener en cuenta en un sistema de iluminación natural es el sistema de regulación. El sistema de regulación será lo que determine la entrada en funcionamiento del sistema de respaldo. Para este sistema se necesitan el flujo luminoso necesario en los distintos huecos para coger el valor más restrictivo. Este flujo luminoso se llamará flujo luminoso limitante y será el valor máximo de entre todos los valores calculados previamente, ya que una vez la aportación de la luminaria natural baje de ese valor ya se tiene el primer hueco que no cumpliría con las necesidades estipuladas en la normativa.

Mediante la regulación sabremos cuanta luz estaremos emitiendo en las luminarias y con el flujo luminoso limitante podremos configurar un sistema de regulación que cuando bajemos de dicho valor se pondría en marcha el sistema de iluminación artificial como respaldo para cumplir la normativa. Para este sistema convendría que las luminarias artificiales también fueran regulables para así tener un control mayor sobre el sistema de regulación.

7. SIMULACIÓN

7.1 Software

Para las simulaciones que se va a realizar se usará el programa DIALux EVO. Este programa se lanzó inicialmente en 1994 bajo el nombre de DIALux con su complemento DIALux light, por la empresa alemana DIAL GmbH Lüdenscheid. Es un software libre y es el más usado del mundo por mezclar el diseño 3D con cálculos lumínicos. Posteriormente estos dos programas fueron sustituidos por el sistema actual de DIALux EVO. [46]

7.2 Ejemplo previo

Para la primera parte del estudio se diseñó un edificio con múltiples salas. Dicho edificio, representado en la Figura 7.1, estaba compuesto por 4 huecos con distintos usos, mobiliario e incluso cristaleras. En este primer ejemplo no se tendrán en cuenta los materiales más allá de los definidos por defecto de los objetos. En este edificio se incluyen: vestíbulo, taller, aula y biblioteca. Todas las salas tienen la misma altura, la altura del edificio, 2.8m.

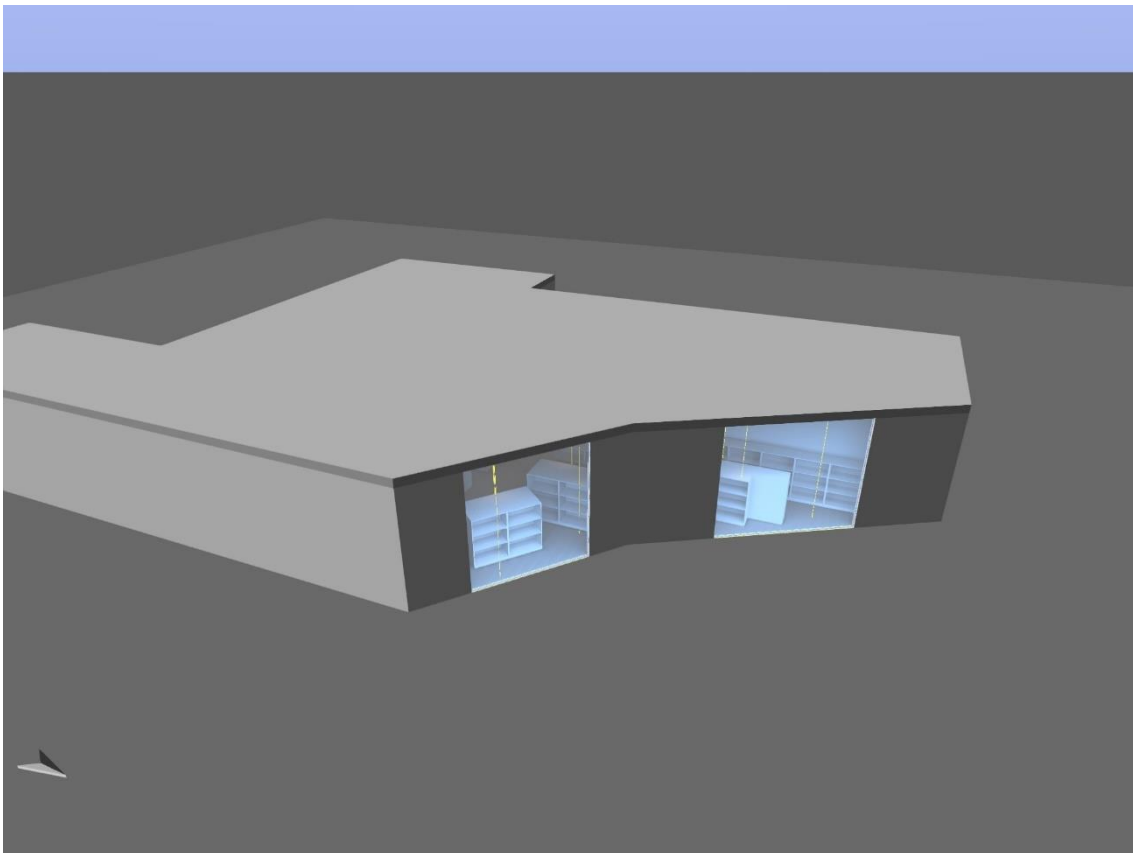


Figura 7.1 Edificio de ejemplo

El objetivo de esta primera parte era la visualización mediante un ejemplo de las distintas normativas y luminarias que hay para distintos usos. Como se puede ver en la Figura 7.2, las salas son de distintos tamaños con lo cual se necesitarán diferentes distribuciones y luminarias para cumplir con la normativa correspondiente a cada uso.

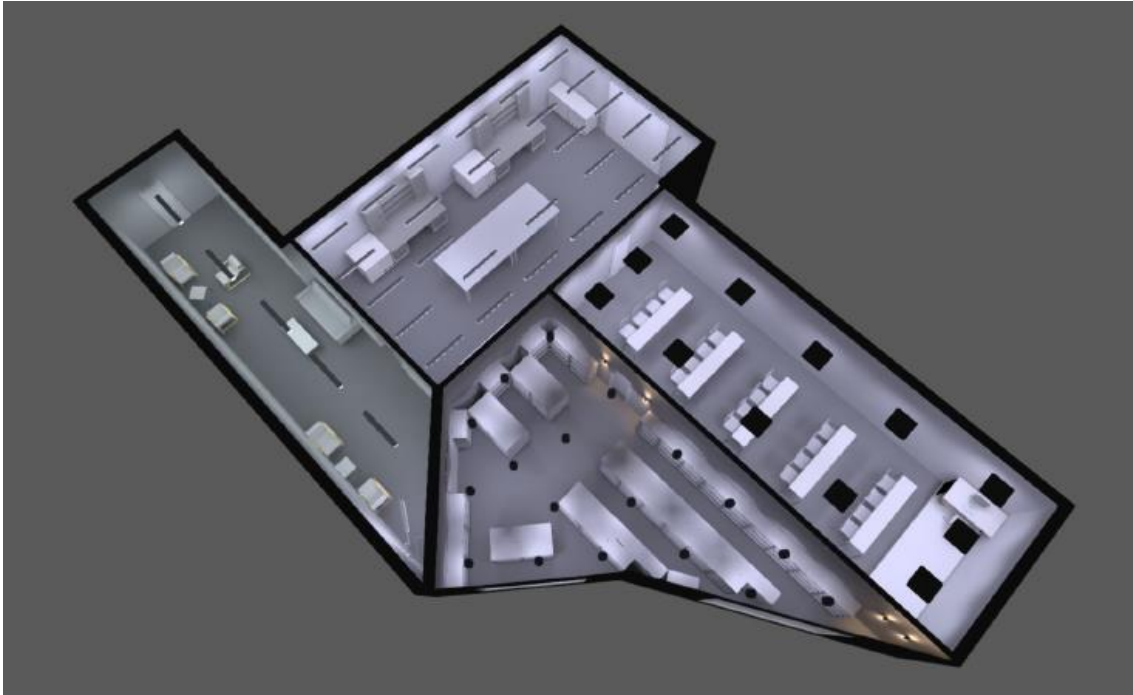


Figura 7.2 visión cenital salas

7.2.1 Vestíbulo

La primera habitación, Figura 7.3, corresponde al vestíbulo, este sigue una disposición lineal mediante la cual estudiaremos el efecto de luminarias de pie al margen de las superficiales de techo. La necesidad luminosa de esta sala es la menor de entre todas siendo 100lx, pero por la forma irregular de la sala es necesaria la luminaria de pie para compensar la zona más oscura sin tener que modificar la distribución de las luminarias del techo a una distribución irregular la cual nos daría un exceso innecesario de luxes. En esta sala el plano de trabajo está a ras de suelo.



Figura 7.3 vestíbulo

Con el objetivo de incrementar la eficiencia se dividen las zonas en las que se distribuyen las luminarias en dos, de esta forma nos aseguramos de que no se tienen luminarias de más ni luminosidad excesiva.

Como se puede ver en la Figura 7.4, la primera zona será un rectángulo más estrecho que se corresponde a la entrada, esta zona está compuesta por 3 luminarias en fila. Por otro lado, se tiene la zona que se ve en la Figura 7.5, esta tiene una forma irregular en la que, tras varias pruebas, comprobamos que la mejor distribución era combinar la distribución rectangular con 2 luminarias y una lampara de pie (3F Filoluce WH 16+23W/840 Touch DALI de 3F Filippi S.p.A (Figura 7.7)) para iluminar la zona oscura que se me crea en la esquina que nos daría problemas en los cálculos y nos obligaría a poner una distribución irregular lo cual no es recomendable.

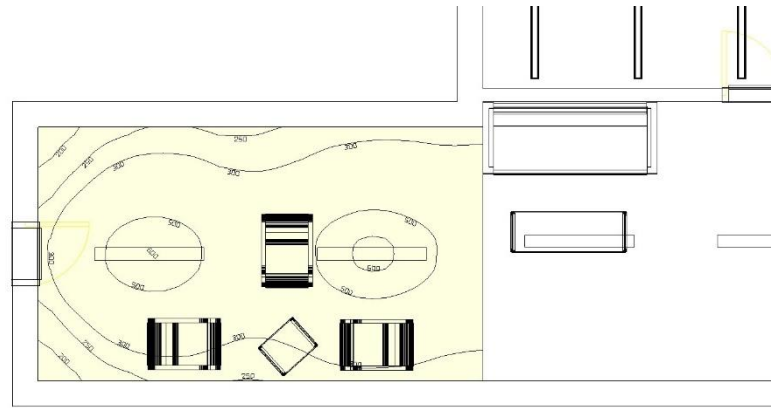


Figura 7.4 Zona 1 del vestíbulo

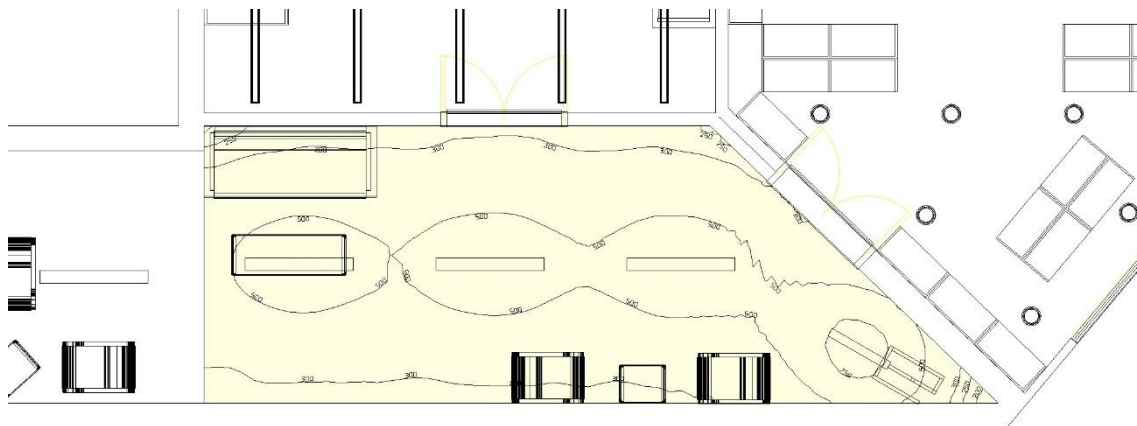


Figura 7.5 Zona 2 del vestíbulo

Las luminarias de esta sala son luminarias de baja potencia ya que, al igual que se dividen en zonas para usar la mínima cantidad de luminarias, también se utilizarán unas luminarias menos potentes para poder cumplir con los lúmenes más cercanos a las exigencias de la normativa. Se colocó un falso techo a efecto de colocar las luminarias de superficie de techo a una altura menor de 2.2m para una mejor uniformidad sin que haya que sobre iluminar la sala. Estas luminarias son las luminarias LSP44-2x54-011 del fabricante ASTZ, las cuales se puede ver en la siguiente Figura 7.6.

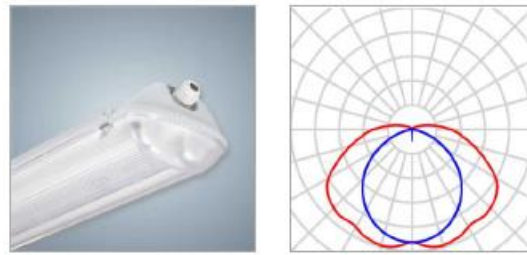


Figura 7.6 Luminarias de techo del vestíbulo

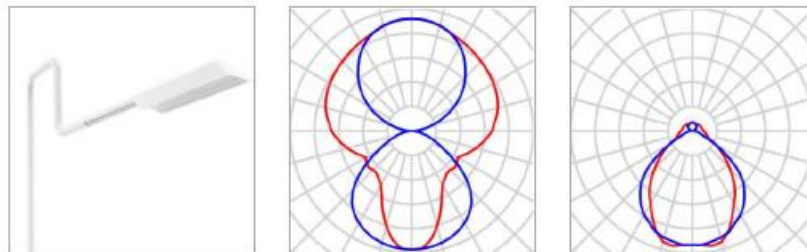


Figura 7.7 Luminaria de pie del vestíbulo

7.2.2 Taller

La próxima habitación es a la que le daremos el uso de taller. Esta habitación tiene una sección de $63.53m^2$. Con esta habitación que se puede ver en la Figura 7.8 se pretende ver geometrías más irregulares y una altura de plano de trabajo (0.85m de altura) distinta al resto de estancias y geometrías. En este taller se encuentra como novedad un portón de garaje y varios bancos de trabajo de diversas alturas, los bancos tienen una luz específica para cada uno al margen de la iluminación total de la sala. En esta sala se usarán 26 luminarias distribuidas de una forma irregular, como ya explicamos antes para cubrir cada puesto y el resto de la sala. Las necesidades lumínicas de esta sala son las siguientes: 500lx y uniformidad de 0.6.



Figura 7.8 taller

Para el taller utilizaremos las siguientes luminarias: Areza CE PC 20W 2000 DALI 840 de Aura Light, las cuales se puede ver en la Figura 7.9. Se escogieron estas luminarias para cubrir las necesidades luminosas del taller.

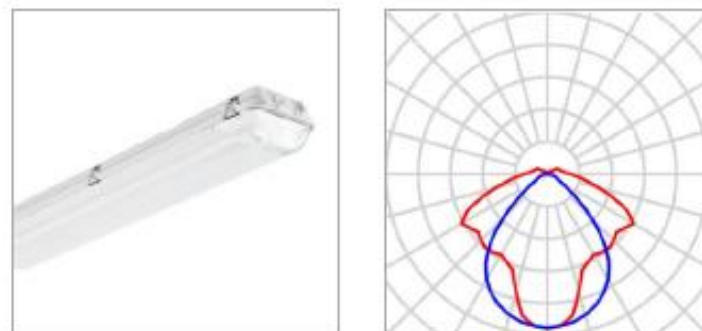


Figura 7.9 Luminarias taller

7.2.3 Aula

La siguiente estancia es un aula convencional, como se ve en la Figura 7.10. Su altura es de 2.8m, con una superficie de $57.79m^2$, más una pequeña zona correspondiente a la palestra de $6.82m^2$. El aula está compuesta por 5 filas de mesas y sillas para alumnos y una mesa para el docente, esta última está situada sobre un escalón, para estudiar el efecto sobre la disposición de las luminarias.

Esta aula intenta imitar las que se puede encontrar en el edificio departamental oeste del campus de la escuela politécnica de ingeniería de la universidad de Oviedo. De cara a estudiar la iluminación de esta aula se pone el plano de trabajo a 0.75m del suelo, esto es por normativa en lugares en los que las personas van a estar sentadas. Para este uso concreto se necesitan 500 lx y una uniformidad de 0.6.

Al tener una distribución simétrica la distribución es más fácil, ya que es en la que menos pruebas hubo que hacer. Solo hubo que modificar la distribución para que las zonas de los extremos tuvieran por lo menos el mínimo de iluminación requerida. Resultando en un total de 9 luminarias como las de la Figura 7.11.



Figura 7.10 aula

Para la iluminación de esta sala se usarán la siguiente luminaria del catálogo de DIALux: DARK-LED del fabricante TEC-MAR se pueden ver en la Figura 7.11. Con este tipo de luminaria se ve otro tipo de disposición, ya que esta va empotrada en el techo.

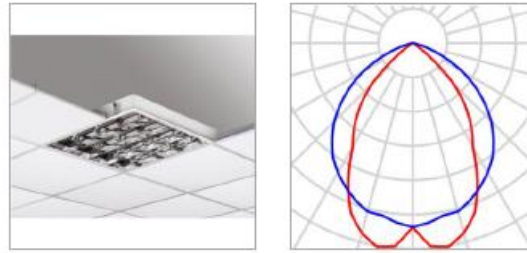


Figura 7.11 Luminarias aula

7.2.4 Biblioteca

La última sala es la biblioteca que se ve en la Figura 7.12, está dispuesta en una forma irregular para estudiar diferentes formas que puede tener una sala, también dispone de dos cristaleras para ver el efecto que tiene la luz natural en combinación con la aportada por las luminarias. El mobiliario en esta sala son las estanterías que podríamos encontrar en cualquier biblioteca. El área de cálculo está situada a 0m del suelo ya que se considera una zona de paso. Esta sala tiene una sección de $40.75 m^2$.



Figura 7.12 biblioteca

En la biblioteca probamos varias luminarias distintas y distribuirlas en toda la forma no uniforme, pero hemos optado por dividir la sala en tres zonas distintas para distribuir las luminarias.

En la zona 1 se puede ver en la Figura 7.13 que es simétrica, con lo cual la distribución va a ser muy parecida a la distribución recomendada, moviéndola ligeramente más cercano a los pasillos y fuera de la parte superior de las estanterías.

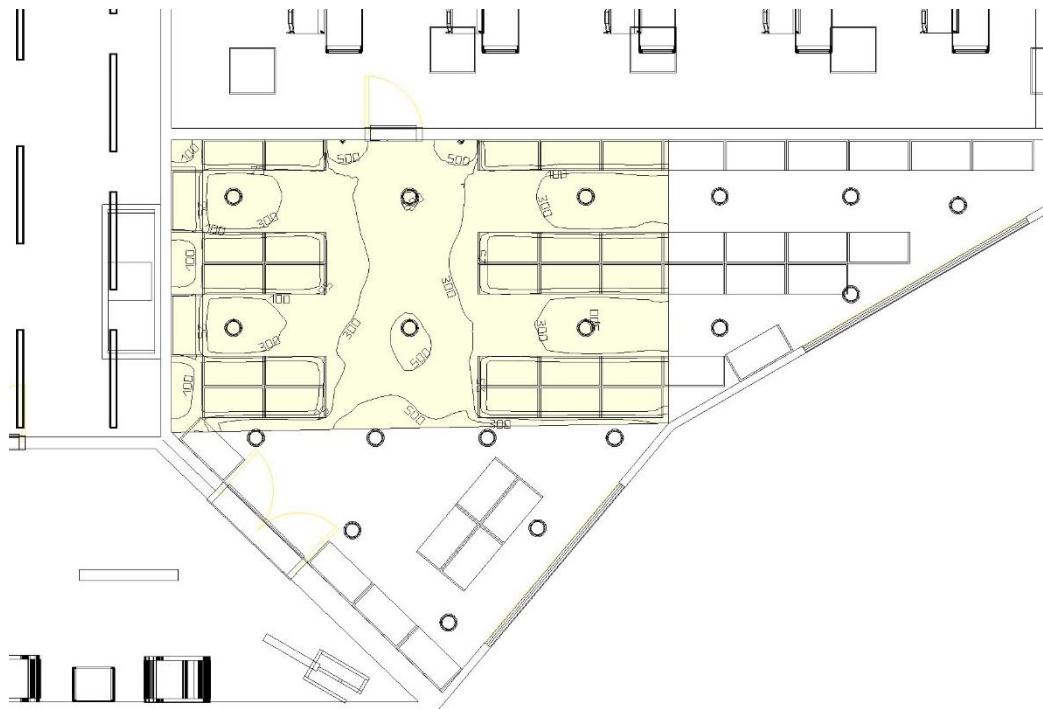


Figura 7.13 Zona 1 de la biblioteca

Para la segunda zona, la cual se ve en la Figura 7.14, alternamos la distribución de tal forma que no es simétrica, pero intentando siempre que formen una línea recta para mantener una distribución lo más simétrica posible por simplicidad de la instalación. En esta forma iluminan su zona, sin dejar puntos muertos y así no hay luminarias de más.

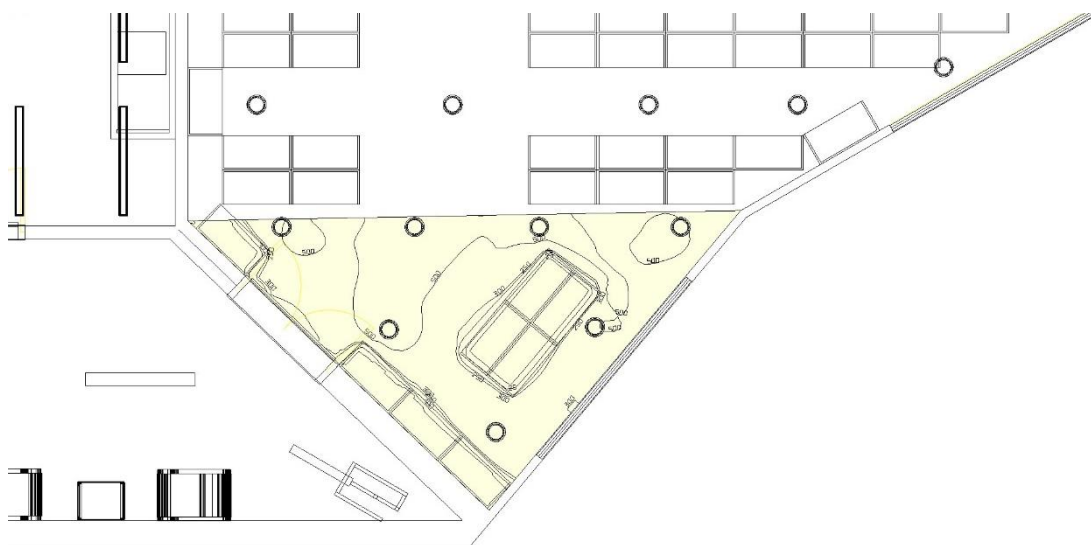


Figura 7.14 Zona 2 de la biblioteca

Por último, en la zona 3 también se tiene una distribución asimétrica, puesto que esta zona tiene una forma irregular, con luminarias de pared para iluminar la esquina y en la cual se tiene una de las cristaleras. En la Figura 7.15 se ve esta zona.

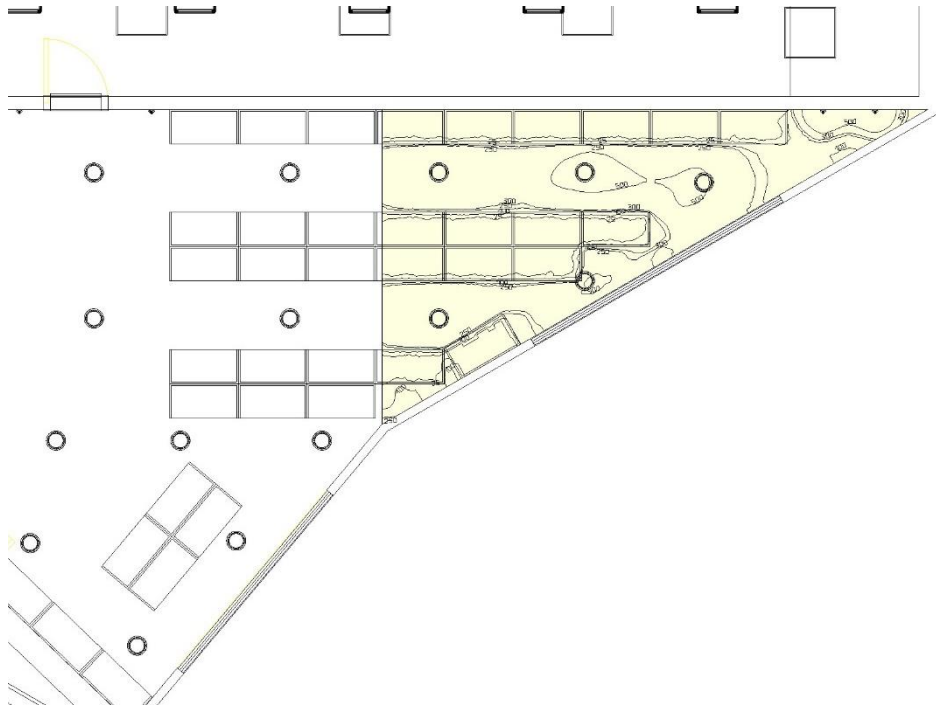


Figura 7.15 Zona 3 de la biblioteca

Para la biblioteca la necesidad luminosa era de 200 lx y 0.4 de uniformidad. La primera opción fue colocar unas luminarias poco potentes en el techo, pero debido a la altura del techo la iluminación no era suficiente. Por lo cual, se pasó a unas luminarias más potentes, pero a la hora de realizar los cálculos con las cristaleras nos daba zonas con una iluminación demasiado grande. Con lo que llegamos a la solución que se acabó colocando, unas luminarias menos potentes y colgantes a 0.3m del techo. Esto nos dará una opción más de estudio sobre el modelo Ture 57-283L-10GDE/840, B del fabricante Halla, a.s. Al igual que las luminarias de pared, colocadas a 1.8m de altura, que son distintas a lo previamente visto para eliminar las zonas muertas, escogimos el modelo Chival wall up/down 292 2xLED DI 2700K black brushed anodised de Modular Lighting Instruments. Estas son las de Figura 7.16 y Figura 7.17 respectivamente.

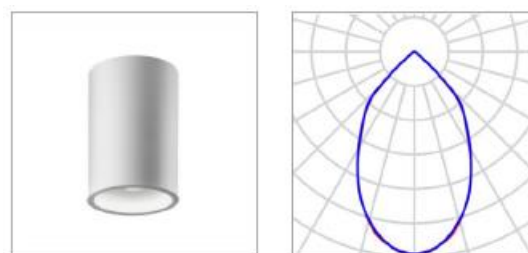


Figura 7.16 Luminarias colgantes de la biblioteca

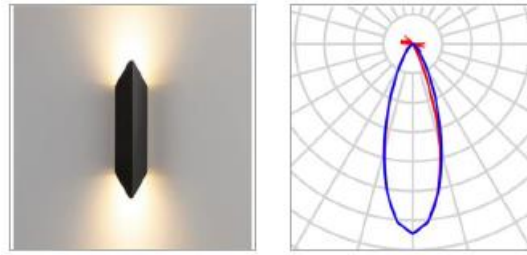


Figura 7.17 Luminarias de pared de la biblioteca

7.3 Análisis de la instalación actual

Se comienza por el análisis la instalación actual de la estación. Para ello lo primero que se tiene que hacer es reconstruir la estación e insertar las luminarias. La estación consiste en 5 niveles, pero para su construcción se dividirá en 6 plantas en DIALux.

Tabla 7.1 Alturas y espesores de las plantas tabulados

Plantas en Dialux	Nivel	Altura (m)	Espesor (m)	Área útil (m ²)
0_2	0	1,326	0,604	0
0	0	5,1	1,787	160,72
Entresuelo 1	-1	2,659	0,702	81,27
-1	-2	2,539	1,698	780,61
Entresuelo 2	-3	2,965	0,96	1634,14
-2	-4	3,613	1,2	1626,64

En la Tabla 7.1 se pueden ver las alturas y los espesores del piso de todas las plantas de DIALux en función del nivel al que pertenecen, junto con la superficie útil de la planta. La superficie útil es la superficie a la que se tiene acceso.

7.3.1 Construcción de la estación

Lo primero que se hace para cualquier planta es importar el plano para poder trazar la planta para crearla. Hay una cosa muy importante a tener en cuenta y es que las plantas han de ser creadas por orden desde abajo hasta arriba, ya que no se puede añadir una planta por debajo de la primera planta creada. Una vez creado todo el edificio este se “hundirá” bajo tierra.

La primera planta es la planta de mayor complejidad a la hora de ser construida. Principalmente, ya que esta tiene un techo a doble altura (5.1m y 7.03m). De aquí viene la planta extra en DIALux ya que, se optó por hacer una segunda planta a la que se le haría un hueco en el suelo para que estén conectadas las dos plantas. De esta forma la planta 0 se considerarán las plantas 0_2 y 0, como se ven en la Figura 7.18, donde se ve la comparativa de la entrada que corresponde con el nivel 0.

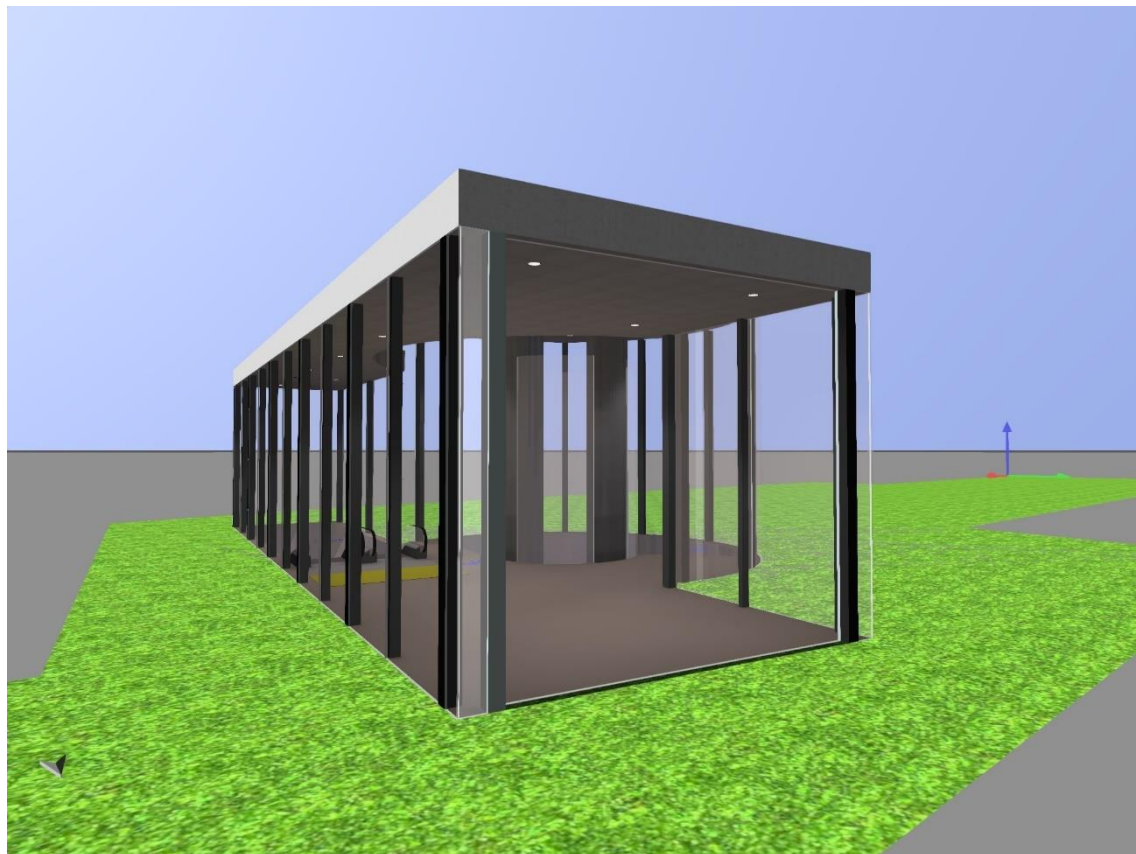


Figura 7.18 Comparativa nivel 0 real vs nivel 0 DIALux

Para la planta 0_2, con el mismo plano que la planta 0, se hace una planta de 1.326m de altura y un espesor de suelo de 0.604m, siendo este espesor el que se ve en la Figura 7.18, en la imagen real, en la zona de cemento, para dar la altura de 7.03m en total hasta el suelo de la planta 0. Una vez creada a la zona circular se le recortara el suelo y al resto todas las paredes dejando solo el suelo.

Posteriormente, se crea la planta 0, esta planta se creará con el plano de la Figura 7.19 trazando alrededor del plano. Se crea la sala con una altura de 5.1m de alto. Una vez levantada la planta se recorta las paredes para poder crear las columnas de acero, para ello se crea objetos y se cambian las propiedades de material a un acero creado por el usuario con las propiedades que se ve en el anexo. Si bien se pueden crear las cristalerías creando aperturas, nos será mucho más sencillo recortar todas las paredes por dos motivos principales. El primero, así nos permite crear columnas a las que cambiarles las propiedades de forma más fácil y segundo, cuando se llegue a las cristalerías de la zona circular no se puede crearlas de esta forma así que, se tendría que crear un objeto con la geometría necesaria y cambiarla al material por defecto de la cristalería. Como último paso lo que se hace es hacer los recortes en el suelo que corresponden a las escaleras que conectaran con las siguientes plantas. Dando como resultado lo que se puede ver en la Figura 7.20, en la cual se compara lo creado con la realidad.

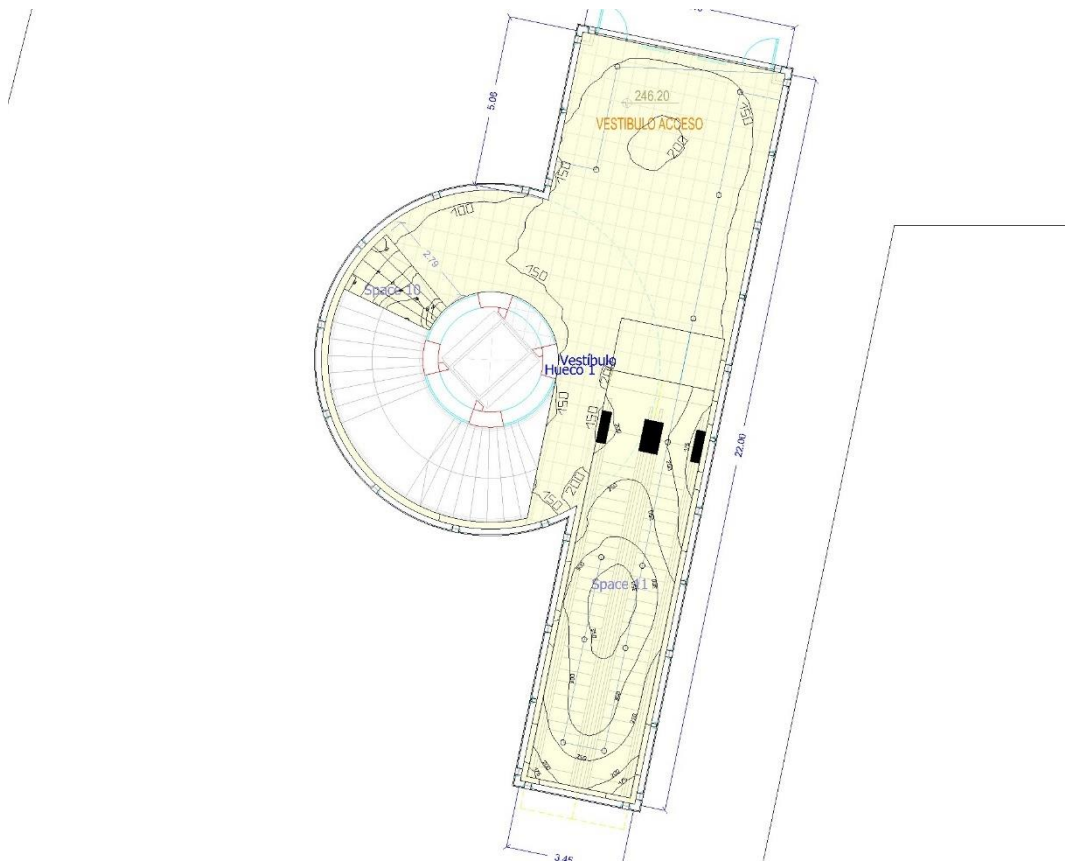


Figura 7.19 Plano planta 0

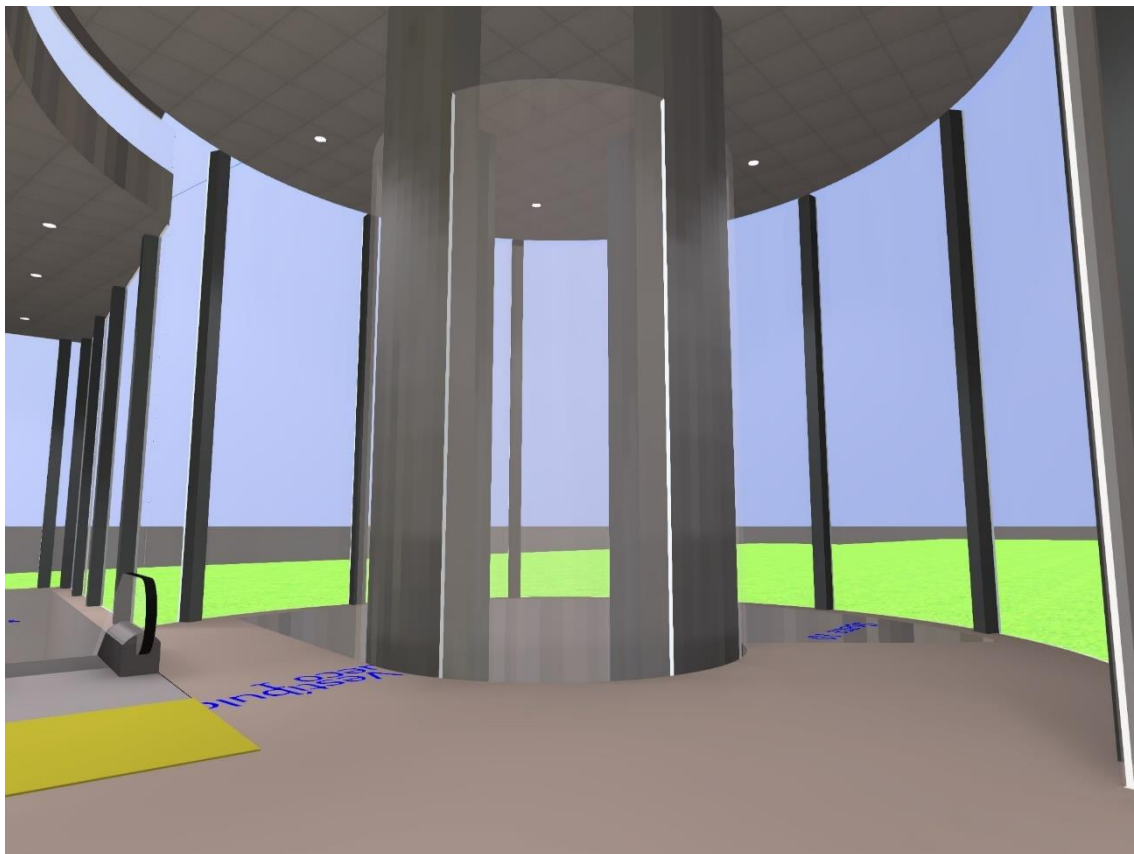


Figura 7.20 Planta 0 real vs planta 0 DIALux

Para todos los niveles siguientes se tiene las mismas paredes exteriores, lo cual implica que lo único que varía entre plantas son los huecos y los objetos que se encuentran en ellas.

Se procede a crear ahora el nivel -1, este nivel cumple como un pequeño entresuelo previo para la primera bajada por escaleras mecánicas. Su función no es más que la de una zona de paso antes de llegar al vestíbulo principal. Como se ve en la Figura 7.21, al margen del plano se puede ver

las curvas de iluminación de la instalación actual. En la Figura 7.23 se puede apreciar este nivel y parte del nivel -2.

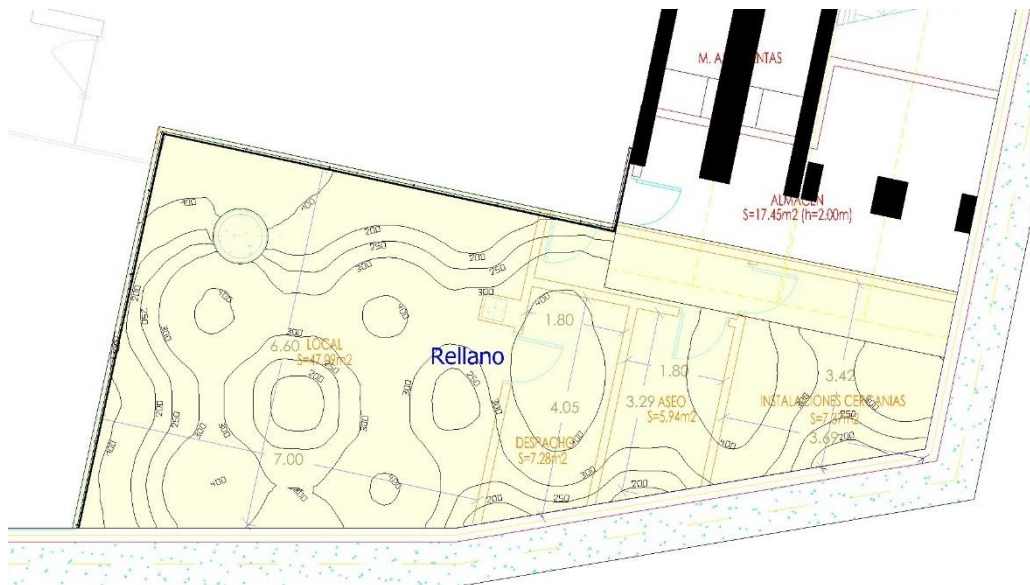


Figura 7.21 Plano nivel -1

El siguiente nivel es el -2, el que corresponde a la planta -1. En esta planta se encuentra el vestíbulo principal donde se encuentran las máquinas de los billetes, los tornos, la sala de información, ... Después de fijar la altura de esta planta (2.m) se crea los recortes del suelo para las escaleras mecánicas, escaleras, ascensores y la zona de pasarela (la cual se puede ver en la Figura 7.22).

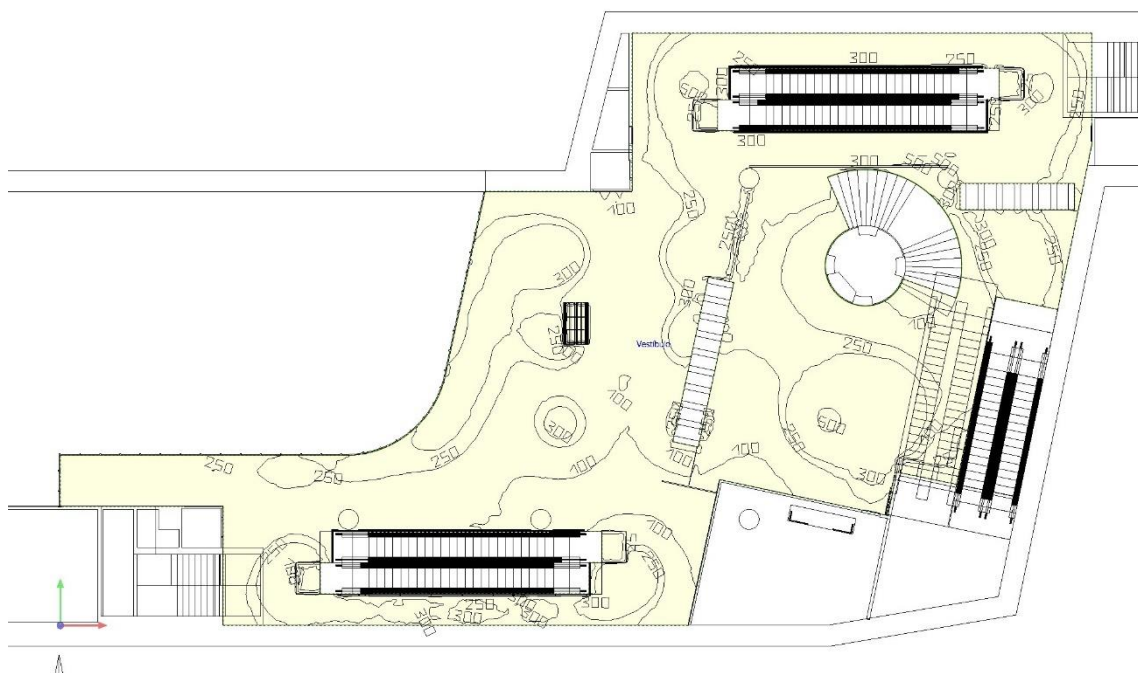


Figura 7.22 Plano planta -1

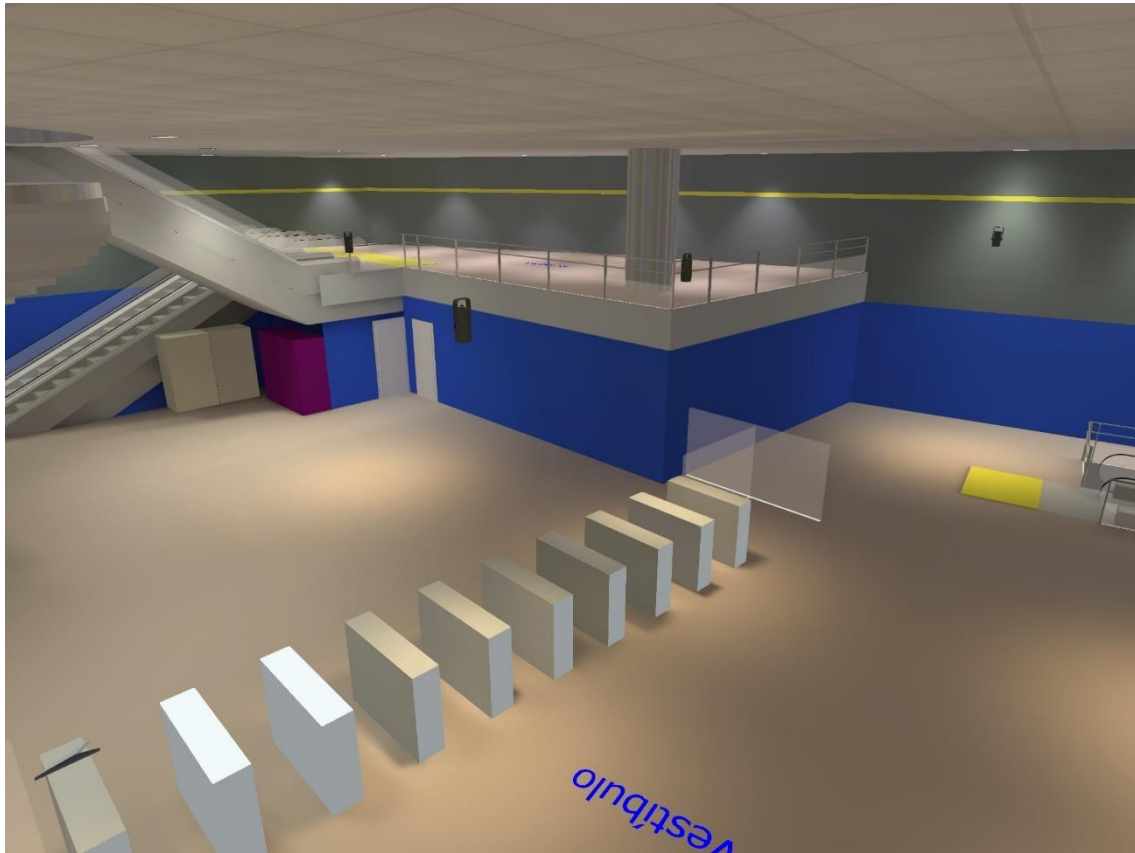


Figura 7.23 Vista del nivel -1 y -2

Después, se colocan los objetos de la planta. Se crea las columnas, las cuales tendrán una altura de 5.9m para llegar al techo del entresuelo 0, las escaleras circulares, estas se crearán escalón a escalón y conectan con la planta 0. A continuación, se insertan las puertas metálicas de los ascensores y las escaleras mecánicas que se han creado y se amuebla la sala de información (Figura 7.25). Por último, se crea la cristalera para la cual, primero, se crea las columnas rectangulares de $0.05 \times 0.1 m^2$ y altura 5.9m, lo siguiente que se crea son los cristales siguiendo el contorno en una distribución de 3 filas y se finaliza con las piezas superiores entre cristales. Quedando el resultado como se ve en la Figura 7.24 al fondo.

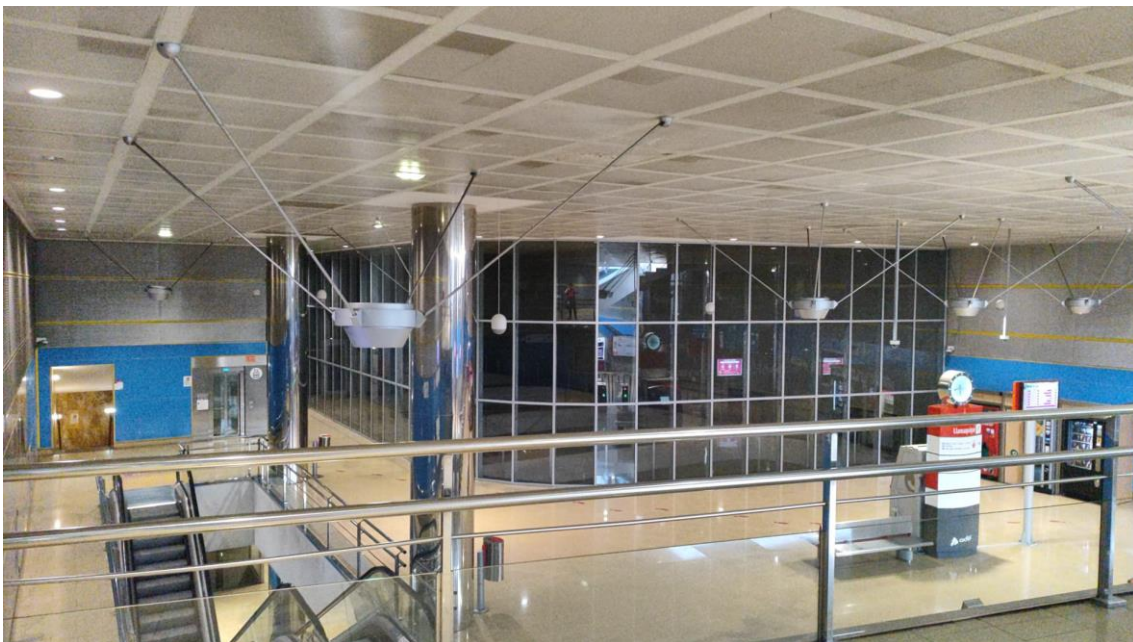


Figura 7.24 Planta -1 real vs planta -1 DIALux

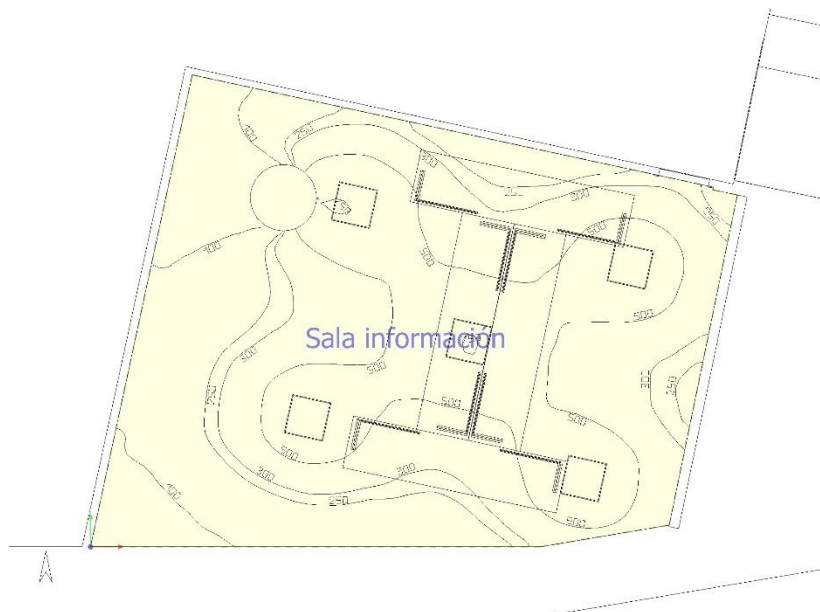


Figura 7.25 Sala de información por dentro

El próximo nivel se corresponde con la planta del entresuelo 2. Este entresuelo es el que se sitúa entre el vestíbulo y los andenes. Como en la planta anterior se hace los huecos para las escaleras, las escaleras mecánicas y los ascensores y además quitaremos lo que se llamará espacio de pasarela en el entresuelo 2, el cual se puede ver en la Figura 7.26.

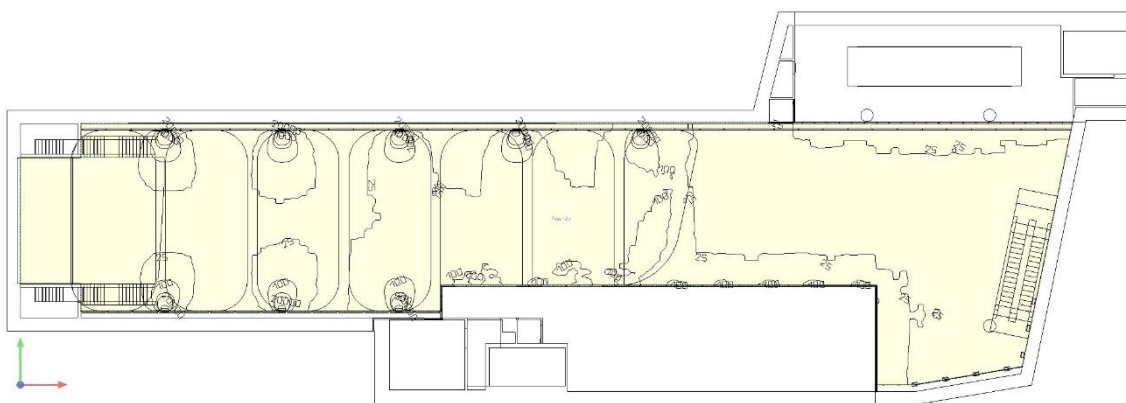


Figura 7.26 Zona pasarela del entresuelo 2

Para el mobiliario se tiene que insertar las escaleras, las escaleras mecánicas, un banco en el andén A y las cristaleras de ambos andenes que seguirán un proceso similar al de la planta -1 ya que las columnas son del mismo material y tamaño, pero en este caso los cristales cubren toda la altura. Con una complicación menor también se encuentran las escaleras de emergencia que tienen una forma irregular saliente (Figura 7.27).

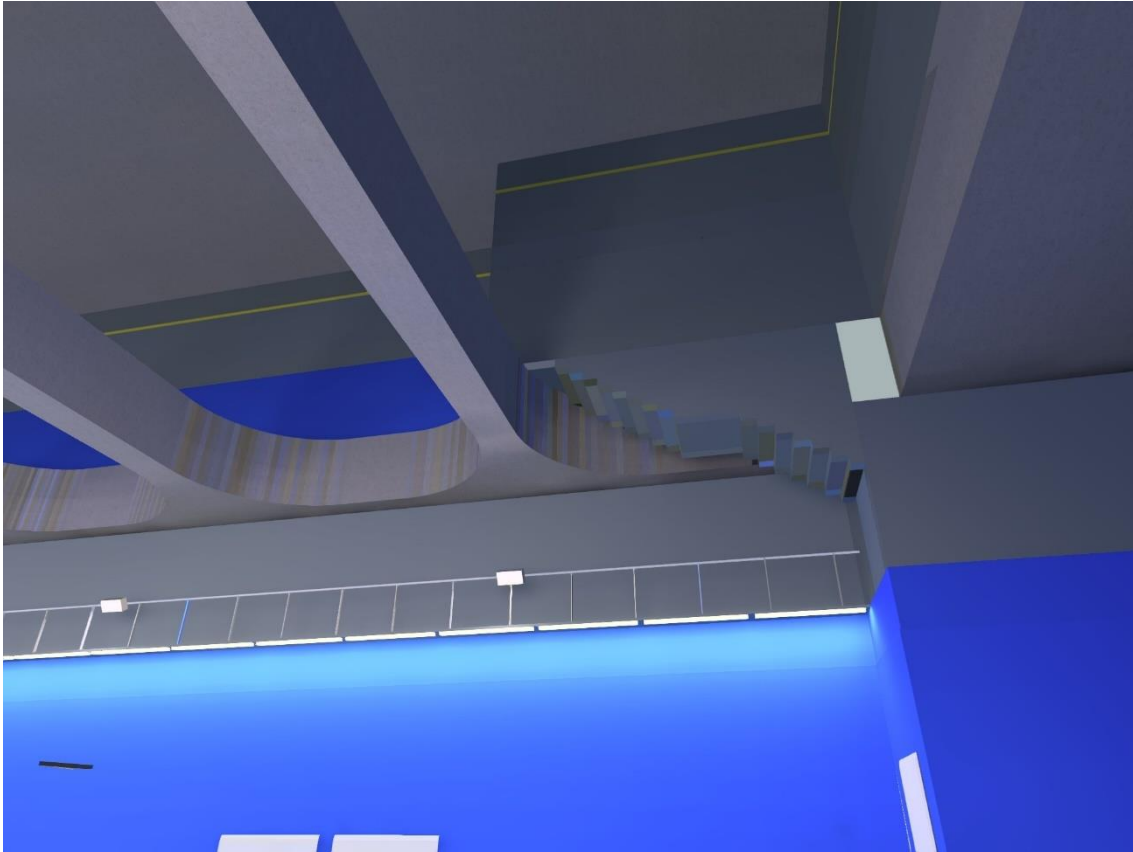
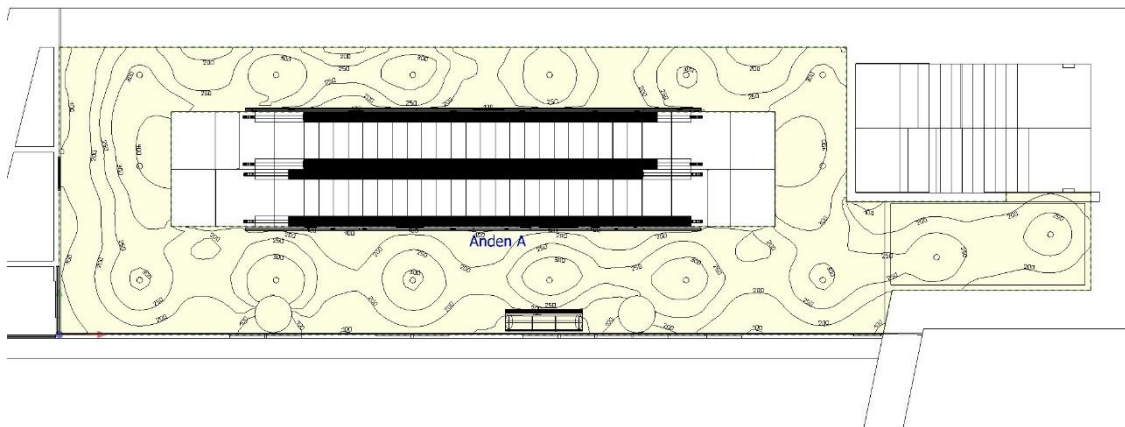


Figura 7.27 escaleras de emergencia

Finalmente, se asignan los materiales correspondientes a cada objeto y los resultados se ven en la Figura 7.28 que se ven las curvas de iluminación de los andenes del entresuelo.



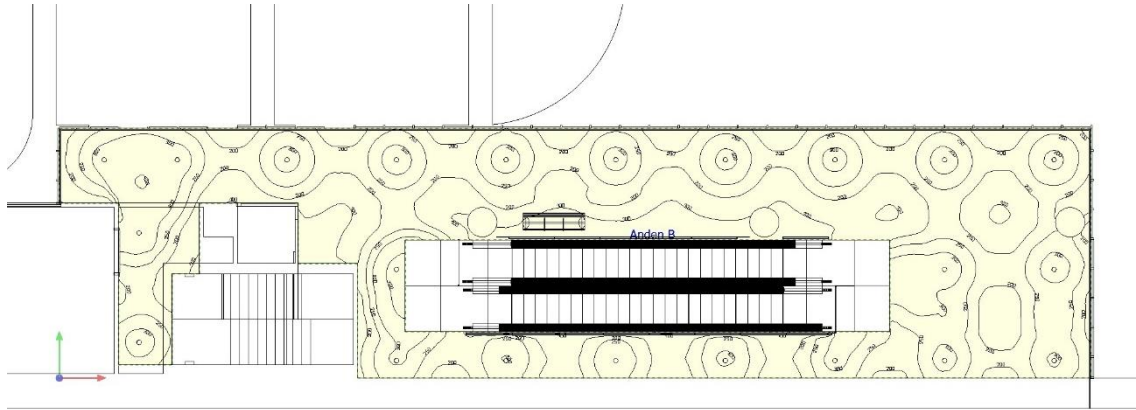
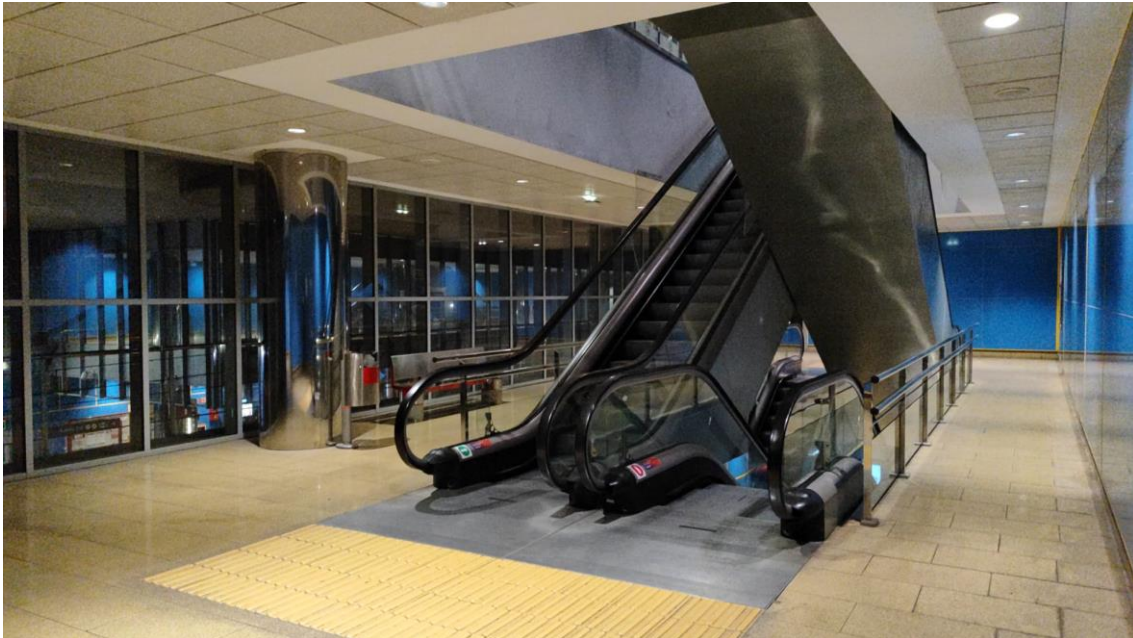


Figura 7.28 Andenes entresuelo 2



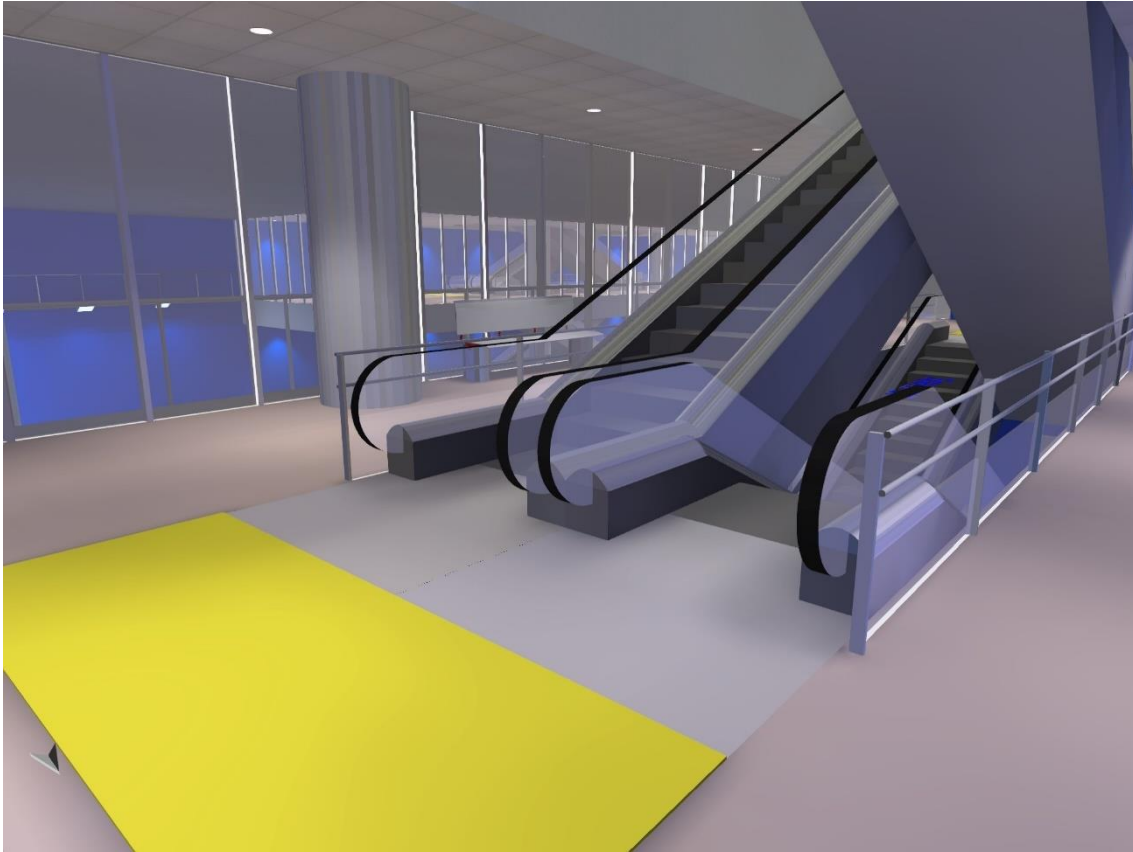


Figura 7.29 Entresuelo 2 real vs Entresuelo 2 DIALux desde el andén A

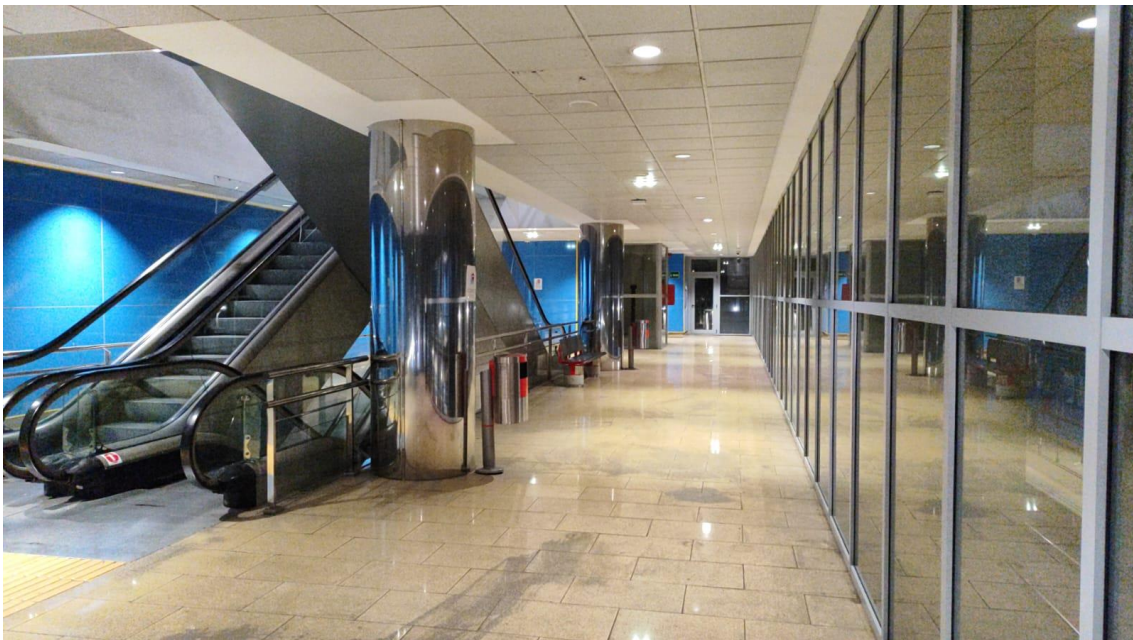
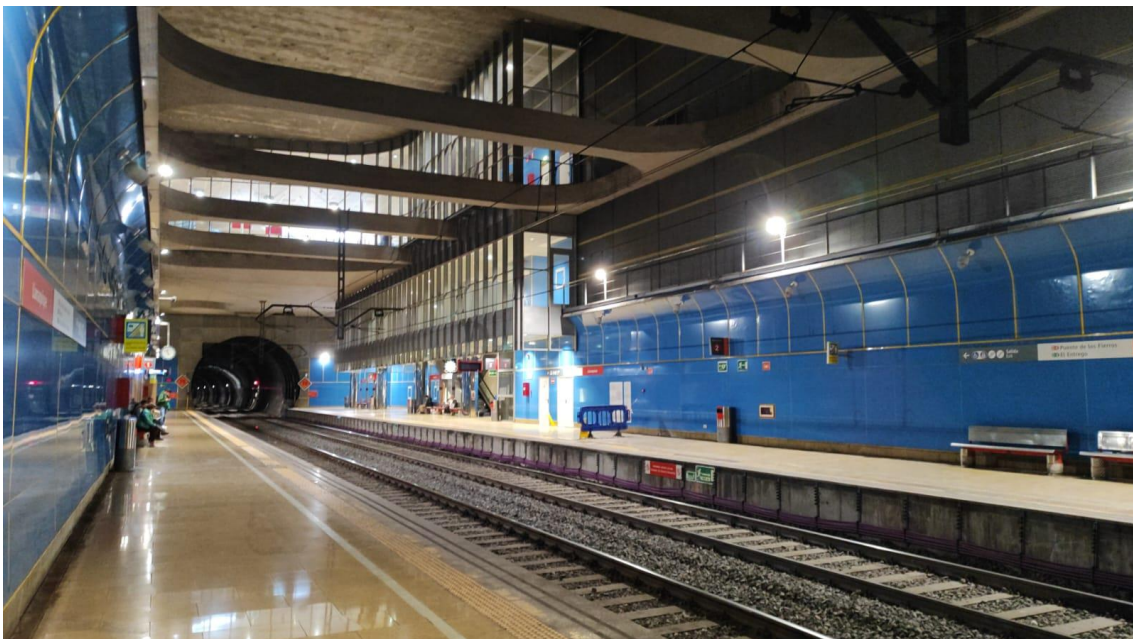




Figura 7.30 Entresuelo 2 real vs Entresuelo 2 DIALux desde el andén B

En la Figura 7.29 se ve la comparación entre captura del programa y foto el andén A y en la Figura 7.30 se ve eso mismo desde el andén B. Siendo el andén A el de menor tamaño y el B el de mayor tamaño.

Por último, se crea el ultimo nivel, la planta -2. En esta planta se encuentran los andenes y las vías. En este nivel se hace recortes en el suelo para insertar las escaleras mecánicas, recortes para crear los accesos a las escaleras y un recorte con profundidad limitada de 1m para crear el hueco de las vías. Una vez creados los recortes, se insertan las escaleras, las escaleras mecánicas, las columnas, etc. En esta planta la mayor complejidad son las escaleras. Dando como resultado lo que se aprecia en la Figura 7.31 donde se ve la comparación entre programa y realidad.



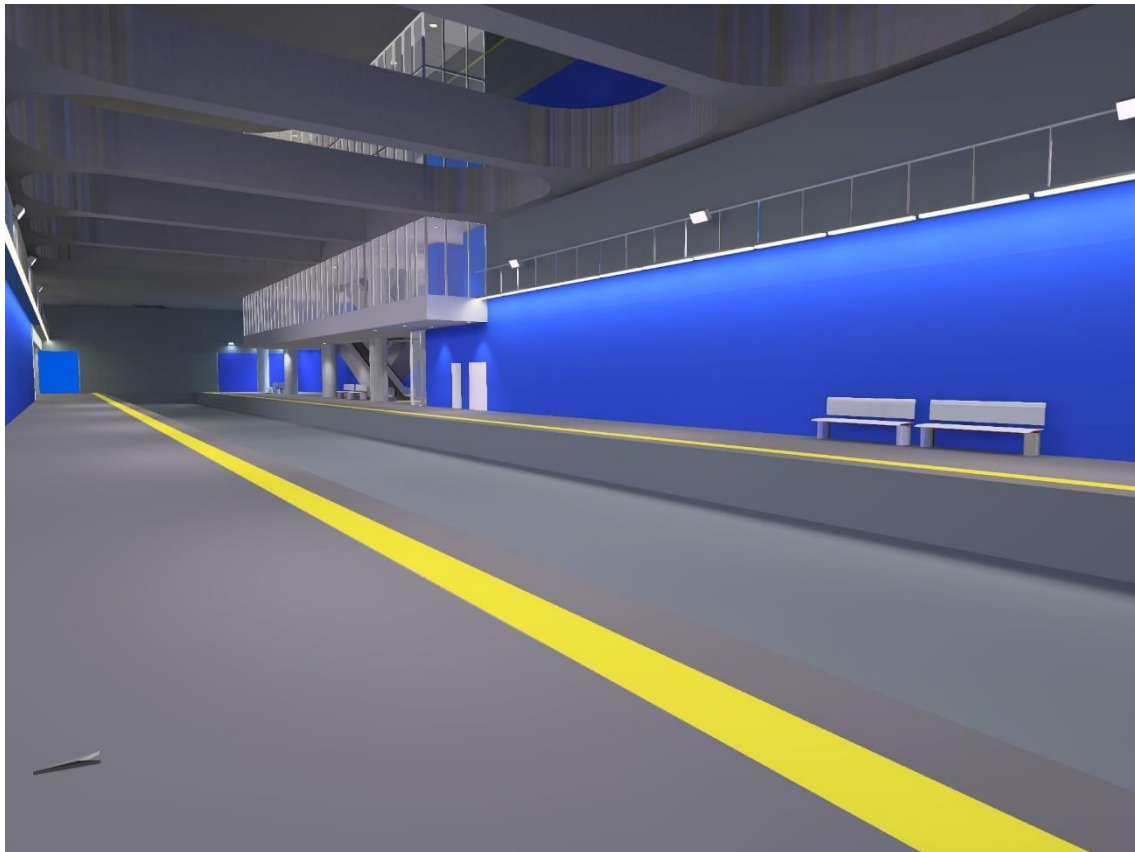


Figura 7.31 Planta -2 real vs planta -2 DIALux

7.3.2 Creación de objetos para la construcción de la estación

Escaleras mecánicas. Se va a empezar por la construcción de las escaleras mecánicas. Estas escaleras están formadas por 5 objetos distintos. El primer objeto es la parte principal que sería en la cual encontraríamos el mecanismo en la realidad, este objeto se puede ver en la Figura 7.32 y se ve que se compone por la parte más voluminosa, los escalones que se añaden posteriormente. Se precede a crear los escalones, de 40cm de largo y su altura dependerá de la altura que haya vaya a tener la escalera dividido entre los escalones que se tiene. Después se crea las dos piezas laterales que harán de carriles para los escalones y los pasamanos. Por último, se crea los pasamanos siguiendo la trayectoria de la escalera y será en dos materiales para simular la parte móvil de caucho. En la Figura 7.33 se ve el montaje final de una escalera mecánica con los materiales ya aplicados. Habrá en total 12 escaleras mecánicas las cuales habría que calcular dependiendo de las diferentes alturas que se tiene.

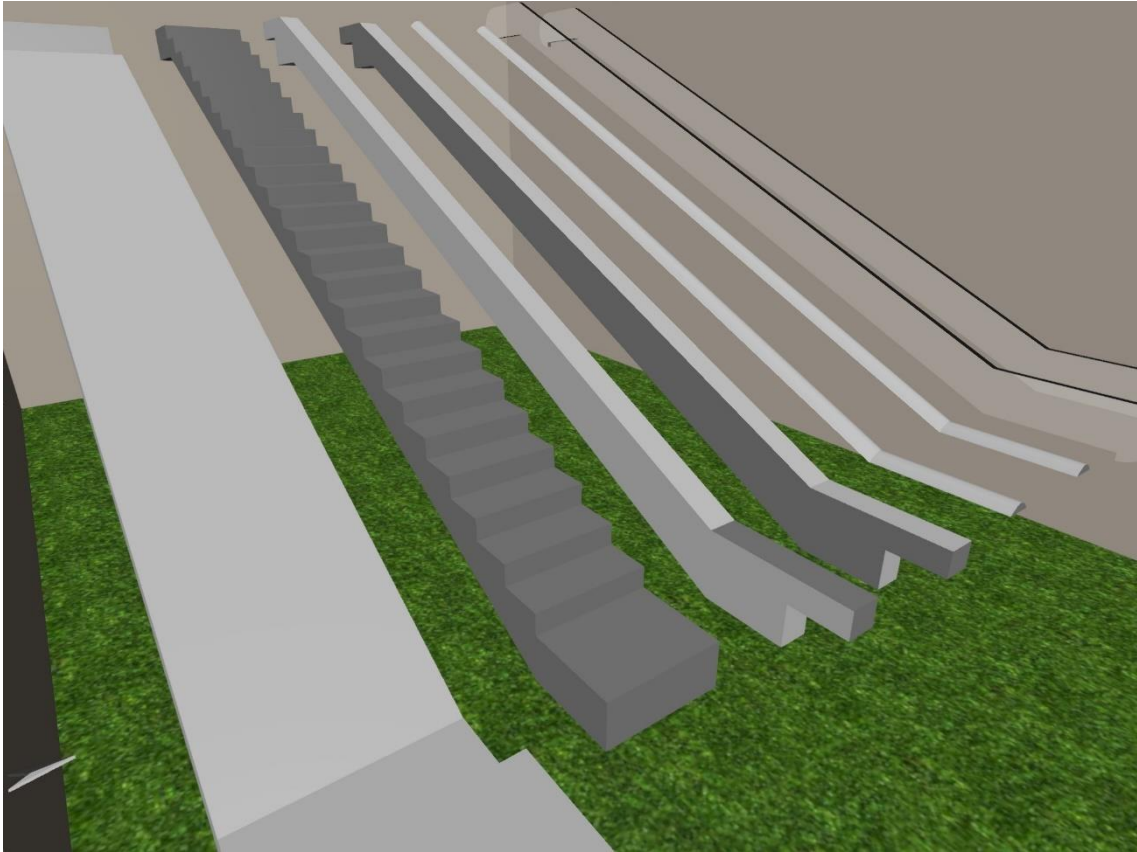


Figura 7.32 Piezas del ensamblado de las escaleras.

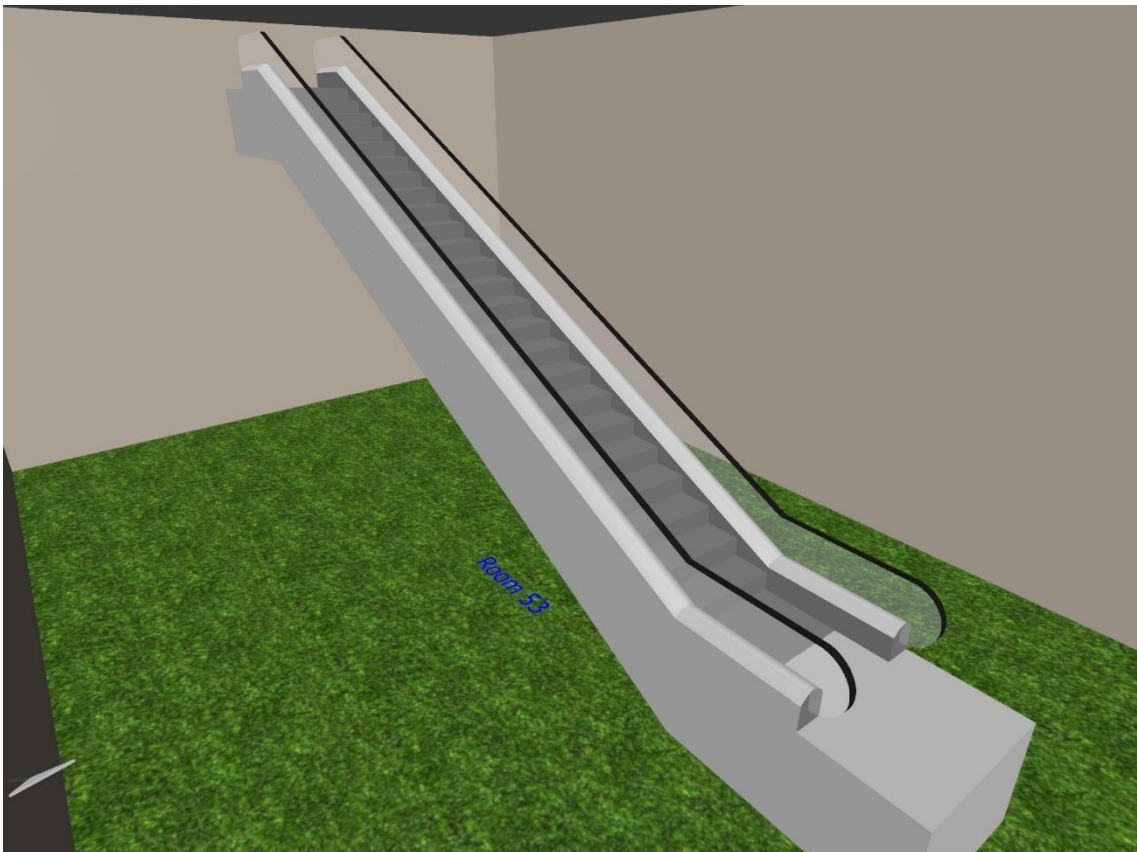


Figura 7.33 Vista del montaje final de una escalera mecánica.

Escaleras. Para la creación de las escaleras regulares de bajada desde la planta -1 hasta la planta -2 se tiene 12 conjuntos de escaleras, 6 por lado. Todos los conjuntos de escaleras serán distintos ya que dependen del número de escalones que tengan, a pesar de ser todos igual de largos, pero principalmente se hace las siguientes distinciones: los conjuntos de la planta -2 , los conjuntos de 9 escalones y los de 8 escalones.

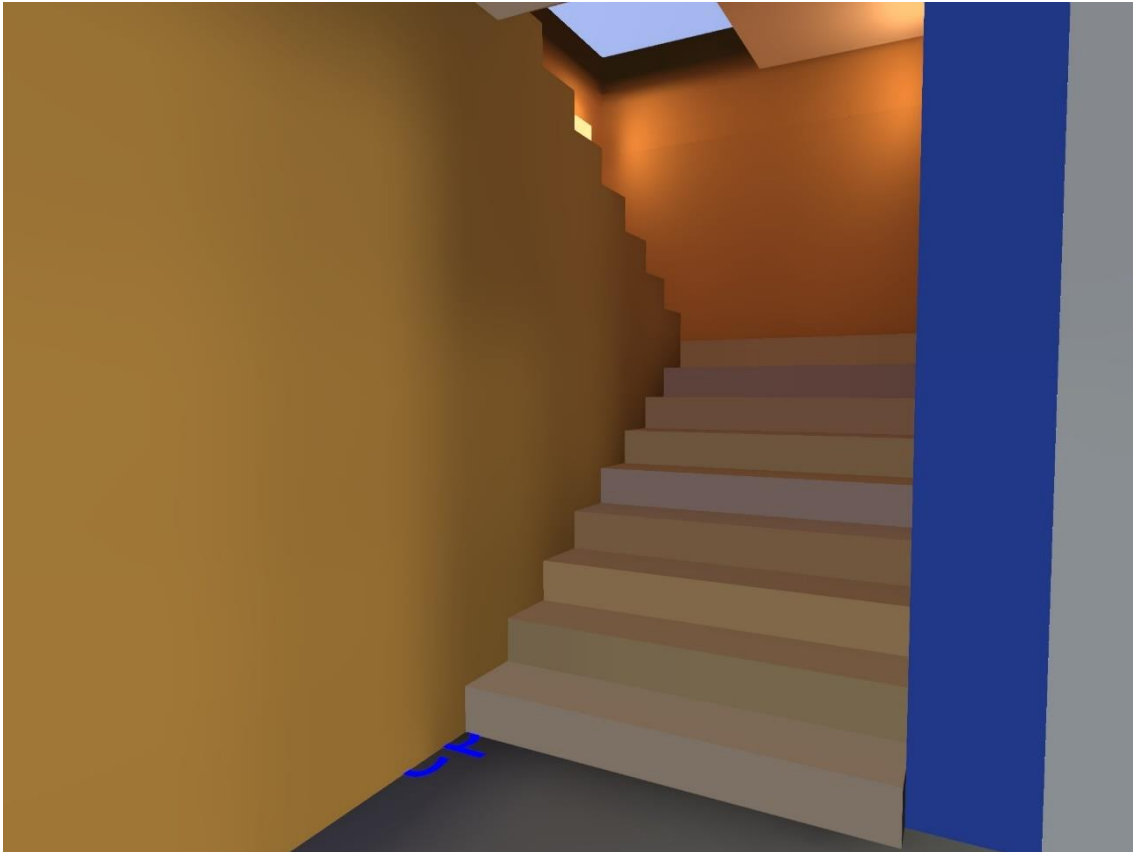


Figura 7.34 Conjuntos de escaleras.

Escaleras circulares. Las escaleras circulares son las que comunican la planta 0 con la planta -1 . estas escaleras las se hace escalón a escalón y luego serán elevados lo que sea necesario para crear las escaleras, con 3 rellanos.

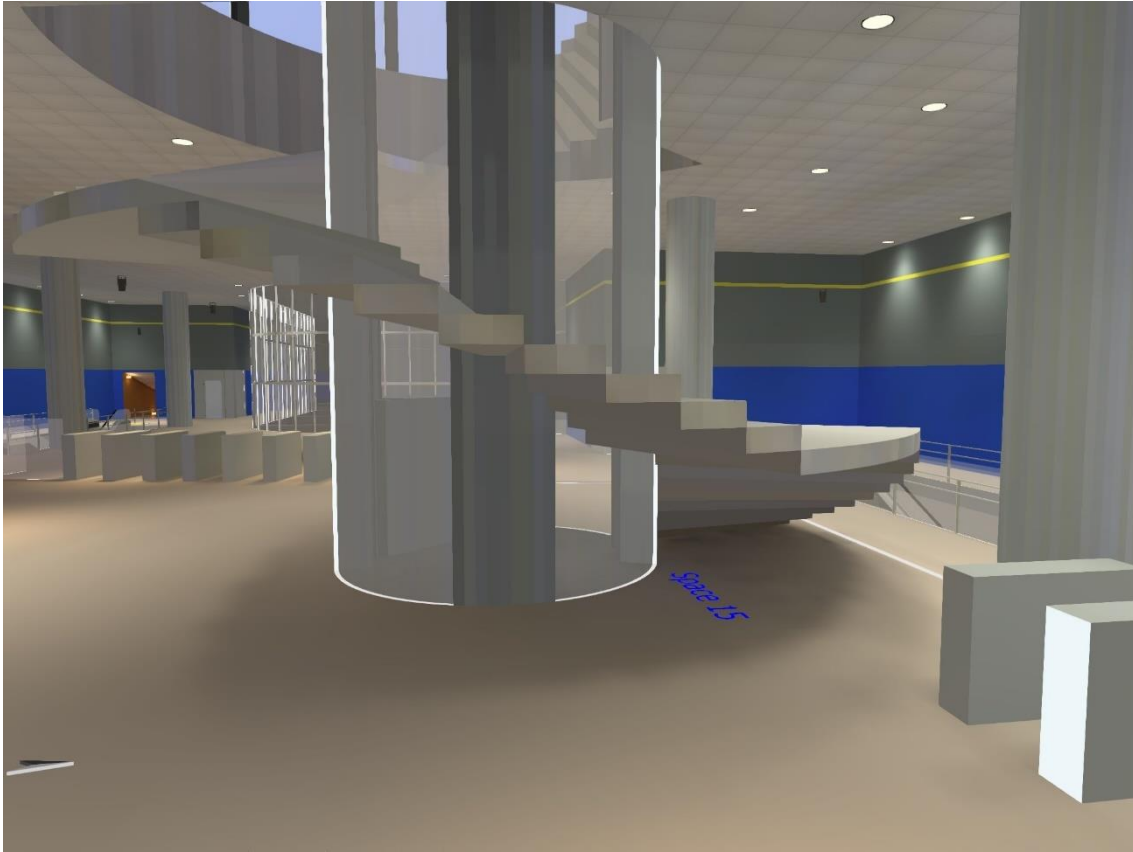


Figura 7.35 Escaleras circulares

Puertas ascensores. Las puertas de los ascensores tienen una disposición asimétrica que se colocan en los huecos de los ascensores de forma que el resultado final es una puerta de cristal rodeada de acero.

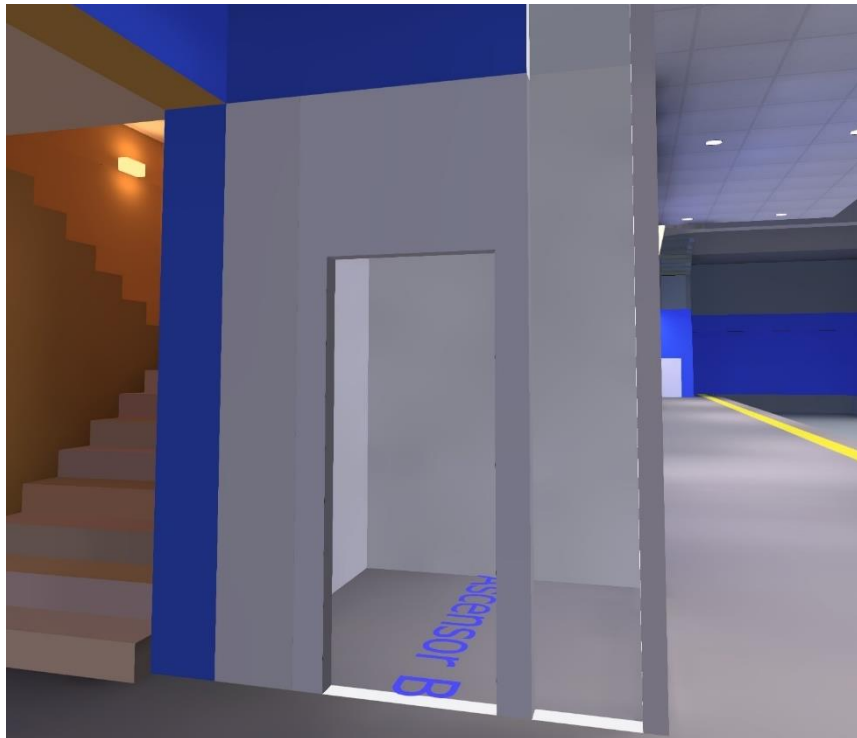


Figura 7.36 Puertas de ascensores

Escaleras emergencias. Dichas escaleras solo se pueden ver desde fuera ya que en condiciones normales no se tiene acceso a ellas, pero afectan al diseño interior así que se simularon con lo que se puede ver desde fuera resultando en las siguientes escaleras.

Baldosas para invidentes. A la hora de crear las baldosas para invidentes se hace las baldosas amarillas con una elevación de 1cm para simular el suelo rugoso y ligeramente elevado.

Pasarelas. Las pasarelas son pasarelas de metal que sirven para colocar los focos y acceder a la salida de emergencia. En la siguiente figura se puede ver una comparativa de cómo se verán las pasarelas en comparación con el modelado.

Techos. A la hora de analizar las escaleras, en la planta -1, hay que tener en cuenta que los techos no son planos. Esto es importante, puesto que las luminarias de esta zona también propagan luz hacia arriba y hay que tener en cuenta la reflectancia de estas superficies. Por ello se tiene que crear unos objetos para imitar los techos.



Figura 7.37 Techos de las escaleras

Barandillas. Para las barandillas primero se crea los postes que son cubos de 0.02×0.05 y de 0.8 m de altura, después entre postes se pone un cristal de altura 0.4 m y dos barandillas que recorren todo el perímetro de 0.05 m de diámetro idénticas a alturas 0.6 y 0.8 m, dando como resultado la Figura 7.38. También se tiene otro modelo de barandilla en las pasarelas, pero los postes son de 1 m de alto y la barandilla única de 0.1 m de diámetro va encima de estos.

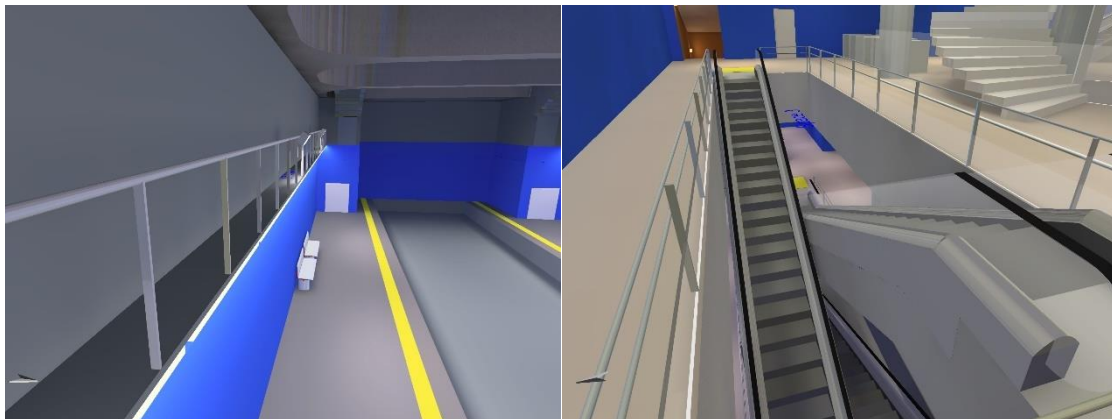


Figura 7.38 Barandillas

Banco. Estos bancos están creados mediante varias piezas, se empieza por dos cilindros elípticos que serán las patas del banco, después una barra que conectará ambas y sustentará el apoyo, por último, se colocan el respaldo que irá sujeto a la base mediante cuatro piezas de forma ajustada a la base y al respaldo. En la Figura 7.39 se puede apreciar un banco real y un banco creado en el proyecto.



Figura 7.39 Banco real comparado con el banco del programa.

Máquinas de billetes. Las máquinas de billetes posiblemente serán una de las constricciones más sencillas, ya que son bloques de 2*1*0.73 m a los que luego se aplica el material correspondiente.

7.3.3 Iluminación de la estación

Una vez se completa la construcción completa de la estación y aplicados todos los materiales a todas las superficies y objetos se precede a insertar las luminarias en cada una de las plantas para acabar el estudio lumínico de la instalación actual de la estación. Puesto que los planos estaban obsoletos las posiciones de las luminarias y las alturas han sido mediadas in situ, dando lugar a las líneas azules que se observan en los planos a modo de “blueprint”. Se usarán 8 tipos distintos de luminarias. La siguiente Tabla 7.2 muestra el desglose de las luminarias por nivel y por su tipo.

Tabla 7.2 Luminarias por nivel

Nivel	Tipo de luminaria							
	Empotrables Modular	Empotrables Pak	Focos alta intensidad	Focos baja intensidad	Colgantes	Fluorescentes	Oficina	Pared
0	18	0	0	0	0	0	0	0
-1	9	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	42	0	0	12	0	5	6
-3	42	0	8	7	0	0	0	11
-4	47	0	0	0	0	54	0	7

Para la colocación de las luminarias primero se deben realizar unos cálculos para determinar su colocación y así trazar sus posiciones sobre los planos que se ven en la Figura 7.40. Después de esto se determinará cuáles son las luminarias que se van a usar. Estos siguen la distribución azul y han sido medidos in situ.

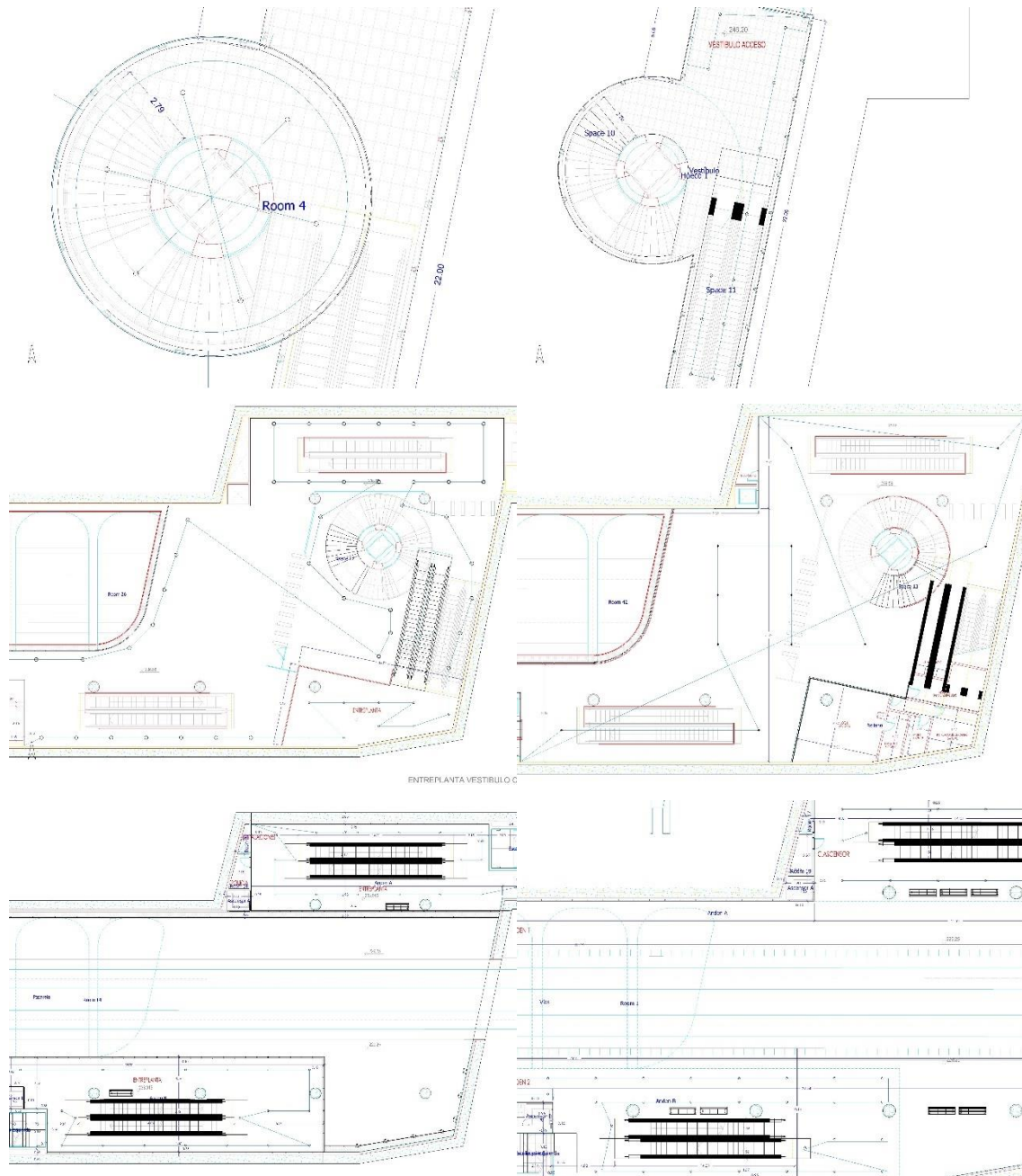


Figura 7.40 planos con la ubicación de las luminarias

Las primeras luminarias que se van a colocar son las Smart kup 160 IP55 LED GE 4000K wide flood white struc. Estas luminarias son del fabricante Modular Lighting Instruments, en la Figura 7.41 se puede ver la luminaria y su curva polar. Sus características se pueden ver en la Tabla 7.3 de las características de las luminarias. En el total en la estación se colocarán 116 de estas luminarias en todo el proyecto.

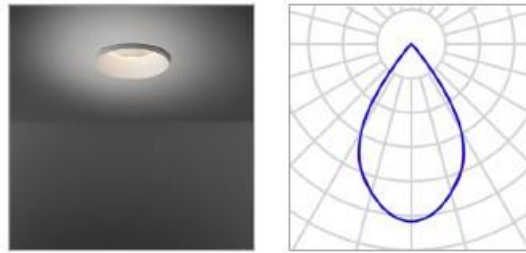


Figura 7.41 Luminaria de techo de Modular Lighting Instruments

La siguiente luminaria que se coloca es el modelo LED del fabricante Pak y es la mayoritaria que hay en el techo del nivel -1. Son luminarias de techo empotradas Con la curva polar de la siguiente Figura 7.42:

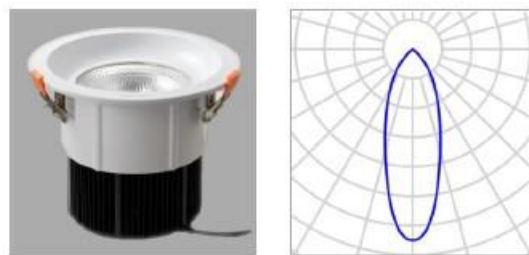


Figura 7.42 Luminaria del techo nivel -1

Ahora se ponen los focos. Los más potentes son modelo es Sports lighting del fabricante Varton, se ve su curva polar en la Figura 7.43. Estas luminarias están colocadas en la pasarela del nivel -3 y están colocadas 1m por encima de la pasarela. Los menos potentes son el modelo Floodlight del mismo fabricante que los focos anteriores. Los focos de menor potencia también iran colocados en la pasarela, pero estos van a ras de suelo. Estos focos iluminan toda la zona de andenes y vías que no estén cubiertas por el entresuelo.

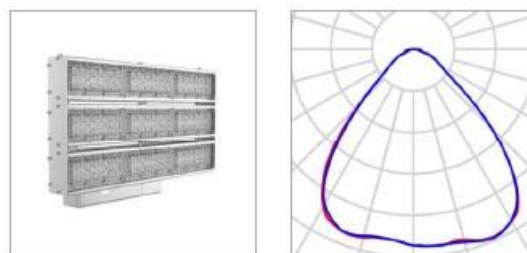


Figura 7.43 Luminaria focos de alta intensidad

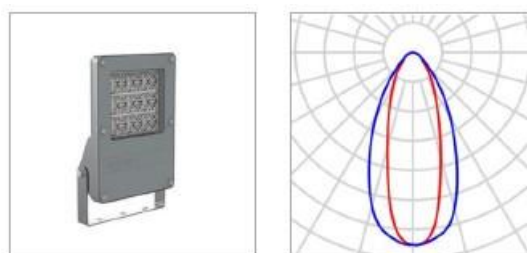


Figura 7.44 Luminaria focos de baja intensidad

Las siguientes luminarias a analizar son las ECLPENDANTFC_BLACK_BRACKET, que se corresponden con las luminarias colgantes del fabricante Prolights. Estas luminarias nos dan la libertad de estar colgantes, en concreto a 1.587m del techo del nivel -1.

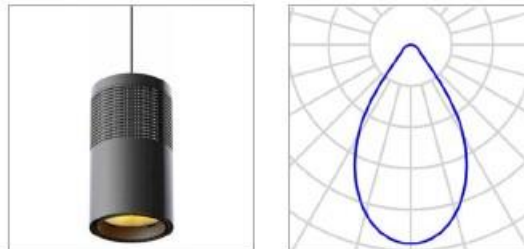


Figura 7.45 Luminaria colgantes

A continuación, se analizarán las luminarias fluorescentes. Estas fluorescentes son el modelo LSO46-2x58-002 Modul + Grid del fabricante ASTZ. Estas luminarias están sobre los andenes, en el andén A llegan hasta el final, mientras que en el andén B solo llegarían desde la salida de emergencia hasta el final de esa pasarela.

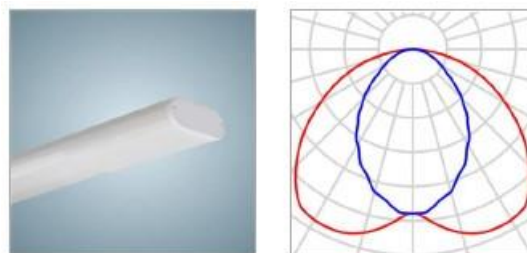


Figura 7.46 Luminaria fluorescentes

Se analizarán ahora las luminarias que se encuentran en la sala de información y son luminarias que se puede ver en muchas oficinas. Son luminarias fabricadas por DARK-LED y son el modelo TEC-MAR. Estas luminarias son las mismas que se utiliza en el aula del modelo anterior.

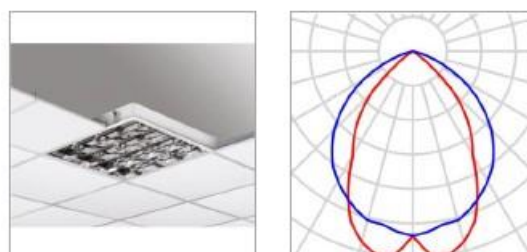


Figura 7.47 Luminaria sala de información

La última luminaria que se analizarán es la luminaria de pared que se emplean en las escaleras. Estas las se puede ver en la Figura 7.48, son incandescentes para conseguir los parámetros que se

necesitan, serán el modelo NBO54-60-001 Econom del fabricante ASTZ. Su curva luminosa abarca todas las direcciones desde la superficie de la pared.

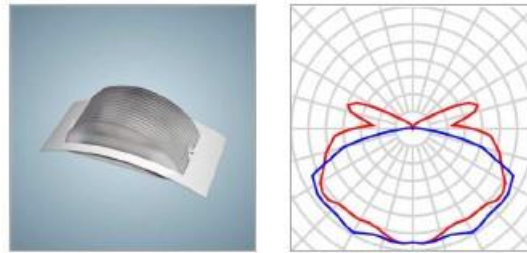


Figura 7.48 Luminaria de la pared

En la Tabla 7.3 que se muestra a continuación se puede ver las características de cada uno de los distintos tipos de luminarias.

Tabla 7.3 características de las luminarias

Luminaria	Potencia (W)	CCT	CRI	Flujo luminoso (lm)	Tecnología
Empotrables Modular	25,0	3500	90	2713	LED
Empotrables Pak	51,4	4000	85	6082	LED
Focos alta intensidad	250,0	4000	90	27500	LED
Focos baja intensidad	100,0	4000	70	14700	LED
Colgantes	58,0	2800	93	2990	LED
Fluorescentes	58,0	4000	80	5462	Fluorescente
Oficina	33,0	4000	80	3809	LED
Pared	60,0	2688	99	715	Incandescente

7.4 Análisis de la iluminación natural

La siguiente parte es sustituir la iluminación artificial de la estación actual por una iluminación completamente compuesta por luminarias de luz natural. Para la instalación se usarán luminarias reales a las que se les cambian los valores de: flujo luminoso, CRI, CCT, potencia y eficacia luminosa. En este caso, como se utiliza luz natural, hay parámetros que hay que cambiar porque carecen de sentido como son: la potencia, el CRI y la eficacia luminosa, ya que en este caso no requieren de potencia y la capacidad de la luz natural de reproducir correctamente los colores comparada consigo misma carece de sentido. Para el flujo luminosos se escoge una iluminación de 5500 lm. Para la CCT se usará el valor estándar para luz natural que es el D65 [47], esto significa que la luz tendrá una temperatura de color de 6500K aproximadamente.

Después de sustituir todas las luminarias nos quedaría como se ve de la Figura 7.49 a la Figura 7.53, estas nos muestran unas imágenes que ya se tienen de la iluminación con respecto al anterior modelado de la estación que se hizo previamente y muestra la instalación actual. Como se puede apreciar en la Figura 7.56 para sustituir los focos habría que poner varias luminarias de este estilo para así cumplir con la aportación que estos harían.

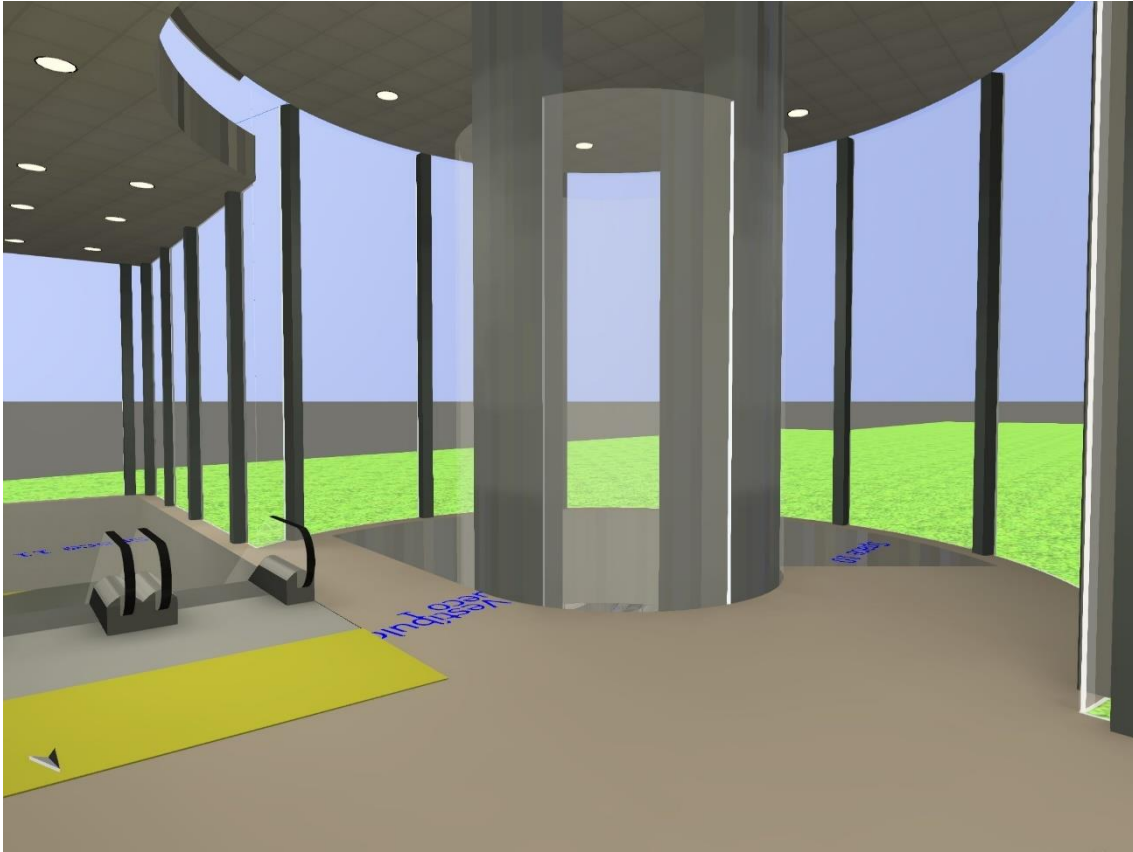


Figura 7.49 Entrada con iluminación natural

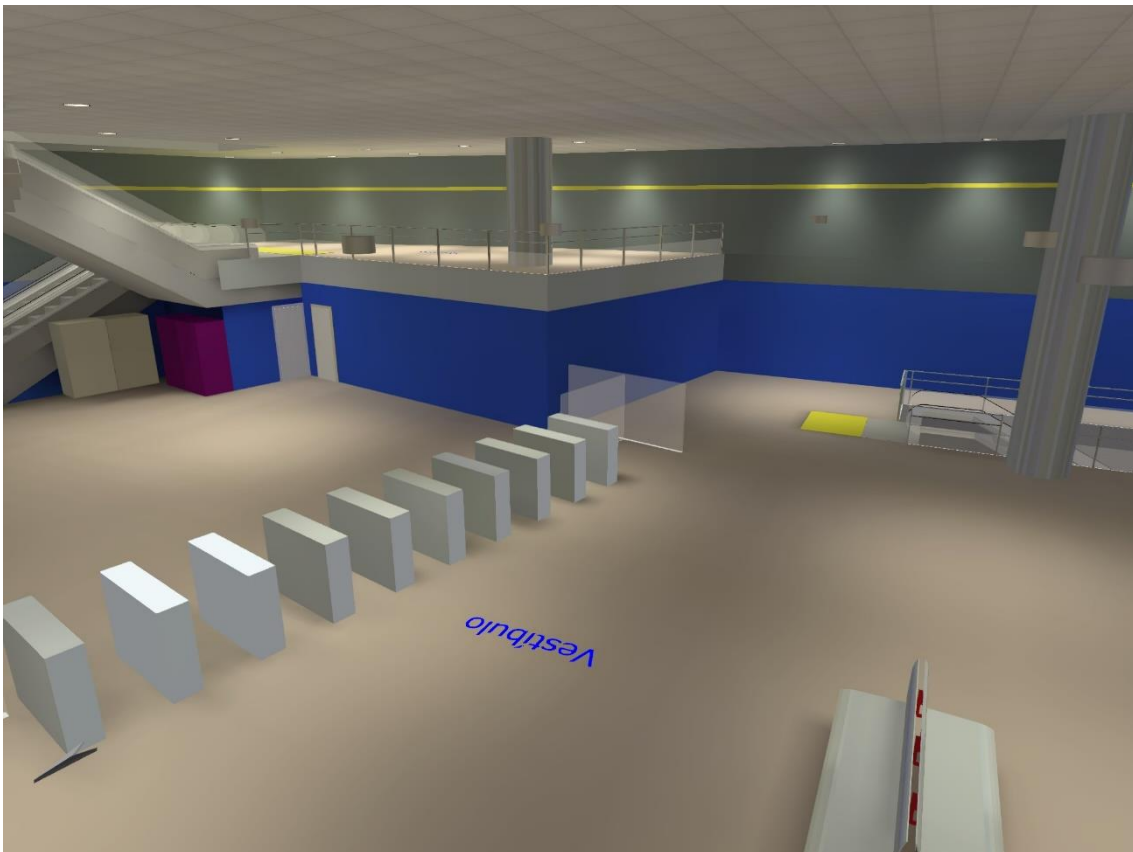


Figura 7.50 Nivel -1 y -2 con iluminación natural



Figura 7.51 Entresuelo 2 Anden A con iluminación natural

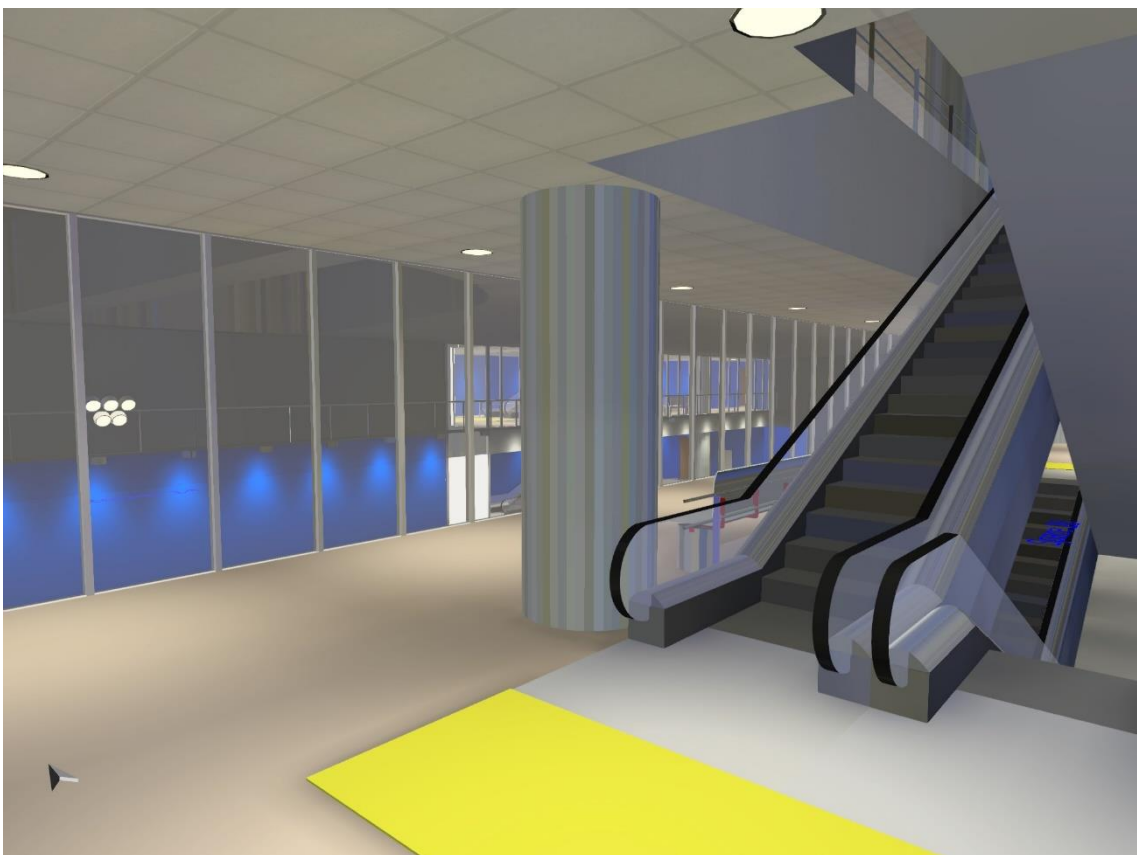


Figura 7.52 Entresuelo 2 Anden B con iluminación natural

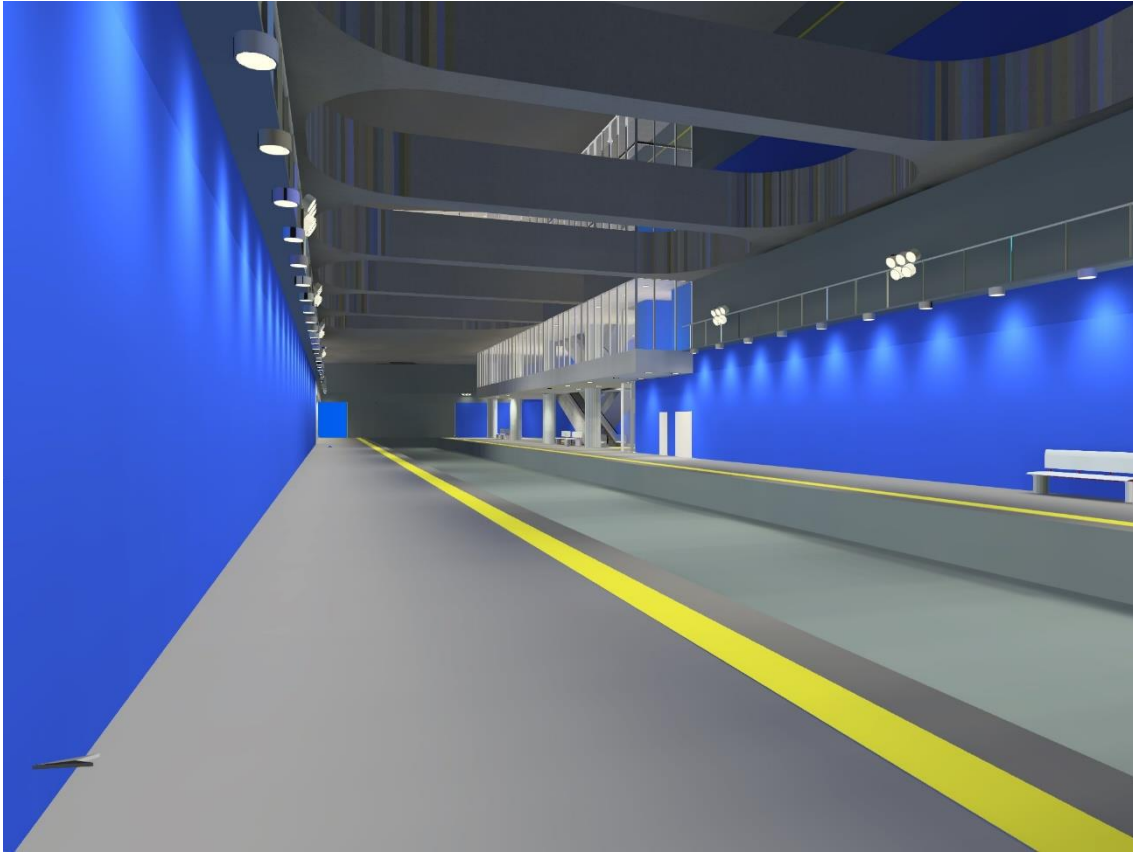


Figura 7.53 Planta -2 con iluminación natural

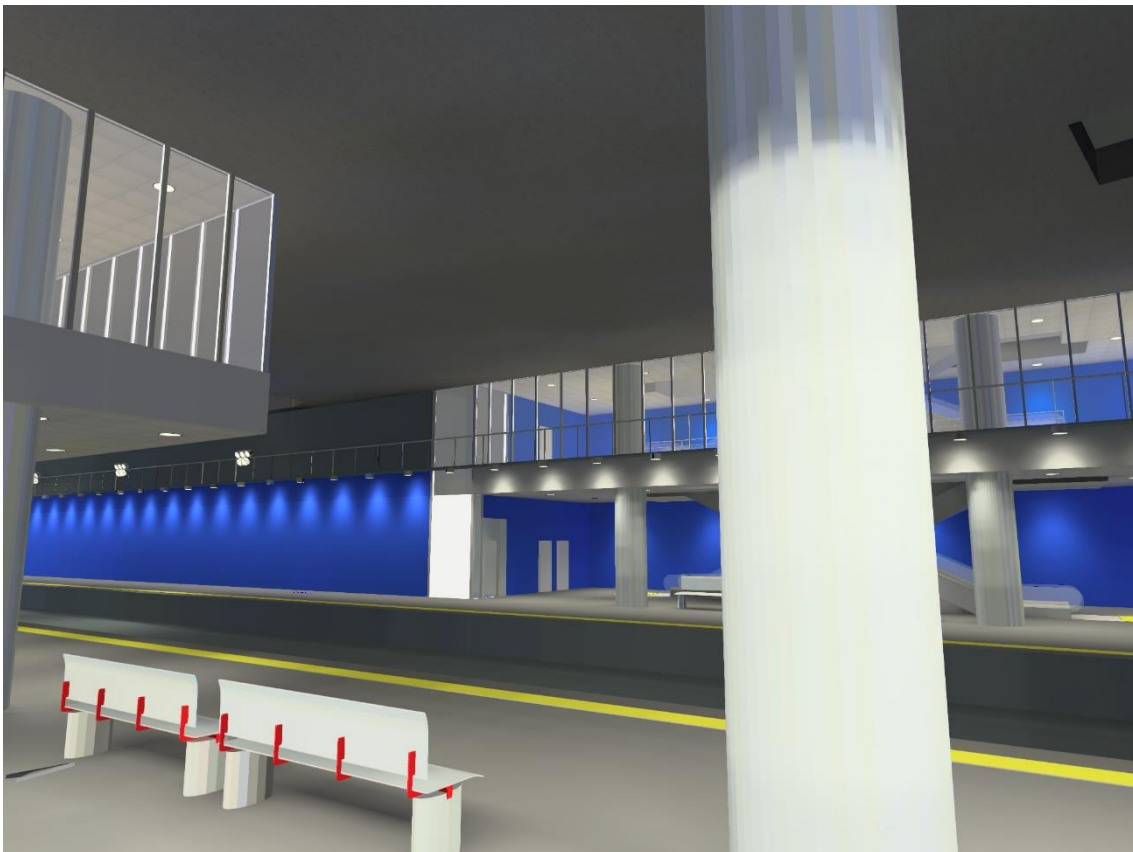
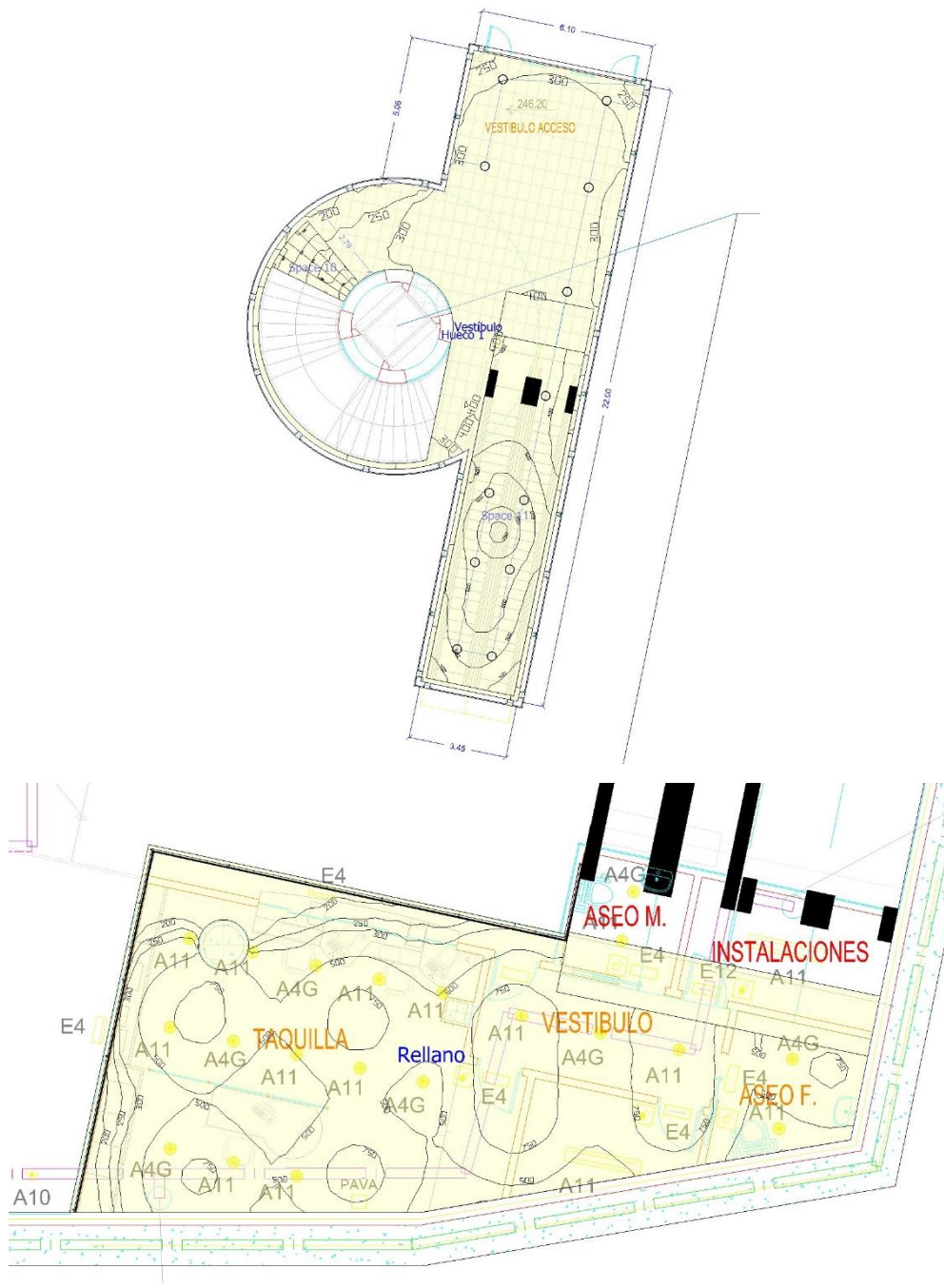
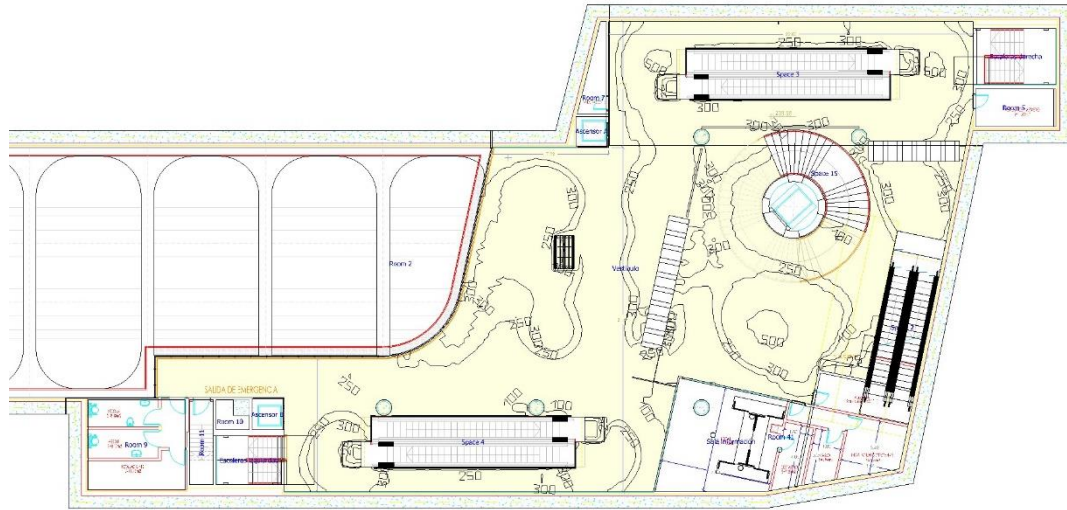
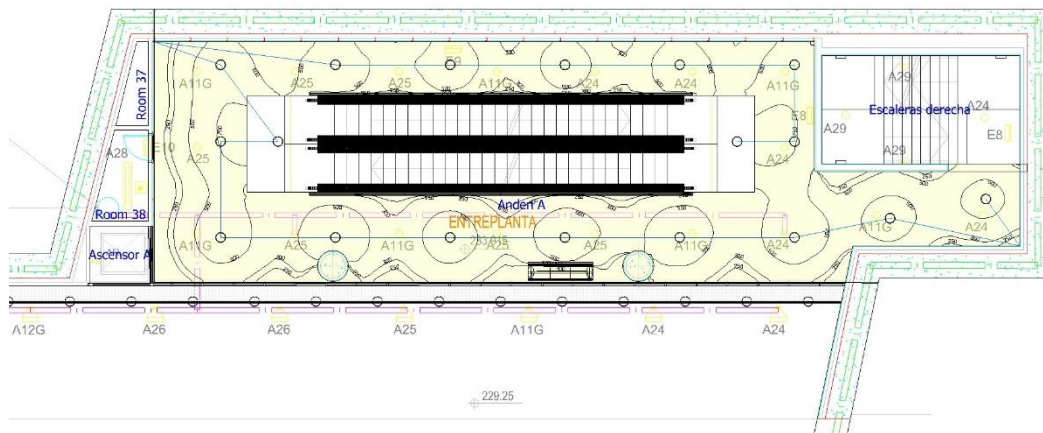
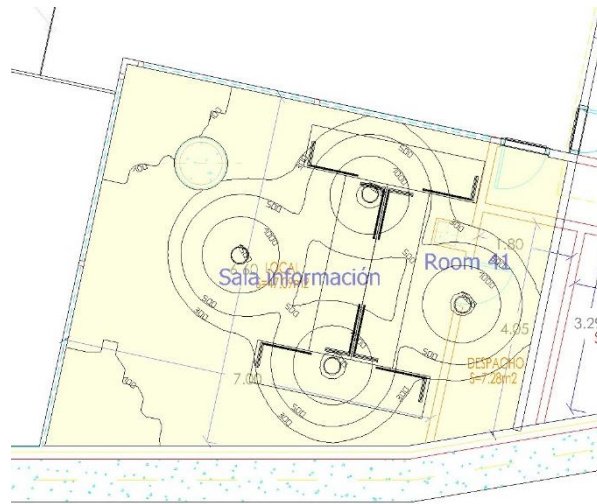


Figura 7.54 Anden B Planta -2 con iluminación natural





PLANTA VESTIBULO COTA 238.58



229.25

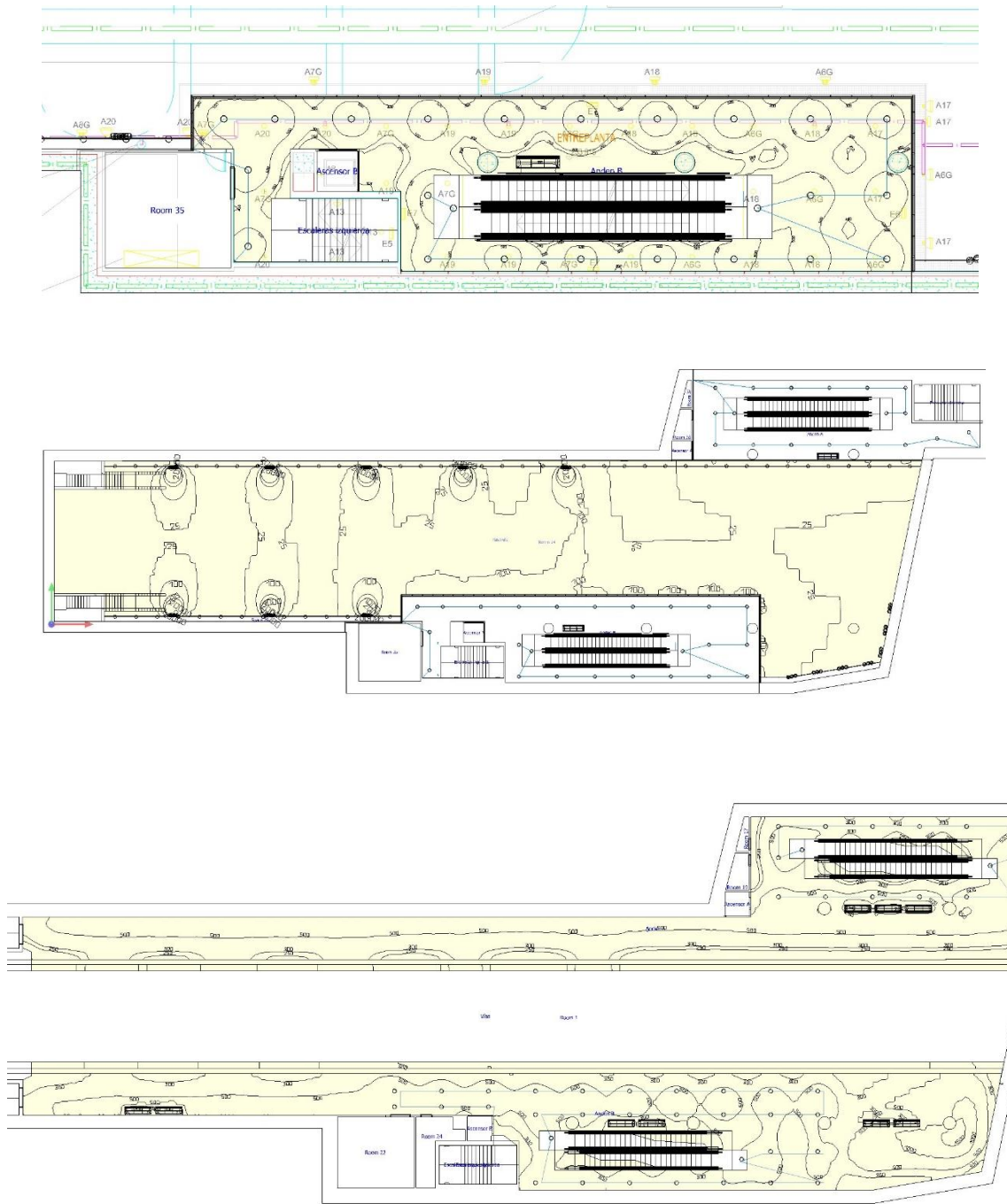


Figura 7.55 Curvas fotométricas con iluminación natural

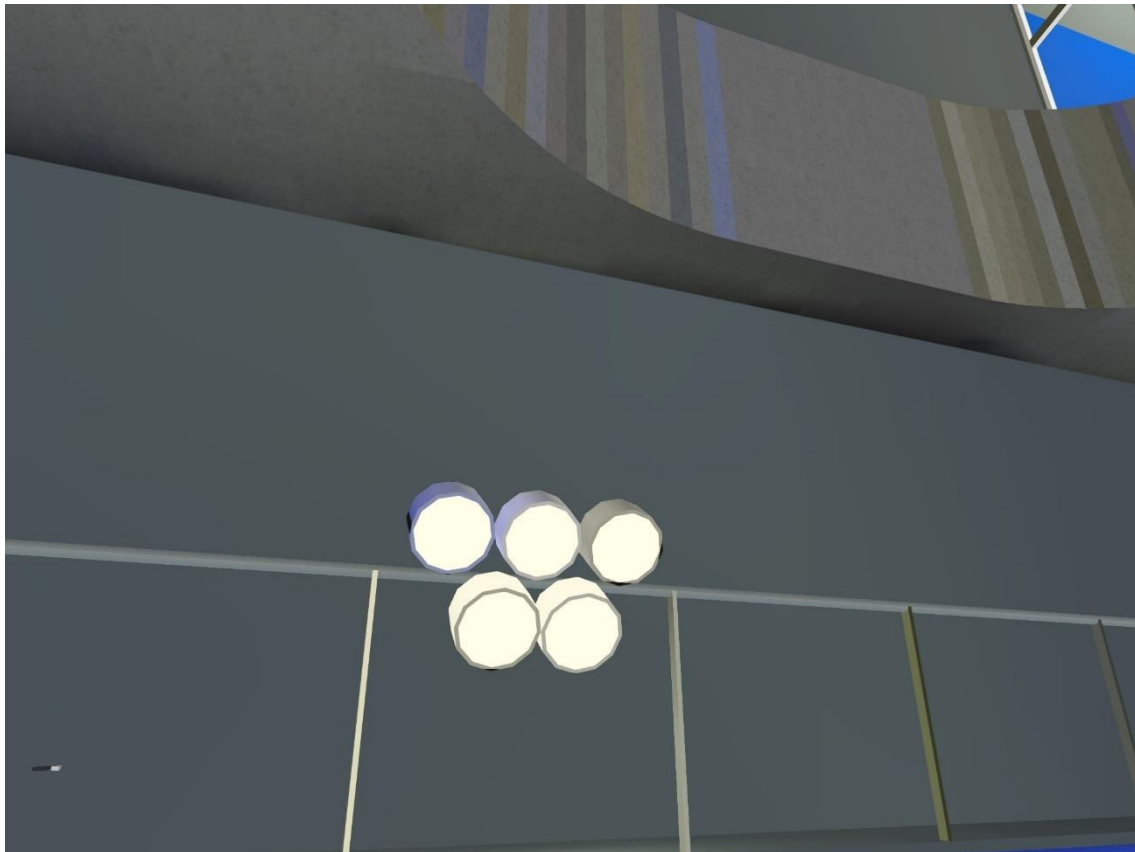


Figura 7.56 Focos sustituidos por luminarias de luz natural

7.5 Cálculos

Se pasa ahora a los cálculos que se van a realizar para analizar la potencia y los lúmenes consumidos durante un año completo empezando en enero, para posteriormente realizar las conclusiones. Con el horario de apertura de la estación se estima que las luminarias están consumiendo durante 7587 horas a lo largo del año. Para el programa calculamos que serán 5840 horas de día y 1747 horas de noche. Para los cálculos que realizamos se tomará un valor estimado de 19 horas diarias para mayor simplicidad.

Para los cálculos se van a diferenciar todas las superficies que se tienen iluminadas, con las alturas desde las que son iluminadas. Dividiremos este estudio por el tipo de luminarias en las cuales distinguiremos por: luminarias LED, fluorescentes, focos de alta intensidad, focos de baja intensidad, luminarias de pared y colgantes. Dentro de las luminarias LED se considerarán las empotradas en el techo. Con el número de bloques de luminarias, en la mayoría de los casos será una luminaria por bloque excepto en las fluorescentes, y el flujo luminoso en lúmenes que aportan calcularemos cuantos lúmenes por hueco se tiene y luego lo multiplicaremos por la cantidad de horas al día para sacar la iluminación en lúmenes por hora.

Se analizarán los lúmenes que llegan a cada superficie para estimar las necesidades de las luminarias de luz natural, que después sustituirán a la iluminación artificial. También se hace los cálculos del sistema de iluminación artificial con luz natural de respaldo.

También se hace cálculos de energía, estos son los más significativos, ya que con ellos podremos hacer los cálculos económicos. Estos cálculos los que se hacen análogamente a aquellos de la iluminación por bloque, se tiene los mismos huecos y la misma cantidad de bloques en cada hueco, además de la misma distinción entre tipos de luminarias. En este caso en vez del flujo luminoso se tiene la potencia consumida por cada bloque de luminarias. Después, calcularemos la energía por día multiplicando la potencia en cada hueco por las horas de consumo se tiene la energía consumida en cada hueco por día en kWh.

Tras los cálculos de potencia se puede comparar la Tabla 7.4 en la cual se ve lo que consumimos en la actualidad y la Tabla 7.5 en la que se ve en el cálculo global cuanto baja el consumo al añadir la iluminación natural. Se puede apreciar de forma más visual en cuanto a porcentaje en la Tabla 7.7, ya que en ella se ve el porcentaje de energía ahorrada al añadir la iluminación natural en cada mes. Se puede ver en la Tabla 7.6 que el mayor ahorro es en los meses de verano, ya que en estos se produce el cenit solar y durante toda esa época se recibe más luz, al igual que se puede observar que en los meses de invierno el ahorro es cerca de cinco veces menor. Igualmente, en el cómputo general anual se ve que nos ahorramos una gran cantidad de energía, que resulta un gran ahorro económico.

Tabla 7.4 Energía absorbida por la instalación actual en kWh

Energía absorbida solo con iluminación artificial (kWh)												
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
6.020,34	5.437,73	6.020,34	5.826,14	6.020,34	5.826,14	6.020,34	6.020,34	5.826,14	6.020,34	5.826,14	6.020,34	70.884,66

Tabla 7.5 Energía absorbida por la instalación con iluminación natural en kWh

Energía absorbida por iluminación artificial con iluminación natural (kWh)												
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
4.751,26	3.684,40	3.217,78	2.286,50	1.355,93	536,63	512,63	1.322,48	2.609,31	3.790,36	4.401,96	4.842,21	33.311,44

Tabla 7.6 Ahorro de energía por la iluminación natural en kWh

Energía ahorrada con iluminación natural (kWh)												
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1.269,08	1.753,33	2.802,56	3.539,64	4.664,41	5.289,50	5.507,71	4.697,86	3.216,83	2.229,98	1.424,18	1.178,13	37.573,22

Tabla 7.7 Ahorro de energía por iluminación natural de forma porcentual

Energía ahorrada con iluminación natural (%)												
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
21,08	32,24	46,55	60,75	77,48	90,79	91,49	78,03	55,21	37,04	24,44	19,57	52,89

Por último, realizamos los cálculos de ahorro económico de la estación para visualizar el impacto de la energía que hemos visto previamente. Esta tabla está hecha multiplicando la energía que se consume por el coste de la energía eléctrica. Se puede ver en la Tabla 7.8 un desglose del coste cada mes, con un coste fijo aproximado al precio de la energía actual. El coste de la instalación actual en rojo, el coste de la instalación con iluminación natural en verde y la diferencia o ahorro en amarillo.

Como era de esperar el ahorro económico es el mismo en valor porcentual que el de la energía ahorrada de la Tabla 7.7.

Tabla 7.8 Tabla de estudio económico

Coste de la energía absorbida solo con iluminación artificial (€)													
Coste (€/kWh)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
0,15	903,05	815,66	903,05	873,92	903,05	873,92	903,05	903,05	873,92	903,05	873,92	903,05	4.398,73
Coste de la energía absorbida por iluminación artificial con iluminación natural (€)													
Coste (€/kWh)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
0,15	712,69	552,66	482,67	342,97	203,39	80,50	76,89	198,37	391,40	568,55	660,29	726,33	2.294,38
Diferencia de coste de la energía absorbida por luminarias (€)													
Coste (€/kWh)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
	190,36	263,00	420,38	530,95	699,66	793,43	826,16	704,68	482,52	334,50	213,63	176,72	2.104,35

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En conclusión, se puede apreciar que se ahorra una cantidad considerable de dinero anualmente, lo cual es muy llamativo sobre todo en cifras porcentuales. El sistema tiene un periodo de amortización muy grande, igualmente hay que tener en cuenta de que estas instalaciones están previstas para durar mucho tiempo. Igualmente, pese a que el aspecto económico es el más llamativo y el que se puede cuantificar, sabemos que el aspecto ecológico es extremadamente importante y todo avance es importante.

Con lo cual se puede concretar que es una modificación francamente llamativa, sobre todo si nos paramos a pensar en implantar estos sistemas a nivel nacional. Es justo asumir que otras estaciones tendrían comportamientos similares, incluso siendo conservador al extrapolar se sigue siendo muy llamativo el ahorro. Si extrapolamos estos datos a una aplicación a nivel nacional se puede esperar un ahorro que ronde entre 40% y 50%. Estos datos dependen también de la localización, ya que en Asturias no hay la misma cantidad ni intensidad de luz que en otras provincias de España. Al igual que también hay que tener en cuenta la orientación de la estación que queramos estudiar, aunque esto puede ser paliado en cierto modo con la instalación de los colectores, sigue siendo una limitación a tener en cuenta. Todo esto en especial teniendo en cuenta que son instalaciones públicas financiadas por el gobierno, con lo cual la rentabilidad económica pasa a un segundo plano y deberíamos tener en cuenta, aún más, el aspecto ecológico. Otro factor a tener en cuenta respecto a su precio es el abaratamiento de las tecnologías por su uso, ya que cuando una tecnología se empieza a masificar su coste baja, puesto que los procesos de instalación y creación se abaratan como ya paso con los módulos fotovoltaicos (una tecnología similar).

Como propuestas de trabajos futuros podríamos plantear la instalación de placas fotovoltaicas para alimentar a la instalación actual, se podría desarrollar ya que en el techo hay espacio para su colocación. Otra posibilidad sería a partir de las placas fotovoltaicas y su generación estudiar la posibilidad de instalar un sistema de baterías para alimentar cuando haya menos luz. Se puede también estudiar otro tipo de colectores solares y otras tecnologías de iluminación natural. Otro estudio que podría ser básico en cuanto a eficiencia energética es un estudio para mejorar la instalación actual. También podría ser interesante, a la hora de expandir en la instalación de iluminación natural, el estudio de un sistema de regulación automatizado en función de la iluminación que aportan las luminarias solares.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «FichaEstacion15218».
- [2] «PROTOCOLO de KIOTO o KYOTO: Qué es y En qué consiste», [ecologiaverde.com](https://www.ecologiaverde.com/protocolo-de-kioto-que-es-y-en-que-consiste-413.html). Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/protocolo-de-kioto-que-es-y-en-que-consiste-413.html>
- [3] «World», IEA. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/world/energy-mix>
- [4] «Europe – Countries & Regions», IEA. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/regions/europe/energy-mix>
- [5] «China - Countries & Regions», IEA. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/countries/china/energy-mix>
- [6] «Spain - Countries & Regions», IEA. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/countries/spain/energy-mix>
- [7] «Blog de la energía». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blogdelaenergia.com/sabias-que-la-primera-central-hidroelectrica-del-mundo-fue-inaugurada-en-el-ano-1882/>
- [8] <https://www.areatecnologia.com>, «Turbinas Hidraulicas». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>
- [9] «Figura 3.2. Tres tipos más conocidos de turbinas hidráulicas: (A)...», ResearchGate. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-32-Tres-tipos-mas-conocidos-de-turbinas-hidraulicas-A-Kaplan-B-Pelton-y_fig7_339645266
- [10] adriana, «Historia de la energía eólica: Del molino de viento a los aerogeneradores», Renovables Verdes. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.renovablesverdes.com/origenes-e-historia-de-la-energia-eolica/>
- [11] «► Aerogeneradores Como Funcionan - Como Funciona Todo». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://comofuncionatodo.es/aerogeneradores-como-funcionan/>
- [12] S. Y. CONOCIMIENTO, «Historia de la Energía Solar Fotovoltaica», Estudiar Energías Renovables Online. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://estudiarenergiasrenovablesonline.es/historia-energia-solar-fotovoltaica/>
- [13] J. Bustos, «Energías renovables en España: historia y un futuro prometedor», E4e Soluciones. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.e4e-soluciones.com/blog-eficiencia-energetica/energia-renovables-espana>
- [14] E. Flores, «Análisis de los diferentes colectores híbrido fotovoltaico térmico (C-PVT) », KeeUI Solar. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://keeui.com/2021/06/09/hibrido-fotovoltaico-termico/>
- [15] J. A. Roca, «Las plantas híbridas de energía solar ayudan a garantizar una generación más estable», El Periódico de la Energía. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-plantas-hibridas-de-energia-solar-ayudan-a-garantizar-una-generacion-mas-estable/>
- [16] C. Pacheco, «Esta fue la primera calle iluminada artificialmente del mundo, gracias Thomas Alva Edison (y sin luces LED)», Computer Hoy. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://computerhoy.20minutos.es/energia/fue-primera-calle-iluminada-artificialmente-mundo-gracias-thomas-alva-edison-luces-led-1386349>
- [17] «REPSUS - Bombillas incandescentes». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repsus.es/Aprende-con-REPSUS/Sab-as-que/Bombillas-incandescentes/>
- [18] S. Garcia, «LuminoTech: Tipos de luces», LuminoTech. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://luminotechdesign.blogspot.com/2017/02/tipos-de-luces.html>



- [19] «Lámparas Fluorescentes: Definición, Funcionamiento Y Aplicación - Electrositio». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://electrositio.com/lamparas-fluorescentes-definicion-funcionamiento-y-aplicacion/>
- [20] «Electricidad Práctica: Lámparas Fluorescentes», Electricidad Práctica. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com/2011/05/lamparas-fluorescentes.html>
- [21] «Lámparas y Luminarias». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://opcc.cl/lamparas%20y%20luminarias.html>
- [22] «Bombilla de LEDs E27 24V Ac/Dc 5050SMD 8W 640Lm 30.000H», luzled-energia.com.es (Energía Activa, S.L.). Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.luzled-energia.com.es/bombillas-led-12vac-dc-para-instalaciones-solares/4102-bombilla-de-leds-e27-24v-ac-dc-5050smd-8w-640lm-30-000h-8435402539933.html>
- [23] «Como calcular a quantidade de luz para um ambiente? – Empório Luz». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.emporioluz.com.br/blog/como-calcular-a-quantidade-de-luz-para-um-ambiente/>
- [24] H. He, «Qué es el Contraste de Luminancia», Rayzeek. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rayzeek.com/es/glosario/que-es-la-luminancia-contraste>
- [25] «Manual del científico: ¿Por dónde sale el Sol?», Manual del científico. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://manualdelcientifico.blogspot.com/2017/04/por-donde-sale-el-sol.html>
- [26] «10Nvm10de17».
- [27] Cooper, «The absorption of radiation in solar stills», *Sol. Energy*, vol. 12, pp. 333-346, 1969, doi: DOI: 10.1016/0038-092X(69)90047-4.
- [28] A. Tracy, «Equation of Time (EoT): What is It and What's the Attraction? - Reprise», Quill & Pad. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://quillandpad.com/2023/10/05/equation-of-time-eot-what-is-it-and-whats-the-attraction-reprise/>
- [29] «7.9 Ecuación de tiempo», Curso General de Astronomía. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://curso.auladeastronomiadeFuenlabrada.com/tema-7-relojes-de-sol/7-9-ecuacion-de-tiempo/>
- [30] U. CUAED, «Completar Arrastrando V2.1», Completar Enunciado Arrastrando V2.1. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio-uapa.cuaed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/1817/mod_resource/content/7/contenido/evaluacion/completar_arrastrando/index.html
- [31] A. Barbón, J. A. Sánchez-Rodríguez, L. Bayón, y N. Barbón, «Development of a fiber daylighting system based on a small scale linear Fresnel reflector: Theoretical elements», *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 733-745, feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.071.
- [32] «Curva de eficiencia luminosa | Imagen Digital». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.gusgsm.com/curva_de_eficiencia_luminosa
- [33] E. GmbH, «Deslumbramiento: Tipos y definición | ERCO Conocimientos luminotécnicos». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.erco.com/es/planificacion-de-iluminacion/conocimientos-luminotecnicos/percepcion-visual/deslumbramiento-7462/>
- [34] iluminet, «¿Qué es el Efecto Purkinje?» Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://iluminet.com/que-es-efecto-purkinje/>
- [35] R. Golmohammadi, H. Yousefi, N. Safarpour Khotbesara, A. Nasrolahi, y N. Kurd, «Effects of Light on Attention and Reaction Time: A Systematic Review», *J. Res. Health Sci.*, vol. 21, n.º 4, p. e00529, oct. 2021, doi: 10.34172/jrhs.2021.66.
- [36] J. Morales-Bravo y P. Navarrete-Hernandez, «Enlightening wellbeing in the home: The impact of natural light design on perceived happiness and sadness in residential spaces», *Build. Environ.*, vol. 223, p. 109317, sep. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109317.
- [37] «Natural Light and Productivity: Analyzing the Impacts of Daylighting on Students' and Workers' Health and Alertness», *Int. J. Adv. Chem. Eng. Biol. Sci.*, vol. 3, n.º 1, may 2016, doi: 10.15242/ijacebs.ae0416104.

- [38]«7dd66ee0-095f-4c9d-a287-52af544d16b8.pdf». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.diba.cat/documents/7294824/11610426/E05UNE-12464.1+Norma+europea+para+la+iluminaci%C3%B3n+de+interiores.pdf/7dd66ee0-095f-4c9d-a287-52af544d16b8>
- [39]U. Nations, «El Acuerdo de París | Naciones Unidas», United Nations. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [40]«La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: ¿qué son y para qué sirven?» Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/derechos-sociales-consumo-agenda-2030/paginas/2024/ods-que-es-la-agenda-2030.aspx>
- [41]A. Barbón, A. Pardellas, J. A. Fernández-Rubiera, y N. Barbón, «New daylight fluctuation control in an optical fiber-based daylighting system», *Build. Environ.*, vol. 153, pp. 35-45, abr. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.02.022.
- [42]J. Á. Fernández-Rubiera, A. Barbón, L. Bayón, y M. Ghodbane, «Sawtooth V-Trough Cavity for Low-Concentration Photovoltaic Systems Based on Small-Scale Linear Fresnel Reflectors: Optimal Design, Verification, and Construction», *Electronics*, vol. 12, n.º 13, p. 2770, jun. 2023, doi: 10.3390/electronics12132770.
- [43]«Reflexión interior total | Definición y aplicación – Electricity – Magnetism». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.electricity-magnetism.org/es/reflexion-interior-total-definicion-y-aplicacion/>
- [44]Jgjj300, «JGJJ300: RESUMEN FIBRA OPTICA», JGJJ300. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://jgjj300.blogspot.com/2017/05/resumen-fibra-optica.html>
- [45]@GLCtec, «Cómo elegir el cable de fibra óptica adecuado para tu proyecto», GLC tec. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.glctec.com/como-elegir-el-cable-de-fibra-optica-adecuado-para-tu-proyecto--news--8-1013>
- [46]«DIAL: Light is our profession». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dial.de/en-GB/>
- [47]«Daylight Illuminant - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/daylight-illuminant?utm_source=chatgpt.com

10. ANEXO

10.1 Materiales

Tabla 10.1 Clasificación de materiales

Designacion	Código de color	Factor de reflexion	Recubrimiento	Tipo de material
Escaleras mecánicas	#E3E4E5	25%	20%	Metálico
Acero columnas	#ACB2B4	70%	90%	Metálico
Tira metálica pared	#FCFC34	82%	20%	Metálico
Recubrimiento metalico pared	#8A9597	26%	0%	Metálico
Chapa metálica (escaleras, ...)	#E3E4E5	63%	17%	Metálico
Escaleras circulares	#F4F4F4	81%	0%	Pintado
Marmol Pared	#E0B046	43%	30%	Pintado
Marmol suelo	#EBDECF	67%	30%	Pintado
Metal pared	#0066FF	15%	20%	Metálico
Baldosas Invidentes	#FFFF00	84%	0%	Pintado
Caucho	#191919	1%	0%	Pintado
Suelo escaleras	#EBDECF	67%	0%	Pintado

Estos son los materiales creados con sus respectivas propiedades para este trabajo. cabe mencionar también que hay diversos materiales que ya están en las bases de datos de DIALux como son:

1. Hierva
2. Translucido
3. Cemento fino, cemento-19
4. Placas del techo
5. Yeso

10.2 Figuras

