

Trabajo de Fin de Grado

Titulación en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**PROPUESTA DE MEJORA ENERGÉTICA EN EL ALUMBRADO PÚBLICO Y
MONITORIZACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMINICA DE UN MUNICIPIO
PEQUEÑO**

MEMORIA

Autor: Mateo Aguilar Triana, Ignacio Lafuente Piedrafita
Director: Manuel García Gil
Convocatoria: Julio 2022



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



RESUMEN

El proyecto que se describe a continuación pretende principalmente un incremento de la eficiencia energética del municipio de Graus, situado en la provincia de Huesca, sin generar un impacto ambiental negativo, es decir, con el objetivo de que la contaminación lumínica no aumente y, en cuanto sea posible, disminuirla y así preservar los cielos oscuros de este emplazamiento.

En primer lugar, la investigación se basó en un análisis de la situación actual mediante datos que nos fueron proporcionados por las personas encargadas del alumbrado público del municipio.

En segundo lugar, se realizó un trabajo de campo, in situ, que permitió de primera mano evaluar las condiciones de la instalación en general y los niveles de iluminación que posee actualmente el municipio.

Finalmente, mediante las conclusiones extraídas de estos trabajos previos se propusieron acciones a realizar en el municipio con la finalidad de reducir la potencia total instalada que conllevara un ahorro en la energía consumida y en el coste anual de la energía eléctrica.

Las acciones propuestas demostraban que se reduce la potencia total instalada en un 74% y, en consecuencia, tanto el ahorro de consumo en energía eléctrica como del coste anual y el de emisiones de CO_{2eq} se sitúan en un 78%.

Palabras clave

Eficiencia energética, contaminación lumínica, alumbrado, potencia instalada.

Abstract

The project described below is mainly aimed at increasing the energy efficiency of the municipality of Graus, located in the province of Huesca, without causing an increase in night sky brightness; this means reducing light pollution whenever possible, or maintaining it at a constant level where unreducible.

Firstly, the research was based on an analysis of the current situation using data provided by the people in charge of public lighting in the municipality.

Secondly, field work was carried out in situ, which allowed firsthand assessment of installation's condition and general lighting levels in the municipality as of today.

Finally, the conclusions drawn from this preliminary work led to the design of an action plan, to be carried out in the municipality in order to reduce lighting power, which would inherently mean savings in total energy consumption and in annual electricity bill.

The proposed light system restructure reduced the installation's power by 74% and, consequently, savings in electricity consumption, annual cost and CO_{2eq} emissions were 78%.

Key Words

Energetic efficiency, light pollution, lighting system, power.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Motivación	13
1.2. Contexto	13
1.3. Problemática: Situación lumínica en España	14
1.4. Estado de la técnica	17
1.5. Objetivos del proyecto	19
1.5.1. Criterios de valoración.	19
1.6. Alcance del proyecto	23
2. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL	25
2.1. Contexto Municipal y situación actual	25
2.2. Requisitos previos	25
2.2.1. Conceptos	25
2.2.2. Luminarias.....	27
2.2.3. Instalaciones de alumbrado exterior	30
2.3. Situación actual del alumbrado.....	33
2.4. Turismo astronómico y optimización de las instalaciones de alumbrado exterior	38
3. INVENTARIO Y DIAGNÓSTICO DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO	37
3.1. Metodología de trabajo de campo	37
3.1.1. 1ª FASE.....	37
3.1.2. 2ª FASE.....	45
3.1.3. 3ª FASE.....	50
3.1.3.1. Diagnóstico de los niveles lumínicos	50
3.1.3.2. Diagnóstico de las instalaciones	51
3.1.3.2.1..... Lámparas	51
3.1.3.2.2..... Luminarias	52
3.1.3.2.3..... Sistemas de gestión	53
4. PLAN DE MEJORA	54

4.1. Entorno RELUX	54
4.1.1. Simulación en RELUX Desktop	54
4.2. Propuestas de mejora	60
4.2.1. Áreas sin actuaciones propuestas	60
4.2.2. Áreas con redistribución de luminarias.....	61
4.2.3. Regulación permanente y análisis de tipos de apoyo	63
4.3. Eficiencia de las instalaciones	66
4.4. Resultados previstos.....	68
5. PLAN DE SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DE CIELO NOCTURNO	69
5.1. Contaminación lumínica	69
5.2. Tipos de medición	69
5.3. Magnitud de medición.....	69
5.4. Evaluación de dispositivos	70
5.5. Calibración	71
5.6. Alternativas de sistema de control.....	72
5.7. Evaluación de alternativas de sistema de control	77
5.8. Proceso de calibración periódica y control	78
6. PROGRAMACIÓN	80
6.1. PROGRAMACIÓN INGENIERIL.....	80
6.2. PROGRAMACIÓN DE OBRA	81
7. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	82
7.1. Contaminación Lumínica	82
7.2. Gases de efecto invernadero respecto al sistema antiguo	83
7.3. Gases de efecto invernadero asociados a ciclo de vida.....	85
8. PRESUPUESTO	88
8.1. PRESUPUESTO DE INGENIERÍA	88
8.2. PRESUPUESTO DE OBRA	89
8.3. Análisis de inversión	92
9. CONCLUSIONES	94
AGRADECIMIENTOS	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Gasto eléctrico en Europa por habitante (Sánchez de Vera, 2017)	14
Ilustración 2. Espectro de emisión de una luminaria de halogenuros metálicos (García i Boix, 1999).....	21
Ilustración 3. Elementos de la iluminaria (Morente Montserrat, 2012)	27
Ilustración 4. Derecha: Obtención de curvas polares (Deco, 2017). Izquierda: Distribución lumínica de luminaria OCHOCENTISTA. Fuente: Salvi Lighting Barcelona	29
Ilustración 5. Tipología de luminarias en Graus. Elaboración propia	34
Ilustración 6. Luminaria vial a la izquierda y luminaria villa o clásica a la derecha. Fuente: Salvi Lighting Barcelona	34
Ilustración 7. Luminarias tipo bola y proyector. Fuente: Mayja y Salvi Lighting Barcelona....	35
Ilustración 8. Tipología de lámparas en Graus. Elaboración propia	35
Ilustración 9. Gráfico de dispersión del parámetro Altura. Elaboración propia.....	42
Ilustración 10. Gráfico de dispersión del parámetro Interdistancia. Elaboración propia	42
Ilustración 11. Esquema del método de los 9 puntos. Fuente ITC EA 07	45
Ilustración 12. Campaña de medición con el método de los 9 puntos en el área Polígono Industrial. Elaboración propia.....	46
Ilustración 13. Aplicación Fotómetro al lado de uno de los puntos en la campaña de medición. Elaboración propia.....	46
Ilustración 14. Iluminación funcional del área General Miguel Cuervo. Elaboración propia ..	47
Ilustración 15. Iluminación del área Plaza España. Elaboración propia.....	47
Ilustración 16. Tercera medición en el proceso de calibración. Elaboración propia	48
Ilustración 17. Diagnóstico de las áreas analizadas en el municipio de Graus. Elaboración propia	51
Ilustración 18. Potencia instalada por tipo de lámpara. Elaboración propia	52

Ilustración 19. Interfaz para proyectos en escenas exteriores. Fuente: Relux Desktop	54
Ilustración 20. Cuadro para rellenar con la información necesaria. Fuente: Relux Desktop ..	55
Ilustración 21. Proceso iterativo de simulación. Elaboración propia	57
Ilustración 22. Ficha técnica de la luminaria escogida. Fuente: Salvi Lighting Barcelona (Relux Desktop)	57
Ilustración 23. Vista horizontal de Avenida Pirineos (Vía de servicio). Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)	58
Ilustración 24. Representación en 3D de Avenida Pirineos (Vía de servicio). Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)	58
Ilustración 25. Resumen de los resultados de la tipología 1. Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)	59
Ilustración 26. En la parte superior: Distribución actual - Parte inferior: Distribución propuesta. Elaboración propia	61
Ilustración 27. Distribución calculada en el estudio luminotécnico. Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)	62
Ilustración 28. Distribución calculada en el estudio luminotécnico. Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)	62
Ilustración 29. Tipos de apoyo existentes en el municipio. Elaboración propia	63
Ilustración 30. Luminaria tipo Mural Clásica OCHOCENTISTA TOP. Elaboración propia Relux (Desktop)	64
Ilustración 31. Luminaria tipo Proyector CIRCUS LIRA AMBAR. Elaboración propia (Relux Desktop)	64
Ilustración 32. Luminaria tipo Mural Vial BASIC S WALL AMBAR. Elaboración propia. (Relux Desktop)	65
Ilustración 34. Tabla comparativa de potencia total instalada. Elaboración propia	68
Ilustración 35. Tabla comparativa de energía consumida. Elaboración propia	68
Ilustración 36. Tabla comparativa del coste anual de la energía. Elaboración propia	68

Ilustración 37: Ubicación de los 3 SQM de la Alternativa 1. Elaboración propia.....	74
Ilustración 38: Ubicación de los 5 SQM de la Alternativa 2. Elaboración propia.....	75
Ilustración 39: Ubicación de los 7 SQM de la Alternativa 3. Elaboración propia.....	76
Ilustración 40: Emisión de azules antes de la reforma. Elaboración propia	83
Ilustración 41: Emisión de azules después de la reforma. Elaboración propia	83
Ilustración 42: Análisis de Ciclo de Clap S III. Fuente: Salvi Lighting Barcelona	86
Ilustración 43. Flujo tesorería acumulado. Elaboración propia	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Censo y consumo energético de los municipios de España (Vera, 2017)	15
Tabla 2. Tipo de lámpara y % de radiancia por debajo de 500 nm. Fuente: (Comité Español de Iluminación, 2018)	18
Tabla 3: Censos de Poblaciones Dependientes de Graus. Elaboración propia	23
Tabla 4. Requisitos mínimos de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado vial funcional. Fuente: ITC EA 01	31
Tabla 5. Valores de eficiencia energética de referencia. Fuente: ITC EA 01	31
Tabla 6. Calificación energética de una instalación de alumbrado. Fuente: ITC EA 01	32
Tabla 7. Potencia total instalada actualmente. Elaboración propia.....	38
Tabla 8. Energía total consumida actualmente. Elaboración propia	38
Tabla 9. Coste de la energía anual actual. Elaboración propia	38
Tabla 10. Criterio de clasificación de las vías. Fuente: ITC EA 02.....	39
Tabla 11. Clases de alumbrado vías tipo B. Fuente ITC EA 02	42
Tabla 12. 14 áreas con clase de alumbrado ME4B. Elaboración propia.....	39
Tabla 13. Clases de alumbrado vías tipo C y D. Fuente ITC EA 02	40
Tabla 14. 1 área con clase de alumbrado S3 y situación de proyecto C1. Elaboración propia	40
Tabla 15. Clases de alumbrado vías tipo E1. Fuente ITC EA 02	40
Tabla 16. Niveles de iluminación para las vías. Fuente ITC EA 02	41
Tabla 17. Tipología de áreas. Elaboración propia.....	43
Tabla 18. Tipología definitiva de áreas. Elaboración propia	44
Tabla 19. Mediciones utilizadas para la calibración. Elaboración propia	47
Tabla 20. Datos obtenidos en la campaña de medición. Elaboración propia	49

Tabla 21. Comparación de los niveles de iluminación por ley con los valores obtenidos. Elaboración propia.....	50
Tabla 22. Zonas según el grado de protección contra la CL. Fuente: (GENCAT, 2012).....	52
Tabla 23. Parámetros de la tipología 1. Elaboración propia.....	55
Tabla 24. Tipologías con regulación permanente. Elaboración propia	63
Tabla 25. Tipos de apoyo y luminarias propuestas. Elaboración propia.....	65
Tabla 26. Cálculos para las tipologías de los parámetros de eficiencia energética. Elaboración propia	66
Tabla 27. Clase de alumbrado a cumplir con la regulación. Elaboración propia	67
Tabla 28. Aparatos más comunes para medir el brillo del cielo y su tipo de medición. Fuente: (Rubio, 2015)	70
Tabla 29: Aparatos y su desviación típica de medida del brillo del cielo. Fuente: (Rubio, 2015)	71
Tabla 30: Ponderaciones de criterios de evaluación de sistema de control. Elaboración propia	78
Tabla 31: Puntuación final de los sistemas de control. Elaboración propia	78
Tabla 32: Análisis de Ciclo de Vida Luminarias Clap S I. Fuente: Salvi Lighting Barcelona .	86
Tabla 33: Análisis de Ciclo de Vida Clap S II. Fuente: Salvi Lighting Barcelona	86
Tabla 34: Eficiencia de las áreas de medición antes de la reforma. Elaboración propia	95
Tabla 35: Eficiencia de las áreas de medición después de la reforma. Elaboración propia..	95

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Desde que tenemos conocimiento, hemos sido bombardeados con artículos, noticias, estudios, etc. que alarman sobre el impacto de la actividad humana en el medio ambiente y urgen a la acción para evitar consecuencias funestas e irreversibles en el mismo. Por esta razón decidimos que, para nuestro Trabajo fin de Grado, podríamos tratar de concebir una manera de ahorro de energía para evitar las emisiones asociadas a su producción. Para ello, buscamos un sector determinado en que centrar el proyecto; el alumbrado público exterior. La razón de nuestra elección es simple: en la mayoría de núcleos urbanos hay algún tipo de sistema de alumbrado y la mayoría de ellos están obsoletos. Por ello, el impacto ambiental positivo asociado a la renovación este tipo de instalaciones es muy significativo. Así que decidimos encomendar el TFG a esta área en pro de poner nuestro granito de arena para fomentar alumbrados de exterior respetuosos con el medio ambiente.

Una vez decidido el enfoque, al buscar sector y área ingenieril en que llevar a cabo el proyecto, se nos ocurrió con nuestro tutor Manuel realizar un estudio de renovación de un sistema de alumbrado público. Para un proyecto como este necesitábamos un entorno aislado y de tamaño reducido para asegurar un resultado de calidad. Es aquí cuando uno de los integrantes del grupo mencionó que el alumbrado del pueblo de su origen es antiguo y se encuentra en mal estado; es ahí cuando se escogió Graus como pueblo base para el estudio.

1.2. Contexto

En los últimos años, la cantidad de municipios que han llevado a cabo la renovación de su alumbrado público, con la tecnología LED (Light emitting diode), son notables. Los LED destacan por encima de las diferentes tecnologías de iluminación debido a su alta eficacia luminosa, con la que favorecen al ahorro y al incremento de la eficiencia energética. Sin embargo, es de suma importancia que los LED sean de alta calidad y que los equipos auxiliares cumplan la normativa vigente con el fin de obtener el máximo rendimiento y no generar incomodidades en los usuarios de las instalaciones. Aunado a esto, hay aspectos a considerar respecto del uso de la tecnología LED que son de vital importancia para no aumentar la contaminación lumínica y preservar los cielos oscuros, además de procurar por la salud de los ciudadanos de los efectos negativos sobre la salud humana que puede generar la contaminación lumínica (en adelante CL).

1.3. Problemática: Situación lumínica en España

En el año 2011, el grupo de Estudio de Contaminación Lumínica de la Universidad Complutense de Madrid publicó un informe en el cual se trataba de estimar el crecimiento anual del gasto en alumbrado público en España; dicho crecimiento resultó de un 4,7%. Por aquel entonces, el consumo energético por habitante en Alemania se situaba entre 48 y 43 kWh/año, en Francia sobre los 77 y 90 kWh/año, mientras que en España oscilaba entre los 114 y 118 kWh/año (Sanchez de Miguel, 2010) lo que posiciona a este último como el país europeo con mayor consumo energético anual per cápita.

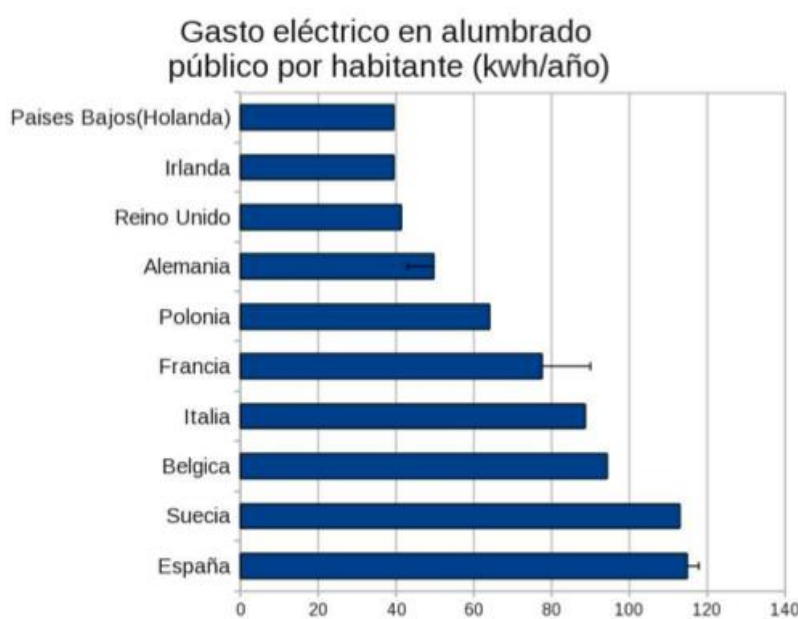


Ilustración 1. Gasto eléctrico en Europa por habitante (Sánchez de Vera, 2017)

Paralelamente, el 29 de julio de 2011, fue aprobado en el Consejo de ministros, el segundo Plan Nacional de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. Este plan daba continuidad a los planes de ahorro y eficiencia energética anteriormente aprobados por el Gobierno español en el marco de la *Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 (E4)*, aprobada en noviembre de 2003. Estaba enfocado a distintas ramas de mejora en función de un análisis sectorial del país, como, por ejemplo: Industria, servicios públicos y transporte, entre otros. Cada análisis incorporó una descripción de situación actual y las medidas que se pretendieron poner en marcha. A partir de este momento, de todas las ramas desglosadas en los planes de ahorro, se pone el foco en el análisis sectorial de los servicios públicos y más concretamente en el alumbrado público (el análisis sectorial de los servicios públicos está dividido entre alumbrado y sistema de agua potable). Para la línea trabajo de la adecuación del alumbrado público, se diseñó un programa que priorizaba la mejora en ciudades de más de 25.000 habitantes, con una línea de financiación específica, a la cual también tenía total acceso el resto de los ayuntamientos que quisieran optar a un proyecto de renovación de alumbrado.

Unos años después, el CONAMA del año 2014, enunciaba el objetivo de la Unión Europea para el año 2020 en incrementar la eficiencia energética en un 20%. Para España, se hizo un énfasis importante en los municipios rurales con baja población, resaltando que estos municipios son uno de los puntos más sensibles a mejoras debido a su eficiencia energética. Asimismo, se remarcó que el gasto en iluminación representaba una importante cuantía del presupuesto anual por la falta relativa de ingreso público respecto a otros países de la unión, otra razón por que se urgía a buscar este 20% de mejora.

En España, un 84% de los municipios existentes tienen una población menor a 5000 habitantes con una baja densidad poblacional. Estos son los pueblos que cuentan con unas instalaciones de alumbrado público con un número demasiado elevado de puntos de luz y con una gran dispersión. El resultado de este despropósito son instalaciones energéticamente ineficientes y costosas. Cabe destacar que, a medida que disminuye el tamaño del municipio disminuye la potencia unitaria del alumbrado. Aún con esta disminución de potencia unitaria, resulta sorprendente descubrir que en municipios de menor tamaño aumenta tanto el número de puntos de luz y como la ratio de consumo per cápita (Vera, 2017). También los niveles de iluminación de las calles, en la mayoría de casos, resultan excesivos en comparación a las necesidades.

Tamaño municipio	RATIOS IDAE 2017			CENSO DE ESPAÑA 2016		RESULTADOS	
	kWh/hab/a	W/PL	PL/1000 hab	Municipios	Población	GWh/a	PL
> 75.000 habitantes	82	179	120	98	21.525.605	1.760	2.588.324
40.001 a 75.000 hab	112	172	153	77	4.204.804	471	642.952
20.001 a 40.000 hab	114	161	189	227	6.248.522	713	1.183.382
10.001 a 20.000 hab	139	155	229	347	4.914.991	682	1.124.529
5.000 a 10.000 hab	151	137	280	551	3.869.029	586	1.084.126
< 5.000 habitantes	187	131	384	6.825	5.794.057	1.085	2.226.526
Conjunto España	114	156	190	8.125	46.557.008	5.296	8.849.839

Tabla 1. Censo y consumo energético de los municipios de España (Vera, 2017)

En la Tabla 1 se pueden observar los datos relacionados con el consumo de energía del alumbrado exterior municipal en España. De las columnas 2 y 4 se desprende que tanto el consumo anual, como la cantidad de los puntos de luz en municipios con población menor a 5000, superan ampliamente a las cifras respectivas de los municipios con una población mayor a 75000 habitantes, lo cual ratifica la ineficiencia de las instalaciones de la España despoblada.

Debido a la gran cantidad de municipios con una población menor de 5000 habitantes, el proyecto pretende abarcar una transición ecológica aportando un ahorro económico al

municipio mediante actuaciones que tendrán impacto ambiental positivo en el ámbito energético y en reducción de CL.

Las instalaciones de alumbrado público exterior tienen un potencial de mejora tanto en ahorro energético como económico. El CONAMA, en 2014, situó el potencial ahorro para los municipios de la España vacía en un 65%; exactamente lo mismo estimó el IDAE en el año 2017. Para esta última estimación, se utilizaron datos fehacientes de renovaciones en la cuales el IDAE tuvo cierto grado de implicación; se constataron ahorros que llegaron a superar el 80% respecto a los alumbrados obsoletos gracias a la combinación de tecnología LED con regulación de potencia horaria.

Así, en los últimos años un gran número de municipios están llevando a cabo la renovación de su alumbrado público exterior. Ciertos rediseños están fomentados por el incremento de las subvenciones para la obra, como por ejemplo el Programa de ayudas para alumbrado exterior municipal mediante el FEDER y el IDAE en el año 2017-2018 (siendo esta la segunda convocatoria), también el PLAN Pemis-Lumen llevado a cabo por la consultora Artecoin, el cual informa que ha conseguido un éxito del 100% en la consecución de subvenciones o más recientemente el programa DUS 5000 gestionado por el IDAE que subvenciona aquellos planes de mejoras singulares en municipios pequeños, de menos de 5000 habitantes, en el año 2021-2022. Proyecto que además pretende paliar la despoblación masiva de los medios rurales y afrontar el reto demográfico que se plantea en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (Gobierno de España, 2021) trabajando sobre la transición ecológica, así como la cohesión territorial y la lucha contra la despoblación, siendo estos dos de los cuatro ejes que orientan las políticas del Plan.

El siguiente aspecto por tratar es la CL y de los aspectos adversos producidos por el alumbrado artificial en el entorno. En los años 70 diversos expertos comenzaron a mostrar su preocupación por la posible relación entre ciertos problemas de salud y el brillo del alumbrado. Entre estos problemas se encontraba la variación del ritmo hormonal del ser humano en función de la luz incidente o la hipersensibilidad de una célula en la retina a la radiación luminosa. También comenzaron a encontrar problemas independientes a la salud como la dificultad de situar observatorios astronómicos cerca de ciudades con un alto brillo luminoso (García Gil, 2015).

Gracias a los numerosos estudios realizados en la última década, es sabido que la CL también tiene impactos ecológicos y ambientales negativos que siguen siendo objeto de análisis científico. Por consiguiente, se requiere su cuantificación para que la CL sea evaluada de manera precisa, y así poder implementar medidas que conlleven una reducción del brillo del cielo para generar un impacto ambiental positivo en el ecosistema.

Reducir la CL podría llevar al desarrollo de diversas actividades con el fin de proteger la salud de los pueblerinos, el entorno natural e incluso de fomentar el turismo astronómico; un colectivo de turistas con creciente grado de afiliación y que podría significar una inyección económica notable para el pueblo.

1.4. Estado de la técnica

El incremento en las subvenciones a la obra mencionado previamente se vio motivado por 3 avances: el tecnológico, legislativo y en la contratación

◆ Avance tecnológico:

Como se comentó inicialmente, la tecnología LED ha logrado ubicarse como un referente de eficiencia energética en comparación a las tecnologías utilizadas con anterioridad. Los aspectos que han conseguido posicionarlo por encima son, por ejemplo:

- La vida útil es mucho más elevada que el resto. Actualmente existen fabricantes que garantizan más de 50000 horas de uso sin alteración de propiedades a lo largo de la vida útil.
- El conjunto luminaria-lámpara es altamente eficiente al conseguir que la luz sea fácilmente dirigible mediante las ópticas adecuadas.
- Los LED son de un pequeño tamaño, lo que facilita su instalación en cualquier localización.
- Su encendido es instantáneo y evita que exista un tiempo de espera.
- La programación va de la mano con esta tecnología, por ende, facilita las ejecuciones durante su funcionamiento.
- No presenta pérdidas en forma de calor al no emitir en la franja de infrarrojos.

En otro orden de ideas, existen aspectos tecnológicos a considerar para que los LED no supongan una fuente de contaminación lumínica. Por ejemplo, la direccionalidad que posee permite concentrar más del 80% de su emisión luminosa en el plano horizontal (CONAMA, 2014). Por el contrario, el análisis de la temperatura del color del módulo LED es totalmente imprescindible. El rango de temperaturas del módulo LED blanco varía entre 2200 y 4000 [K] con una variación de ± 300 [K] y, a medida que la temperatura aumenta, la emisión de radiancia por debajo de 500 [nm] aumenta también, esto significa que, a mayor temperatura de calor, más contaminación lumínica produce. Para cuantificar el efecto, en la Tabla 2 se puede observar el % de radiancia emitido por cada tipo de lámpara respecto al total visible (V) y notar como aumenta a medida que la temperatura del color aumenta.

Tipo de lámpara	% de radiancia por debajo de 500 nm
Vapor de sodio a alta presión (VSAP)	7% del total V
LED PC Ámbar	1 % del total V
LED Blanco 2200 K (Cálido)	7% del total V
LED Blanco 3000 K (Ultracálido)	13% del total V
LED Blanco 4000 K (Neutro)	21% del total V
Halogenuros metálicos (HM)	21% del total V

Tabla 2. Tipo de lámpara y % de radiancia por debajo de 500 nm. Fuente: (Comité Español de Iluminación, 2018)

◆ Avance legislativo

En el año 2009 entraba en vigor el *Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior (RD 1890/2008)*, aunque no se contempló la aplicación de la tecnología LED. No es hasta el año 2011 cuando se publica el primer documento relacionado con el uso de esta tecnología para alumbrado: *Requisitos técnicos exigibles para luminarias con tecnología LED de alumbrado exterior* el cual ha sufrido revisiones y actualizaciones regulares a acorde con el desarrollo de la tecnología.

Durante los siguientes años, a causa de algunos inconvenientes que podían surgir a causa de una mala implementación de la tecnología y sus efectos perjudiciales sobre el medioambiente, diversas entidades se han encargado de elaborar guías técnicas. Véase la Junta de Andalucía que, en el año 2011, se publica la *Guía técnica de adaptación de las instalaciones de alumbrado exterior al decreto 357/2010 del 3 de agosto*, en el cual se establecían las bases para preservar la calidad del cielo nocturno, evitar la contaminación lumínica y fomentar medidas acordes con el ahorro y la eficiencia energética.

Otro es el caso de la Comunidad de Madrid, que publica en el año 2015 la *Guía sobre tecnología LED en el alumbrado* con el objetivo informar a todo tipo de usuarios sobre los conceptos básicos, los últimos avances en el sector y aspectos relacionados con la iluminación y la normativa aplicable.

Aunado a esto, en el año 2020, el IDAE publicaba una nueva revisión de *Requisitos técnicos exigibles para luminarias con tecnología LED de alumbrado exterior*, denotando que la tecnología, hoy en día, sigue en plena expansión.

◆ Avance en la contratación

En los últimos años, la posibilidad por parte de la Administración Pública de contratar Empresas de Servicios Energéticos (ESE) supone un gran avance en pro de la mejora del alumbrado público. Estas empresas tienen como eje de trabajo principal el ahorrar energía, esto conlleva un ahorro económico y una reducción de las emisiones de CO_2 . Se encargan del análisis de instalaciones que garanticen una gestión eficiente de la energía con un compromiso de ahorro económico de por medio, mediante la financiación del proyecto con los ahorros generados o, por otro lado, cumpliendo los requisitos exigibles para poder optar a las subvenciones comentadas con anterioridad. Su principal atractivo es que, para el

inicio de los proyectos, no se requiere de un desembolso inicial, lo cual generaría que la mayoría de proyectos de renovación del alumbrado público exterior fueran inviables a causa de falta de fondos.

1.5. Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene dos objetivos principales que son:

- Mejora energética del sistema de alumbrado público: este objetivo engloba todo aquello relacionado con eficiencias, vatios, kilovatios-hora.
- Reducción de la CL del pueblo: este objetivo engloba todo lo relacionado con emisión de luz hacia el cielo, franja espectral en que se emite la luz, total de lúmenes emitidos.

Con tal de valorar el grado de cumplimiento de objetivos de proyecto, se definirán unas variables cuantitativas sobre las que se tratará de actuar. Variables entre las cuales se incluyen “Potencia instalada”, “Factura eléctrica para alumbrado público” o “brillo de la cúpula celeste” entre otras con sus unidades de $[W]$, $[\text{€}]$ y $[\frac{mag}{arcsec^2}]$ respectivamente. A cada una de estas variables se le asignarán objetivos numéricos específicos y se diseñará el nuevo alumbrado con el cumplimiento de estos objetivos secundarios en foco. Con un sistema que resuelva satisfactoriamente las demandas de cada variable, se podrán dar por satisfechos los dos objetivos principales del proyecto. De manera que, en realidad, estas variables serán tratadas como criterios de valoración de cumplimiento de proyecto.

Habrán tres categorías distintas de criterio de valoración en función de su naturaleza. El primer criterio englobará las variables energéticas, el segundo englobará las variables relacionadas con CL y el tercero incluirá las variables de seguridad vial.

1.5.1. Criterios de valoración.

- 1) Valoración de aumento de eficiencia energética y reducción de impacto ambiental.

I. Potencia total instalada

Es una variable que se autodefine; mide la diferencia entre potencia instalada del alumbrado actual y la que habrá una vez se lleve a cabo la reforma.

El primer paso para calcular esta variable es hallar la potencia instalada actualmente, para ello se utilizará el inventario del alumbrado municipal. El cálculo únicamente tendrá en cuenta todas las luminarias de Halogenuros Metálicos (HM), y las pocas luminarias de Vapor de Sodio a Alta Presión (VSAP) dado que son las luminarias con mayor presencia en el inventario. Las luminarias que emplean otras tecnologías se desprecian por dos razones principales: la primera es que representan un porcentaje muy reducido del total de luminarias

(5%<) y la segunda es que las potencias de las luminarias de tipos raros son tan reducidas (3 – 10 [W]), que se pueden considerar despreciables.

Una vez diseñado el plan de acción final, se reharán los cálculos anteriores para hallar la potencia instalada del alumbrado nuevo. Repitiendo el procedimiento anterior, se tomará como documento base el inventario de luminarias, con la diferencia de que éste estará actualizado al nuevo sistema de alumbrado. Con las potencias instaladas pre y post reforma se encontrará la diferencia de potencia, que será la cuantificación final de esta variable.

A partir de una extrapolación de valores de núcleos urbanos similares estudiados en el Proyecto Rebeca¹, se estima que la cifra de ahorro energético rondará un 70% y en ningún caso se validará un nuevo alumbrado en que la reducción de potencia sea inferior al 60%.

II. Eficiencia energética de las zonas medidas

La eficiencia energética es una relación entre el producto de la superficie iluminada por la iluminancia media, entre la potencia instalada total (se ampliará sobre esta definición más adelante). Las clasificaciones de eficiencia energética se reparten en una escala de 7 subdivisiones de la A hasta la G, donde A es la categoría más eficiente (verde) y G es la menos eficiente (rojo).

En Graus la mayoría de las luminarias que se encuentran actualmente en funcionamiento utilizan tecnología VSAP, HM, etc. Dichas luminarias conllevan unas pérdidas de potencia cuantiosas en forma de desprendimiento de calor durante el uso y pérdidas no negligibles de conmutación en el encendido, lo cual conlleva una calificación energética deplorable. La nueva instalación lumínica buscará catapultar todas las zonas de iluminación hacia la A.

III. Coste económico en iluminación

Otra manera de cuantificar la reducción en impacto ambiental y el gasto energético es cuantificar el ahorro anual en la fracción de la factura de electricidad asociada al alumbrado. Para calcular la partida anual emitida desde el consistorio para cubrir el gasto de alumbrado nocturno, se utilizará el cálculo desarrollado en el criterio 2. Son necesarios los valores de potencia instalada antes y después de la reforma, además de una estimación de horas totales de encendido anual de cada luminaria. En la estimación horaria se tendrán en cuenta todos los factores relevantes del gasto energético del alumbrado, como por ejemplo la regulación de luminarias en horas determinadas o la duración variable de la noche a lo largo del año.

¹ El Proyecto Rebeca fue un programa estratégico para la renovación del alumbrado público, de 15 municipios, en la provincia de Albacete.

Multiplicando la potencia instalada pre y post reforma por las horas de encendido anuales se encontrará la cantidad de energía total en $kWh/año$ empleada en alumbrar antes y después de la ejecución del proyecto. Con estos dos valores se calculará la diferencia como el ahorro energético anual que acarreará el proyecto. Luego, se encontrará el *precio medio/kWh* del último año, teniendo en cuenta anomalías puntuales como el conflicto bélico ucraniano, para encontrar el ahorro total que el proyecto conlleva. En función del resultado de esta variación se podrán determinar indicadores económicos como el periodo de retorno o el valor actual neto, que desprenderán la calidad del proyecto como inversión económica además de la ambiental intrínseca.

2) Valoración de disminución de CL.

1. En espectro de longitud de onda medio

La luz del espectro visible más contaminante lumínicamente es la luz azul, a la que le corresponde una longitud de onda entre 380 – 500 $[nm]$ (Rodríguez, 2021). Como se puede observar en la Ilustración 2, los halogenuros metálicos emiten longitudes de onda pertenecientes a la franja de los azules y, de acuerdo con el inventario, este tipo de luminarias representan un gran porcentaje del total en el municipio. De manera que un criterio de peso en la valoración de reducción de CL será la reducción de la luz de las franjas más contaminantes. Se espera para este apartado poder disminuir la emisión de ondas azules prácticamente en su totalidad y en ninguna circunstancia se validará un diseño de sistema que no implique una reducción de azules menor al 80%.

La manera de cuantificación es similar a las de los criterios energéticos. A partir de los diagramas espectrales de emisión de luz de las luminarias del pueblo, se calculará la cantidad total de luz perjudicial emitida antes y después de la reforma. Comparando los dos valores obtenidos obtendremos la reducción total de luz azul.

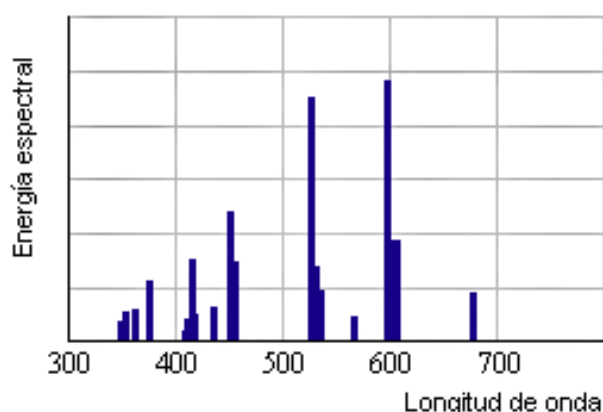


Ilustración 2. Espectro de emisión de una luminaria de halogenuros metálicos (García i Boix, 1999)

II. Cantidad de luz emitida directamente hacia el cielo

Para este criterio se define el concepto: geometría de las luminarias. La forma de las farolas tiene un impacto directo en la CL de la localidad, por ejemplo, las lámparas esféricas sustentadas por la parte inferior emiten un FHS de alrededor del 50% (Mayja, 2021), es decir, más de la mitad de la luz que sale de la lámpara se emite directamente hacia el hemisferio superior. Este 50% es, en general, luz poco aprovechable y por ende potencia malgastada. En cambio, los fanales de foco LED orientados hacia el suelo con sujeción no intrusiva en zona de iluminación directa reducen casi por completo la emisión al cielo. Siempre que sea posible, se buscará fomentar el uso de las farolas del segundo tipo, aunque habrá situaciones excepcionales que impedirán la implementación de estas geometrías de luminaria (como por ejemplo en la basílica, donde la torre está iluminada de abajo hacia arriba). Cabe mencionar que esta variable no contempla la CL causada por reflejo de luz del suelo hacia arriba, tan solo la que se emite directamente hacia arriba. El proyecto plantea reducir esta emisión de luz hacia el cielo en su totalidad cuando la iluminación de monumentos se desconecte en horas de la madrugada, y en no menos de un 90% aproximadamente durante el resto de la noche. No se validará un alumbrado que no reduzca las emisiones de hemisferio superior en menos de un que no superen el 70%.

3) Valoración seguridad

I. Cantidad de luxes presentes a nivel de suelo

Si la reestructuración del sistema de alumbrado no se lleva a cabo con cuidado o si las medidas de eficiencia llevadas a cabo durante el proyecto son demasiado agresivas, podría verse afectada la seguridad vial. Reduciendo la cantidad de luminarias o utilizando farolas con iluminación variable se debe tener en elevada consideración la cantidad de luz que llega a nivel suelo. El proyecto se ajustará a la legislación tanto de iluminación mínima como de iluminación media para los distintos tipos de vía, pero adicionalmente se tratará de respetar la iluminación previa a la reforma en aquellos puntos en que la iluminación previa fuera superior al mínimo legal establecido.

1.6. Alcance del proyecto

Este proyecto tiene unas ciertas limitaciones que pasamos a detallar a continuación. En primer lugar, el municipio de Graus controla el alumbrado de 19 núcleos urbanos habitados además del propio del pueblo. Estos poblados con sus respectivos censos son los siguientes:

Población	Nº de habitantes
Abenzoas	1
Aguinalú	28
Bellestar	15
Benavente de Aragón	27
Centenera	15
Ejep	17
Güel	14
Juseu	18
Panillo	4
Pano	4
La Puebla de Fantova	105
La Puebla del Mon	2
Pueyo de Marguillén	20
El Soler	18
La Tosquilla	6
Torre de Ésera	52
Torre de Obato	19
Torrelabad	15
Torres del Obispo	169
Las Ventas de Santa Lucía	30

Tabla 3: Censos de Poblaciones Dependientes de Graus. Elaboración propia

De la tabla 3 se extrae que el número de residentes que no habitan en la capital del municipio es 579. Según el IDAE, los habitantes de pueblos de menos de 10.000 habitantes consumen de media un total de $169 \left[\frac{kWh}{hab \cdot a} \right]$ (IDAE, 2017), aunque con datos del punto 3 de Graus, el cálculo de energía/habitante de Graus resulta de $134,11 \left[\frac{kWh}{hab \cdot a} \right]$. Tomando como referencia el consumo a partir del dato del IDAE, se estima el consumo anual de energía para alumbrado de todos los pueblos anexas del municipio en unos $97,85 [MWh]$ al año. El consumo total del Graus capital (calculado en el punto 3) es de $382,91 [MWh]$ anuales; con estas dos cifras se puede calcular el porcentaje de energía consumida por las poblaciones adyacentes. Así se encuentra que Graus supone un 80% del consumo total de la electricidad municipal, por lo que, teniendo en cuenta las relaciones coste de oportunidad e inversión – beneficio, se ha

decidido no rediseñar ningún sistema de pueblos colindantes. Un rediseño global de todos los sistemas independientes del municipio implicaría una multiplicación del precio del proyecto de relación 4 – 1 o 5 – 1. Se entiende entonces que este rediseño es en el mejor de los casos ineficiente, no se entiende multiplicar el coste del proyecto para atacar el 20% del problema. Desgraciadamente, obviar consumos implica fracciones de gasto y emisiones lumínicas no controladas por nuestra modificación; modificaciones que afectarán al resultado del proyecto en términos de consumo de energía y dinero, a la vez que en términos de CL.

2. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

2.1. Contexto municipal y situación actual

Graus es un municipio español que pertenece a la provincia de Huesca, situado en la comarca de Ribagorza; Graus pueblo es capital de dicha comarca. El municipio cuenta con una población de 3434 habitantes (INE, 2021), mientras que el núcleo urbano se queda en 2855. Todo el municipio de Graus fue declarado conjunto histórico-artístico en el año 1975; que es una declaración legal que agrupa los diversos monumentos históricos-artísticos de la localidad en cuestión para su protección y que se encuentra regulada por el Ministerio de Cultura de España. Graus dispone de un patrimonio religioso y cultural principalmente debido a la basílica de la Virgen de la Peña construida sobre la base de una iglesia románica, del siglo XII, en el siglo XVI (Wikipedia, 2022). De acuerdo con el periodo histórico de su construcción, esta basílica es de estilo gótico renacentista y tardó no menos de 22 años en ser construida (se cree que por falta de la inyección económica necesaria por parte del obispado). El patrimonio cultural lo completan el Espacio Pirineos, el museo del pueblo y los iconos de la comarca de La Ribagorza. El Espacio Pirineos es un museo poco convencional; se diseñó con la premisa de la creación de un centro de referencia de reflexión y conocimiento de la cordillera fronteriza. Ahí uno puede ir a educarse sobre geología, fauna y paisajes del pirineo central; conocer las montañas para poder visitarlas y respetarlas. Por otro lado, la exposición del museo de Graus está compuesta por la recopilación de instrumentos educativos, lúdicos y de trabajo en el campo a la vez que instantáneas y filmografía de finales del siglo XIX en adelante.

2.2. Requisitos previos

En este apartado se procede a introducir definiciones y aspectos que se consideran importantes para el entendimiento de los siguientes apartados. La información que se citará a continuación será descrita de manera básica para ofrecer las nociones básicas necesarias para el entendimiento de los puntos siguientes.

2.2.1. Conceptos

El RD 1890/2008 *Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior* define los siguientes conceptos:

“El flujo luminoso es la potencia emitida por una fuente luminosa en forma de radiación visible y evaluada según su capacidad de producir sensación luminosa, teniendo en cuenta la variación de la sensibilidad del ojo con la longitud de onda. Su símbolo es Φ y su unidad es el lumen [lm].”

“La Iluminancia horizontal en un punto de una superficie es el cociente entre el flujo luminoso incidente sobre un elemento de la superficie que contiene el punto y el área de ese elemento.

Su símbolo es E y la unidad es $[lx] = \frac{lm}{m^2}$.”

“La Iluminancia media horizontal es el valor medio de la iluminancia horizontal en la superficie considerada. Su símbolo es E_m y se expresa en $[lx]$.”

“La Iluminancia mínima horizontal es el valor mínimo de la iluminancia horizontal en la superficie considerada. Su símbolo es E_{min} y se expresa en $[lx]$.”

“La luminancia en un punto de una superficie es la intensidad luminosa por unidad de superficie reflejada por la misma superficie en la dirección del ojo del observador. Su símbolo es L y su unidad la candela entre metro cuadrado $\frac{cd}{m^2}$.”

“La luminancia media de una superficie es el valor medio de la luminancia de la superficie considerada. Su símbolo es L_m y se expresa en $\frac{cd}{m^2}$.”

“La uniformidad global de luminancias es la relación entre la luminancia mínima y la media de la superficie de la calzada. Su símbolo es U_o y carece de unidades.”

2.2.2. Luminarias

La norma UNE-EN 60598 define la luminaria como: *aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y la protección de lámparas, (excluyendo las propias lámparas) y, en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación.*

Su principal cometido es proteger la lámpara y los elementos auxiliares para su correcto funcionamiento además de dirigir el flujo de luz a la zona que se pretende iluminar. La luminaria dispone de unos elementos característicos representados en la ilustración 3:

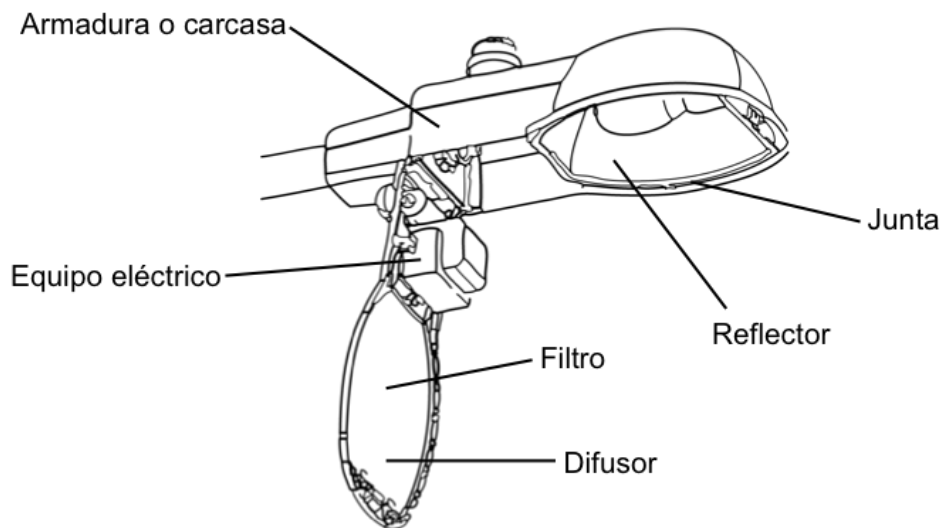


Ilustración 3. Elementos de la luminaria. (Montserrat, 2012)

El comportamiento de una luminaria se mide con parámetros como el rendimiento, la distribución de la iluminación, el nivel de estanqueidad², el FHS o el nivel de deslumbramiento que puede causar en los usuarios. Además de cumplir requisitos que se impongan para estos parámetros, resulta indispensable que sea una luminaria que resulte fácil de ser instalada y mantenida durante su vida útil. Por último, también se valoran los aspectos económicos, estéticos y ambientales (García i Boix, 1999).

“El rendimiento de una luminaria es la relación entre el flujo luminoso total procedente de la luminaria y el flujo luminoso emitido por la lámpara o lámparas instaladas en la luminaria.”

Fuente: R.D. 1890/2008. Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior. (MINISTERIO DE INDUSTRIA 2013 REVISIÓN)

² Estanqueidad: capacidad de evitar que penetren elementos externos al interior de una pieza.

$$\eta_A = \frac{\Phi_A}{\Phi_B}$$

Donde cada uno de los símbolos significan:

Φ_A : es el flujo emitido por la luminaria en lúmenes [lm].

Φ_B : es el flujo emitido por la lámpara en lúmenes [lm].

η_A es el rendimiento de la luminaria. Es un factor adimensional

“El factor de mantenimiento f_m es la relación entre la iluminancia media en la zona iluminada después de un determinado período de funcionamiento de la instalación de alumbrado exterior y la iluminancia media obtenida al inicio de su funcionamiento como instalación nueva.”

El factor de mantenimiento siempre será menor que la unidad y, de acuerdo con la revisión, efectuada en el año 2013, en las instalaciones equipadas con luminarias LED raramente se superará el valor 0,85.

Fuente: R.D. 1890/2008. Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior. (MINISTERIO DE INDUSTRIA 2013 REVISIÓN)

“El factor de utilización f_u es la relación entre el flujo útil procedente de las luminarias que llega a la calzada o superficie a iluminar y el flujo emitido por las lámparas instaladas en las luminarias.”

Fuente: R.D. 1890/2008. Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior. (MINISTERIO DE INDUSTRIA 2013 REVISIÓN)

$$f_u = \frac{\Phi_n}{\Phi_o}$$

Donde:

f_u es el factor de utilización.

Φ_n : flujo luminoso sobre la superficie en lúmenes [lm].

Φ_o : flujo luminoso de la lámpara en lúmenes [lm].

“El flujo hemisférico superior instalado FHS_{inst} la proporción en % del flujo de una luminaria que se emite sobre el plano horizontal que pasa por el centro óptico de la luminaria respecto al flujo total saliente de la luminaria, cuando la misma está montada en su posición de instalación”

Fuente: R.D. 1890/2008. Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior. (MINISTERIO DE INDUSTRIA 2008)

El flujo hemisférico inferior *FHI* es la diferencia en % del flujo total de la lámpara de una luminaria y el flujo hemisférico superior de la luminaria.

Las curvas fotométricas son la representación gráfica del comportamiento de la luz. Muestran las características relacionadas con la naturaleza de la fuente, el tipo de reflector, la óptica o el diseño de las luminarias. Se representan mediante curvas polares obtenidas en laboratorios. En una curva polar de distribución luminosa, la distancia de cualquier punto representa la intensidad luminosa de la fuente en esa dirección (Deco, 2017).

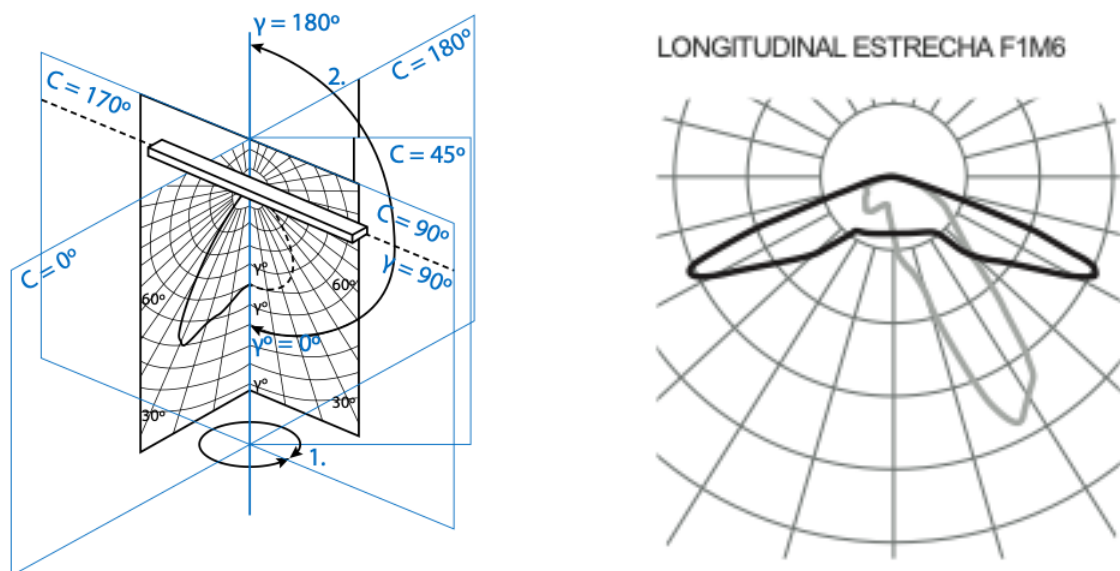


Ilustración 4. Derecha: Obtención de curvas polares (Deco, 2017). Izquierda: Distribución lumínica de luminaria OCHOCENTISTA. Fuente: Salvi Lighting Barcelona

Como se puede observar a la derecha de la ilustración 4, aparecen 2 curvas. Por un lado, la curva de color negro representa la distribución luminosa en la dirección longitudinal de la vía, mientras que la curva de color gris muestra la distribución luminosa en la dirección transversal de vía.

La sección 9 de la norma UNE-EN 60598:2009 especifica los requisitos y ensayos aplicables a las luminarias para su clasificación. La nomenclatura del grado de protección es del tipo *IPXX* donde la primera cifra indica el grado de protección contra la penetración de polvo u objetos extraños y, la segunda cifra indica el grado de protección frente a la penetración de agua en la luminaria. Por ejemplo:

Una luminaria con un grado de protección *IP33* significa:

- Primera cifra 3: Protegido contra contacto con piezas bajo tensión a través de herramientas, cables u objetos similares de grosor superior a 2,5 [mm], y contra penetración de objetos sólidos de diámetro superior a 2,5 [mm].
- Segunda cifra 3: Protegido contra lluvia o agua pulverizada. El agua que cae con un ángulo de hasta 60° no debe tener efectos perjudiciales.

La norma UNE-EN 50102:19969 indica el grado de protección proporcionado por los envolventes de materiales eléctricos contra los impactos mecánicos externos. Es del tipo *IKX* donde la cifra es un número comprendido entre el 0 y el 10; a medida que el número aumenta indica que la energía del impacto mecánico. Por ejemplo:

Una luminaria con grado de protección *IK08*:

Soporta una energía de choque de 5 [J] descrita como protegida contra el vandalismo.

La sección 5 de la norma UNE-EN clasifica las luminarias en función de la protección eléctrica de la siguiente manera:

- Clase 0: aislamiento principal sin conexión a tierra
- Clase I: aislamiento principal con conexión a tierra
- Clase II: aislamiento doble o reforzado sin conexión a tierra
- Clase III: luminarias creadas para conectar a circuitos de baja tensión, sin otros circuitos internos o externos que superen el voltaje de baja tensión.

2.2.3. Instalaciones de alumbrado exterior

Acorde con la ITC-EA 01 sobre la eficiencia energética de una instalación de alumbrado exterior se mencionan los parámetros asociados que determinaran la clasificación energética de la instalación

“La eficiencia energética de una instalación de alumbrado exterior se define como la relación entre el producto de la superficie iluminada por la iluminancia media en servicio de la instalación entre la potencia activa total instalada.”

$$\varepsilon = \frac{S \cdot E_m}{P} \left[\frac{m^2 \cdot lx}{W} \right]$$

Donde:

ε : eficiencia energética de la instalación de alumbrado exterior.

S : superficie iluminada.

E_m : iluminancia media en servicio de la instalación.

P : potencia activa total instalada (lámpara y equipos auxiliares).

Iluminancia media en servicio E_m [lx]	Eficiencia energética mínima ε
≥ 30	22
25	20
20	17,5
15	15
10	12
$\leq 7,5$	9,5

Tabla 4. Requisitos mínimos de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado vial funcional. Fuente: ITC EA 01

Las instalaciones de alumbrado exterior se calificarán en función de su índice de referencia energética

$$I_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R}$$

Iluminancia media en servicio E_m [lx]	Eficiencia energética mínima ε
≥ 30	32
25	29
20	26
15	23
10	18
$\leq 7,5$	14

Tabla 5. Valores de eficiencia energética de referencia. Fuente: ITC EA 01

Con el fin de facilitar la interpretación de la calificación energética de la instalación de alumbrado, se define una etiqueta que caracteriza el consumo de energía de la instalación mediante una escala de siete letras que parte de la letra A, instalación más eficiente y con menos consumo de energía, y llega hasta la letra G, instalación menos eficiente y con más consumo de energía. El índice utilizado será el índice de consumo energético ICE .

$$ICE = \frac{1}{I_e}$$

Calificación energética	Índice de consumo energético	Índice de eficiencia energética
A	$ICE < 0,91$	$I_e > 1,1$
B	$0,91 \leq ICE < 1,09$	$1,1 \geq I_e > 0,92$
C	$1,09 \leq ICE < 1,35$	$0,92 \geq I_e > 0,74$
D	$1,35 \leq ICE < 1,79$	$0,74 \geq I_e > 0,56$
E	$1,79 \leq ICE < 2,63$	$0,56 \geq I_e > 0,38$
F	$2,63 \leq ICE < 5$	$0,38 \geq I_e > 0,20$
G	$ICE \geq 5$	$I_e \leq 0,20$

Tabla 6. Calificación energética de una instalación de alumbrado. Fuente: ITC EA 01

2.3. Situación actual del alumbrado

En el año 2012, la empresa Consultoría Lumínica, realizó una auditoría energética del alumbrado público del municipio de Graus. La auditoría llevó a cabo el análisis de 169 áreas, distribuido en 21 cuadros de mando con 1159 puntos de luz en el núcleo principal del municipio. El proyecto contiene un análisis de los tipos de luminarias, la clasificación de las vías de las 169 áreas analizadas y una comparación de los niveles de iluminación obtenidos en trabajos de campo respecto a la legislación de la ITC EA-02.

Los resultados del análisis no fueron sorprendentes, los puntos clave fueron los siguientes: en primer lugar, se reflejó que el 47% de las áreas analizadas tenían un nivel deficiente de iluminación, el 37% un nivel excesivo, tan solo el 9% un nivel correcto y el 7% restante, no tenía iluminación. En segundo lugar, las lámparas de VM junto con la de VSAP representaban el 63% del total complementándolo con las de HM que representa el 24% del total y, el restante se componía de lámparas de bajo consumo, fluorescente y LED. En tercer lugar, el análisis del balance energético del municipio mostró que las instalaciones del alumbrado público tenían un potencial ahorro, tanto energético como económico, de alrededor del 50% siempre y cuando se siguiera el plan de acción propuesto por la consultora.

Este plan de acción proponía para la mayoría de los puntos de luz, la sustitución de las lámparas de VM y algunas de VSAP por lámparas de HM de menor potencia. En algunos casos, donde la instalación presentaba un alto nivel de ineficiencia, se propuso la sustitución tanto de la lámpara como la del equipo auxiliar existente. Finalmente, también se recomendaba un re-estudio de la disposición de conjuntos lumínicos y una puesta a punto generalizada de los distintos de puntos de luz.

A partir de los resultados de esta auditoría, se planteó comparar los resultados obtenidos con la situación actual para tratar de comprender los cambios aplicados al sistema de alumbrado. Para llevar a cabo el cotejo, se contactó con el técnico especializado encargado del mantenimiento del alumbrado. El técnico proporcionó los documentos relacionados con el inventario del alumbrado público del municipio y mapas de la distribución de las lámparas y los centros de mando. En esta base de datos se puede encontrar información de cantidad de luminarias, potencias, tecnología empleada y agrupación por centros de mando. Con los dos documentos mencionados, se procede al estudio de la situación actual del alumbrado del municipio.

Para ver el inventario del municipio véase el Anexo 1.

- Estudio de la tipología de luminarias

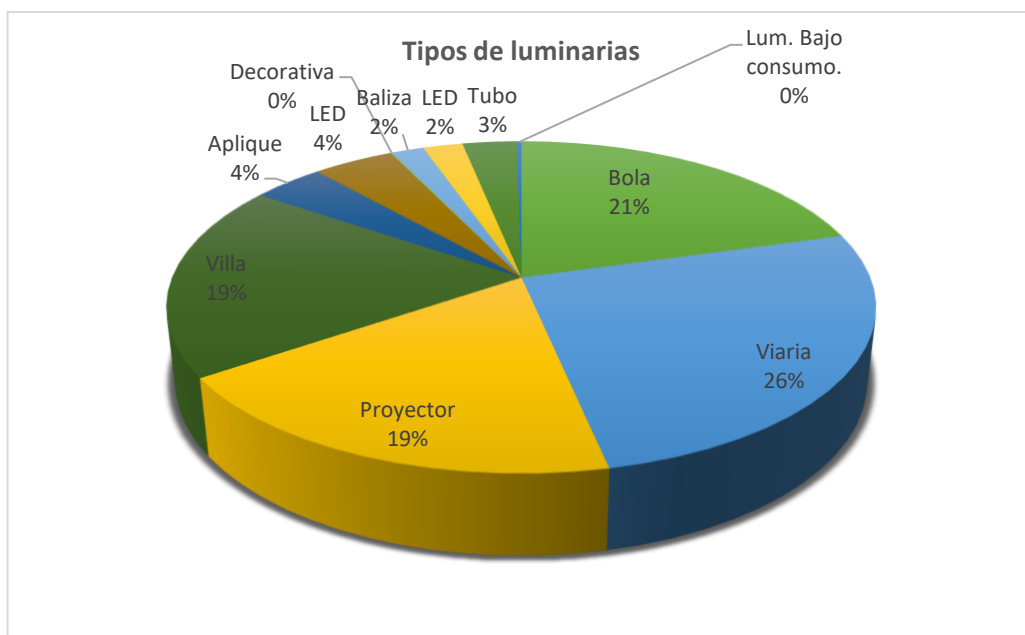


Ilustración 5. Tipología de luminarias en Graus. Elaboración propia

La ilustración 5 describe la distribución de la tipología de luminarias en el municipio. Resulta importante este análisis para saber qué porcentaje de tipos de luminarias hay actualmente instaladas en el municipio y actuar en consecuencia, es decir, modificar la estética de este lo más mínimamente posible y sacar el máximo partido a la instalación existente. En el caso de encontrar las fichas técnicas de las luminarias se podrían conocer los parámetros comentados previamente tales como: FHS_{inst} , grado de protección contra elementos externo o grado de protección contra impactos mecánicos, los cuales permitirían establecer una comparación más exacta entre la instalación actual y la instalación propuesta.



Ilustración 6. Luminaria vial a la izquierda y luminaria villa o clásica a la derecha. Fuente: Salvi Lighting Barcelona



Ilustración 7. Luminarias tipo bola y proyector. Fuente: Mayja y Salvi Lighting Barcelona

- Estudio de la tipología de lámparas.

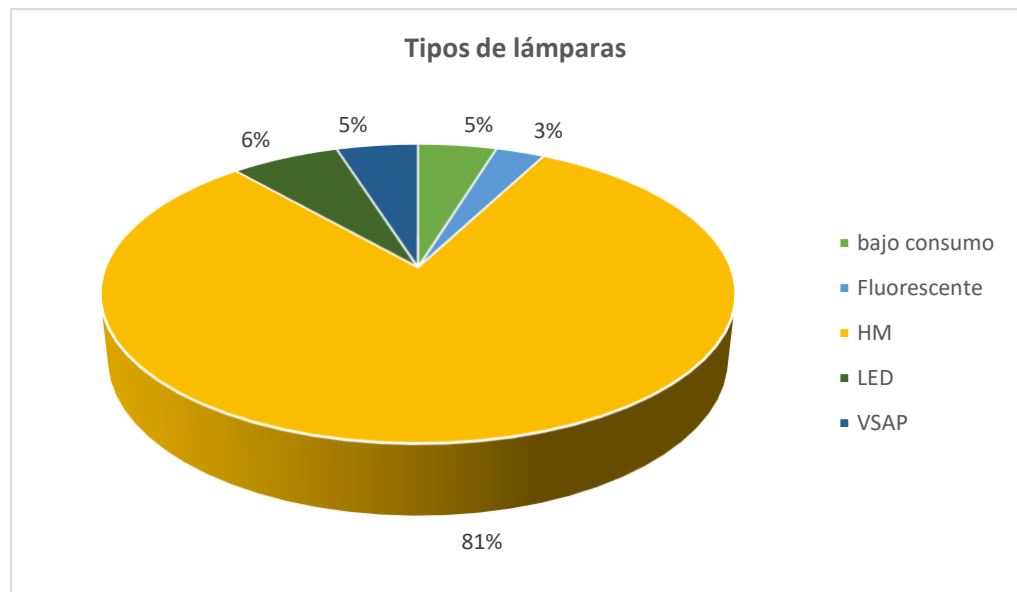


Ilustración 8. Tipología de lámparas en Graus. Elaboración propia

A partir de la ilustración 8 se puede deducir que ciertas propuestas de sustitución de luminarias fueron ejecutadas. Se entiende lo propio porque en el alumbrado actual no se encuentra ninguna lámpara de VM y muy pocas de VSAP. Cabe recordar que previamente a la reforma estas dos tecnologías predominaban en el sistema. Ahora la mayoría de las lámparas son de HM (81%); que fue la tecnología base de las propuestas de mejora de alumbrado que diseñó Consultoría Lumínica tras la auditoría del año 2012. De acuerdo con la Tabla 2 se puede estimar que las emisiones de radiancia por debajo de 500 [nm] será elevada al considerar el

porcentaje tan elevado de HM que hay instalado actualmente. Por ende, las actuaciones pretenderán reducir el valor actual lo máximo posible con el objetivo de contribuir a la máxima disminución posible de la CL para generar un impacto positivo en el medioambiente y, al mismo tiempo, un bienestar en los habitantes del municipio.

3. INVENTARIO Y DIAGNÓSTICO DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO

3.1. Metodología de trabajo de campo

A continuación, se expondrá la metodología empleada en el diagnóstico del alumbrado público y, a su vez, se sentarán las bases de determinación de la metodología del Plan de Acción. Obtener el diagnóstico del alumbrado público existente resulta necesario para identificar, controlar y planificar la renovación del alumbrado público del municipio

El desarrollo del trabajo de campo consta de 3 fases:

- **1ª FASE. Obtención de datos técnicos.** En primer lugar, resulta imprescindible identificar los diferentes focos de consumo energético y los datos técnicos de cada uno. Para esta fase, ha sido de gran ayuda el responsable del alumbrado público del municipio que nos ha proporcionado el inventario de este.
- **2ª FASE. Trabajo de campo.** El objetivo es verificar y complementar los datos obtenidos en la 1ª fase. Los objetivos de esta fase son: determinar si el alumbrado funciona de manera correcta, comprobar los sistemas de regulación (si existen) y determinar su eficiencia, comprobar la clasificación de las vías y determinar los niveles lumínicos de los que dispone cada zona actualmente.
- **3ª FASE. Análisis de resultados.** En esta fase se trabajará con todos los resultados obtenidos en el trabajo de campo y se ejecutará un análisis para determinar el estado y la eficiencia de las instalaciones de alumbrado público actual, a partir de la cual comenzar a analizar alternativas de mejora.

3.1.1. 1ª FASE

La información aportada por el responsable del alumbrado público del municipio está formada por los centros de mando y sus áreas correspondientes, los tipos de luminarias y sus unidades, la lámpara y su potencia juntamente con el modelo.

En primer lugar, se pretende calcular la potencia total instalada, sin embargo, las potencias observadas de las lámparas únicamente hacen referencia a estas, por tanto, el inventario no informa respecto al consumo de los equipos auxiliares. Por ende, para encontrar el valor se multiplicará por 1,15 la potencia de la lámpara (Diputacio de Barcelona, 2020) y obtendremos

la potencia instalada de la lámpara y el equipo auxiliar.

POTENCIA TOTAL INSTALADA ACTUALMENTE [kW]
102,53

Tabla 7. Potencia total instalada actualmente. Elaboración propia

En consecuencia, se calculó la potencia instalada actualmente y corresponde a un valor de 102,53 [kW]. Este valor se puede contrastar con la información de la Tabla 1 en la cual se observa que, para municipios de menos de 5000 habitantes, la media de vatios/punto de luz es de 131 y, en este caso, resulta estar sustancialmente por debajo situándose en $88 \left[\frac{W}{PL} \right]$.

ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA ACTUALMENTE [kWh]
442.531,78

Tabla 8. Energía total consumida actualmente. Elaboración propia

Por otro lado, se calculó la energía consumida anual considerando un funcionamiento anual de 4316 horas y, equivale a un valor de 442.531,78 [kWh]. De modo similar contrastamos el valor obtenido con los datos de la Tabla 1 que sitúa el consumo energético/habitante y por año alrededor de $187 \left[\frac{kWh}{hab \cdot a} \right]$ e idénticamente el valor se sitúa por debajo, sobre $128,87 \left[\frac{kWh}{hab \cdot a} \right]$ que va en concordancia con el parámetro previamente estudiado.

COSTE ENERGÍA ANUAL ACTUAL [€]
92.931,67 €

Tabla 9. Coste de la energía anual actual. Elaboración propia

En último lugar, pero no más importante, se calculó el coste energético anual de municipio, contemplando como valor aproximado del coste de la energía $0,21^3 \left[\frac{€}{kWh} \right]$ y, se obtuvo un coste de 92.931,67 €.

En segundo lugar, la clasificación del alumbrado actual divide el pueblo en 169 áreas de estudio que habrá que categorizar siguiendo los criterios establecidos en la ITC EA-02. Según esta norma, las calles se agrupan en función de la velocidad de circulación de viandantes, vehículos sin motor y vehículos autopropulsados que las transiten. Los grupos de clasificación están tipificados en la tabla siguiente:

³ El valor del coste de la energía es un valor variable y que depende de la situación actual en la que se encuentre el mundo, por tanto, es un valor aproximado.

Clasificación	Tipo de vía	Velocidad del tráfico rodado [km/h]
A	Velocidad alta	$v > 60$
B	Velocidad moderada	$30 < v < 60$
C	Carriles bici	--
D	Velocidad baja	$5 < v < 30$
E	Vías peatonales	$v \leq 5$

Tabla 10. Criterio de clasificación de las vías. Fuente: ITC EA 02

A partir de distintos criterios como el tipo de vía y la intensidad media de tráfico (IMD) se generan subgrupos dentro de la clasificación anterior, los cuales únicamente reflejaremos los que atañen a este estudio y se exponen a continuación.

- Situaciones de proyecto para vías tipo B

Situaciones de proyecto	Tipos de vías	Clase de alumbrado
B1	- Vías urbanas secundarias de conexión a urbanas de tráfico importante	
	- Vías distribuidoras locales y accesos a zonas residenciales y fincas.	
	Intensidad de tráfico	
	IMD ≥ 7000	ME2 / ME3C
	IMD < 7000	ME4b / ME5 / ME6
B2	- Carreteras locales en áreas rurales	
	Intensidad de tráfico y complejidad del trazado de la carretera	
	IMD ≥ 7000	ME2 / ME3b
	IMD < 7000	ME4b / ME5

Tabla 11. Clases de alumbrado vías tipo B. Fuente ITC EA 02

En el municipio de Graus se clasificaron 14 áreas diferentes con clase de alumbrado ME4b.

CM Y CALLES	CLASE DE ALUMBRADO
Avenida Pirineos	ME4B
General Miguel Cuervo	ME4B
BALBASTRO 3536, CTRA.	ME4B
BALBASTRO 3536, CTRA.	ME4B
BALTASAR GRACIÁN	ME4B
BALTASAR GRACIÁN	ME4B
DON CARLOS	ME4B
DON CARLOS	ME4B
MURALLA	ME4B
VALLE DE ARÁN	ME4B
VALLE DE ARÁN	ME4B
VALLE DE ARÁN (CALLEJÓN)	ME4B
ANGEL SAMBLANCAT	ME4B
JOAQUIN COSTA, GLORIETA	ME4B

Tabla 12. 14 áreas con clase de alumbrado ME4B. Elaboración propia

- Clases de alumbrado para vías tipo C

Situaciones de proyecto	Tipos de vías	Clase de alumbrado
C1	– Carriles bici independientes a lo largo de la calzada, entre ciudades en área abierta y de unión en zonas urbanas.	
	Flujo de tráfico de ciclistas	
	Alto	S1 / S2
D1-D2	Normal	S3 / S4
	– Áreas de aparcamiento	ME4b / ME5 / ME6
	– Aparcamientos en general	
	– Estaciones de autobuses	
	Flujo de tráfico de peatones	
D3-D4	Alto	CE1A / CE2
	Normal	CE3 / CE4
	– Calles residenciales suburbanas con aceras para peatones a lo largo de la calzada	
	– Zonas de velocidad muy limitada	
	Flujo de tráfico de peatones y ciclistas	
	Alto	CE2 / S1 / S2
	Normal	S3 / S4

Tabla 13. Clases de alumbrado vías tipo C y D. Fuente ITC EA 02

En el municipio se clasifica un área con situación de proyecto C1 y tipo de alumbrado S3; se clasifican con el mismo tipo de alumbrado S3 95 áreas diferentes, pero con una situación de proyecto D3 - D4.

CM Y CALLES	CLASE DE ALUMBRADO
RIO ÉSERA, PASEO DEL	S3

Tabla 14. 1 área con clase de alumbrado S3 y situación de proyecto C1. Elaboración propia

- Clases de alumbrado para vías tipo E

Situaciones de proyecto	Tipos de vías	Clase de alumbrado
E1	– Espacios peatonales de conexión, calles peatonales, y aceras a lo largo de la calzada.	
	– Paradas de autobús con zonas de espera.	
	– Áreas comerciales peatonales.	
	Flujo de tráfico de peatones	
	Alto	CE1A / CE2 / S1
E2	Normal	S2 / S3 / S4
	– Zonas comerciales con acceso restringido y uso prioritario de peatones.	
	Flujo de tráfico de peatones	
	Alto	CE1A / CE2 / S1
	Normal	S2 / S3 / S4

Tabla 15. Clases de alumbrado vías tipo E1. Fuente ITC EA 02

En el municipio se clasifican 59 áreas con tipo de alumbrado S2. Para comprobar la distribución véase Anexo 1.

Aunado a esta clasificación, se desprenden los siguientes niveles de iluminación estipulados por ley, según las clases de alumbrado mencionadas previamente. Cabe recalcar que los niveles que se verán a continuación son los valores mínimos en servicio con mantenimiento de la instalación del alumbrado.

	Luminancia media L_m (cd/m^2)	Iluminancia media E_m (lx)	Iluminancia mínima E_{min} (lx)
ME4b	0,75 (11,25 lx)		
S2		10	3
S3		7,5	1,5

Tabla 16. Niveles de iluminación para las vías. Fuente ITC EA 02

Es necesario matizar que las áreas que pertenecen al vigesimoprimer centro de mando no serán objeto de estudio ya que se comprobó que su funcionamiento, a partir de las 24h, es nulo.

A continuación, se describen dos planteamientos distintos para obtener casos tipo de las distintas áreas de estudios y se informa sobre el criterio que permite descartar una y seleccionar la otra que servirá como base de la fase 2.

La primera clasificación de áreas de medición se basó sobre los parámetros potencia de la lámpara en vatios [W], distancia entre luminarias o interdistancia en metros [m] y altura de la luminaria en metros [m]. Para la clasificación de las calles por interdistancia, se fijaron los siguientes intervalos:

→ [0,10), [10,20), [20,30), [30,40) [m]

Para la clasificación de las calles según su altura se fijaron los siguientes intervalos:

→ [0,5), [5,10), [10,15), [15,20) [m]

El criterio para confeccionar los rangos de los intervalos definidos nace a partir del estudio de gráficos de dispersión de los parámetros. Tanto la ilustración 9, como la 10, permiten observar que la mayoría de los datos en referencia a la altura de las luminarias se sitúa entre 4 y 11 metros. La luminaria con mayor altura del municipio es de 16 metros, por lo que la dispersión de valores no es muy significativa. En cambio, en cuanto al analizar la interdistancia se observa una mayor dispersión de todos los valores y un valor máximo de interdistancia es el de 40 metros. Con una diferencia de valores tan grande, resulta imposible clasificar los dos parámetros utilizando una única escala de gravámenes, por lo que se han definido los intervalos presentados anteriormente de manera independiente.

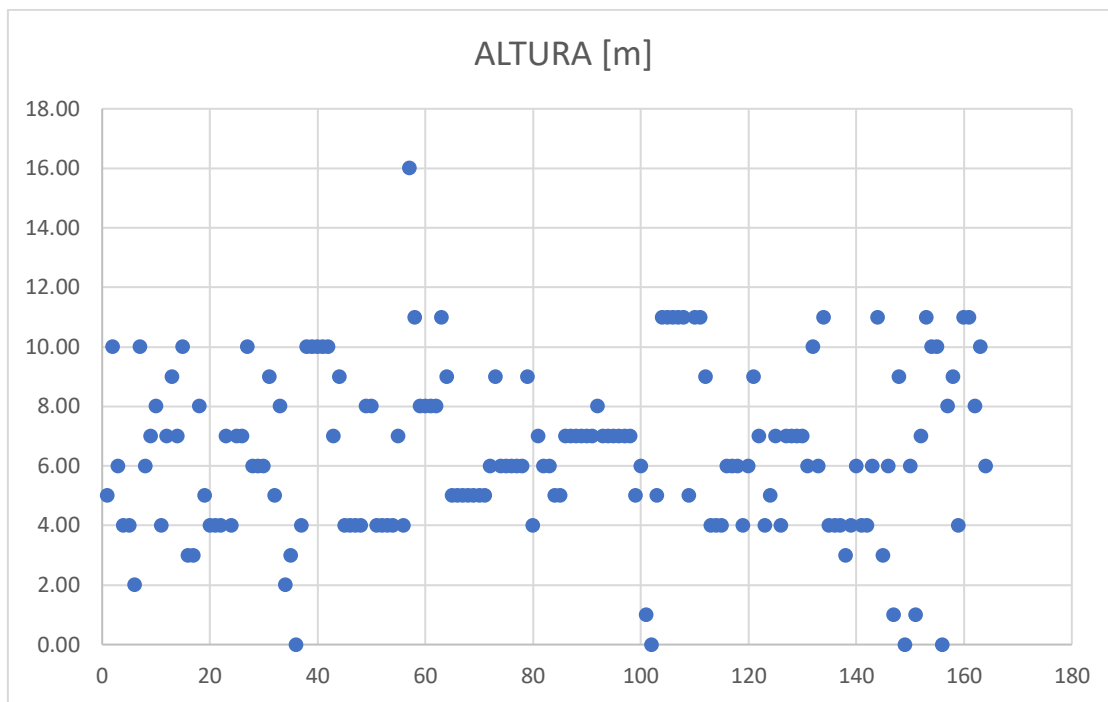


Ilustración 9. Gráfico de dispersión del parámetro Altura. Elaboración propia

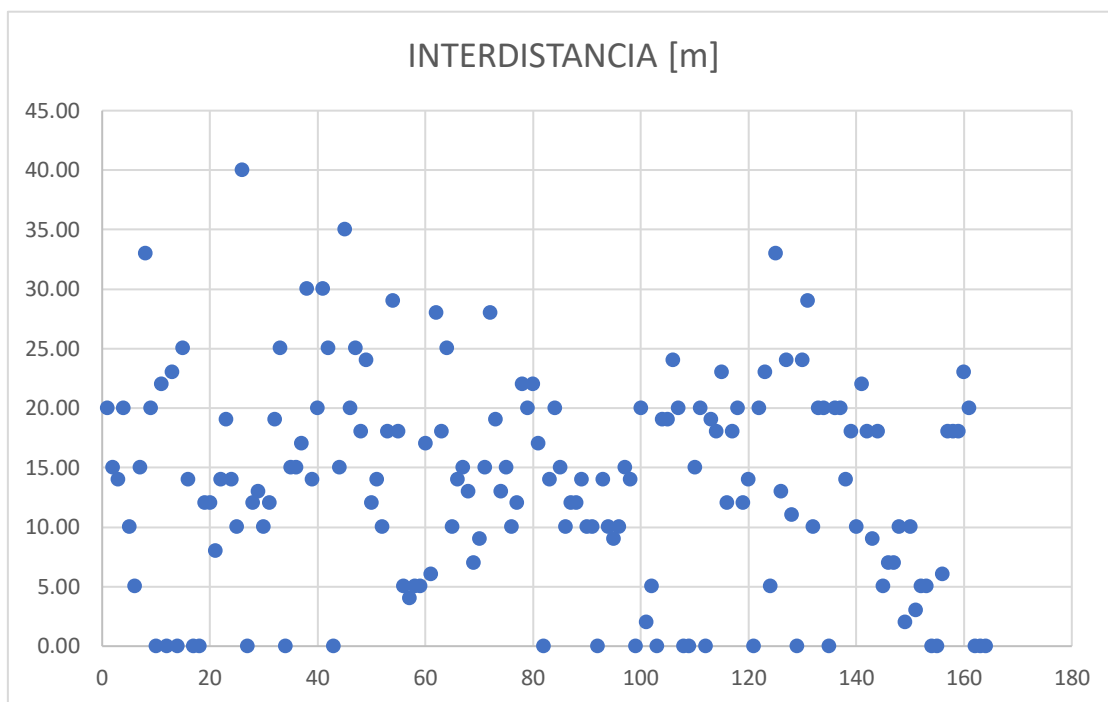


Ilustración 10. Gráfico de dispersión del parámetro Interdistancia. Elaboración propia

A diferencia de los parámetros anteriores, la potencia en diversas áreas presentaba valores puntuales tales como: 5 [W], 11 [W], 14[W], 20 [W], 50 [W] entre otros. Por tanto, la

agrupación de las áreas en función de la potencia era complicada ya que cada una de ellas podía definirse como un tipo diferente.

Como resultado de este primer estudio de clasificación de las áreas de medición se obtuvo la siguiente tabla:

	POTENCIA [W]	INTERDISTANCIA [m]	ALTURA [m]	PUNTO DE MEDICIÓN	CM
TIPO 1	70	[20,30)	[5,10)	Avenida Pirineos (via de servicio)	1
TIPO 2	100	[10,20)	[10,15)	Avenida Pirineos	1
TIPO 3	70	[10,20)	[5,10)	Avenida Pirineos	1
TIPO 4	70	[20,30)	[0,5)	Avenida Pirineos (camino camping)	1
TIPO 5	70	[10,20)	[0,5)	Avenida Pirineos Camping	1
TIPO 6	70	[0,10)	[0,5)	Avenida Pirineos (camino camping)	1
TIPO 7	70	[10,20)	[10,15)	General Miguel Cuervo	1
TIPO 8	70	[30,40)	[5,10)	General Miguel Cuervo	1
TIPO 9	70	[0,10)	[5,10)	Zaragoza	1
TIPO 10	150	[0,10)	[5,10)	BALBASTRO 3536, CTRA.	2
TIPO 11	100	[20,30)	[10,15)	BALBASTRO 3536, CTRA.	2
TIPO 12	100	[0,10)	[0,5)	DE LOS AFILADOS, CAMINO	2
TIPO 13	100	[10,20)	[5,10)	BALTASAR GRACIÁN	3
TIPO 14	100	[0,10)	[10,15)	DE LA COMPAÑIA, PLAZA	3
TIPO 15	100	[30,40)	[10,15)	FABARDO, POLIGONO INDUSTRIAL	4
TIPO 16	70	[30,40)	[0,5)	FRAY DIEGO CERA	6
TIPO 17	100	[20,30)	[5,10)	PARTIDA COSCOLLA, CAMINO	6
TIPO 18	150	[0,10)	[10,15)	JOAQUIN COSTA	9
TIPO 19	100	[0,10)	[5,10)	JOAQUIN COSTA	9
TIPO 20	150	[10,20)	[10,15)	ANGEL SAMBLANCAT	9
TIPO 21	400	[10,20)	[10,15)	BARRANCO	11
TIPO 22	150	[20,30)	[10,15)	SANTA BARBARA	11
TIPO 23	400	[0,10)	[5,10)	SAN MIGUEL, PLAZA	11
TIPO 24	100	[10,20)	[0,5)	VALLE DE ARÁN	12
TIPO 25	150	[10,20)	[5,10)	VALLE DE ARÁN	12
TIPO 26	100	[30,40)	[5,10)	RIO ISABENA	13
TIPO 27	59	[10,20)	[5,10)	SERRETA	12
TIPO 28	59	[20,30)	[10,15)	PICO COTIELLA	15
TIPO 29	39	[0,10)	[0,5)	RIBAGORZA, PASEO	15
TIPO 30	39	[10,20)	[0,5)	RIO ÉSERA, PASEO DEL	20

Tabla 17. Tipología de áreas. Elaboración propia

En la tabla 17 se pueden observar 30 tipos de zona de medición diferentes, que según nuestro análisis permitirían extrapolar sus mediciones a las 139 áreas restantes en base a los parámetros expuestos anteriormente. Sin embargo, los valores de potencia puntuales asociados a algunas zonas resultaban en el aumento de 30 a 42 tipos de zonas de medición. En un cómputo global, se podría considerar una optimización más que aceptable ya que se

reducen en un factor de cuatro el total de áreas a analizar. Por otro lado, los 12 tipos nacidos de los valores puntuales de potencia únicamente engloban un área y se consideran ineficientes, ya que el tiempo invertido no sería para trabajo útil y se estima que no serán de gran relevancia para el resultado final del estudio. Debido a esta ineficiencia, se baraja una segunda estrategia para poder establecer la tipología de las zonas de medición.

Para la segunda clasificación, se analizó el estudio de las áreas realizado por Consultoría Lumínica en el año 2012, donde se clasificaban las áreas de estudio por la clase de alumbrado para las diversas características de las zonas, la cual se especifica en la ITC EA 02, por ende, se sustituyó el parámetro potencia por la clase de alumbrado. El cambio de parámetro implica que los 42 tipos de potencias diferentes de áreas del municipio se sustituyen por únicamente 4 clases de alumbrado distintas. Esta segunda y definitiva clasificación de las diferentes áreas permitirá diagnosticar y extrapolar de manera eficiente los niveles de iluminación del municipio. Con esta nueva técnica de clasificación, se reducen las áreas de estudio de las 164 definidas inicialmente a 28, a partir de las cuales se pueden extrapolar datos para todo el pueblo.

TIPO	CLASE DE ALUMBRADO	INTERDISTANCIA [m]	ALTURA [m]	PUNTO DE MEDICIÓN	CM
TIPO 1	S3	[20,30)	[5,10)	Avenida Pirineos (via de servicio)	1
TIPO 2	ME4B	[10,20)	[10,15)	Avenida Pirineos	1
TIPO 3	S3	[10,20)	[5,10)	Avenida Pirineos	1
TIPO 4	S3	[20,30)	[0,5)	TURBÓN	1
TIPO 5	S2	[10,20)	[0,5)	DE LOS AFILADOS, CAMINO	2
TIPO 6	S3	[0,10)	[0,5)	Avenida Pirineos (camino camping)	1
TIPO 7	S2	[30,40)	[5,10)	General Miguel Cuervo	1
TIPO 8	S2	[0,10)	[5,10)	JOAQUIN COSTA	9
TIPO 9	S2	[0,10)	[5,10)	PUEBLAS ALTAS	9
TIPO 10	ME4B	[20,30)	[5,10)	BALBASTRO 3536, CTRA.	2
TIPO 11	ME4B	[20,30)	[10,15)	BALBASTRO 3536, CTRA.	2
TIPO 12	S2	[0,10)	[0,5)	DE LA ROSA	2
TIPO 13	S2	[10,20)	[5,10)	BARASONA	2
TIPO 14	S3	[10,20)	[0,5)	PARTIDA COSCOLLA	6
TIPO 15	ME4B	[10,20)	[5,10)	BALTASAR GRACIÁN	3
TIPO 16	ME4B	[10,20)	[0,5)	BALTASAR GRACIÁN	3
TIPO 17	S3	[30,40)	[5,10)	RIO ISABENA	13
TIPO 18	S3	[0,10)	[10,15)	JOAQUIN COSTA	9
TIPO 19	S2	[20,30)	[5,10)	GAITEROS DE CASERRAS	3
TIPO 20	S3	[30,40)	[10,15)	FABARDO, POLIGONO INDUSTRIAL	4
TIPO 21	S3	[10,20)	[10,15)	FABARDO, POLIGONO INDUSTRIAL	4
TIPO 22	S3	[20,30)	[10,15)	PICO COTIELLA	15
TIPO 23	S3	[30,40)	[0,5)	FRAY DIEGO CERA	6
TIPO 24	S2	[0,10)	[15,20)	Plaza españa	8
TIPO 25	S2	[0,10)	[10,15)	BARCELONA, PLAZA	11
TIPO 26	ME4B	[0,10)	[5,10)	ANGEL SAMBLANCAT	19
TIPO 27	ME4B	[0,10)	[10,15)	JOAQUIN COSTA, GLORIETA	19
TIPO 28	S2	[20,30)	[0,5)	TOURNEFEUILLE, PLAZA	15

Tabla 18. Tipología definitiva de áreas. Elaboración propia

Durante la noche del 26/5/2022, se llevó a cabo la campaña de medición de cada una de las zonas descritas en la clasificación, ejecutada acorde con el método de los 9 puntos para obtener la iluminancia media E_m y clasificar así, en función de este parámetro las 28 zonas para extrapolar a 164. Se entrará más en detalle en el trabajo realizado esa noche en la Fase 2.

Para observar el proceso de clasificación de las tipologías véase Anexo 1.

3.1.2. 2ª FASE

La segunda fase engloba el trabajo de campo para comprobar el estado del alumbrado público, los sistemas de regulación, la validación in situ de la clasificación teórica de las vías y la determinación los niveles de iluminación reales.

El primer paso es la cuantificación de la iluminación en las distintas zonas tipificadas. El procedimiento consiste en la aplicación del método de los 9 puntos en cada zona. Este método consiste en realizar mediciones con luxómetro en los 9 puntos representados en la ilustración 11, encontrándose los 9 puntos como la intersección de los ejes B, C y D con los ejes 1,2,3,4 y 5.

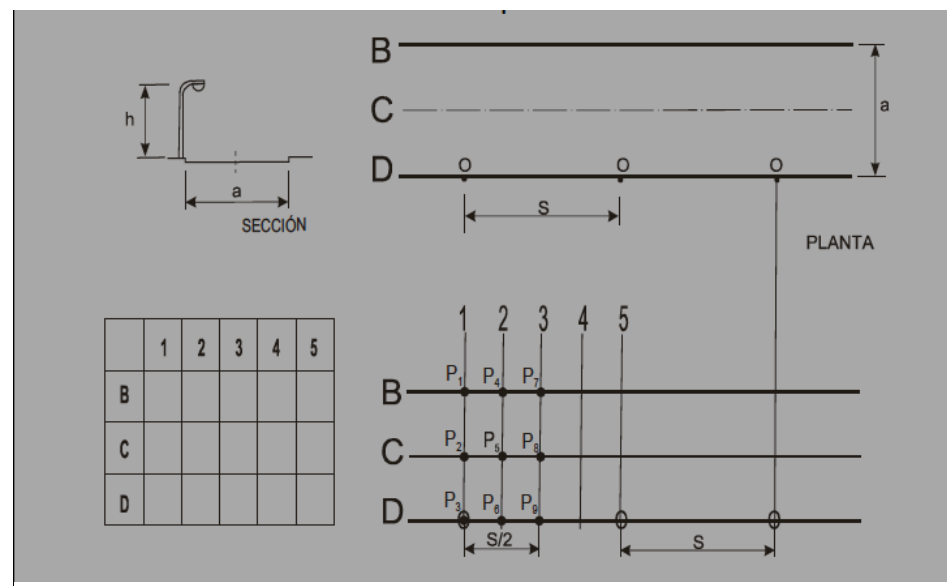


Ilustración 11. Esquema del método de los 9 puntos. Fuente ITC EA 07

Con las 9 mediciones realizadas, se ponderan los valores de iluminación para obtener la media, que será el valor asignado a cada zona.

$$E_m = \frac{E_1 + 2E_2 + E_3 + 2E_4 + 4E_5 + 2E_6 + E_7 + 2E_8 + E_9}{16}$$

donde:

$$E_1 = B_1 \quad E_2 = C_1 \quad E_3 = D_1 \quad E_4 = B_2 \quad E_5 = C_2 \quad E_6 = D_2 \quad E_7 = B_3 \quad E_8 = C_3 \quad E_9 = D_3$$



Ilustración 12. Campaña de medición con el método de los 9 puntos en el área Polígono Industrial. Elaboración propia



Ilustración 13. Aplicación Fotómetro al lado de uno de los puntos en la campaña de medición. Elaboración propia

Debido a la falta de material adecuado, las mediciones se llevaron a cabo con la aplicación Fotómetro disponible en App Store y en Google Play Store. Para evitar posibles errores de medición, posteriormente se llevará a cabo una calibración de la iluminación medida por la aplicación con un luxómetro reglamentario MAVOLUX 5032C USB.



Ilustración 14. Iluminación funcional del área General Miguel Cuervo. Elaboración propia



Ilustración 15. Iluminación del área Plaza España. Elaboración propia

Una vez finalizada la cuantificación de la iluminación en el municipio, el siguiente paso para validar las mediciones es calibrar las medidas mediante la comparación previamente comentada.

Se generaron 3 mediciones en 3 situaciones distintas con el luxómetro contiguo al móvil y en cual se obtuvieron los siguientes valores:

	Luxómetro [lx]	Aplicación Fotómetro [lx]
1ª MEDICIÓN	5,6	4,9
2ª MEDICIÓN	17	16
3ª MEDICIÓN	17,2	17

Tabla 19. Mediciones utilizadas para la calibración. Elaboración propia

Para la calibración se calculó la ratio entre la ratio entre la medición del luxómetro y la de la aplicación Fotómetro.

- 1ª Medición

$$r_1 = \frac{L}{App_F} = \frac{5,6}{4,9} = 1,14$$

- 2ª Medición

$$r_2 = \frac{L}{App_F} = \frac{17}{16} = 1,06$$

- 3ª Medición

$$r_3 = \frac{L}{App_F} = \frac{17,2}{17} = 1,01$$



Ilustración 16. Tercera medición en el proceso de calibración. Elaboración propia

En este punto se define el factor calibración f como la media aritmética entre las 3 ratios, el cual multiplicará todas las mediciones del trabajo de campo y permite validar los datos obtenidos.

$$f = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3} = 1,07$$

En este punto es importante remarcar que el factor calibración f es un valor cercano a la unidad, por tanto, permite afirmar que las mediciones mediante la aplicación, en el rango estudiado, se acercan a las mediciones que se podrían haber encontrado con el luxómetro y le da validez sustancial al trabajo de campo.

Las mediciones obtenidas se pueden observar en la Tabla 20, una vez todas ellas multiplicadas por el factor calibración f .

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	EM
TIPO 1	4,83	7,18	10,29	7,61	9,65	8,47	6,33	7,29	8,58	8,11
TIPO 2	7,51	14,23	19,52	10,19	15,01	14,09	8,58	7,65	8,19	12,26
TIPO 3	10,72	14,38	18,38	7,51	9,12	7,29	4,08	3,54	5,36	8,78
TIPO 4	1,5	5,68	6,97	1,29	2,36	2,36	0,97	1,29	1,72	2,61
TIPO 5	2,79	5,25	6,54	2,04	4,29	4,29	2,68	4,08	4,61	4,07
TIPO 6	5,36	9,33	18,23	4,29	4,72	8,04	3,11	3,86	4,5	6,32
TIPO 7	9,01	11,8	15,01	7,72	8,47	9,33	6,22	6,86	6,11	8,85
TIPO 8	1,39	4,29	12,87	0,64	1,61	3,22	0,32	0,54	0,97	2,46
TIPO 9	3,43	5,79	3,22	2,14	0,97	0,43	1,29	1,5	1,29	2,05
TIPO 10	7,72	10,62	19,3	3,75	6,86	12,87	3,22	7,51	7,94	8,44
TIPO 11	9,65	10,72	12,87	9,12	7,72	9,01	7,51	6,43	7,29	8,67
TIPO 12	9,65	17,16	24,66	7,51	9,76	10,72	6,43	8,58	10,19	11,12
TIPO 13	16,09	31,1	58,98	10,72	21,45	19,3	10,51	8,58	10,29	20,07
TIPO 14	9,65	10,72	14,09	7,18	8,04	10,62	5,22	8,9	7,51	9,16
TIPO 15	7,51	9,87	10,72	4,29	6,86	8,04	3,22	6,97	8,47	7,23
TIPO 16	6,33	13,4	15,01	5,36	5,36	9,12	1,07	2,04	6,97	6,92
TIPO 17	10,62	10,72	15,01	4,72	5,9	4,83	4,29	1,07	5,36	6,35
TIPO 18	6,11	10,62	13,94	3,75	5,36	0,97	2,79	4,29	5,36	5,56
TIPO 19	6,43	9,12	10,62	3,22	5,36	4,29	2,14	1,07	7,94	5,25
TIPO 20	10,72	13,94	15,01	6,76	7,29	10,72	3,43	5,58	5,79	8,63
TIPO 21	10,72	10,72	11,8	6,86	8,58	9,76	4,83	5,68	8,04	8,49
TIPO 22	7,83	10,72	11,8	4,83	6,97	7,94	2,25	3,65	4,4	6,78
TIPO 23	1,72	5,15	17,16	0,54	0,97	3,65	0,21	0,21	0,43	2,65
TIPO 24	11,8	7,51	9,12	9,12	3,75	0,54	4,29	1,07	0,64	4,83
TIPO 25	3,22	6,43	7,4	5,36	8,15	6,86	4,08	4,08	5,36	6,13
TIPO 26	7,51	8,15	10,4	5,25	6,76	9,01	4,72	8,15	9,65	7,53
TIPO 27	4,29	7,51	9,22	7,94	9,12	9,44	5,25	6,76	8,58	7,94
TIPO 28	5,36	7,72	10,29	3	5,04	5,9	1,29	1,29	1,5	4,65

Tabla 20. Datos obtenidos en la campaña de medición. Elaboración propia

Se pueden observar las fichas de mediciones de las tipologías en el Anexo 2.

3.1.3. 3ª FASE

Una vez finalizada la campaña de medición en el municipio, procedemos a ejecutar un análisis de los datos obtenidos, que se compone principalmente de una comparación de la iluminancia media calculada como lo estipula la ITC EA 02, con los niveles de iluminación que se han de cumplir según el tipo de zona a la que pertenece el grupo de luminarias y, seguidamente, un diagnóstico de las instalaciones: luminarias, lámparas y sistemas de gestión.

3.1.3.1. Diagnóstico de los niveles lumínicos

Según la ITC EA 02 los niveles máximos de luminancia o iluminancia media de las instalaciones de alumbrado no pueden superar en más de un 20% los niveles medios de referencia establecidos en la misma ITC. Por ende, si el valor encontrado es superior al 20% del nivel medio se considerará excesivo y si se encuentra por debajo del nivel medio se considerará ineficiente.

A continuación, en la Tabla 21 se pueden observar los resultados comparativos de las 28 tipologías que han sido objeto de estudio en la campaña de medición, de los cuales se expondrán las principales conclusiones respecto a la situación actual del municipio de Graus.

	Emcalc	Em	Emin	RESULTADO COMPARATIVO
TIPO 1	8,11	7,5	1,5	Correcto
TIPO 2	12,26	11,25	0	Correcto
TIPO 3	8,78	7,5	1,5	Correcto
TIPO 4	2,61	7,5	1,5	Deficiente
TIPO 5	4,07	10	3	Deficiente
TIPO 6	6,32	7,5	1,5	Deficiente
TIPO 7	8,85	10	3	Deficiente
TIPO 8	2,46	10	3	Deficiente
TIPO 9	2,05	10	3	Deficiente
TIPO 10	8,44	11,25	0	Deficiente
TIPO 11	8,67	11,25	0	Deficiente
TIPO 12	11,12	10	3	Correcto
TIPO 13	20,07	10	3	Excesivo
TIPO 14	9,16	7,5	1,5	Correcto
TIPO 15	7,23	11,25	0	Deficiente
TIPO 16	6,92	11,25	0	Deficiente
TIPO 17	6,35	7,5	1,5	Deficiente
TIPO 18	5,56	7,5	1,5	Deficiente
TIPO 19	5,25	10	3	Deficiente
TIPO 20	8,63	7,5	1,5	Correcto
TIPO 21	8,49	7,5	1,5	Correcto
TIPO 22	6,78	7,5	1,5	Deficiente
TIPO 23	2,65	7,5	1,5	Deficiente
TIPO 24	4,83	10	3	Deficiente
TIPO 25	6,13	10	3	Deficiente
TIPO 26	7,53	11,25	0	Deficiente
TIPO 27	7,94	11,25	0	Deficiente
TIPO 28	4,65	10	3	Deficiente

Tabla 21. Comparación de los niveles de iluminación por ley con los valores obtenidos. Elaboración propia

Mediante los datos y el resultado comparativo obtenido en la tabla 21 se lleva a cabo una extrapolación del diagnóstico de los 28 tipos a las 164 áreas de medición y obtenemos el siguiente gráfico:

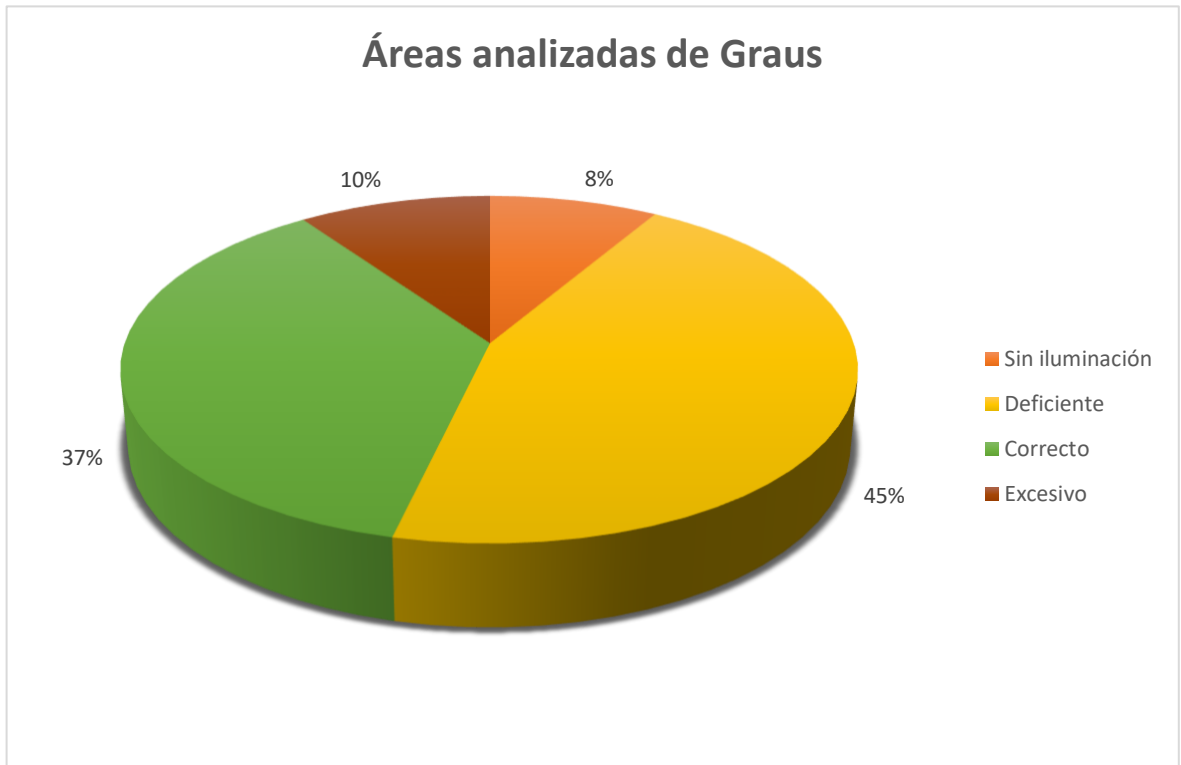


Ilustración 17. Diagnóstico de las áreas analizadas en el municipio de Graus. Elaboración propia

Respecto a los resultados que se obtuvieron mediante la auditoría en el año 2012 las áreas con un nivel deficiente redujeron un 2%, con un nivel excesivo se redujo en un 27% y la cantidad zonas faltas de iluminación se mantiene igual. Por otro lado, el número de zonas con un nivel correcto aumentó un 27%. Como resultado de estos valores se deduce que las actuaciones realizadas tras la auditoría no fueron ejecutadas de manera correcta ya que, hoy en día, el 45% de las áreas del municipio siguen con un nivel de iluminación deficiente. Existe la posibilidad que las actuaciones se hayan decantado por el ahorro energético en detrimento de la seguridad, por ende, estas áreas quedaron infra-iluminadas. De estos resultados se desprende la conclusión que el proyecto no podrá ahorrar tanto como se pudo pensar a causa de partir de una situación actual ineficiente.

3.1.3.2. Diagnóstico de las instalaciones

3.1.3.2.1 Lámparas

La instalación actual del municipio de Graus cuenta con 1159 puntos de luz distribuidos en 21 centros de mando con una potencia total instalada de 102,53 [kW]. A continuación, se

muestra un desglose de la potencia instalada en función del tipo de lámpara que hay actualmente en el municipio

Tipo de lámpara	Cantidad	Potencia [kW]
HM	937	89,48
bajo consumo	55	1,81
LED	76	1,95
VSAP	57	8,09
Fluorescente	34	1,2
Total		102,53

Ilustración 18. Potencia instalada por tipo de lámpara. Elaboración propia

Como se precisó previamente y se manifiesta en la ilustración 18, los HM representa una parte importante de la potencia instalada actual totalmente con valores nominales de potencia, por lámpara, situados entre 70 y 150 [W], y es el principal eje de trabajo para conseguir el máximo ahorro posible, juntamente con las VSAP que tiene valores nominales de potencia entre 100 y 250 [W]. Las luminarias de bajo consumo, los LED y los fluorescentes serán analizados a detalle en el proceso de plan de mejora, en función del área en la que se encuentren situadas y su importancia para la iluminación.

En consecuencia, 994 lámparas requieren de una acción a causa de su elevada potencia. Por otro lado, las 165 luminarias restantes potencialmente requerirán de una acción en función de su importancia, a nivel lumínico, en el área en que se encuentran instaladas.

3.1.3.2.2 Luminarias

La falta de información respecto a las fichas técnicas de las luminarias actuales no permite conocer con exactitud los parámetros asociados al FHS_{inst} , pero se recurre al estudio llevado a cabo por Consultoría Lumínica donde clasificó las diferentes áreas mediante la clasificación reflejada en el Mapa de la protección hacia la contaminación lumínica en Cataluña (GENCAT, 2012).

Clasificación de zonas	Descripción	Flujo hemisferico superior instalado
E1	Áreas con entornos o paisajes oscuros	$\leq 1\%$
E2	Áreas de brillo o luminosidad baja	$\leq 5\%$
E3	Áreas de brillo o luminosidad media	$\leq 15\%$
E4	Áreas de brillo o luminosidad alta	$\leq 25\%$

Tabla 22. Zonas según el grado de protección contra la CL. Fuente: (GENCAT, 2012)

En este, se clasificaron algunas áreas con la tipología de zona E3, por tanto, con un $FHS_{inst} \leq 15\%$, considerándose un valor muy elevado y no va acorde con uno de los objetivos principales relacionados con la reducción de CL, por tanto, se considera que es necesaria una actuación de las luminarias instaladas, basada en que el parámetro FHS_{inst} tenga el mínimo valor posible, es decir, alrededor de $\approx 0,1\%$

3.1.3.2.3 Sistemas de gestión

Cabe considerar, por otra parte, el diagnóstico de los sistemas de gestión del pueblo. En relación con el accionamiento, en el año 2012, Consultoría Lumínica, como medidas correctoras para 16 de los 21 centros de mando, se propuso la instalación de un reloj astronómico, un aparato que calcula automáticamente la hora de salida y de puesta de sol en función de la posición geográfica en la que se encuentra (Wikipedia, 2022). En consecuencia, un 76% de los centros de mando funcionan con un sistema de encendido y apagado eficiente y, por el contrario, un 24% funciona aún con célula fotoeléctrica. Por consiguiente, el diagnóstico permite afirmar que hay 5 centros de mandos que son mejorables respecto al sistema de encendido y apagado.

En otro orden de ideas, se analizó el sistema de regulación mediante la comparación de medidas correctoras propuestas, en el año 2012. Estas constaban de la sustitución de la lámpara y del equipo auxiliar, el cual estaba dotado de un conmutador astronómico de altas prestaciones, aparato con funciones similares al reloj astronómico, que permitiría un ajuste automático al 40% de potencia para los ciclos nocturnos de escasa exigencia lumínica. Las medidas correctoras se propusieron para 44 de las 169 áreas que fueron analizadas, sin embargo, el trabajo de campo permitió observar, mediante el análisis de 8 zonas en las cuales se propusieron la instalación de medidas de regulación, que el nivel lumínico a las 23:00 h era igual que a las 3.00 h de la madrugada, por tanto, se concluyó que los sistemas de regulación no estaban cumpliendo su cometido. Por consiguiente, se extrapola que el 100% de las áreas que son objeto de estudio en este proyecto son mejorables respecto a los sistemas de regulación.

A partir de este punto y, acorde con los resultados obtenidos tras la campaña de medición y el trabajo de campo, el eje principal de mejora será la seguridad de los ciudadanos sin descuidar la eficiencia energética, de tal manera que en el siguiente apartado se podrá observar el estudio llevado a cabo y sus conclusiones.

4. PLAN DE MEJORA

Retomando la última idea mencionada, en relación con el eje principal de mejora del estudio, la información que se mostrará a continuación forma parte del análisis de las 28 tipologías de zona de iluminación que fueron objeto de estudio en la campaña de medición. Tras las mediciones, mediante el programa informático Relux Desktop se simularon las diversas situaciones con objetivo de obtener valores precisos de potencia e iluminación necesarios.

4.1. Entorno RELUX

Relux Desktop es una aplicación de alto rendimiento que simula tanto la luz artificial como la luz natural. Relux proporciona herramientas rápidas y eficientes para todo tipo de proyectos, ya sean grandes o pequeños, sin innecesarias soluciones alternativas. Es una aplicación muy completa que permite su descarga gratuita, pero en caso de que se desee desbloquear las funciones más avanzadas el coste de la licencia puede ascender a 3000€. Otra de las ventajas de Relux Desktop es la accesibilidad a un catálogo considerablemente extenso de luminarias que están categorizadas con su ficha técnica y sus especificaciones correspondientes. Esta selección permite la comparación entre diferentes tipos de luminarias según su potencia, fotometría, temperatura y estilo entre otros.

A continuación, se explicará la metodología utilizada para la simulación de los 28 tipos de áreas.

4.1.1. Simulación en RELUX Desktop

La primera interfaz de interacción relacionada con el estudio es la que se observa en la ilustración 19; en ella se escoge la escena exterior acorde con el proyecto que se pretende desarrollar. Para Graus, 26 tipos de zona de iluminación se simularon en la escena de calle y otros 2 en una escena exterior personalizable.



Ilustración 19. Interfaz para proyectos en escenas exteriores. Fuente: Relux Desktop

Una vez escogida la escena de simulación exterior aparece un cuadro que permite determinar la información relacionada con la simulación que se llevará a cabo. En la ilustración 20 se muestra este panel de opciones.

Ilustración 20. Cuadro para rellenar con la información necesaria. Fuente: Relux Desktop

El proceso que sigue se basa en la configuración de la calle con los parámetros relacionados, tales como la anchura y la clase de alumbrado, acorde con cada una de las 28 tipologías. Una vez definidos los parámetros, el siguiente paso es buscar la luminaria que se ajuste a cada tipo y cumpla los requisitos mínimos en servicio estipulados en la ITC EA 02.

Para comenzar el proceso de simulación de iluminación de las distintas tipologías, se aproximaron los valores necesarios de potencia y lúmenes mediante una serie de cálculos iterativos en que se tienen en cuenta rendimientos, porcentajes de aprovechamiento y condiciones de vía real.

Parámetros	Valores
Interdistancia [m]	20
Altura [m]	5
Anchura [m]	12
Clase de alumbrado	S3
Em	7,5

Tabla 23. Parámetros de la tipología 1. Elaboración propia

Llegados a este punto y, previamente al proceso iterativo para obtener la luminaria correcta, es necesario hacer un estudio de mercado que permita conocer que ofrecen las empresas, respecto a los tipos de luminarias y módulos LED. Para este se comparó la famosa y reconocida mundialmente empresa Philips con una empresa innovadora y recomendada por un profesional del sector llamada Salvi Lightning Barcelona.

En primer lugar, un aspecto sumamente importante es la facilidad que ofrece cada empresa mediante el software Relux Desktop. El uso del catálogo ofrecido por la empresa Salvi Lighting Barcelona resultaba más intuitivo por la información ofrecida dentro del software, la cual podía ser contrastada con las fichas técnicas de las luminarias en la propia página de la empresa, mientras que algunas luminarias que aparecían en el catálogo del software no aparecían en la página de la empresa.

Por otro lado, el siguiente aspecto importante es la diversidad en funcionalidades que ofrece cada empresa. Salvi Lighting Barcelona permite configurar las luminarias a las necesidades particulares de los usuarios y, lo más relevante, dentro de su ficha técnica contemplan la opción de que la luminaria tenga que cumplir algunos requerimientos, para aquellas zonas con protección medioambiental, tales como el filtro ámbar o una temperatura de color 2200 [K] y 2700 [K].

Por estas dos razones, la empresa escogida es Salvi Lighting Barcelona como empresa proveedora de los elementos de iluminación que vaya a requerir el proyecto.

En cuanto a las luminarias, aquellas zonas cuya altura de poste supere los 9 [m] de altura serán equipadas con lámparas de temperatura de color 3000 [K], contemplando que, como muestra la Tabla 2, la radiancia emitida por debajo de 500 [nm] es el 13% respecto del total visible y se compara directamente con el 21% emitido por las lámparas de HM, las cuales representan la mayoría en el municipio.

El resto de zonas serán equipadas con lámparas de temperatura de color 4000 [K] y filtro ámbar con el objetivo de emitir la menor cantidad de luces azules y, en consecuencia, generando un impacto ambiental positivo con relación a la CL.

En conjunto, se observa que las dos opciones escogidas optan por la minimización de la CL del municipio, la cual cosa puede otorgar al municipio un distintivo que certifica sus actuaciones en pro de preservar los cielos oscuros y que lleva consigo una cantidad sustancial de beneficios para la economía del pueblo gracias al reconocimiento y el turismo que puede atraer, como se precisó con anterioridad.

En la ilustración 21 se puede observar el proceso iterativo seguido, para obtener los resultados que sustentan las luminarias escogidas y sus valores de potencia y, además, cumple con la normativa estipulada en la ITC EA 02.

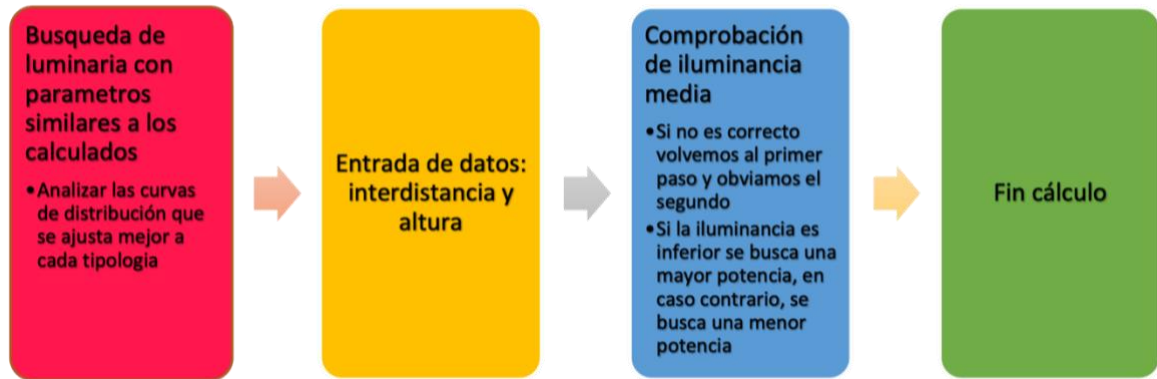


Ilustración 21. Proceso iterativo de simulación. Elaboración propia

La ilustración 22 muestra la ficha de resultados obtenida del Relux para el proceso de cálculo de potencia y lúmenes de la tipología 1.

CLAP S HOR AMBAR Luminaria para montaje en brazo de poste CLAP S HOR

06W F4MC
Frontal intensiva F4MC

Datos de luminarias

Fotometría absoluta	
Eficacia de luminaria	: 111.96 lm/W
Clasificación	: A30 ↓100.0% ↑0.0%
CIE Flux Codes	: 27 71 98 100 100
UGR 4H 8H	: 28.8 / 10.7
Equipo	: Electrónicas con multiples funcionalidades: potencia fija, regulable, 1-10V/DALI/PWM, reductor
Potencia	: 25 W
Flujo luminoso	: 2799 lm
Dimensiones	: 490 mm x 240 mm x 150 mm

Equipamiento con

Cantidad	: 1
Designación	: LED
Color	: 4000K
zócalo	: -
Reproducción cromática	: 70

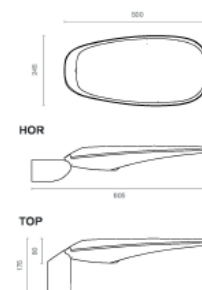
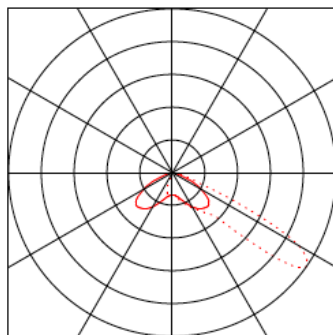


Ilustración 22. Ficha técnica de la luminaria escogida. Fuente: Salvi Lighting Barcelona (Relux Desktop)

La ficha técnica ofrece los datos de la luminaria escogida, que en este caso se trata de la luminaria Vial CLAP S HOR con filtro ámbar. Tiene una potencia de 25 [W] y emite un flujo lumínico de 2799 [lm], con una eficacia de la luminaria de 111,96 $\left[\frac{lm}{W}\right]$.

Una vez terminada la simulación inicial, el software muestra diferentes vistas de la calle que se muestran a continuación:

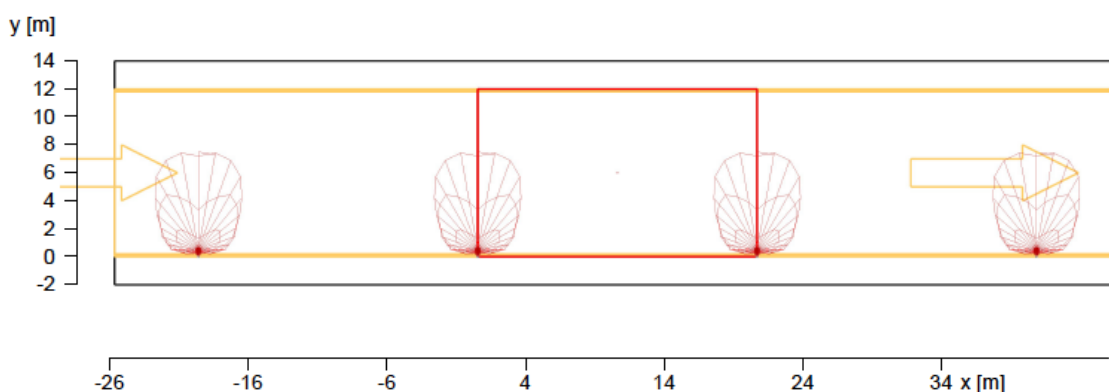


Ilustración 23. Vista horizontal de Avenida Pirineos (Vía de servicio). Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)

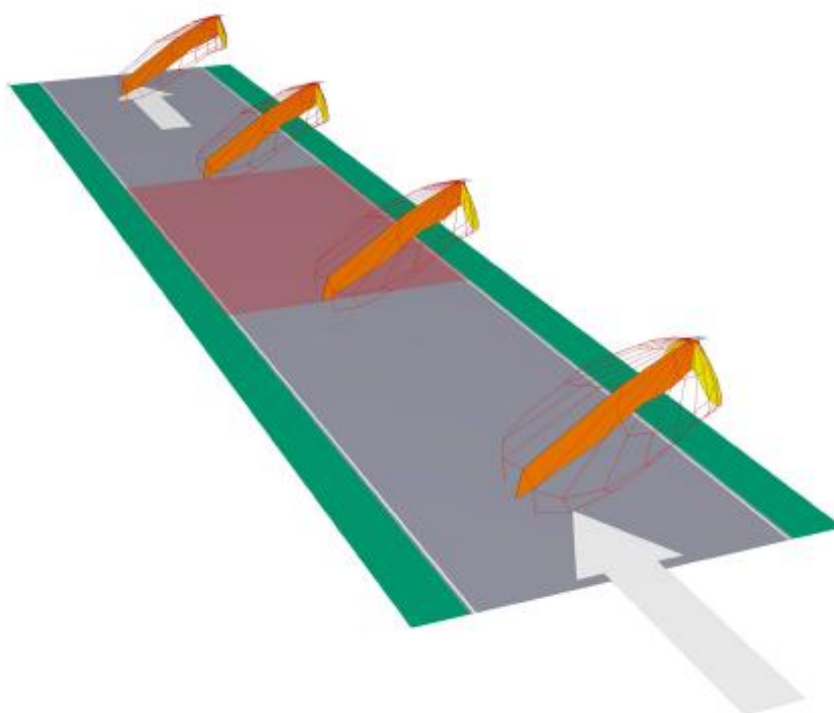
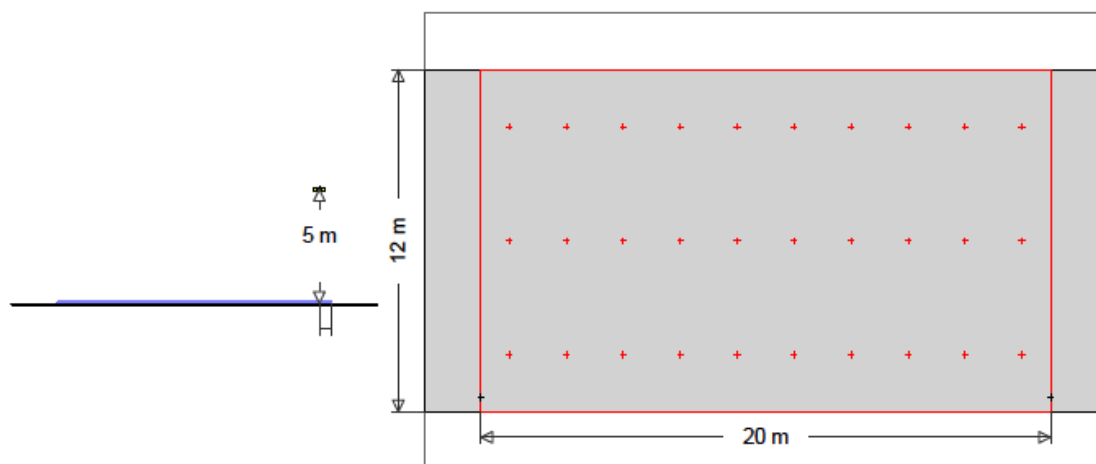


Ilustración 24. Representación en 3D de Avenida Pirineos (Vía de servicio). Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)

Por último, el programa proporciona el resumen de los resultados de la simulación. Estos resultados ofrecen una proyección en planta de la interdistancia y la anchura, una representación de la altura de la luminaria en el alzado, todos los valores relevantes de iluminancia y la comparación con los valores mínimo y medio estipulados por ley comentados previamente.



5 **salvi lighting barcelona**
 Nº de artículo : CLAP S HOR AMBAR/06W F4MC
 Nombre de la lum. : CLAP S HOR
 Equipamiento : 1 x LED 25 W / 2799 lm

Tipología 1

Posicionamiento	: Fila a la derecha	Factor de mant.	: 0.80
Distancia de luminarias	: 20.00 m	Altura(centro fotom.)	: 5.00 m
Voladizo de la luminaria	: 0.50 m	Inclinación	: 0.00 °
Distancia absoluta	: 0.50 m	Clase de deslumbr.	: D6
Potencia instalada / km	: 1250 W/km	Clases de l lum.	: G*4

Vial

Anchura	: 12.00 m	Carriles	: 1
Superficie	: R3, q0=0.07		

Iluminancia

	Campo de cálculo: 20m x 12m (10 x 3 Puntos)			
	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	8.17 lx	2.48 lx	0.30	0.16
P3	≥ 7.50 lx	≥ 1.50 lx		

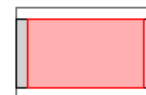


Ilustración 25. Resumen de los resultados de la tipología 1. Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)

Aquí finaliza la explicación de la metodología de análisis de las 28 tipologías de zona de iluminación de Graus. Seguidamente, se explicará al detalle el plan de mejora que se propone con el objetivo principal enfocado en la eficiencia energética, sin poner en tela de juicio la seguridad y siempre procurando que la CL sea la mínima, en comparación con la situación actual.

Se pueden consultar las simulaciones de las 28 tipologías de zonas en el Anexo 3.

4.2. Propuestas de mejora

4.2.1. Áreas sin actuaciones propuestas

Las actuaciones que se proponen a continuación contemplan la sustitución de 1056 puntos de luz de un total de 1159 que hay actualmente en el municipio. Quedan 103 puntos de luz restantes los cuales se tratarán de la siguiente manera:

- Centro de mando 3. GAITEROS DE CASERRAS (Callejón hacia la biblioteca)

Las luminarias tipo HM empotradas en suelo en el área GAITEROS DE CASERRAS serán eliminadas. Estas luminarias son las que se encargan de iluminar el camino; sin embargo, las actuaciones previstas para esta zona las convierten en redundantes e inútiles. En total se eliminarán 3 proyectores tipo HM.

- Centro de mando 10. DON CARLOS

Las balizas tipo HM iluminan una pequeña plaza en el área DON CARLOS. Estas luminarias también serán eliminadas, ya que las actuaciones propuestas asegurarán la iluminación correcta en esta zona. En total se eliminarán 5 balizas de tipo HM.

- Centro de mando 10. HOSPITAL

Las luminarias tipo LED empotradas en el suelo en el área HOSPITAL serán eliminadas. Esta iluminación, que se considera decorativa al estar situada en la parte central de la calle, es innecesaria ya que las luminarias viales se sustituirán y las nuevas ofrecerán un correcto nivel de iluminación. En total serán eliminadas 25 proyectores tipo LED.

- Centro de mando 17. DEL AGUA

Las luminarias tipo halógeno empotradas en la pared en el área PARQUE serán eliminadas. Esta iluminación queda totalmente inservible a causa de las actuaciones llevadas en esta área. En total serán eliminadas 10 proyectores tipo halógeno.

- Centro de mando 18. JOSE SALAMERO

Las luminarias tipo LED empotradas en el suelo dentro de la fuente del área Jose SALAMERO se mantendrán. El conjunto lumínico se considera eficiente por su bajo consumo y su vida útil y no supone un gasto energético cuantioso. En total se mantendrán 16 proyectores tipo LED.

- Centro de mando 18. JOSE SALAMERO

Las balizas tipo fluorescencia situadas en el área Jose SALAMERO iluminan el paseo que está a su lado. El conjunto lumínico se apaga totalmente a partir de medianoche, por lo que

no se considera su aportación a la iluminación pública. De cualquier manera, estas balizas se mantendrán ya que son un elemento decorativo de bajo coste y las nuevas luminarias viales aseguraran el nivel correcto de iluminación. En total se mantendrán 7 balizas de tipo LED.

- Centro de mando 19. JOAQUIN COSTA, GLORIETA

Las luminarias tipo LED ubicadas en el suelo del centro de la rotonda se mantendrán. Estas luminarias iluminan el centro de la rotonda y su árbol. Como son luminarias LED de bajo consumo se consideran adornos de bajo coste. En total se mantendrán 10 proyectores tipo LED.

- Centro de mando 21. BASÍLICA VIRGEN DE LA PEÑA

La iluminación ornamental de la basílica se mantendrá en su totalidad. Estas se apagan totalmente a partir de medianoche, por lo que se considera que el conjunto lumínico cumple con su cometido durante el tiempo justo y necesario. En total se mantendrán 27 luminarias.

4.2.2. Áreas con redistribución de luminarias

- TIPOLOGÍA 23. FRAY DIEGO CERA

La tipología 23 es única, es decir, el estudio luminotécnico no se extrapola a ninguna otra área del municipio. El estudio demostró que era necesario una re-distribución de las luminarias y el diagnóstico de la iluminación demostró que los niveles de iluminación eran deficientes. Actualmente esta zona consta de 5 luminarias, a una altura de 4 [m] y una interdistancia de 35 [m]. Se propone la siguiente distribución: 11 luminarias con una interdistancia de 13 [m] y una altura de 6 [m].

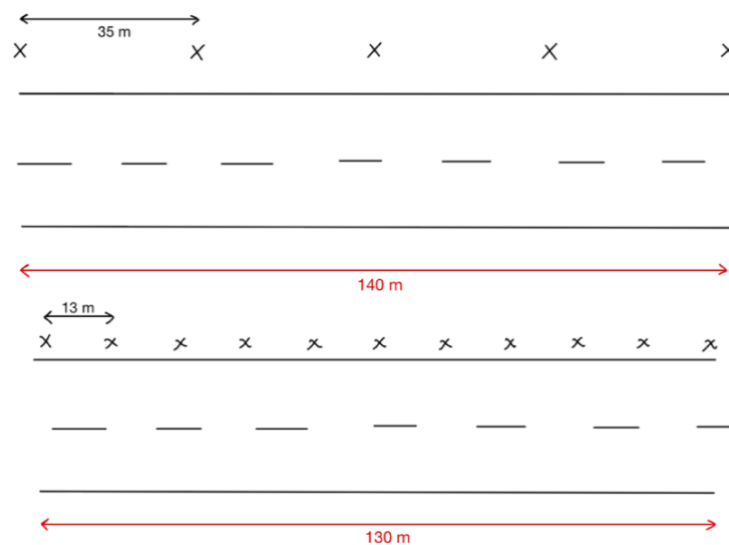


Ilustración 26. En la parte superior: Distribución actual - Parte inferior: Distribución propuesta. Elaboración propia

Para observar la ficha técnica de las nuevas columnas tipo ATLAS véase Anexo 6.

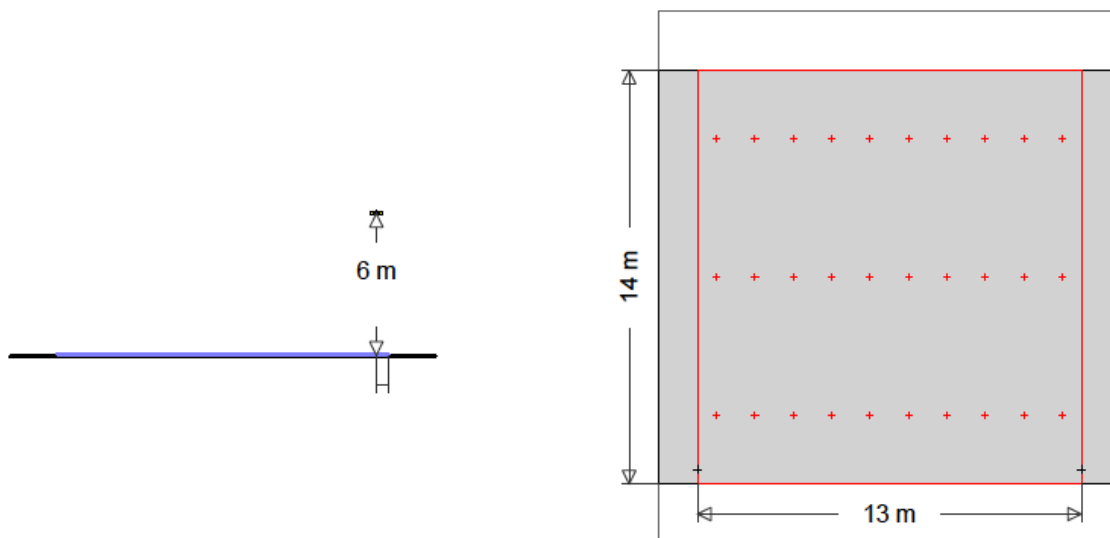


Ilustración 27. Distribución calculada en el estudio luminotécnico. Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)

- TIPOLOGIA 26. ANGEL SAMBLANCAT

En el diagnóstico de iluminación se evidenció un nivel deficiente y, el estudio luminotécnico demostró que es necesaria una redistribución de las luminarias. En este caso, únicamente se ajusta el parámetro de la altura que cambia de 7 [m] actuales a 8,5 [m]. Esta nueva disposición asegura que el conjunto lumínico posea un nivel de iluminación correcto.

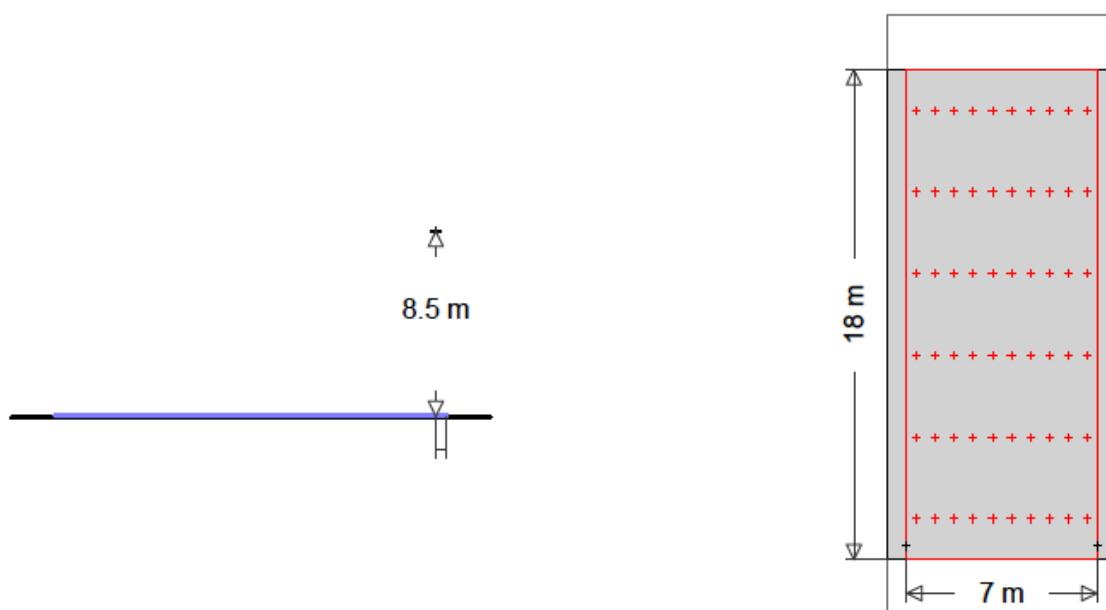


Ilustración 28. Distribución calculada en el estudio luminotécnico. Fuente: Elaboración propia (Relux Desktop)

Para este caso en concreto, en el presupuesto, la instalación de las luminarias necesarias se ha tenido en cuenta en el capítulo: *Sustitución de las luminarias existentes por tecnología LED*.

4.2.3. Regulación permanente y análisis de tipos de apoyo

En otro orden de ideas, según el estudio luminotécnico de las tipologías que se muestran en la tabla 24, resulta evidente la necesidad una regulación permanente. Sin esta regulación, la iluminación sería excesiva y no cumpliría con la legislación:

	Potencia a instalar	Potencia regulada
TIPOLOGIA 6	14 W	3 W
TIPOLOGIA 7	50 W	39 W
TIPOLOGIA 9	18 W	13 W
TIPOLOGIA 18	68 W	60 W
TIPOLOGIA 22	45 W	32 W

Tabla 24. Tipologías con regulación permanente. Elaboración propia

Para el nuevo sistema de alumbrado, se analizaron todos los tipos de apoyo y sustentación de las diferentes luminarias. Estos apoyos están divididos en las siguientes categorías:

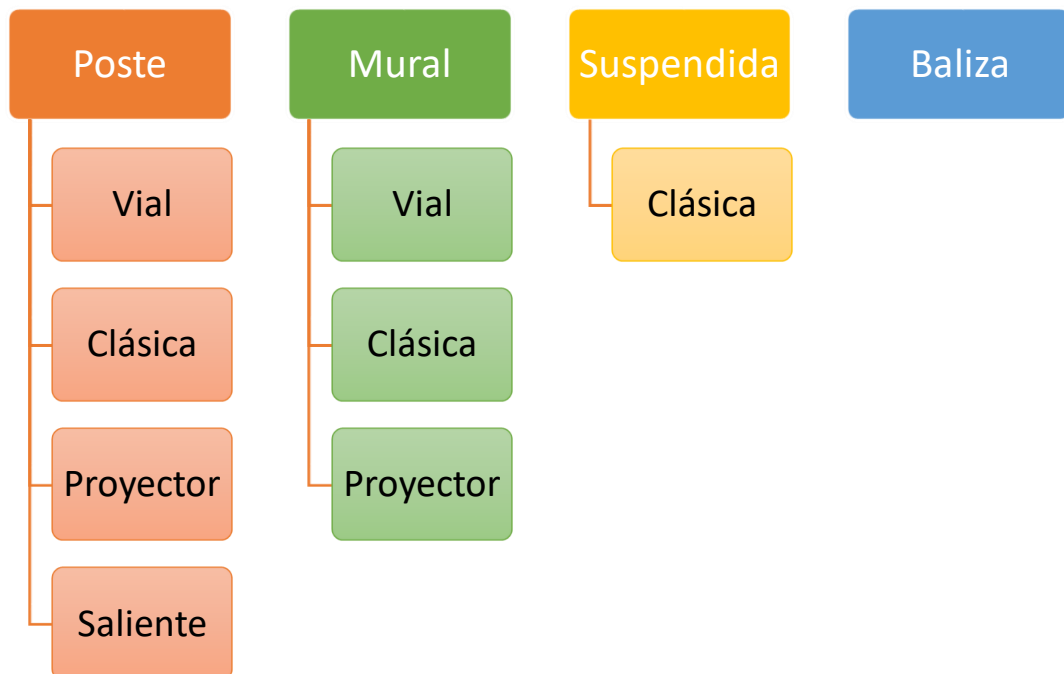



Ilustración 29. Tipos de apoyo existentes en el municipio. Elaboración propia

El objetivo de este análisis es tratar de mantener para cada área el apoyo que hay actualmente, con el objetivo de aprovechar al máximo las instalaciones existentes en el municipio y evitar incrementar el coste de la obra.

Para este análisis es necesario demostrar que una luminaria tipo vial y, por ejemplo, una luminaria tipo clásica con la misma potencia, mismo flujo luminoso y misma distribución lumínica ejecutan la misma función e iluminan de manera similar. Así, se minimizaría la afectación del cambio de tipología para cumplir los niveles de iluminación requeridos. A continuación, se pueden observar diferentes tipos de luminarias con los parámetros previamente comentados iguales.

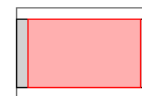
9		salvi lighting barcelona	
		Nº de artículo	: OCHOCENTISTA 72 TOP AMBAR/085 F4MC
		Nombre de la lum.	: OCHOCENTISTA 72 TOP
		Equipamiento	: 1 x LED 26 W / 2605 lm

Tipología 1

Posicionamiento	: Fila a la derecha	Factor de mant.	: 0.80
Distancia de luminarias	: 20.00 m	Altura(centro fotom.)	: 5.00 m
Voladizo de la luminaria	: 0.50 m	Inclinación	: 0.00 °
Distancia absoluta	: 0.50 m	Clase de deslumbra.	: D6
Potencia instalada / km	: 1300 W/km	Clases de l lum.	: G*4

Vial

Anchura	: 12.00 m	Carriles	: 1
Superficie	: R3, q0=0.07		

**Iluminancia**

Campo de cálculo: 20m x 12m (10 x 3 Puntos)

	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	7.60 lx	2.31 lx	0.30	0.16
P3	>= 7.50 lx	>= 1.50 lx		

Ilustración 30. Luminaria tipo Mural Clásica OCHOCENTISTA TOP. Elaboración propia Relux (Desktop)

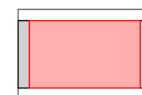
4		salvi lighting barcelona	
		Nº de artículo	: CIRCUS LIRA AMBAR/085 F4MC
		Nombre de la lum.	: CIRCUS LIRA
		Equipamiento	: 1 x LED 26 W / 2605 lm

Tipología 1

Posicionamiento	: Fila a la derecha	Factor de mant.	: 0.80
Distancia de luminarias	: 20.00 m	Altura(centro fotom.)	: 5.00 m
Voladizo de la luminaria	: 0.50 m	Inclinación	: 0.00 °
Distancia absoluta	: 0.50 m	Clase de deslumbra.	: D6
Potencia instalada / km	: 1300 W/km	Clases de l lum.	: G*4

Vial


Anchura	: 12.00 m	Carriles	: 1
Superficie	: R3, q0=0.07		

**Iluminancia**

Campo de cálculo: 20m x 12m (10 x 3 Puntos)

	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	7.60 lx	2.31 lx	0.30	0.16
P3	>= 7.50 lx	>= 1.50 lx		

Ilustración 31. Luminaria tipo Proyector CIRCUS LIRA AMBAR. Elaboración propia (Relux Desktop)

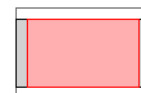
8		salvi lighting barcelona	
		Nº de artículo	: BASIC S WALL M AMBAR/085 F4MC
		Nombre de la lum.	: BASIC S WALL
		Equipamiento	: 1 x LED 26 W / 2605 lm

Tipología 1

Posicionamiento	: Fila a la derecha	Factor de mant.	: 0.80
Distancia de luminarias	: 20.00 m	Altura(centro fotom.)	: 5.00 m
Voladizo de la luminaria	: 0.50 m	Inclinación	: 0.00 °
Distancia absoluta	: 0.50 m	Clase de deslumbra.	: D6
Potencia instalada / km	: 1300 W/km	Clases de l lum.	: G*4

Vial

Anchura	: 12.00 m	Carriles	: 1
Superficie	: R3, q0=0.07		

**Iluminancia** Campo de cálculo: 20m x 12m (10 x 3 Puntos)

	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	7.60 lx	2.31 lx	0.30	0.16
P3	≥ 7.50 lx	≥ 1.50 lx		

Ilustración 32. Luminaria tipo Mural Vial BASIC S WALL AMBAR. Elaboración propia. (Relux Desktop)

Las conclusiones de este análisis resultan extrapolables para el tipo Suspendida Clásica, con la serie OCHOCENTISTA SUS AMBAR. El estudio detallado del tipo de apoyo permite observar los estudios luminotécnicos y, en función del área, instalar el tipo de luminaria adecuada en cada situación. Asimismo, en la siguiente tabla se puede observar las unidades de luminarias necesarias y el nombre del artículo:

LUMINARIAS	UNIDADES
Clap S	380
Clap M	133
Basic	24
Wall	100
Circus LIRA	168
Ochocentista TOP	213
Ochocentista SUS	38
Total	1056

Tabla 25. Tipos de apoyo y luminarias propuestas. Elaboración propia

Cabe recalcar que, para el tipo Mural Clásica hay un total de 197 luminarias, el restante pertenece al tipo Poste Clásica, por ende, para asegurar la instalación de este tipo de luminarias se adquirirá el soporte OCHOCENTISTA que proporciona la empresa.

Para observar el análisis de los tipos de apoyos véase Anexo 4. Para observar la ficha técnica del soporte OCHOCENTISTA véase Anexo 6.

4.3. Eficiencia de las instalaciones

Un aspecto importante para tener en cuenta es la eficiencia de las instalaciones propuestas. De las 154 áreas se calcularon los parámetros asociados con la eficiencia energética, comentados en el apartado 2.2 de requerimientos previos, y los resultados son notablemente favorables. Resulta haber un 100% de las áreas objeto de estudio con una clasificación energética a. A continuación, se podrá observar los valores calculados que permiten concluir que las actuaciones propuestas son energéticamente eficientes, en su totalidad.

	Superficie	Potencia instalada	Em en instalación	Eficiencia	Indice de eficiencia	Indice de consumo energético	Calificación
TIPO 1	240	26	7,6	70,15	5,01	0,2	A
TIPO 2	255	32	19,3	153,8	5,92	0,17	A
TIPO 3	168	19	7,51	66,4	4,74	0,21	A
TIPO 4	260	27	7,53	72,51	5,18	0,19	A
TIPO 5	70	14	10,1	50,5	2,81	0,36	A
TIPO 6	45	3	8,09	121,35	7,14	0,14	A
TIPO 7	99	39	10	25,38	1,41	0,71	A
TIPO 8	50	14	11,9	42,5	2,13	0,47	A
TIPO 9	28	13	10	21,54	1,2	0,84	A
TIPO 10	299	68	15,4	67,71	2,94	0,34	A
TIPO 11	575	68	16,8	142,06	5,92	0,17	A
TIPO 12	32	14	11,1	25,37	1,34	0,75	A
TIPO 13	48	14	10,5	36	2	0,5	A
TIPO 14	180	19	7,77	73,61	5,26	0,19	A
TIPO 15	171	39	12,2	53,49	2,67	0,37	A
TIPO 16	126	36	20	70	2,69	0,37	A
TIPO 17	132	36	8,36	30,65	2,04	0,49	A
TIPO 18	50	14	8,84	31,57	4,17	0,24	A
TIPO 19	375	60	10	62,5	3,47	0,29	A
TIPO 20	600	39	8,26	127,08	8,47	0,12	A
TIPO 21	196	27	8,04	58,36	3,89	0,26	A
TIPO 22	480	32	7,5	112,5	8,04	0,12	A
TIPO 23	490	36	7,54	102,63	7,33	0,14	A
TIPO 24	120	12	10	100	5,56	0,18	A
TIPO 25	121	59	11,8	24,2	1,34	0,74	A
TIPO 26	126	39	20	64,62	2,49	0,4	A
TIPO 27	121	85	22,1	31,46	1,12	0,89	A
TIPO 28	100	27	10,6	39,26	2,18	0,46	A

Tabla 26. Cálculos para las tipologías de los parámetros de eficiencia energética. Elaboración propia

Los resultados que se pueden observar en la Tabla 26 son totalmente concordantes con los objetivos generales del proyecto, en relación con el aumento de la eficiencia energética y, al mismo tiempo, dotaría al municipio de Graus con una modernización que solidariza con el medio ambiente. Se concluye que, al obtener en todas las áreas objeto de estudio una clasificación energética A, el proyecto cumple con creces los objetivos relacionados con la eficiencia energética.

De acuerdo con el capítulo 9 de la ITC EA 02, las instalaciones de alumbrado público han de disponer de dispositivos o sistemas para regular el nivel luminoso mediante alguno de los siguientes sistemas:

- a) balastos serie de tipo inductivo para doble nivel de potencia.
- b) reguladores - estabilizadores en cabecera de línea.
- c) balastos electrónicos de potencia regulable – que son los más utilizados en la actualidad.

La empresa Salvi Lighting dispone de un software de integración para ciudad inteligente llamado SMARTEC. Este abarca varios aspectos que no entran en el alcance del proyecto, pero ofrece sistemas de regulación para el alumbrado público y, todas sus luminarias son compatibles con este software. En consecuencia, se dispone de regulación por niveles, de regulación en cabecera, entre otros.

Se propone para la regulación del municipio de Graus lo siguiente:

A partir de las 24h entra en vigor la regulación y, acorde con las Tablas 11,13 y 15, la clase de alumbrado se reduce en un nivel, como se puede observar en la Tabla 27, cumpliendo los niveles de iluminación establecidos. Para conocer hasta que punto se regula cada tipología objeto de estudio, se hicieron las simulaciones de todas las tipologías adaptadas a la nueva clase de alumbrado. Para observar el cumplimiento de la regulación véase Anexo 5.

CLASE DE ALUMBRADO	CLASE DE ALUMBRADO EN REGULACIÓN
ME4B	ME5
S2	S3
S3	S4

Tabla 27. Clase de alumbrado a cumplir con la regulación. Elaboración propia

De esta manera, se estima que la instalación funcionará un 45% del total de horas anuales de manera normal y, un 55% funcionará con regulación, correspondiendo esto a $1942 \left[\frac{h}{año} \right]$ de funcionamiento normal y $2374 \left[\frac{h}{año} \right]$ de funcionamiento con regulación. Los estudios luminotécnicos avalan que, los niveles exigidos se cumplen, por ende, la seguridad de los ciudadanos no se ve comprometida en pro de obtener un ahorro superior.

4.4. Resultados previstos

En primer lugar, se pretende establecer una comparativa entre los principales parámetros analizados en el apartado de estudio de la situación actual. Como se comentó previamente, para los cálculos que a continuación se observan, tienen en cuenta la regulación propuesta. En consecuencia, con las potencias futuras a instalar se ha calculado la potencia total instalada y equivale a un valor de 26,9 [kW]. Respecto a la situación actual, las actuaciones propuestas conllevan un ahorro del 73,77% y, este valor cumple el objetivo propuesto respecto a la potencia instalada.

POTENCIA TOTAL INSTALADA ACTUALMENTE [kW]	POTENCIA TOTAL INSTALADA A FUTURO [kW]	DISMINUCIÓN [%]
102,53	26,9	73,77%

Ilustración 33. Tabla comparativa de potencia total instalada. Elaboración propia

En segundo lugar, se procedió a computar la energía consumida anual y se obtuvo un valor de 93.505,96 [kWh]. En este orden de ideas, el ahorro alcanza un valor del 78,87% demostrando que el objetivo propuesto de incrementar la eficiencia energética se cumple con creces.

ENERGIA TOTAL CONSUMIDA ACTUALMENTE [kWh]	ENERGIA TOTAL CONSUMIDA A FUTURO [kWh]	AHORRO [%]
442.531,78	93.505,96	78,87%

Ilustración 34. Tabla comparativa de energía consumida. Elaboración propia

En último lugar, se calculó el coste anual de la energía para el municipio y, en este caso, se encontró un valor de 19.636,25 €. El parámetro más relevante tendría un ahorro del 78,87% con las obras de renovación propuestas y concuerda totalmente con la filosofía de ayudar al municipio que el gasto anual sea inferior considerando la cuantía de su presupuesto.

COSTE ENERGÍA ANUAL ACTUAL [€]	COSTE ENERGÍA ANUAL A FUTURO [€]	AHORRO [%]
92.931,67 €	19.636,25 €	78,87%

Ilustración 35. Tabla comparativa del coste anual de la energía. Elaboración propia

5. PLAN DE SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DE CIELO NOCTURNO

5.1. Contaminación lumínica

Las medidas de contaminación lumínica se deben realizar con aparatos preparados y homologados para este propósito. Tras un estudio preliminar de mercado se han encontrado una serie de dispositivos que se pueden clasificar en función de dos parámetros diferentes que son:

- Cómo miden
- Qué magnitud miden.

5.2. Tipos de medición

De los dispositivos estudiados podemos clasificar dos tipos de medición distintos. El primero y más sencillo consiste en calcular la CL a partir de la porción de cielo que se encuentra en el cono de la vertical del aparato de medida; este método lo usan dispositivos como el SQM. El segundo, y más complejo, consiste en calcular la CL a partir de una sección esférica de cielo capturada con una lente redonda; así calculan CL dispositivos como el ASTMON.

5.3. Magnitud de medición

Los aparatos de cuantificación de CL miden dos magnitudes físicas diferentes. El primer tipo de aparato, tipo en que clasifican dispositivos como el SQM o el ASTMON, mide la luminancia. Este parámetro representa una relación entre intensidad luminosa y superficie aparente de una fuente que emite luz o la refleja y es captada por el ojo humano, por lo que sus unidades son candelas entre superficie $\frac{cd}{m^2}$ o $\frac{cd}{cm^2}$ (García i Boix, 1999). El segundo tipo, en cambio, mide iluminación irradiada, son aparatos en general más caros como el Lightmeter.





Aparato	Magnitud Medida	Imagen de Dispositivo
Sky Quality Meter (SQM)	Luminancia	
ASTMON	Luminancia	
Lightmeter	Iluminación irradiada	
Digilum	Luminancia	

Tabla 28. Aparatos más comunes para medir el brillo del cielo y su tipo de medición. Fuente: (Rubio, 2015)

5.4. Evaluación de dispositivos

La evaluación de tecnologías de medición previa al diseño de un sistema de monitorización de CL para Graus está basada en el capítulo 3 del estudio realizado sobre la CL en zonas protegidas y urbanas por Ribas Rubio S, J (2015) en que se compara el comportamiento de distintos aparatos de medida en entornos con distintos niveles de CL. Con ánimo de facilitar el análisis de los aparatos, se transforman las medidas de los aparatos que cuantifican irradiación mediante factor de conversión a valor de luminancia. Así, las medidas de los distintos aparatos se pueden representar en el mismo gráfico y se pueden comparar en la misma base.

Con los gráficos del estudio ya dispuestos, se observa que las tendencias generales de las curvas asociadas a cada dispositivo son similares. A lo largo de todas las noches de medición los patrones de medición son prácticamente idénticos en todos los aparatos (salvo algún pico o valle momentáneo debido seguramente a un haz de luz externo o apagón momentáneo), pero presentan distintos grados de *offset* entre ellos. En el caso de los dispositivos medidores de irradiación, el desfase puede deberse a un factor de conversión impreciso o inexacto; mientras que en el caso de dispositivos medidores de luminancia las diferencias entre curvas

pueden deberse a variaciones sutiles de configuración y puesta a punto. De cualquier manera, el *offset* implica un error de muy pocas décimas de unidad y no será relevante a la hora de escoger el aparato de medida.

Al comienzo de la evaluación directamente se descartan los dispositivos ASTMON por dos razones distintas. La primera es que este aparato detecta brillo emitido por luminarias cercanas encendidas y desajusta la medición (Rubio, 2015). La segunda es que, en la escala de precios de medidores, el ASTMON tiende hacia la zona prohibitiva. También se descarta el Digilum que, aunque presentaba curvas de medidas perfectas, igual que el ASTMON requería una inversión más elevada que la necesaria para otros sistemas de comportamiento similar (Rubio, 2015). Finalmente, se decide que los instrumentos SQM poseen la relación calidad-precio óptima para el proyecto. Son aparatos cuyo comportamiento en la comparativa fue más que aceptable; las desviaciones presentadas en las mediciones disponían de una precisión casi insignificante de unos $0.10 \frac{\text{mag}}{\text{arcsec}^2}$ (véase tabla 29). Además, el precio unitario de cada SQM es de 299,95\$ más los gastos de envío; precio competitivo y sustancialmente inferior al de cualquier otra alternativa (Unihedron). Además, estos aparatos tienen una variante llamada SQM – LE, que mediante un cable de conexión ethernet, manda señales de medición en vivo a un posible ordenador o central de monitorización (que es justo lo necesario para este proyecto). Variante que resulta ideal para el sistema de monitorización (que puede ser continua) que se pretende diseñar para este proyecto.

Aparato	Desviación
Sky Quality Meter (SQM)	0.10 mag/arcsec ²
ASTMON	Depende de la fotometría
Lighmeter	10 µlx
Digilum	0.1 mcd/m ²

Tabla 29: Aparatos y su desviación típica de medida del brillo del cielo. Fuente: (Rubio, 2015)

5.5. Calibración

Tras la selección de medidor, el siguiente paso en el diseño del sistema de control es el dibujo del procedimiento de certificación de veracidad de resultados. Para poder asegurar que el sistema es fiable, se realizará una intercalibración de los aparatos. Este procedimiento es necesario para corregir el *offset* (visto en los párrafos de selección de medidor) que pueden presentar los distintos SQM (Rubio, 2015). Para llevar a cabo la mencionada intercalibración, se deben seguir los pasos estipulados en esa misma tesis que son a grandes rasgos:

- Definir un patrón de referencia para todos los dispositivos a calibrar
- Evaluar cada SQM en una función f , que es una función ajustada por mínimos cuadrados que transforma cada aparato al patrón definido en el primer paso.
- Calcular el offset de cada SQM respecto al patrón como la media de las diferencias en las mediciones entre el patrón y el aparato en concreto
- Considerar el offset correspondiente a cada SQM en las mediciones

Independientemente de la primera intercalibración (realizada justo después de la instalación del sistema de monitorización), es recomendable realizar comprobaciones periódicas de las medidas de los aparatos; el periodo óptimo de comprobación de sistemas es de unos dos años. Esta recomendación se desarrollará más adelante en el apartado 5.8.

Este afán por cuantificar la CL con alto grado de precisión viene incentivado por una iniciativa autonómica en fase de diseño; en ella se propone buscar la creación de una Red de Monitoreo de CL en los pirineos para crear una zona (con pocos precedentes) de preservación del medio nocturno. Para este cometido, Graus se podría tomar como pueblo piloto a modo de ejemplo para otras localidades y comarcas circundantes. Esta iniciativa se mira en el espejo de la zona protegida del Montsec; zona que se creó con la intención de generar una reserva con los niveles mínimos legales de iluminación y que además posee la certificación Reserva Starlight (Fundación Starlight). En el Montsec, también existe una red de dispositivos medidores de CL del tipo SQM-L (Nievas Rosillo, y otros, 2014) para la adquisición y el manejo de los datos. Una vez estos datos han sido recogidos, son procesados en un programa llamado PySQM, que, mediante unas líneas de código en Python, lee, procesa y representa gráficamente los datos recogidos por los SQM. Para el proyecto de Graus, tomando la reserva del Montsec como ejemplo, se podría buscar el diseño de una red de monitorización continua similar, con objetivo último de que quizá algún día se acabe formando una zona pirenaica conjunta de reserva del espacio nocturno.

5.6. Alternativas de sistema de control

En este apartado se diseñará la metodología de recolección, procesamiento y análisis de datos relacionados con CL. Antes de nada, cabe recordar que en la conclusión del apartado de investigación de aparatos de medida se decide que el método más efectivo y balanceado (Coste – rendimiento) para la monitorización de CL son los SQM – LE conectados a internet por cable. A medida que el aparato mide, va enviando el valor instantáneo (en $\frac{mag}{arcsec^2}$) a un ordenador central que plasma la información recibida en un gráfico para su posterior análisis.

Con tal de definir el plan de monitorización de CL en primer lugar se debe concretar el número de unidades a utilizar y a decidir su posicionamiento. Existen diversos métodos para medir CL, de los cuales se enumeran los dos más interesantes: el primero y más sencillo es fijar distintos dispositivos en lugares estratégicos del pueblo e ir recopilando la información que

proporcionan. El segundo y más difícil de implementar son las mediciones a remolque de vehículo; consiste en atar un dispositivo medidor a la parte trasera de un remolque de coche y recorrer las calles recopilando información de CL. Así se han diseñado 5 alternativas de sistema de control (ordenadas por coste de instalación y mantenimiento creciente):

Alternativa 1: Tres puntos de medición continua.

La alternativa 1 implica un sistema de control fijo y de medición continua de los SQM – LE. Para esta alternativa se ha diseñado un mínimo indispensable de puntos a medir para obtener una cifra de CL ajustada a la realidad del pueblo. Los emplazamientos seleccionados para estos tres SQM – LE son:

- La azotea del ayuntamiento del pueblo (Con ligera elevación para evitar contaminación directa de luminarias cercanas).
- Explanada situada entre la última casa del pueblo (por el lado sur) y las naves industriales situadas en el punto donde abre la carretera nacional.
- Cementerio del pueblo (punto exterior pero cercano al pueblo)

Con estos tres SQM se obtendrá información del centro neurálgico del pueblo, la zona más concurrida y donde se desarrolla gran parte del ocio nocturno que será el punto más contaminado ya que es la zona más iluminada del pueblo. Con el segundo SQM – LE, se hallarán datos sobre la periferia del pueblo. En esta zona la emisión de luz es limitada, lo cual lleva a pensar que la mayor parte de la CL que medirá este dispositivo vendrá de las luminarias de dentro del pueblo. Por último, se registrarán datos de la zona del cementerio a las afueras del pueblo (se escoge el cementerio porque es el sitio sin iluminación artificial más cercano al pueblo, que además cuenta con tomas de electricidad necesarias para la instalación) que debería ser la zona de brillo de cielo más bajo.

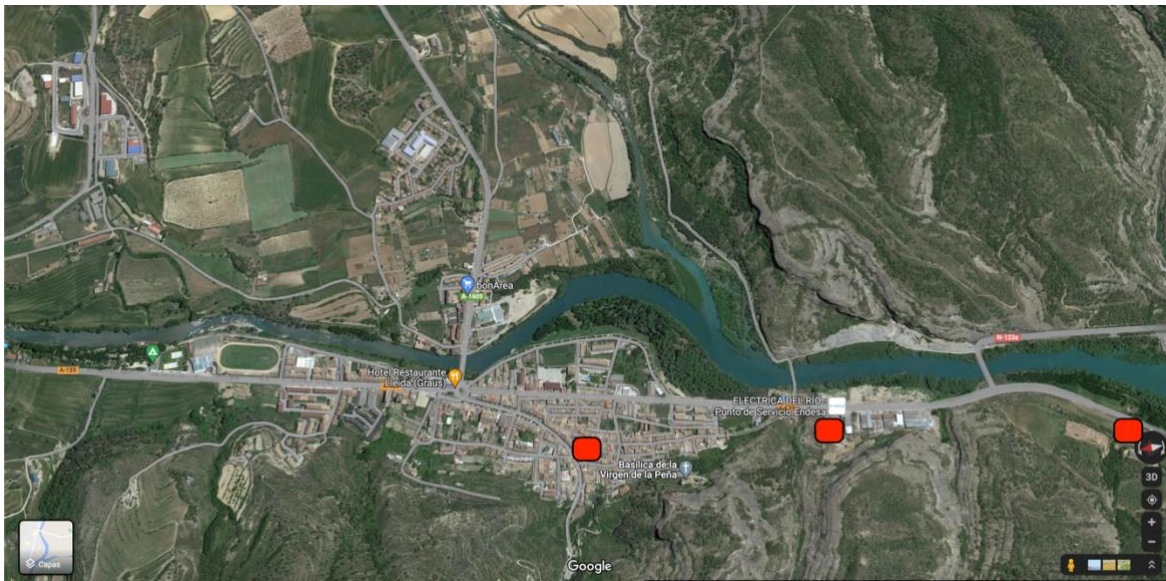


Ilustración 36: Ubicación de los 3 SQM de la Alternativa 1. Elaboración propia

Alternativa 2: Cinco puntos de medición continua.

La alternativa 2 es una extensión virtual de la 1. Esta opción resulta un poco más costosa que la primera y está diseñada para obtener una distribución más ajustada de la cantidad de CL que percibe un transeúnte cuando alza la vista hacia el cielo nocturno desde cualquier punto de Graus. Se mantienen los tres SQM de la alternativa 1 y además se añaden los dos siguientes:

- Piscina municipal
- Urbanización nueva en calle Isábena

Lo que se busca conseguir con estos nuevos SQM es mapear de forma más exacta la CL en el pueblo. Gracias al SQM situado en la piscina de Graus se generará una curva más representativa de la zona norte del pueblo y gracias al situado en la urbanización nueva se hará lo propio con la curva correspondiente asociada a la parte de Graus que se encuentra al otro lado del río Ésera.

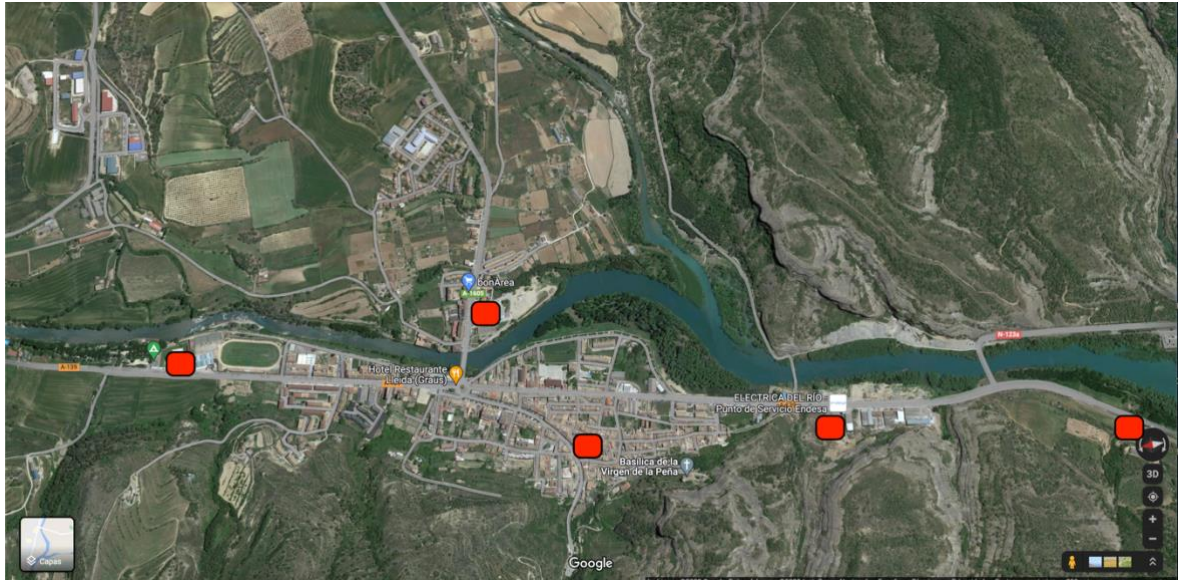


Ilustración 37: Ubicación de los 5 SQM de la Alternativa 2. Elaboración propia

Alternativa 3: Siete puntos de medición continua.

Es la opción que brinda el máximo de información de CL posible con SQM – LE instalados permanentemente. Con ella, el gráfico procesado por el ordenador central mostrará una radiografía segmentada en las distintas zonas de los niveles de CL en Graus. A los cinco dispositivos de la alternativa 2 se añaden dos más situados en:

- Barrio Coscolla (donde están el cuartel de la guardia Civil, la central de bomberos y el instituto de secundaria y bachillerato)
- Polígono industrial en carretera A – 2612

Se añade esta última alternativa porque tanto Coscolla como el polígono son dos zonas que quedan alejadas entre uno y tres kilómetros del núcleo urbano, por lo que podrían presentar cambios significativos en los niveles de CL. Por esta razón, si la intención del proyecto es tener los niveles de CL completamente mapeados al máximo exponente de detalle para todo el pueblo, es necesario optar por la alternativa de monitorización 3.

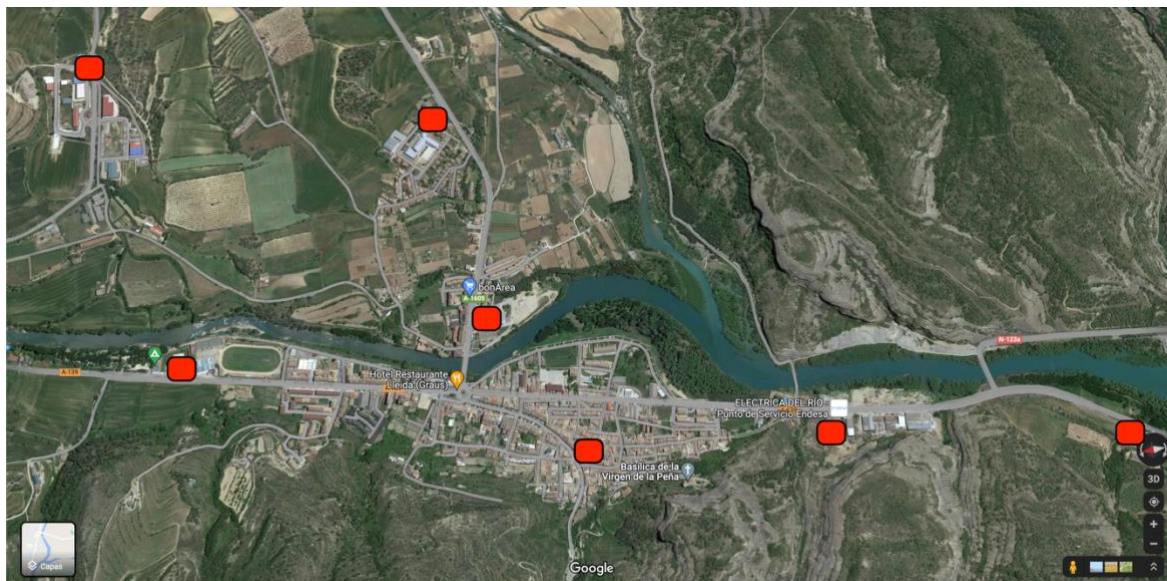


Ilustración 38: Ubicación de los 7 SQM de la Alternativa 3. Elaboración propia

Alternativa 4: Medición mediante vehículo.

Este tipo de monitorización es diferente, ya que no es un método de monitorización continuo. Esta alternativa está basada en el método conocido como RoadRunner y consiste en, de manera regular, atar un dispositivo a la parte superior de un vehículo (tiene que ser la superior para evitar errores sistemáticos de medida con las luces del coche) y dar vueltas por una serie de calles predeterminadas recopilando información a lo largo de toda la noche (Rubio, 2015). Una vez terminado el proceso de recopilación de datos, se extraerían y se analizarían en la central de control para comprobar el rango de valores de las medidas en búsqueda de posibles valores anómalos.

Es un método más costoso que los anteriores porque requiere la participación de al menos dos asalariados durante cada proceso de medición, además del alquiler de instrumentos, vehículo y accesorios necesarios para la toma de datos. Además, es un sistema de control que puede sufrir distorsión en sus resultados ya que puede haber ciertas calles donde el haz de luz de los focos incida directamente en la lente del medidor, lo que puede conllevar un valor de $\frac{mag}{arcsec^2}$ inusual por bajo. Por estas razones, la opción 4 solo sería recomendable en el caso de que no se quiera instalar un sistema permanente de medición en el pueblo y se considere que la alternativa 5 es demasiado costosa.

Alternativa 5: Medición con cámaras All – Sky

Por último, con ánimo de ampliar al máximo la oferta de sistemas de control, se olvida momentáneamente la elección del SQM – LE como aparato de medición y se propone una alternativa de medición mediante cámara all – sky como ATV o ASTMON (aparato de medida descartado por costoso en el apartado 5.4). Estas cámaras son dispositivos de captura de imagen de toda la cúpula celestial y no solo el cono de la vertical del aparato como los SQM (Rubio, 2015), lo que las hace potencialmente más exactas en la cuantificación de la CL de la zona. Dado que la compra de uno de estos dispositivos no es recomendable debido a su precio prohibitivo (a partir de 1000€, que con la calibración y software requeridos asciende a 2500€ en total), el proceso de medición para esta alternativa sería similar al de la 4. Un técnico visitaría el pueblo periódicamente con una única cámara all – sky alquilada y la colocaría en el punto más alto del pueblo; tras una noche de mediciones, se repetiría el proceso de extracción y análisis de la alternativa 4 en la central de control para comprobar el rango de valores de las medidas en búsqueda de posibles valores anómalos. Aún con la exactitud de las mediciones, esta alternativa sólo es recomendable en caso de que no se quiera instalar un sistema permanente de monitorización.

5.7. Evaluación de alternativas de sistema de control

Para la evaluación y recomendación del más indicado de estos sistemas de control, se han propuesto una serie de criterios de evaluación. A cada sistema se le ha asignado una nota en función del comportamiento del sistema de control asociado a cada métrica, con la suma de los resultados se decidirá el sistema óptimo:

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Precio	10	9	8	4	3
Precisión de datos	7	8	9	5	10
Resistencia a anomalías	10	10	10	0	0
Requiere instalación	0	0	0	10	10
Requiere mantenimiento	0	0	0	10	10

Tabla 30. Criterios de evaluación de sistema de control. Elaboración propia

El método de asignación de notas por criterio para las alternativas de la tabla 30 es el siguiente:

- Precio: Regresión lineal donde el sistema más barato (alternativa 1) marca el 10 y un sistema de control con dispositivos desestimados en el apartado 5.4 marca el 0.
- Precisión de datos: Nota asignada en función de puntos de medida y porcentaje de cielo cubierto por el aparato de medida.
- Resistencia a anomalías: Criterio si o no. Otorga un 10 si el sistema es capaz de filtrar anomalías (medición continua) y un 0 si no lo es.
- Requiere instalación: De nuevo criterio si o no. Otorga 10 si el sistema requiere instalación en el pueblo y un 0 si no la requiere.
- Requiere mantenimiento: Criterio muy ligado al anterior. De la misma manera, otorga 10 si el sistema requiere mantenimiento periódico y un 0 si no lo requiere.

Sin embargo, no todos los criterios de evaluación son igual de importantes a la hora de escoger el sistema. Por esta razón, aquí se presentan las ponderaciones que se ha otorgado a cada criterio para la elección final:

Precio	Precisión de datos	Resistencia a anomalías	Requiere instalación	Requiere mantenimiento
0.25	0.4	0.15	0.1	0.1

Tabla 31: Ponderaciones de criterios de evaluación de sistema de control. Elaboración propia

De manera que los resultados ponderados para cada una de las alternativas son los siguientes:

Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
6,8	6.95	7,1	5	6.35

Tabla 32: Puntuación final de los sistemas de control. Elaboración propia

Finalmente, la alternativa escogida para el control de la CL es la alternativa 3. El precio de compra e instalación de dispositivos es muy competitivo frente a las alternativas más costosas, pero no impide que la calidad de los datos proporcionados sea excepcional. Además, no es sensible a alteraciones puntuales como días nublados o festivos con cielo sobre-iluminado por las ferias o las decoraciones, ya que la medición es constante.

5.8. Proceso de calibración periódica y control

Una vez escogida la alternativa de medición, instalados los SQM e intercalibrados, se debe activar el contador temporal del proceso de calibración periódica de los aparatos para asegurar la fiabilidad de los gráficos obtenidos. Este proceso se llevará a cabo una vez cada dos años y se realizará siempre con el mismo procedimiento. Se alquilarán aparatos de

medida de oscuridad celestial en cúpula (Lightmeter) y se colocarán al lado de cada SQM. A continuación, se realizarán mediciones utilizando ambos sistemas; medidas que solo serán válidas si el cielo presenta condiciones de noche astronómica. Por último, mediante factores de conversión se representarán en un mismo gráfico las curvas de los SQM y Lightmeter para proceder al proceso de calibración.

Con el sistema instalado y calibrado sólo resta definir los valores de distorsión a partir de los cuales se deberán actuar en caso de que aumenten los niveles de CL. El objetivo del proyecto es minimizar el brillo del cielo, así que una vez se hayan medido el nivel medio de brillo de cada SQM a lo largo de las noches del primer mes de instalación, se impondrá cada valor medio como nuevo valor base. En caso que un dispositivo concreto mida brillo 0.5 unidades de su valor base, saltará la alarma de alerta: de manera que se planteará investigar la zona asignada a un SQM cuando el valor medido medio sea superior a los siguientes:

Medidor	Valor de notificación
Plaza	Valor base 1 - 0,5 (uds SQM)
Periferia	Valor base 1 - 0,5 (uds SQM)
Cementerio	Valor base 1 - 0,5 (uds SQM)
Piscina	Valor base 1 - 0,5 (uds SQM)
Calle Isabena	Valor base 1 - 0,5 (uds SQM)
Barrio Coscolla	Valor base 1 - 0,5 (uds SQM)
Polígono Industrial	Valor base 1 - 0,5 (uds SQM)

Tabla 33. Valores umbral de los distintos SQM. Elaboración propia

En caso de encontrar valores anómalos por bajos en uno de los gráficos, primero se debe comprobar que la medición haya sido realizada en noche astronómica (ya que, en cualquier otro caso, se considera medición distorsionada o inválida). Si después de detectar un valor anómalo se verifica que durante la noche de la medición el cielo se mantuvo despejado, es momento de recalibrar el SQM con un dispositivo externo. Si con el SQM recalibrado se siguen obteniendo medidas anómalas, se debe buscar la zona en cuestión y realizar un diagnóstico del alumbrado y proponer reparaciones o modificaciones para devolver el valor de SQM al objetivo establecido.

7. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Para calcular el impacto ambiental del proyecto se analizará el efecto en diversos ámbitos de medida. Se tendrán en cuenta los siguientes parámetros:

- Contaminación lumínica
- Emisiones contaminantes asociadas a la producción de energía
- Ciclo de vida y externalidades asociadas

7.1. Contaminación Lumínica

Para calcular la componente de CL del impacto ambiental del proyecto, se trabajará con la luz emitida por el sistema de alumbrado en la franja de los azules del espectro de ondas. El cálculo se hace mediante la ponderación de los lúmenes emitidos con sus correspondientes porcentajes de luz azul y calcular la diferencia entre antes y después de la reestructuración del alumbrado. La ecuación utilizada sería la siguiente:

$$Lm_{antes} - Lm_{ahora} = Impacto en CL$$

Donde:

- Lm_{antes} = Lúmenes emitidos [Lm] (pre – reforma) · % luz emitido
- Lm_{ahora} = Lúmenes emitidos [Lm] (post – reforma) · % luz emitido

Es cierto que, al calcular la CL con este método, se están obviando factores significativos de peso en la reducción de la CL como sería por ejemplo el factor FHS de las luminarias del pueblo. También es cierto que existen métodos de cuantificación de CL mediante aproximaciones matemáticas como el modelo de Miroslav Kocifaj; modelos que, lamentablemente, quedan fuera del alcance del proyecto por la complejidad de estos. La razón para la desestimación de la cuantificación de CL mediante el modelo de Miroslav es el siguiente: el modelo está basado en una serie de ecuaciones diferenciales indefinidas cuyos inputs, necesarios para realizar estimaciones, son prácticamente imposibles de calcular para el proyecto de Graus. Por eso, el método escogido para la estimación de impacto del proyecto es idóneo por viable.

Para la situación pre-reforma, existen dos tipos de luz predominantes (los HM y los de VSAP) que serán utilizados para calcular L_{antes} . Los otros tipos de luminaria se consideran de impacto en CL negligible por dos razones: la primera es que representan un porcentaje muy reducido del total de luminarias (5%<) y la segunda es que las potencias de las luminarias de tipos raros son reducidas (e.g. 3 W, 7W) por lo que la cantidad de lúmenes emitidos por estas resulta despreciable. La ilustración 40 que se muestra a continuación describe el proceso de

cálculo de la emisión de azules antes de la reforma:

	Total Lúmenes emitidos	% emitido por debajo de 500 nm	Emisión por debajo de 500 nm
HM	7528800	21%	1581048
VSAP	360400	7%	25228
Total			1606276

Ilustración 39: Emisión de azules antes de la reforma. Elaboración propia

El número de lúmenes emitidos en la franja de los azules antes de la reforma es 1.606.276.

Una vez sustituido el sistema de alumbrado, se debe ir con cuidado al repetir el cálculo. Con este nuevo sistema, las luminarias están reguladas en potencia y emiten distinta cantidad de lúmenes a lo largo de la noche. Por esta razón es necesario considerar en el cálculo las horas de luz en que la luminaria emite por debajo de sus lúmenes nominales. La ilustración 41 que se muestra a continuación describe el proceso de cálculo de la emisión de azules después de la reforma:

	% LUMENES SIN REDUCCION	% LUMENES CON REDUCCION	TOTAL	% RESPECTO DEL TOTAL	EMISION POR DEBAJO DE 500nm2
3000K	133105,05	108372	241477,05	13%	31392,02
4000K	53234,55	37171,2	90405,75	1%	904,06
Total					32296,07

Ilustración 40: Emisión de azules después de la reforma. Elaboración propia

El número de lúmenes emitidos en la franja de los azules después de la reforma es 32.296,07.

Utilizando los dos valores de emisiones de azules recuperamos la primera ecuación de este apartado:

$$Lm_{antes} - Lm_{ahora} = 1606276 - 32296,07 = 1573979,93 = \text{Impacto en CL}$$

Gracias al nuevo sistema de alumbrado, en Graus se emitirán 1.573.979,93 lúmenes en la franja de los azules menos que antes de la reforma.

7.2. Gases de efecto invernadero respecto al sistema antiguo

Para calcular la componente de emisiones del impacto ambiental del proyecto se utilizarán unidades de energía convertidas a emisiones contaminantes equivalentes. Dicha transformación se lleva a cabo utilizando el factor de conversión del CO_{2eq}, una unidad de medida que engloba todas las emisiones contaminantes y las pondera en función de su masa y su capacidad de retención de calor (potencial de calentamiento global). Esto permite obtener una estimación ajustada del efecto invernadero asociado a las emisiones de una actividad

productiva; es el fenómeno conocido como huella ecológica. Sin embargo, no es una medida perfecta ya que el CO_{2eq} pone énfasis en el calentamiento global, pero obvia en la ponderación de los gases diversos factores de impacto ambiental como el efecto en la lluvia ácida o en el sistema respiratorio de habitantes y fauna vinculado cada uno de los contaminantes emitidos. Aun así, la cuantificación de CO_{2eq} está reconocida como una de las formas de medición de emisión más representativas en la actualidad, por lo que será la que se utilizará para el cálculo del impacto ambiental de este proyecto.

Para el cálculo de la emisión de este proyecto, se utilizará la estimación de la CNMC (Comisión Nacional de Mercados y la Competencia) que entiende que la cantidad media de CO_{2eq} emitido a la atmosfera por cada kWh producido por la red eléctrica española en el año 2021 es de $259 \left[\frac{g}{kwh} \right]$. Este valor será multiplicado por la diferencia de consumos de energía y obtendremos la masa de gases de efecto invernadero que se deja de emitir. La ecuación utilizada sería la siguiente:

$$(E_{antes} - E_{ahora}) \cdot 259 = \text{Impacto de Gases de Efecto Invernadero}$$

Donde:

- E_{antes} = Energía consumida anualmente [kWh] (pre – reforma)
- E_{ahora} = Energía consumida anualmente [kWh] (post – reforma)

Estos valores los recuperamos de la ilustración 35 del apartado 4.4:

- $E_{antes} = 442.531,78 \text{ } [kWh]$
- $E_{ahora} = 93.505,96 \text{ } [kWh]$

Así, volviendo a la ecuación de cálculo de impacto:

$$(442.531,78 - 93.505,96) * 259 = 90,4 \text{ T } [CO_{2Eq}]$$

Gracias al nuevo sistema de alumbrado, cada año se dejarán de emitir 90,4 toneladas de gases de efecto invernadero. Para poner en perspectiva la cuantía de ahorro se encuentra que la cantidad de toneladas de CO_{2eq} emitidas per cápita en España que son 7.6. Esto quiere decir que nuestro alumbrado libera a la atmósfera de el equivalente a las emisiones de efecto invernadero de 11.89 personas en España. Dato que no hace más que recalcar el éxito de la actualización de la instalación.

7.3. Gases de efecto invernadero asociados a ciclo de vida

La última componente del impacto ambiental del proyecto es aquella relacionada con la confección, transporte, retirado y reciclaje de las luminarias; en definitiva, su ciclo de vida. El sistema de alumbrado propuesto está compuesto por dos elementos principales: la farola y el foco de luz LED; de manera que se comentará el proceso asociado a estos dos componentes. Este análisis, de ser completo y riguroso, debería tener en cuenta las siguientes etapas de vida:

- **Materias primas:** Las luminarias en general están hechas de aleaciones metálicas varias que suelen incluir aluminio y hierro. La extracción y el posterior proceso de refinado en altos hornos (o electrólisis en el caso de la transformación de Alúmina a Aluminio) de estos materiales implica un coste en emisiones contaminantes considerable. A su vez, los LED (hechos de semiconductores como el Galio) también fueron sometidos a proceso de purificación tras la separación del Galio de la bauxita en el refinamiento de aluminio.
- **Fabricación:** El impacto de este proceso es especialmente relevante para la luminaria; el proceso de conformado del soporte y brazo requiere fusión y stampa que son procesos intensivos en gasto de energía y emisión de contaminantes. Para el LED, por su parte, también se debe calentar en horno para su homogeneización, pero nunca gastando tanta energía ya que no se buscan temperaturas extremas.
- **Uso:** A lo largo de toda su vida útil, las emisiones asociadas a la luminaria son las emisiones relacionadas con la generación de energía utilizada para alumbrar.
- **Transporte:** Incluye todo el coste ambiental asociado a los desplazamientos de materia prima, producto acabado y producto obsoleto camino de la chatarra. El impacto de estos transportes es función de las distancias recorridas, por lo que no resulta sencillo estimar las emisiones reales.
- **Retirada y Reciclaje:** El reciclaje de semiconductores y aleaciones es distinto, pero en ambos casos implica procesos industriales de reacondicionado para uso intensivos en gasto de energía.

La información requerida para realizar un estudio de impacto de ciclo de vida es en general muy difícil de encontrar. Afortunadamente, tras contactar con la empresa Salvi Lighting Barcelona escogidas para el proyecto, se descubrió que ellos habían realizado este estudio de impacto de ciclo de vida para la luminaria CLAP S. Los resultados del informe de Salvi son los siguientes:

Indicador	MÓDULO "UPSTREAM"	MÓDULO "CORE"		MÓDULO "DOWNSTREAM"			Total
	A1 Materias primas	A2 Transporte a fabrica	A3 Proceso de manufactura	A4 Transporte al cliente	B Uso	C Fin de vida	
Cambio climático (Kg CO ₂ -eq ⁴)	40,8	0,06	0,32	1,49	1034	0,02	1076

Tabla 34: Análisis de Ciclo de Vida Luminarias Clap S I. Fuente: Salvi Lighting Barcelona

Indicador	MÓDULO "UPSTREAM"	MÓDULO "CORE"		MÓDULO "DOWNSTREAM"			Total
	A1 Materias primas	A2 Transporte a fabrica	A3 Proceso de manufactura	A4 Transporte al cliente	B Uso	C Fin de vida	
Cambio climático (%)	3,79	0,01	0,03	0,14	96,03	<0,01	100,00

Tabla 35: Análisis de Ciclo de Vida Clap S II. Fuente: Salvi Lighting Barcelona

Estos resultados quedan resumidos en el siguiente diagrama:

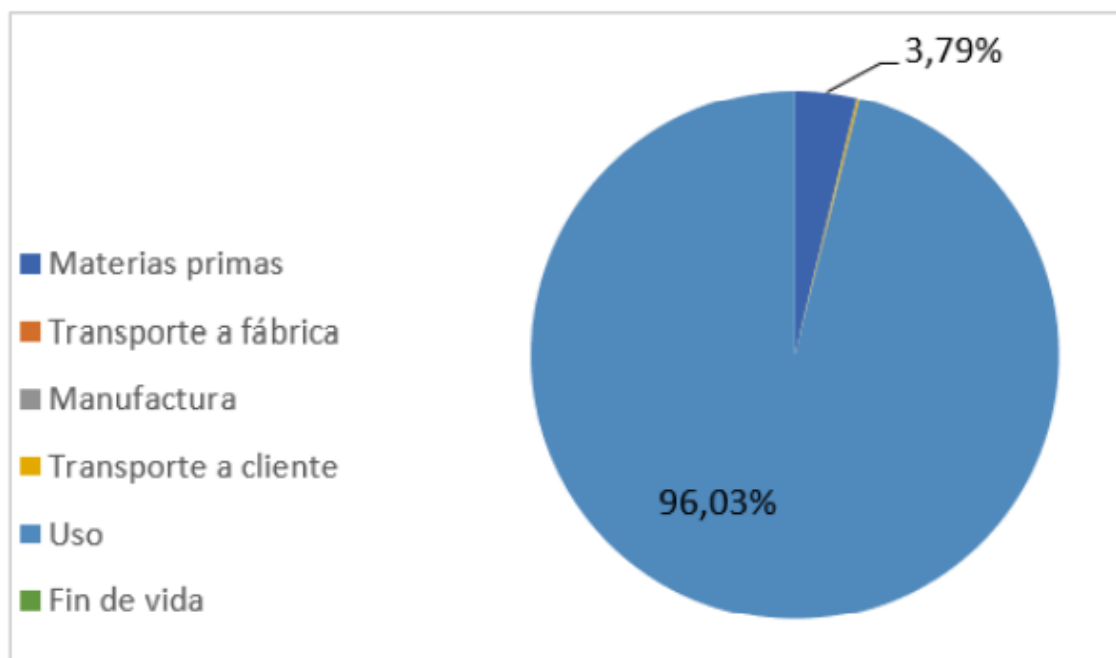


Ilustración 41: Análisis de Ciclo de Clap S III. Fuente: Salvi Lighting Barcelona

Según Salvi, las emisiones de gas de efecto invernadero a lo largo de toda la vida de una Clap S del nuevo sistema de alumbrado es 1,076 T. Para extrapolar estos valores a todo el alumbrado, se asumirá que el coste de materias primas, transporte, manufactura y fin de vida es constante, ya que las diferencias entre las luminarias son despreciables. Sin embargo, se estimarán las emisiones por uso mediante una relación de potencias que se pasa a explicar a continuación: las emisiones de uso son directamente proporcionales a la potencia de cada luminaria y las Clap S emplean lámparas de 53 [W]. Por otra parte, la potencia media de luminaria de nuestro alumbrado es 23 [W] y relacionando la potencia de la Clap con la potencia media se puede extrapolar el coste de todas las sustituciones de luminaria:

Coste medio de luminaria:

$$\begin{aligned} \text{Coste medio de luminaria en uso} &= \text{Coste de Clap S} \cdot \frac{23}{53} = 1034 * \frac{23}{53} \\ &= 448,72 \left[\frac{\text{Kg } CO_{2eq}}{\text{año}} \right] \cdot \frac{23}{53} = 448,72 \left[\frac{\text{T } CO_{2eq}}{\text{año}} \right] \end{aligned}$$

Utilizando este nuevo coste de uso para el cálculo de las emisiones de ciclo de vida obtenemos un impacto por luminaria de 0,491 [T CO_{2eq}]. Multiplicando el valor de emisiones por unidad por la cantidad de unidades nuevas instaladas se obtiene que la emisión total asociada a ciclo de vida es 518,5 [T CO_{2eq}].

Al comparar este coste con el ahorro anual que proporciona el nuevo alumbrado, se encuentra que el tiempo necesario para compensar las emisiones de la instalación es 5,73 [años]. Ahora bien, la vida útil de los LED instalados son más de 80.000 [h] de encendido, lo que equivale a 18,5 [años]. Por lo que el proyecto garantiza casi 13 [años] de ganancia neta en términos de emisiones de gas de efecto invernadero.

8. PRESUPUESTO

8.1. PRESUPUESTO DE INGENIERÍA

IMPORTE

Nº	Mano de obra	Precio [€]	Cantidad	Unidad de medida	Total [€]
1	Estudios previos	40	50	h	2000
2	Análisis situación actual	40	150	h	6000
3	Trabajo de campo y tratamiento de resultados	60	200	h	12000
4	Análisis del plan de mejora	40	200	h	8000
Nº	Desplazamiento y estadía				
1	Combustible	2,2	160	l	352
2	Estadía	50	5	noche	250
3	Necesidades básicas	30	5	noche	150
Nº	Software				
1	Relux Desktop	0	1	licencia	0
Presupuesto de ingeniería					28752
13% de gastos generales					3737,76
6% de beneficio industrial					1725,12
Total					34214,88
21% IVA					7185,12
Presupuesto por ejecución de contrata					41400

El presupuesto por ejecución de contrata asciende a la cantidad de CUARENTA Y UN MIL CUATROSCIENTOS EUROS

8.2. PRESUPUESTO DE OBRA**IMPORTE**

Nº		Precio [€]	Cantidad	Unidad de medida	Total [€]
Nº Sustitución de las luminarias existentes por tecnología LED					
1	CLAP S HOR AMBAR	147,7	380	u	56126
2	CLAP M HOR VDR_SPUW	237,7	133	u	31614
3	OCHOCENTISTA 72 TOP AMBAR	297,7	213	u	63410
4	CIRCUS LIRA AMBAR	370,95	168	u	62320
5	BASIC S HOR AMBAR	177,7	24	u	4265
6	BASIC S WALL M AMBAR	217,7	100	u	21770
7	OCHOCENTISTA SUS	297,7	38	u	11313
Nº Componentes necesarios para la instalación de luminarias					
1	Soporte OCHOCENTISTA	200	197	u	39400
Nº Nueva distribución para luminarias de FRAY DIEGO CERA					
1	Columna ATLAS 6m	310	11	u	3410
2	Material	7812,1	1	u	7812,1
3	Camión cesta	38,86	56	h	2176,16
4	Camión grúa	43,03	56	h	2409,68
5	Electricista Oficial 1ª	19,1	36	h	687,6
6	Peón	19,1	56	h	1069,6
7	Ayudante electricista	17,21	40	h	688,4
8	Costes indirectos	8259,4	3%	h	247,782

Nº Nueva distribución para luminarias de ANGEL SAMBLANCAT					
1	Material	4890,7	1	u	4890,7
2	Camión cesta	38,86	24	h	932,64
3	Camión grúa	43,03	24	h	1032,72
4	Electricista Oficial 1ª	19,1	14	h	267,4
5	Peón	19,1	24	h	458,4
6	Ayudante electricista	17,21	20	h	344,2
7	Costes indirectos	5028	3,00%	h	150,84
Nº Nueva distribución para luminarias de VALLE DE ARÁN					
1	Columna ATLAS 2 brazos 8,5m	380	1	u	380
2	Material	2789,21	1	u	2789,21
3	Camión cesta	38,86	8	h	310,88
4	Camión grúa	43,03	8	h	344,24
5	Electricista Oficial 1ª	19,1	4	h	76,4
6	Peón	19,1	8	h	152,8
7	Ayudante electricista	17,21	4	h	68,84
8	Costes indirectos	4122,37	3%		123,671
Nº Eliminación de luminarias					
1	Material	5270,5	1	u	5270,5
2	Retroexcavadora	70	8	h	560
3	Electricista Oficial 1ª	19,1	20	h	382
4	Peón	19,1	40	h	764
5	Ayudante electricista	17,21	30	h	516,3
6	Obra pública Oficial 1ª	18,84	25	h	471
7	Peón	16,35	40	h	654
8	Costes indirectos	8617,8	3%		258,534

Presupuesto de ejecución material	317113,6
13% de gastos generales	41224,77
6% de beneficio industrial	19026,82
2% de honorarios por ingeniería	6342,27
Total	383707,46
21% IVA	80578,57
Presupuesto por ejecución de contrata	464286,03

El presupuesto por ejecución de contrata asciende a CUATROSCIENTOS SESENTA Y CUATRO MIL DOSCIENTOS OCHENTA Y SEIS EUROS CON TRES CÉNTIMOS

8.3. Análisis de inversión

Tasa de interés	10%
Tasa de descuento	3%
Coste actual	92.931,67 €
Coste a futuro	19.636,25 €
Ahorro anual	73.295,42 €
Inversión	464.286,03 €

Proyecto de renovación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ahorro anual		73.295,42 €	75.562,29 €	77.899,27 €	80.308,52 €	82.792,29 €	85.352,88 €	87.992,66 €	90.714,08 €	93.519,67 €
Inversión	464.286,03 €									
Total pagos	-464.286,03 €	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo tesorería	-464.286,03 €	73.295,42 €	75.562,29 €	77.899,27 €	80.308,52 €	82.792,29 €	85.352,88 €	87.992,66 €	90.714,08 €	93.519,67 €
Flujo tesorería acumulado	-464.286,03 €	-390.990,61 €	-315.428,32 €	-237.529,05 €	-157.220,53 €	-74.428,24 €	10.924,64 €	98.917,29 €	189.631,37 €	283.151,04 €
Flujo tesorería actualizado	-464.286,03 €	66.632,20 €	62.448,17 €	58.526,87 €	54.851,80 €	51.407,50 €	48.179,47 €	45.154,15 €	42.318,79 €	39.661,47 €

VAN	4.988,48 €
TIR	11%
PAYBACK	5,87

El análisis de la inversión de la renovación del alumbrado público del municipio de Graus es rentable. Tras el cálculo de los indicadores de comparación más importantes se observa como el VAN sale positivo con un valor de 4.988,48 €, la TIR está por encima de la tasa de interés considerada con un valor del 11% y el período de retorno es de 5,87 años.

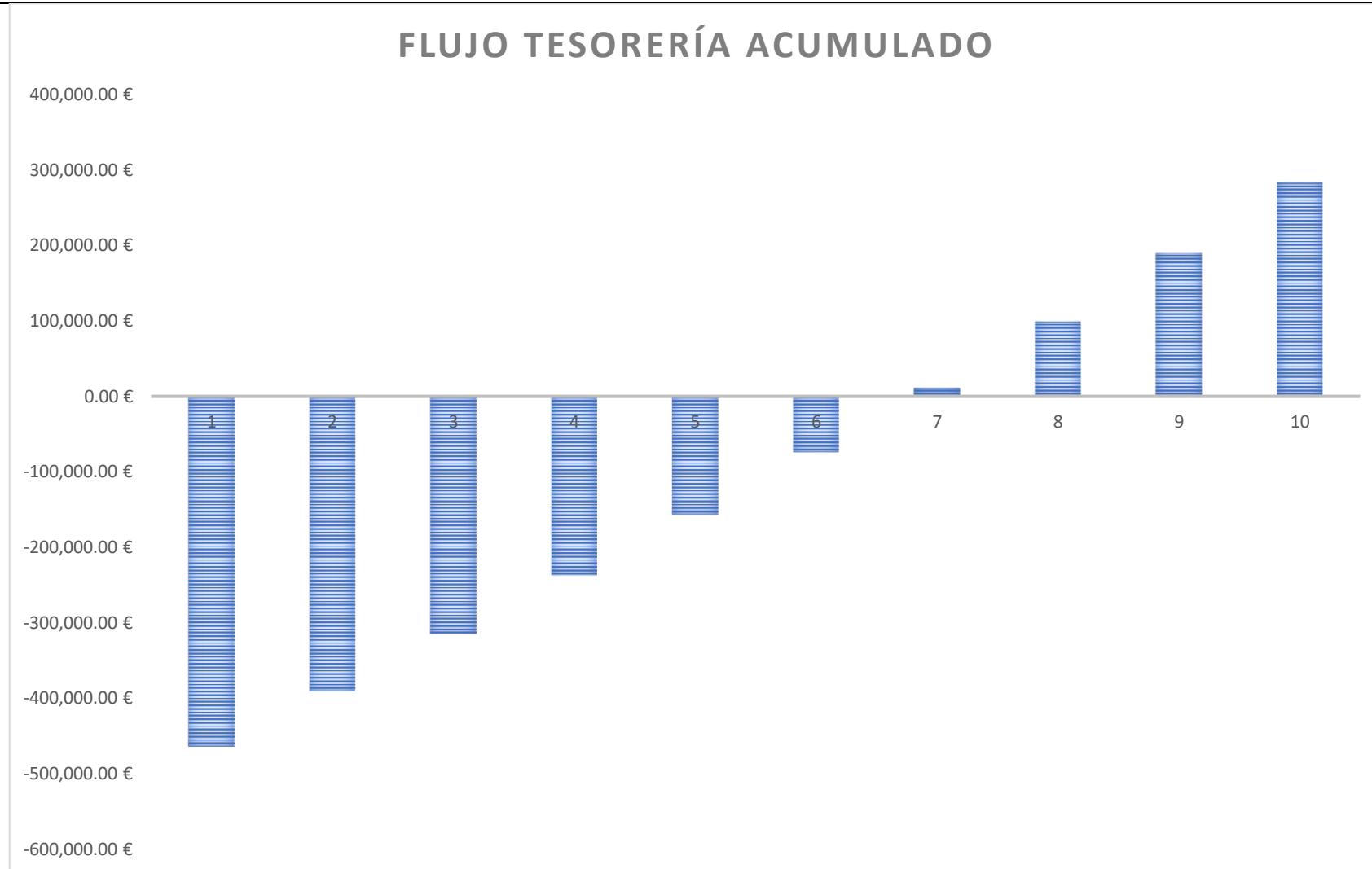


Ilustración 42. Flujo tesorería acumulado. Elaboración propia

9. CONCLUSIONES

Para concluir este proyecto se evaluará el grado de cumplimiento de los objetivos impuestos al principio a partir de los criterios de evaluación definidos. Dicha evaluación se llevará a cabo a partir de una estimación individual del impacto del proyecto en las variables de los criterios de valoración definidas en el punto 2.3 del informe.

Para comenzar la evaluación se analizan los criterios de valoración de aumento de eficiencia energética y reducción de impacto ambiental.

I. Potencia total instalada:

Esta es la variable de impacto ambiental más representativa a la hora de cuantificar el ahorro energético e impacto ambiental. Las cifras clave en la valoración de la variable son las siguientes:

Potencia previa a la reforma: 102,53 [kW]

Potencia posterior a la reforma: 26,9 [kW]

Disminución de potencia instalada total: 75,63 [kW]

La potencia instalada se ha reducido en un 73,77%, lo cual excede en un 3.77% la estimación de reducción inicial basada en proyectos similares del proyecto Rebeca. Las implicaciones ambientales de este ahorro, explicadas más al detalle en el apartado 7.2 de impacto ambiental, son un ahorro de 349.163,62 [kWh]. Este ahorro implica una disminución de emisiones equivalentes de CO₂ de 90,4 [T]; lo cual es el equivalente a las emisiones de todas las actividades de 11,89 personas en un año en España.

II. Eficiencia energética de las zonas de medición:

La función de esta variable es analizar y entender qué zonas del pueblo generan los mayores despilfarros de energía del pueblo para asegurar que estas zonas han sido tratadas con especial atención a la hora de realizar los ajustes del sistema de alumbrado. La situación de las zonas de medición previa a la reforma era la siguiente:

Calificación energética	Áreas
A	27,00
B	37,00
C	10,00
D	7,00
E	11,00
F	23,00
G	39,00
Total	154,00

Tabla 36: Eficiencia de las áreas de medición antes de la reforma. Elaboración propia

De la tabla 36 se desprende que la eficiencia de las zonas está concentrada en los extremos; hay una gran cantidad de zonas que presentan eficiencia buena o óptima, pero también hay una gran cantidad de zonas que presentan eficiencia mala o deplorable. Una vez reformado todo el sistema, la distribución de áreas quedó de la siguiente manera:

Calificación energética	Áreas
A	154,00

Tabla 37: Eficiencia de las áreas de medición después de la reforma. Elaboración propia

Como se puede apreciar de la tabla 37, después de la reforma no quedó un solo área con eficiencia energética no ideal. Con estos resultados, se reafirma el beneficio ambiental que trae consigo la nueva instalación.

III. Coste económico en iluminación

Coste previo a la reforma: 92.931,7€

Coste posterior a la reforma: 19.636,25 €

Disminución de gasto en alumbrado: 73.295,42 €

Las ventajas que presenta el proyecto de Graus en cuanto a emisiones e impacto ambiental también se ven reflejadas en la factura municipal de electricidad. Gracias al ahorro anual de 73.295,42 € el periodo de retorno se encuentra en 5,87 [años] y, considerando la vida media de la instalación LED de unos 12 [años], el proyecto representa 6 años de beneficio neto hasta la primera sustitución de lámparas.

Ahora comentan los criterios de valoración de disminución de CL

I. Espectro de longitud de onda medio

Emisión total de azules previa a la reforma: 1.606.276 [Lm]

Emisión total de azules posterior a la reforma: 32.296 [Lm]

Esta es la variable más representativa de cuantificación de disminución de CL. La disminución de CL calculada por emisión de azules es de -1.573.979 [Lm], lo cual representa una disminución de un 97,98%; cifra que excede las expectativas de control de CL formadas al principio del proyecto.

II. Cantidad de luz emitida en hemisferio superior

Esta variable no es cuantificable. La forma de asegurar el cumplimiento de objetivo de esta variable ha sido la sustitución de todas las luminarias por las CLAP S con FHS menor a 0,1%. Tras la reforma, las únicas luminarias que aún emiten luz por encima del plano horizontal son los proyectores ornamentales de la basílica de la peña. Sin embargo, el impacto de estos 30 focos por su emisión en hemisferio superior es despreciable respecto a la cantidad de lúmenes emitidos hacia el cielo antes de la reforma. Además, hay que tener en cuenta que la iluminación decorativa de todo el pueblo tiene un temporizador que la desactiva todos los días a las 00.00. Por esta razón, el FHS medio de todas las luminarias del pueblo es igual al FHS de una CLAP S durante la mayor parte de la noche. Lo que quiere decir que entre las 00:00 y la hora en que se apaga el alumbrado, la emisión total del pueblo hacia el hemisferio superior es inferior al 0.1%.

Valoración seguridad

I. Seguridad

Es una variable de comprobación de cumplimiento legal del nuevo sistema de alumbrado. Como se puede comprobar en los resultados de Relux del apartado 4, y del Anexo 3 para el resto de las tipologías, el proyecto se ha ceñido a la más estricta legalidad vigente. En todos los casos se cumplen con margen de seguridad los límites fijados de iluminación media e iluminación mínima. Además, todas las zonas que se encontraban en situación atípica de iluminación han sido reestructuradas para corregir este problema: en las zonas sin iluminación y en las zonas infra-iluminadas se ha aumentado o redistribuido la cantidad de lúmenes emitidos para alcanzar el nivel mínimo de iluminación en todo punto, además del nivel medio de iluminación en toda la calle. En las zonas sobre-iluminadas se ha buscado llevar la

iluminación al mínimo legal para evitar gasto energético innecesario. Gracias a las acciones llevadas a cabo, todas las zonas del pueblo están ahora correctamente iluminadas

Los resultados de la evaluación de las variables definidas exceden las expectativas generadas al principio del proyecto. Lo cual quiere decir que los objetivos impuestos al principio del proyecto han sido cumplidos con creces. No solo se reducirá significativamente la huella ambiental del pueblo; también, gracias al nuevo sistema de alumbrado, los transeúntes podrán disfrutar de una mejoría en la claridad celestial nocturna sin precedentes.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer al profesor Manuel García Gil por el apoyo y la confianza desde el primer momento en el que se planteó este proyecto. Por su entrega y dedicación para que el trabajo fuese exitoso y siempre priorizando que fuese de una manera notable o inclusive excelente.

En segundo lugar, agradecer al señor Aguilar, la señora Triana, señor Aguilar hijo, el señor Lafuente y la señora Piedrafita, que nos apoyaron de forma incondicional durante todo el proceso desde el día que entramos en la ETSEIB. Siempre han tratado de ayudarnos a convertirnos en la mejor versión de nosotros mismos y han sido un pilar fundamental en la obtención del título de ingeniero industrial.

Finalmente, agradecer a Asensi, Cavero, Sabater, Lara, Álvarez y Ródenas por los 4 años de experiencias, aprendizaje y, sobre todo; amistad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(Barcelona, Diputació de, 2020). DIPUTACIÓ DE BARCELONA. *12a edició del Cercle de comparació intermunicipal d'eficiència energètica en l'enllumenat públic*. [en línea]. 2020 [Revisado en 02-mar-2022]. Disponible en: <https://www.diba.cat/es/web/mediambient/cercle/enllumenat-public>

(CONAMA, 2014). CONGRESO NACIONAL DEL MEDIOAMBIENTE. *¿Cómo ahorrar en el alumbrado público de pequeños municipios rurales de España y mejorar su eficiencia energética?*. [en línea]. 2014. [Revisado en 02-mar-2022]. Disponible en: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711454.pdf>

(Comité Español de Iluminación, 2018). COMITE ESPAÑOL DE ILUMINACIÓN. *Posibles Riesgos de la iluminación LED*. [en línea]. 2018. [Revisado en 02-mar-2022]. Disponible en: https://www.ceisp.com/fileadmin/user_upload/Riesgos-iluminacion-led.pdf

(Garcia Gil, 2015). GARCIA GIL, Manuel. *Predicción del impacto ambiental de la contaminación lumínica. Propuesta de una metodología para proyectos luminotécnicos de ingeniería*. 2015

(Rodríguez, 2021). RODRÍGUEZ RINCÓN, María Inmaculada. *La luz azul en la salud visual: Efectos de su abuso y soluciones*. 2021

(Sanchez de Miguel, 2010). SANCHEZ DE MIGUEL A, ZAMORANO J, PILA-DÍEZ B, RUBIO JIMÉNEZ J, RUIZ CARMONA R, RODRÍGUEZ HERRANZ I, GONZÁLEZ PÉREZ A. *Contaminación lumínica en España*. 2010

(Rubio, 2015). RIBAS RUBIO S,J. *Caracterització de la contaminació lumínica en zones protegides i urbanes*. 2015

(INE, 2021). INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Cifras oficiales de población de los municipios españoles: Revisión del padrón municipal*. [en línea]. 2021. [Revisado en 10-mar-2022]. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177011&menu=resultados&idp=1254734710990

(Vera, 2017). SÁNCHEZ DE VERA, Ángel. *Inventario, Consumo de energía y potencial de ahorro del alumbrado exterior municipal en España*. [en línea]. 2017. [Revisado en 17-mar-2022]. Disponible en: <https://www.idae.es/articulos/inventario-consumo-de-energia-y-potencial-de-ahorro-del-alumbrado-exterior-municipal-en>

(Austrian Energy Agency, 2018). AUSTRIAN ENERGY AGENCY. *Iluminación LED exterior. Guía práctica: diseño y criterios de compra*. [en línea]. 2018. [Revisado en 4-abr-2022]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/ahorro_y_eficiencia_energetica/alumbrado_exterior/guia_de_iluminacion_exterior_premium_light_pro.pdf

(Deco, 2017). DECO, Fernando. *La utilidad de las curvas fotométricas*. [en línea]. 2017. [Revisado en 07-may-2022]. Disponible en: https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/lu139_deco_curvas_fotometricas.pdf

(Montserrat, 2012). MORENTE MONTSERRAT, Cristina. *Elaboración del material docente actualizado para curso on-line de iluminación*. [en línea]. 2012. [Revisado en 22-mar-2022]. Disponible en: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/>

(Nievas Rosillo, y otros, 2014). NIEVAS ROSILLO M, ZAMORANO CALVO J. *PySQM Info*. [en línea]. 2014. [Revisado en 22-abr-2022]. Disponible en: https://guaix.fis.ucm.es/pysqm_info

(GENCAT, 2012). GENERALITAT DE CATALUNYA. MEDIO AMBIENTE. *Zonas según el grado de contaminación lumínica*. [en línea]. 2012. [Revisado en 09-may-2022]. Disponible en: https://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_luminica/mapa-de-proteccio-contra-contaminacio-luminica/zones_proteccio_contaminacio_luminica/

(García i Boix, 1999). GARCÍA FERNÁNDEZ J, BOIX ARAGONÈS O. *Luminotecnia. Iluminación de interiores y exteriores*. [en línea]. 1999. [Revisado en 06-abr-2022]. Disponible en: <https://recursos.citcea.upc.edu/llum/>. ISBN: 84-600-9647-5.

(Wikipedia, 2022). WIKIPEDIA. *Graus*. [en línea]. 2022. [Revisado en 17-abr-2022]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Graus>

(Wikipedia, 2022). WIKIPEDIA. *Reloj astronómico*. [en línea]. 2022. [Revisado en 27-may-2022]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Reloj_astronómico

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- [1] EUROSTAT STATISTICS EXPLAINED. *Carbon dioxide equivalent*. [en línea]. 2001. [Revisado en 15-may-2022]. Disponible en : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent
- [2] GENERALITAT DE CATALUNYA. MEDIO AMBIENTE. *Factor de emisión de la energía eléctrica : el mix eléctrico*. [en línea]. 2022. [Revisado en 16-may-2022]. Disponible en: https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/
- [3] CENTRO DE CREACIÓN Y CULTURA DEL PIRINEO. ESPACIO PIRINEOS de GRAUS. *El concepto Espacio Pirineos*. [en línea]. 2012. [Revisado en 7-abr-2022]. Disponible en: <https://espaciopirineos.com/2012/02/29/el-concepto-espacio-pirineos/>
- [4] UNIHEDRON. PORTABLE TOOLS FOR PHYSYCS AND ASTRONOMY. [en línea]. Disponible en: <http://www.unihedron.com>
- [5] RELUX DESKTOP. Disponible en: <https://reluxnet.relux.com/es/relux-desktop.html>
- [6] CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE. JUNTA DE ANDALUCÍA. *Guía técnica de adaptación de las instalaciones de alumbrado exterior al decreto 357/2010 de 3 agosto*. [en línea]. 2011. [Revisado en 8-may-2022]. Disponible en: <https://www.famp.es/export/sites/famp/.galleries/documentos-lab-eficiencia-energetica-guias/GUIA-11.pdf>
- [7] FUNDACIÓN DE LA ENERGÍA DE LA COMUNIDAD DE MADRID. *Guía sobre la tecnología LED en el alumbrado*. [en línea]. 2018. [Revisado en 8-may-2022]. Disponible en: <https://www.iluminet.com/press/wp-content/uploads/2018/07/Guia-sobre-Tecnologia-LED-en-el-Alumbrado-fenercom-2015.pdf>
- [8] IDAE. *Requerimientos técnicos exigibles para luminarias con tecnología LED de alumbrado exterior*. [en línea]. Revisión 2020. [Revisado en 8-may-2022]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/ahorro_y_eficiencia_energetica/alumbrado_exterior/requerimientos_tecnicos_exigibles_alumbrado_exterior_dic-2020.pdf
- [9] Jefatura de Estado (2.008) “Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07”, Boletín Oficial del Estado (BOE), miércoles 19 de noviembre 2.008 (279), pp. 45.988 – 46.057

- [10] SALVI LIGHTING BARCELONA. Disponible en: <https://www.salvi.es>
- [11] MAYJA S/L. Disponible en: <https://mayja.es>
- [12] ARTECOIN. SERVICIO PEMIS. Disponible en: <https://artecoin.es>
- [13] FEDER. FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/95/el-fondo-europeo-de-desarrollo-regional-feder->