

Implantación de un sistema de iluminación eficiente en pequeñas ciudades

José Revaliente Revuelta

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Smart Cities

David Crespo García

Víctor Monzón Baeza

30/05/2022



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Implantación de un sistema de iluminación eficiente en pequeñas ciudades</i>
Nombre del autor:	<i>José Revaliente Revuelta</i>
Nombre del consultor/a:	<i>David Crespo García</i>
Nombre del PRA:	<i>Víctor Monzón Baeza</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	<i>05/2022</i>
Titulación:	<i>Plan de estudios del estudiante</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación</i>
Idioma del trabajo:	<i>Castellano</i>
Palabras clave	<i>Contaminación lumínica; Iluminación tradicional; Iluminación LED; Dispersión lumínica.</i>
<p>Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): <i>Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.</i></p>	
<p>Actualmente, la iluminación pública representa alrededor del 30% de la factura energética de un ayuntamiento. Esto es así porque la forma de operación de esta iluminación no es la más eficiente, ni en términos de potencia ni en términos de contaminación lumínica. Debido a esto muchos ayuntamientos se ven obligados a reservar recursos económicos a iluminación pública que podrían dedicar a otras mejoras de la ciudad si se hicieran diversos cambios en el sistema de iluminación.</p> <p>Con esto en mente se plantea el estudio de la potencia eléctrica consumida por una ciudad pequeña y de la capacidad de reducción de dicha potencia utilizando otros sistemas de iluminación alejados de la iluminación pública tradicional. Para ello se propondrá un proyecto de sustitución de las farolas convencionales por otras que permitan el uso de bombillas LED para poder regular con mayor facilidad el nivel de iluminación adecuado en cada zona de la ciudad. De esta manera, también se pretende mejorar la directividad de la luz y reducir la contaminación lumínica.</p> <p>El resultado final debe ser la evidencia de que replanteando el sistema de iluminación a usar en una ciudad es posible disminuir el gasto de potencia eléctrica del ayuntamiento manteniendo o mejorando la calidad de alumbrado de las vías públicas.</p>	

Abstract (in English, 250 words or less):

Currently, public lighting comprises more than 30% of a town's energy bill. This is because the lighting operation is not the most efficient in terms of power or in terms of light pollution. Consequently, some towns are spending part of their budget on public lighting instead of serving other city improvements that would be possible if some changes in the public lighting system were made.

With this being present, a study of a small town's electric power consumption and its capacity to reduce its power by means of other lighting systems is presented. The project proposes an upgrade from traditional streetlights to LED ones to be able to control the level of lightning easily according to the area in the city. This way also light directivity is improved and light pollution is reduced.

The final result is proof that it is possible to reduce the power consumption of a city and maintain or improve the lighting quality on the streets.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	1
1.3 Enfoque y método seguido.....	2
1.4 Planificación del Trabajo	3
1.5 Breve resumen de productos obtenidos	5
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria.....	5
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. Sistemas de iluminación.....	8
2.1.1. Sistemas tradicionales	8
2.1.2. Sistemas no tradicionales: LED.....	10
2.2. Comunicación en sistemas de iluminación.....	11
2.2.1. Sistemas sin ningún tipo de comunicación	11
2.2.2. Comunicaciones cableadas.....	11
2.2.3. Comunicaciones inalámbricas	12
2.3. Tipos de sistemas de regulación y control.....	13
2.3.1. Sistemas de regulación bajo demanda.....	13
2.3.2. Sistemas de regulación a partir de la luz natural	14
2.3.3. Sistemas de regulación mediante sensores de presencia.....	14
2.3.4. Regulación mediante sistema centralizado.....	15
2.3.5. Protocolos modulación LED.....	15
2.3.5.1. Protocolo 1-10V.....	16
2.3.5.2. Protocolo DALI.....	16
2.4. Proyectos exitosos	17
2.4.1. Guadalajara, España	17
2.4.2. Amberes, Bélgica	17
2.4.3. Balatonfüred, Hungría	18
2.4.4. Sonsonate, El Salvador	18
2.5. Normativa iluminación y comités	18
2.5.1. Normativa de alumbrado público exterior (REEIAE)	18
2.5.2. AEN/CTN 178 “Ciudades Inteligentes”	19
2.5.3. Plan Nacional de Territorios Inteligentes	20
3. DESCRIPCIÓN DEL CASO	21

3.1. Ubicación.....	21
3.2. Explicación y problemática general	21
3.3. Cuadro de Mando (ABLIC1)	23
3.3.1. Funcionamiento de ABLIC1	24
3.3.2. Luminarias	25
3.3.3. Ventajas e inconvenientes.....	26
3.3.3.1. Contaminación lumínica	27
3.3.4. Cálculos de consumo eléctrico anual	28
4. SUSTITUCIÓN DE LUMINARIAS	31
4.1. Consideraciones generales	31
4.2. Sustitución de luminarias de vapor de sodio por luminarias LED	32
4.3. Cálculos de consumos de nuevas luminarias.....	34
4.4. Ventajas e inconvenientes	35
4.4.1. Contaminación lumínica	36
5. REGULACIÓN DE LUMINARIAS.....	38
5.1. Consideraciones generales de DALI	38
5.2. Elementos necesarios para poder utilizar DALI en el caso de uso	39
5.3. Propuesta de regulación de intensidad lumínica.....	41
5.4. Cálculos de consumos utilizando sistema DALI	42
5.5. Ventajas e inconvenientes	44
6. LÍNEAS FUTURAS Y MEJORAS	45
6.1. Realización de estudio económico.....	45
6.2. Diseño/programación del sistema DALI para ABLIC1	46
6.3. Extensión del estudio para el resto de los cuadros de mando del municipio.....	47
7. CONCLUSIONES	48
8. GLOSARIO.....	51

9. BIBLIOGRAFÍA.....	52
10. ANEXOS	55
10.1. Cálculos de porción de consumo del sistema DALI en comparación con el sistema LED sin regulación y el sistema original	55

Lista de imágenes

IMAGEN 1 - MAPA SATELITAL DE ABLITAS. FUENTE: GOOGLE MAPS	21
IMAGEN 2 - UBICACIÓN CUADRO DE MANDO ABLIC1. FUENTE: GOOGLE MAPS	23
IMAGEN 3 - INTERIOR DEL CUADRO DE MANDO ABLIC1. FUENTE: AYUNTAMIENTO DE ABLITAS	25
IMAGEN 4 - FAROLAS TIPO FUNCIONAL (IZQUIERDA) Y GLOBO (DERECHA). FUENTE: AYUNTAMIENTO DE ABLITAS	28
IMAGEN 5 - FAROLAS TIPO FUNCIONAL Y GLOBO: DETALLE. FUENTE: AYUNTAMIENTO DE ABLITAS.....	28
IMAGEN 6 - DISEÑO LUMINARIA FILUX F5242 INVERTIDA. FUENTE: AMAZON	37
IMAGEN 7 - CABLEADO BÁSICO SISTEMAS DALI. FUENTE: BLOG.LEDBOX.ES	38
IMAGEN 8 - ESQUEMA DRIVER DALI RE DA2 LE3. FUENTE: DINUY.COM	40
IMAGEN 9 - PERFIL DE DEMANDA DIARIO SISTEMA LED REGULADO	43
IMAGEN 10 - COMPARATIVA DE DEMANDAS DE POTENCIA DIARIAS DE LOS TRES SISTEMAS.....	49

Lista de tablas

TABLA 1 - CARACTERÍSTICAS LUMINARIAS ABLIC1. FUENTE: AYUNTAMIENTO DE ABLITAS.....	26
TABLA 2 - POTENCIAS LUMINARIAS ABLIC1	29
TABLA 3 – EFICACIAS DE LUMINARIAS. FUENTE: ITC-EA-04	31
TABLA 4 - POTENCIAS LUMINARIAS LED ABLIC1	35
TABLA 5 - COSTES DE ELEMENTOS SISTEMA DE REGULACIÓN DE LUMINARIAS.....	46

Lista de ecuaciones

ECUACIÓN 1 - RELACIÓN ENTRE ENERGÍA, POTENCIA Y TIEMPO.....	29
ECUACIÓN 2 - EFICIENCIA DE UNA LUMINARIA	32
ECUACIÓN 3 - CONSUMO ANUAL ABLIC1 CON LUMINARIAS LED.....	35
ECUACIÓN 4 - PORCIÓN DE CONSUMO SISTEMA LED VS SISTEMA ORIGINAL.....	36
ECUACIÓN 5 - EXPRESIÓN SECCIÓN DE UN CABLE	40
ECUACIÓN 6 - SECCIÓN MÍNIMA DE CABLE CONTROL DALI.....	41
ECUACIÓN 7 - CONSUMO ELÉCTRICO DIARIO SISTEMA LED REGULADO	43

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

En la actualidad existen muchas ciudades (tanto grandes como pequeñas) del territorio español que siguen utilizando mecanismos de iluminación de vía pública tradicionales tales como las lámparas de vapor.

Este tipo de tecnologías de iluminación tiene una eficacia y eficiencia muy mejorables gracias a los avances de las últimas décadas en la materia. El objetivo es estudiar las nuevas tecnologías de iluminación que se puedan usar en vías públicas y entender hasta qué punto es rentable su aplicación en una ciudad pequeña.

Para ello es interesante centrarse en el punto de vista de una Smart City original. Estas son ciudades que adoptan todo un conjunto de proyectos para solucionar problemas, principalmente de sostenibilidad, que surgen en dichas ciudades (ESTRADA, 2021). En este contexto la eficiencia energética es uno de los pilares fundamentales.

Este tipo de estrategias inteligentes para mejorar ciertos aspectos de una ciudad (en este caso, de cara a iluminación pública y eficiencia energética) se han ido incorporando durante la última década en grandes ciudades, tales como en Barcelona y Valencia (en algunos de sus barrios o zonas concretas) (Barcelona, 2022) (Yusta, 2019). No obstante, sigue siendo una idea que está alejada de los proyectos actuales de pequeñas ciudades o pueblos periféricos. Estas pequeñas ciudades suelen tener un presupuesto anual mucho más reducido que las grandes, así que en estos casos es mucho más interesante desarrollar proyectos que permita, a la larga, un ahorro energético prolongado.

La urgencia del uso eficiente de la energía es una realidad del mundo actual. Esto se puede apreciar analizando el aumento de la factura eléctrica, tanto de particulares como de empresas, que se ha visto en toda España durante los últimos años. Además, durante la primera mitad del 2022 y debido a la escasez en suministro de gas, se ha producido un aumento todavía mayor en el precio del kilovatio-hora (Garrett, 2022). Todo esto puede llevarnos a una crisis energética global en los próximos años o décadas, cosa que hace todavía más imperativa la necesidad de aplicar soluciones tecnológicas en el sector energético que sean sostenibles y eficientes en el largo plazo.

1.2 Objetivos del Trabajo

Una vez comentado el contexto inicial se procede al listado de los principales objetivos que tendrá este trabajo.

- Estudio de los sistemas convencionales de iluminación pública, haciendo hincapié en términos de eficiencia energética y contaminación lumínica.
- Estudio de sistemas alternativos de iluminación pública y elección del más adecuado.
- Demostración de las ventajas e inconvenientes de ambos tipos de sistemas (tradicionales y más eficientes).
- Propuesta de una solución que permita mejorar los inconvenientes de los sistemas tradicionales para una ciudad concreta.
- Simulación del consumo eléctrico de la misma ciudad con ambos sistemas (el tradicional y el nuevo diseño).
- Estudio de los efectos, en el ámbito de contaminación lumínica, del uso del nuevo sistema en relación con el tradicional para dicha ciudad.

1.3 Enfoque y método seguido

A partir de lo comentado con anterioridad surgen las dos siguientes alternativas:

1. Reemplazo total del alumbrado de una ciudad por tecnologías más modernas.
2. Utilizar un sistema mixto, manteniendo ciertas zonas de la ciudad con iluminación tradicional.

Con estas dos alternativas en mente, y pese a que para cada caso concreto se deberían estudiar y valorar ambas opciones, se ha decidido orientar este proyecto a la primera de ellas. En este caso, se presupone que si se empleara la segunda alternativa se conseguiría reducir el consumo eléctrico, pero es probable que unos años después de su inclusión se decidiera a reemplazar la iluminación antigua aún existente por los sistemas modernos, cosa que implicaría más costes al largo plazo.

De cada al método a seguir se distinguen las siguientes etapas:

1. Estudiar los sistemas de iluminación de vía pública tradicionales. Se debe hacer especial énfasis en encontrar los inconvenientes de este tipo de sistemas.
2. Diseño de un producto alternativo que pueda cubrir los inconvenientes encontrados en los sistemas tradicionales.
3. Basándose en una ciudad concreta, aplicar el producto diseñado y verificar que los resultados obtenidos con él mejoran los que se obtienen con sistemas tradicionales.

1.4 Planificación del Trabajo

Debido a la ambición de este trabajo es interesante dividir las tareas en el máximo número de puntos posible. Esto se hace con el objetivo de saber evaluar de mejor manera el tiempo que se le puede dedicar a cada subtarea.

Así pues, las tareas dedicadas al análisis e investigación serían las siguientes:

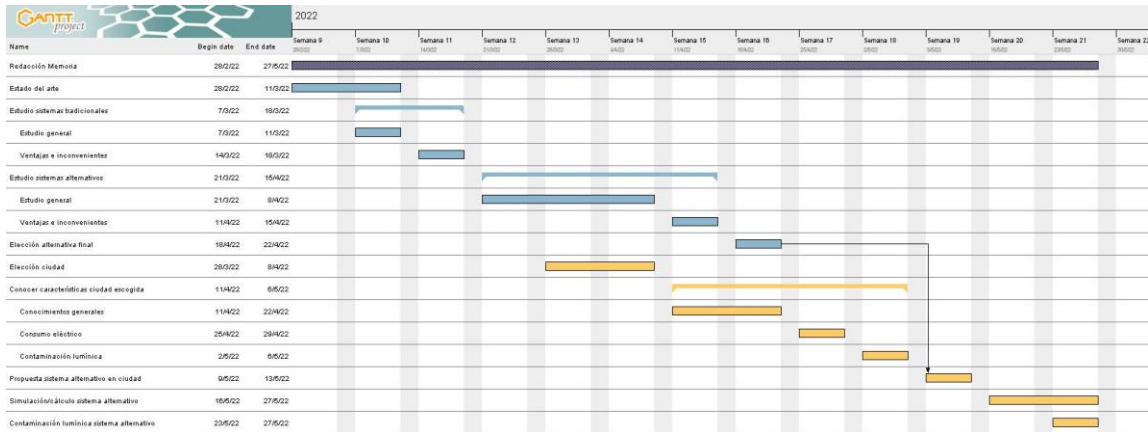
- Estado del arte.
- Estudio de los sistemas tradicionales de iluminación en vía pública:
 - Conocer ventajas e inconvenientes de los sistemas tradicionales.
- Estudio de dos o más alternativas que puedan mejorar los inconvenientes de los sistemas tradicionales.
 - Conocer ventajas e inconvenientes de ambos sistemas.
- Elección de la alternativa final a implantar en la ciudad X.

Por otra parte, las tareas prácticas o de aplicación principales son las siguientes:

- Elección de una ciudad pequeña (X).
- Conocer o estimar la distribución de puntos de iluminación pública de la ciudad X y sus características:
 - ¿Qué tipo de tecnología de iluminación tradicional usa?
 - ¿Cuál es el consumo eléctrico de la ciudad en un intervalo de tiempo (mensual o anual)?
 - ¿Cuán problemática es la contaminación lumínica?

- Proponer un sistema de iluminación más eficiente.
- Simular o calcular el consumo eléctrico de la ciudad en un intervalo de tiempo (mensual o anual) con este nuevo sistema.
- Estudiar cómo se podría ver reducida la contaminación lumínica.

Con todas ellas en mente, se ha decidido realizar un diagrama de Gantt inicial tal y como se contempla en la siguiente figura:



Las fechas más representativas son las siguientes:

Tarea	Fecha de inicio	Fecha de fin
Redacción Memoria	28/02/2022	27/05/2022
Estado del arte	28/02/2022	11/03/2022
Estudio sistemas tradicionales	07/03/2022	18/03/2022
Estudio general	07/03/2022	11/03/2022
Ventajas e inconvenientes	14/03/2022	18/03/2022
Estudio sistemas alternativos	21/03/2022	15/04/2022
Estudio general	21/03/2022	08/04/2022
Ventajas e inconvenientes	11/04/2022	15/04/2022
Elección alternativa final	18/04/2022	22/04/2022
Elección ciudad	28/03/2022	08/04/2022
Conocer características ciudad escogida	11/04/2022	06/05/2022
Conocimientos generales	11/04/2022	22/04/2022
Consumo eléctrico	25/04/2022	29/04/2022
Contaminación lumínica	02/05/2022	06/05/2022
Propuesta sistema alternativo en ciudad	09/05/2022	13/05/2022
Simulación/cálculo sistema alternativo	16/05/2022	27/05/2022
Contaminación lumínica sistema alternativo	23/05/2022	27/05/2022

Como se puede comprobar, existe el riesgo de no acabar el trabajo a tiempo para la entrega prevista de este. Esto se trata de un riesgo que se debe contemplar a medida que avanzan las fases de desarrollo del proyecto para poder actuar acorde a ello.

Notas:

- Se ha considerado el día 28/02/2022 como fecha de inicio del proyecto, puesto que no se tiene en cuenta al trabajo hecho hasta la fecha.
- Se ha considerado el día 30/05/2022 como fecha de fin de proyecto, puesto que a partir de entonces solo quedará hacer la defensa de este.
- Se ha considerado que la redacción de la memoria es algo que se debe ir haciendo en todas las fases de desarrollo del proyecto.

1.5 Breve resumen de productos obtenidos

A partir de los apartados anteriores, en este punto es posible seleccionar los siguientes productos deseados a obtener:

- Un análisis del funcionamiento del sistema de iluminación pública de una ciudad pequeña y de los inconvenientes que tiene.
- Un análisis de posibles alternativas para mejorar el sistema en concreto.
- El diseño de una posible solución a algunos de los problemas que presenta este sistema para dicha ciudad.

Como material extraordinario, se valorará la inclusión del siguiente producto:

- Simulación de ambos sistemas, el actual y el nuevo diseño propuesto, para visualizar claramente hasta qué punto el diseño cumple con la solución de los problemas planteados.

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

A raíz de lo que queda expuesto en el apartado de planificación se han detectado, inicialmente, los siguientes capítulos:

1. **Estudio del estado del arte** – Permitirá conocer proyectos similares que se han realizado en relación con este trabajo. Así se podrá estudiar si vale la pena variar el enfoque de este.
2. **Estudio de los sistemas tradicionales de iluminación en vía pública** – A partir del estado del arte se podrán listar y estudiar cuáles son las características más significativas de estos sistemas tradicionales:
 - a. **Conocer ventajas e inconvenientes de los sistemas tradicionales** – De esta manera, en los siguientes apartados

el trabajo se puede enfocar en intentar minimizar estos inconvenientes.

3. **Estudio de dos o más alternativas que puedan mejorar los inconvenientes de los sistemas tradicionales** – Permitirá visualizar una serie de alternativas para posteriormente escoger una de ellas.
 - a. **Conocer ventajas e inconvenientes de ambos sistemas** – Para decantarse por una alternativa u otra, inicialmente se deben conocer los puntos fuertes y débiles de cada una de ellas.
4. **Elección de la alternativa final a implantar en la ciudad X** – A raíz del estudio anterior y con cierta idea de la ciudad X a utilizar, se escoge la alternativa que sea más viable.
5. **Elección de una ciudad pequeña (X)** – Relacionado con el punto anterior, elección de una ciudad que permita implantar los diseños que se están comentando en el trabajo.
6. **Conocer o estimar la distribución de puntos de iluminación pública de la ciudad X y sus características** – Para poder implantar un nuevo diseño, inicialmente se debe conocer cómo está construido el alumbrado público en la ciudad escogida con el máximo detalle posible:
 - a. **¿Qué tipo de tecnología de iluminación tradicional usa?** – En este apartado se debe conocer el tipo de tecnología de iluminación. Los más comunes son lámparas de vapor de mercurio o de sodio (alta o baja presión).
 - b. **¿Cuál es el consumo eléctrico de la ciudad en un intervalo de tiempo (mensual o anual)?** – Conocer este consumo eléctrico ayudará a entender lo necesaria o innecesaria que se vuelve la propuesta posterior.
 - c. **¿Cuán problemática es la contaminación lumínica?** – Aunque no es uno de los objetivos principales del trabajo se va a intentar hacer alguna mención a la contaminación lumínica de los sistemas de alumbrado público tradicionales. Este puede ser un buen apartado para ello.
7. **Proponer un sistema de iluminación más eficiente** – Este es uno de los apartados más importantes. A partir del estudio de la ciudad X y las alternativas estudiadas en los apartados iniciales, se debe

comentar cómo afectaría, en términos generales, la incorporación de la alternativa “eficiente” en la ciudad. En este caso.

a. Valorable: Estudio el impacto económico del cambio de tecnología.

8. **Simular o calcular el consumo eléctrico de la ciudad en un intervalo de tiempo (mensual o anual) con este nuevo sistema** – Conocer este consumo eléctrico permitirá entender hasta qué punto será interesante la inclusión del nuevo diseño.

9. **Estudiar cómo se podría ver reducida la contaminación lumínica** – Este es otro apartado en el que puede ser interesante comentar aspectos de contaminación lumínica. A valorar la aportación que realiza este apartado en el trabajo.

2. Estado del arte

Para poder desarrollar un proyecto de estas características es interesante, previamente, realizar un estudio del estado actual del mercado en referencia a los temas que se van a tratar. Para ello, se ha decidido tratar los siguientes puntos:

- Características de los sistemas de iluminación
- Tipos de comunicación en sistemas de iluminación
- Tipos de sistemas de regulación y control
- Proyectos exitosos en los que se haya implementado tecnología de iluminación eficientes o inteligentes.
- Normativa actual relativa a la iluminación para exteriores y Smart Cities.

A continuación, se presentarán un conjunto de ideas detalladas para cada uno de los puntos comentados.

2.1. Sistemas de iluminación

Uno de los principales puntos a tener en cuenta antes del desarrollo de este trabajo es el estudio de los sistemas de iluminación. Para ello se partirá de la idea de diferenciación entre sistemas que se han ido utilizando de manera tradicional y sistemas actuales o más novedosos, que implicarán mayor eficiencia energética.

2.1.1. Sistemas tradicionales

Se entiende por sistemas de iluminación tradicionales aquellos que están basados en tecnologías que han aparecido durante el siglo XIX y primera mitad del XX. Desde la creación de la iluminación pública se han desarrollado muchos tipos de estos sistemas, pero los más representativos son los siguientes:

Lámparas de filamento incandescente

Son el tipo de lámpara más antiguo y utilizado. Para entender su principio de funcionamiento se deben destacar sus componentes principales, que son los siguientes (Montserrat, 2022):

- Filamento

- Envoltura
- Gas de relleno

En este caso, para provocar una iluminación se hace pasar corriente eléctrica por el filamento (que suele ser de Wolframio), cosa que implica que aumente su temperatura emitiendo radiación visible. Este filamento se caracteriza por tener una temperatura de fusión muy elevada pero un bajo grado de evaporación. De esta manera, al forzar una corriente eléctrica se consigue un efecto lumínico sin implicar un desgaste del filamento y, de esta manera, alargando la vida útil de la lámpara.

La envoltura suele ser de vidrio y sirve para crear la forma de la lámpara como tal (forma de gota, normalmente). Esta envoltura es un elemento necesario, ya que se utiliza para conseguir que en el medio en el que se encuentra el filamento no haya oxígeno, para reducir en la medida de lo posible la evaporación del material iluminado. Para provocar el vacío de oxígeno se introduce un gas, que puede ser argón o nitrógeno, para alargar en la medida de lo posible la vida útil del filamento.

Una evolución de las lámparas de filamento incandescente clásicas son las lámparas halógenas, que siguen el mismo funcionamiento que las clásicas con la diferencia de que se consigue reducir el tamaño de la lámpara.

Pese a ser un tipo de lámparas muy empleado, hoy en día se considera muy poco eficiente. Esto es debido, principalmente, a que tienen una baja eficiencia eléctrica generando calor. Además, su vida útil es corta en comparación con las otras lámparas que se verán a continuación. Por ello, no se suelen usar actualmente para alumbrado público.

Lámparas de mercurio a alta presión

Se tratan de lámparas que disponen de un tubo en el que se encuentra un gas inerte (argón, por ejemplo) y una dosis controlada de mercurio. Además, consta de dos electrodos principales que permitan la fácil emisión de electrones. También se dispone de un electrodo auxiliar conectado mediante un resistor a uno de los electrones principales.

Su principio de funcionamiento es más complejo que el de las lámparas de filamento y su explicación no forma parte de este proyecto. Lo interesante es conocer que en el arranque de estas lámparas se tiene un periodo de transición que suele durar varios minutos en que la luz pasa de un tono violeta a un tono más blanquecino. Esto se produce cuando el mercurio se evapora progresivamente hasta alcanzar una alta presión y llegar a un equilibrio.

Uno de los principales inconvenientes de este tipo de lámparas es que si durante el momento de encendido de estas dejan de recibir corriente eléctrica se tiene que esperar a que el mercurio se enfríe y vuelva a su estado natural para volver a hacer uso de ella (EcuRed, 2022).

Estas lámparas, pese a que sean más eficientes que las de filamento, tienen varios inconvenientes. El principal de ellos, y que tiene importancia en este proyecto, es su tiempo de encendido y reencendido.

Lámparas de vapor de sodio

Este tipo de lámparas tienen una estructura muy similar a las lámparas de vapor de mercurio. Una de sus características que las hace más interesantes es que el rendimiento lumínico es más elevado, puesto que el tipo de radiación que emiten (debido a utilizar sodio en lugar de mercurio) se encuentra dentro de la zona visible de máxima percepción para el ser humano.

En la actualidad se pueden distinguir dos tipos según la presión a la que se encuentra el sodio: a baja presión o a alta presión.

En el caso de las lámparas de **baja presión**, al forzar una corriente eléctrica por la lámpara se provoca un aumento de la temperatura, que implica que el sodio se empiece a evaporar hasta que el proceso de descarga de electrones se realiza a través del vapor de sodio (cosa que provoca un característico color amarillo). Esto implica que tengan un índice de reproducción cromática (IRC) muy bajo, cosa que es una gran pega de este tipo de lámparas. Además, presentan un espectro de emisión muy ajustado.

Una evolución de estas son las lámparas de vapor de sodio a **alta presión**. Con ellas se consigue mitigar los problemas de espectro de emisión de las lámparas de baja presión (aunque también estén caracterizadas por entregar una luz dorada). No obstante, siguen siendo lámparas con poca eficiencia luminosa y, al igual que pasaba con las lámparas de mercurio, requieren de tiempos de encendido y reencendido elevados.

2.1.2. Sistemas no tradicionales: LED

Como se ha podido apreciar en el apartado 3.1.1, los sistemas de iluminación tradicionales presentan una serie de inconvenientes que a lo largo de las últimas décadas se han intentado erradicar. En este caso, se entiende por sistemas alternativos y más actuales los que están basados en tecnologías de diodo de emisor de luz (LED).

Estos dispositivos son semiconductores que admiten corriente eléctrica en una dirección. Están formados por un material dopado con exceso de electrones (material N) y otro material con exceso de huecos (material P). Cuando una

corriente eléctrica es inyectada a través del LED, los electrones libres del material N se mueven a través del dispositivo hasta combinarse con los huecos existentes en la capa P. Al hacerlo se produce una liberación de energía en forma de luz (fotones).

Una de las características que hace a los LEDs más interesantes es que es fácil controlar (de manera química) el color de la luz que emiten. De esta manera, combinando LEDs de los 3 colores principales (rojo, azul y verde) se puede y regulando la intensidad de iluminación de cada uno de ellos, se puede crear un efecto óptico que simule cualquier color.

Debido al auge de los semiconductores en las últimas décadas, se ha llegado a mejorar ampliamente la eficacia y eficiencia luminosa de este tipo de emisores de luz (ILUMINICA, 2022). Además, también se ha conseguido reducir en gran medida el coste de estos, siendo hoy en día una alternativa que se está empezando a tener en cuenta cuando se trata de iluminación en las vías públicas.

2.2. Comunicación en sistemas de iluminación

Desde que los sistemas de iluminación de las vías públicas no se encienden de manera manual, es necesario que exista un sistema de comunicación que dé la orden de encendido y apagado a las diferentes lámparas del sistema. En este apartado se explicará de forma resumida qué tipo de comunicación se puede encontrar en estos sistemas.

2.2.1. Sistemas sin ningún tipo de comunicación

Inicialmente se debe hacer mención a los sistemas de iluminación que no tienen ningún sistema de comunicación. Estos son sistemas que tienen todas las lámparas conectadas entre sí (normalmente en paralelo) y se dispone de uno o varios interruptores generales. Cuando estos se activan manualmente, todos los elementos de la red se encienden de golpe. Lo mismo pasa para el apagado.

Es el método más sencillo, pero por razones obvias hace muchas décadas que se ha dejado de usar. De esta manera se irá sustituyendo el interruptor manual por un centro de control que se encargará de realizar estas tareas manuales.

2.2.2. Comunicaciones cableadas

Se trata de los sistemas que requieren de un medio cableado para poder realizar las tareas de comunicación entre terminales. Actualmente, se pueden encontrar diferentes opciones en el mercado:

PLC (*Power Line Communication*)

Se trata de un sistema que utilizar la propia red eléctrica para las comunicaciones con los nodos de la red. Estas comunicaciones estarán centralizadas en un cuadro eléctrico y permite ejecutar labores sencillas de gestión sobre iluminarias. La principal ventaja de este tipo de sistemas es que puede emplear la propia infraestructura de red ya creada y abarca grandes distancias (Méndez, 2022). No obstante, su principal inconveniente es que disponen de una baja capacidad de transferencia de datos.

Sistemas basados en 0-10V

Son sistemas que funcionan a través de la instalación de un interruptor que se coloca en la propia línea de alimentación que va a dar a cada uno de los terminales. Funcionan para corriente continua y permiten regular el flujo de luz de la lámpara a través de la tensión de entrada (ILUMINET, 2022). Para una tensión de 0V implicará una luminosidad mínima (apagado) y para una tensión de 1V implicará una luminosidad máxima (terminal iluminado al 100%)

Sistemas basados en DALI

En este caso se dispone de dos hilos de comunicación (bus bidireccional) y la velocidad de transmisión de datos es de hasta 1.2 Kb/s. Se dispone de un controlador que emite (y recibe) información hasta cada una de las terminales de iluminación. Permite la creación de 16 escenarios diferentes y tiene la capacidad de detectar fallos en las luminarias.

Power Over Ethernet

En este caso las luminarias reciben tanto la alimentación como los datos sobre un único cable Ethernet. Es una estructura similar a PLC, pero, en este caso, aprovecha que está hecha la instalación Ethernet para reutilizarla para instalación de terminales luminosos. Gracias a la inclusión de sensores en el sistema se puede ir ajustando los niveles de iluminación de estancias continuamente. Es una opción útil en espacios cerrados. Un ejemplo de aplicación es la Torre Europa en Madrid (CASADOMO, 2022).

2.2.3. Comunicaciones inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas son aquellas que no requieren de un sistema cableado para enviar o recibir órdenes entre los diferentes nodos de la red. Algunos de los sistemas más significativos son los siguientes.

Wi-Fi

Se trata de un protocolo muy extendido hoy en día. Es utilizado para el acceso a Internet en terminales móviles, entre otras aplicaciones. Tiene un alcance de algunas decenas de metros, y permite comunicación bidireccional a

velocidades de centenares de Mbps. Se puede usar en sistemas de iluminación locales cuando los terminales emisores de luz tienen una antena que permita la recepción de señales Wi-Fi (2.4GHz o 5 GHz) y un microprocesador que pueda controlar la lámpara.

Bluetooth

El principio de funcionamiento es similar a bluetooth. Es una tecnología que ha tenido mucha evolución en los últimos años, especialmente desde la irrupción del término Internet de las cosas (IoT). Hoy en día puede proporcionar velocidades de transferencia de decenas Mbps y alcance de hasta decenas metros. Se suele usar para aplicaciones que no requieran grandes cantidades de transferencia de datos (no es adecuado para internet).

LORA

Se trata de una tecnología que emplea modulación en frecuencias de radio. Es empleado principalmente en aplicaciones militares, aunque se está teniendo en cuenta en los últimos años como opción de comunicación de elementos dentro de una Smart City. Su frecuencia de trabajo, dependiendo del continente en el que se use, está entre 433 MHz y 915 MHz. La principal ventaja que tiene respecto al resto de sistemas inalámbricos mencionados es su largo alcance alrededor de 10 Km. Su versión original no permitía alta transferencia de datos, puesto que la velocidad máxima que permite es de 255 bps. No obstante, se está trabajando en evolución de esta tecnología que permita transferencia de datos de decenas de kbps. (Carracedo, 2022)

2.3. Tipos de sistemas de regulación y control

Para conseguir aprovechar al máximo la energía consumida de un sistema (por ejemplo, un sistema de iluminación) es necesario disponer de sistemas de regulación y control para ajustar los encendidos, apagados y regulación de luz no natural según las circunstancias del entorno o la actividad que se pretenda desarrollar con dicha luz.

En este apartado se presentarán los principales tipos de sistemas de regulación y control. Además, al final del apartado, se explicarán brevemente los protocolos de modulación LED más conocidos, y que harán referencia a algunos de los tipos de comunicación presentados en el apartado 3.2.

2.3.1. Sistemas de regulación bajo demanda

El caso más representativo de los sistemas de control de iluminación bajo demanda es un interruptor manual. En este caso es necesario que un usuario (operario) accione el interruptor cuando considere que se necesita luz artificial

en una zona o habitáculo. De la misma forma, cuando deje de ser necesaria esa luz artificial debe haber otro usuario que se encargue de apagarla.

Al tratarse de un sistema que depende tanto de un usuario externo pueden salir problemas de eficiencia como, por ejemplo, que el último usuario se olvide de desactivar el interruptor para apagar la luz. Por ello el interruptor manual se ha desarrollado hasta convertirse, en muchas ocasiones, en un interruptor temporizado. En este caso, los interruptores están programados para que se enciendan y apaguen en ciertos momentos del día (por ejemplo, encendida única en horarios nocturnos).

De todas maneras, algunos de los sistemas con interruptor temporizado suelen ir acompañados de un interruptor manual con un nivel de control superior a partir del cual se puede provocar el encendido de los puntos de luz. Esto puede ser útil en oficinas que normalmente tienen luz natural cuando hay un día nublado o en puntos exteriores cuando se está en horas de sol, pero está lloviendo, por poner algún ejemplo. Debido a esta dependencia del factor usuario pueden no ser la mejor opción en determinadas situaciones.

2.3.2. Sistemas de regulación a partir de la luz natural

A raíz de lo comentado en el apartado anterior surge la idea de disponer de un interruptor que se active o desactive según la luz (en este caso, luz natural) que esté recibiendo. Pese a que hay varios tipos, el sensor de luz más común es el LDR (*Light Dependant Resistor*) que basa su principio de funcionamiento en un resistor que es capaz de cambiar su resistencia según la intensidad de luz que está recibiendo.

Si se añade un sensor LDR a un punto de luz artificial será posible diseñar un “interruptor” analógico para activar o desactivar un punto de luz concreto según la intensidad lumínica que esté recibiendo del exterior. Este sistema se puede encontrar, por ejemplo, en vehículos que disponen de iluminación automática.

2.3.3. Sistemas de regulación mediante sensores de presencia

Un sensor de presencia es aquel que es capaz de captar algunas variaciones físicas que se producen en un entorno y, a partir de ello, enviar una respuesta eléctrica que pueda interpretar la presencia o no de un objeto.

Pese a que existen multitud de tipos, los más representativos son los siguientes:

- Sensores por **infrarrojos**: basan su funcionamiento en la detección de variación de temperatura que produce un cuerpo sobre un espacio de visión vacío. Actualmente, son muy utilizados porque permiten detectar el calor que emiten los seres vivos (personas, en este caso)

- Sensores por **ultrasonidos**: se basan en la emisión de una frecuencia (ultrasonido) a una cierta longitud de onda en un espacio. Si un objeto se encuentra en el campo de visión del sensor, la onda rebotará sobre este y volverá al sensor. Según el tiempo que tarda en viajar la onda el sensor será capaz de calcular la distancia a la que se encuentra el objeto. La ventaja con respecto a los sensores infrarrojos es que no dependen de que el objeto a detectar desprenda calor.
- Sensores **híbridos o duales**: combinan las dos tecnologías anteriores.

En la actualidad ya se están usando este tipo de sensores para control de iluminación artificial en espacios cerrados.

2.3.4. Regulación mediante sistema centralizado

Se trata de sistemas que combinan todos los sistemas anteriores para la regulación de la iluminación en grandes superficies que tienen habitáculos (o zonas) con diferentes necesidades de iluminación. Para ello, se requiere de una unidad central (un controlador, PC o similar) a la que están conectados los sistemas de las diferentes zonas.

El hecho de disponer de un control de la iluminación centralizado dispone de varias ventajas. La principal es que se puede monitorizar el encendido y apagado de diferentes zonas del sistema con características diferentes a través de las órdenes de una unidad central. De esta manera es más sencillo evaluar desde un solo punto el estado general de cada uno de los circuitos y el consumo de ellos.

Un ejemplo de este tipo de sistemas es Lutron LCP128 (lutron.com, 2022). Se trata de un sistema de control de iluminación que incorpora el control de todos los circuitos de iluminación, conmutados y regulados, interiores y exteriores en un único sistema.

2.3.5. Protocolos modulación LED

Una de las principales ventajas de la utilización de la tecnología LED si se compara con otro tipo de tecnologías de iluminación (como las lámparas de mercurio o de vapor de sodio) es el amplio control que se tiene sobre la luminosidad de estos dispositivos. Esto es una ayuda en sistemas que no requieran que todos sus puntos de luz estén siempre encendidos a máxima potencia lumínica, cosa que se acaba traduciendo en un ahorro en el consumo eléctrico.

De esta manera, y relacionado con algunos de los tipos de comunicaciones explicados brevemente en el apartado 3.2.2 de este documento, se explicará el

funcionamiento con respecto al control y gestión del protocolo 1-10V y el protocolo DALI.

2.3.5.1. Protocolo 1-10V

Como se ha comentado anteriormente, se trata de un protocolo que permite regular el flujo luminoso de lámparas basadas en LED. Para poder utilizar este tipo de tecnología es necesaria la instalación de un cable de dos hilos, que actuará como bus de control. Por este cable se enviará una tensión continua que variará entre 1V y 10V dependiendo del grado de luminosidad que se requiera en el punto de luz.

En la entrada de cada punto de luz es necesario disponer de una fuente de alimentación controlada por tensión (*driver*) que reciba la diferencia de tensión aplicada por el controlador 1-10V y emita la corriente eléctrica necesaria para el encendido del punto de luz. De esta manera, si se quiere disponer de un sistema que apague completamente el punto de luz se debe añadir un interruptor que al detectar una tensión mínima de entrada (1V en este caso) corte el paso de corriente a la lámpara. Al ser un sistema tan sencillo tanto de instalación como de control y mantenimiento tiene una desventaja que puede ser importante en determinadas circunstancias. Esto es que se trata de una comunicación del tipo unidireccional, es decir, que los puntos de luz actuarán solamente como actuadores.

Hoy en día existen varios fabricantes de productos con sistemas reguladores que siguen este protocolo. Un ejemplo de estos fabricantes es GTLED (gtled.com, 2022).

2.3.5.2. Protocolo DALI

El protocolo DALI se trata de una evolución del protocolo anterior y se emplea actualmente en aplicaciones de iluminación en edificios. Una de sus características más relevantes es que permite la comunicación entre los diferentes dispositivos de control de la iluminación (así que se puede integrar con los sistemas de regulación de LEDs comentados en el apartado 2.3 de este documento).

La norma del protocolo se conoce como IEC 62386 y permite controlar una serie de actuadores siempre que estén preparados para control digital (transformadores, reguladores de potencia, entre otros). El elemento principal de los sistemas que utilizan este protocolo es un módulo DALI maestro. Este tiene la característica de controlar hasta 64 dispositivos, que podrán enviar mensajes de estado al módulo maestro.

En la actualidad se pueden encontrar muchos fabricantes de productos que integran el protocolo DALI. Uno de ellos Wago (wago.com, 2022).

2.4. Proyectos exitosos

En este apartado se presentarán un conjunto de proyectos exitosos en los que se haya realizado un cambio con respecto a iluminación de la vía pública que implique una mejora de eficiencia energética en una zona.

2.4.1. Guadalajara, España

Guadalajara es una ciudad situada en España, a 60 kilómetros de Madrid. Su ayuntamiento instaló en 2017 un total de 13500 puntos de luz LED conectados y 187 cuadros eléctricos conectados mediante un software de gestión de activos llamado **Interact City**. La combinación del alumbrado LED y el uso de este software ha permitido al municipio un ahorro de hasta el 68% de consumo energético. Según cuenta Antonio Román, alcalde de Guadalajara, “Este software de gestión de iluminación nos ayuda a reducir el consumo energético, aumentar la eficiencia y, en definitiva, prestar un mejor servicio a nuestros ciudadanos.” (interact-lighting.com, 2022).

Interact City, implementado por la empresa Signify, ha permitido flexibilizar de tal manera la iluminación pública de la ciudad para que pudiera satisfacer las necesidades de una Smart City en el mediano plazo. Además, aparte de monitorizar y administrar de forma remota los puntos de luz, el software permite ver sobre un mapa los puntos de luz y cuadros de mando. De esta forma es más eficiente la gestión de los equipos de mantenimiento de la ciudad cuando surja cualquier problema (Nobbot, 2022).

2.4.2. Amberes, Bélgica

Amberes es una ciudad belga con un gran historial de innovación. Recientemente en uno de sus barrios se ha creado la iniciativa *Slimme Zone* (o zona inteligente) cuyo objetivo es verificar que el uso de tecnología y sensores pueden mejorar las vidas de los residentes (Church, 2022).

Uno de los campos más destacados de esta iniciativa es la aplicación de soluciones de iluminación inteligentes a medida. Esto se basa en tres principios. En primer lugar, se han instalado cámaras y sensores de movimiento para activar el encendido de la iluminación de manera automática. En segundo lugar, cada punto de luz puede actuar como una estación meteorológica, indicando la posibilidad de próximas lluvias o nevadas. En tercer lugar, se han instalado sensores de ruido que ayudan a aumentar la luz cuando se detecta niveles altos de ruido.

Todos estos principios implican un aumento del ahorro energético para el ayuntamiento, que un año después de la inclusión de la iniciativa *Slimme Zone* ha superado en un 30% el ahorro energético anual.

2.4.3. Balatonfüred, Hungría

El ayuntamiento húngaro de Balatonfüred, en Hungría, decidió cambiar su sistema de iluminación público tradicional por sistemas basados en LED, que permitían mejorar la eficiencia energética reduciendo el mantenimiento. La empresa encargada de la creación de estas nuevas lámparas ha sido la conocida General Electric y, de acuerdo con los cálculos iniciales, se conseguirá un ahorro de hasta el 55% del coste energético.

Aparte del ahorro energético, la luz proveniente de las farolas LED son más aceptadas por los vecinos de la localidad, puesto que permiten que los objetos se ven de su color natural y no en el tono amarillento característico de los sistemas tradicionales. Además, también se prevé la instalación de una central online a través de la cual cada luminaria recibirá la orden de cuando encenderse y permitirá recibir datos de ellas para mejorar, todavía más, la eficiencia y eficacia del alumbrado público (FuturEnergy, 2015).

2.4.4. Sonsonate, El Salvador

Sonsonate es una de las ciudades más importantes de El Salvador que ya está utilizando tecnología LED inteligente para todo su sistema público de iluminación. Para ello se nutren de la tecnología *LighGrid* (gecurrent.com, 2022), que permite la supervisión, control y gestión de activos remotos (en este caso, las luminarias) a través de un sistema de gestión central habilitado para web. Además, esta tecnología permite, entre otras cosas, atenuar la intensidad de cada luminaria para un mayor control de los niveles de iluminación.

En este proyecto se instalaron más de cuatro mil luminarias de tecnología LED, que juntamente con la tecnología *LightGrid* ofrecen un ahorro de más del 50% del consumo energético comparado con los sistemas anteriores, basados en luminarias de mercurio.

2.5. Normativa iluminación y comités

A continuación, se hará un breve resumen de algunas de las normativas y comités que se deben tener en cuenta en el momento de realizar un proyecto de iluminación de la vía pública desde el punto de vista de las *Smart Cities*.

2.5.1. Normativa de alumbrado público exterior (REEIAE)

Para los proyectos de alumbrado exterior en el territorio español se debe tener en consideración el Real Decreto 1890/2008 de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior, abreviado como REEIAE (España, 2022).

Este documento reúne todo un conjunto de consideraciones que tienen doble objetivo. Por un lado, mejorar la eficiencia y el ahorro energético de las instalaciones reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero. Por otro, la limitación de la contaminación lumínica, especialmente por la noche. Además, se especifica que se debe aplicar a cualquier instalación de alumbrado vial, ya sea por nueva instalación o por modificación de alguna ya existente, siempre que la potencia instalada supere 1 kW.

Cuenta con un total de 16 artículos entre los que, para este proyecto en particular, se pueden destacar los siguientes:

- Artículo 3. Definiciones: Cuenta con un conjunto de definiciones de valores que pueden servir para valorar la eficiencia de una instalación. Ejemplos de estos valores son la eficacia luminosa de una lámpara, el flujo luminoso o el rendimiento de una luminaria.
- Artículo 4. Eficiencia energética: Este artículo hace referencia a los niveles de iluminación y eficiencia energética que se deben presentar en los alumbrados exteriores. Para ello, se apoya en los documentos complementarios ITC-EA-01, ITC-EA-02 e ITC-EA-04.

2.5.2. AEN/CTN 178 “Ciudades Inteligentes”

El CTN 178 se trata de un comité de más de 700 expertos de sector tanto público como privado que tiene el objetivo de generar estándares para el desarrollo de ciudades inteligentes (Marín, 2022). Dicho comité se construyó en 2012, cuando la idea de ciudad inteligente empezó a ser una realidad en el territorio español.

Uno de los puntos más fuertes de este comité es que trabaja colaborando con otros comités especializados en aspectos más técnicos y especializados, como comités de vehículos eléctricos, cambio climático o infraestructuras de telecomunicaciones. Otro aspecto para tener en cuenta es que se encarga de la creación de normas específicas a medida que surja una necesidad de detallar aspectos concretos de la Smart City desde el punto de vista de la normalización. Actualmente, cuentan con un total de 34 normas elaboradas (UNE, 2022).

De cara a la realización de este proyecto la norma que puede tener más interés es la UNE 178401:2017, cuyo título es “Ciudades inteligentes. Alumbrado exterior. Grados de funcionalidad, zonificación y arquitectura de gestión.”. El objetivo de esta norma es establecer los requisitos mínimos que deben cumplir los sistemas de regulación de las instalaciones de alumbrado exterior.

2.5.3. Plan Nacional de Territorios Inteligentes

El PNTI (Plan Nacional de Territorios Inteligentes) se trata de un plan que reúne un conjunto de acciones a realizar en España entre 2018 y 2023 con el objetivo de implantar el concepto de la Smart City en el país.

El objetivo principal de dicho plan es “propiciar el desarrollo económico maximizando el impacto de las políticas públicas en TIC para mejorar la productividad y la competitividad, y transformar y modernizar la economía y sociedad española mediante un uso eficaz e intensivo de las TIC por la ciudadanía, empresas y administraciones” (Ministerio de Asuntos Económicos, 2017). De esta manera, se pretendía un aumento del PIB dedicado al sector TIC y la mejora de la eficiencia de las prestaciones de servicios públicos a través del empleo de tecnologías.

Pese a que en este plan no hay ningún apartado dedicado de forma exclusiva al alumbrado público sí que es mencionado con frecuencia que uno de los objetivos debe ser mejorar la eficiencia de este, pudiendo utilizar en algunas ocasiones dispositivos IoT (Internet of Things). De esta manera, es interesante tener de referencia este plan para plantear cualquier proyecto que tenga como objetivo acercar una ciudad al concepto de Smart City.

3. Descripción del caso

Este apartado pretende hacer una descripción del caso que se va a estudiar. Para ello, inicialmente se darán algunos detalles de la ubicación y emplazamiento del municipio a tratar. A continuación, se hará una evaluación de cuáles son los problemas principales de dicho municipio comentando cuáles son las principales necesidades que cubrir. Finalmente, se seleccionará uno de los cuadros de mando del municipio que servirá a este Trabajo como punto de partida para realizar una propuesta de mejora, comentando su funcionamiento, componentes y problemáticas, así como la situación actual en cuanto al consumo eléctrico.

3.1. Ubicación

La ubicación del proyecto a realizar está en el municipio de Ablitas. Se trata de un pequeño pueblo de Navarra de 2500 habitantes que se encuentra a 90 km de Zaragoza, a medio camino entre Zaragoza y Logroño. La superficie del municipio en su totalidad es de 77 km².

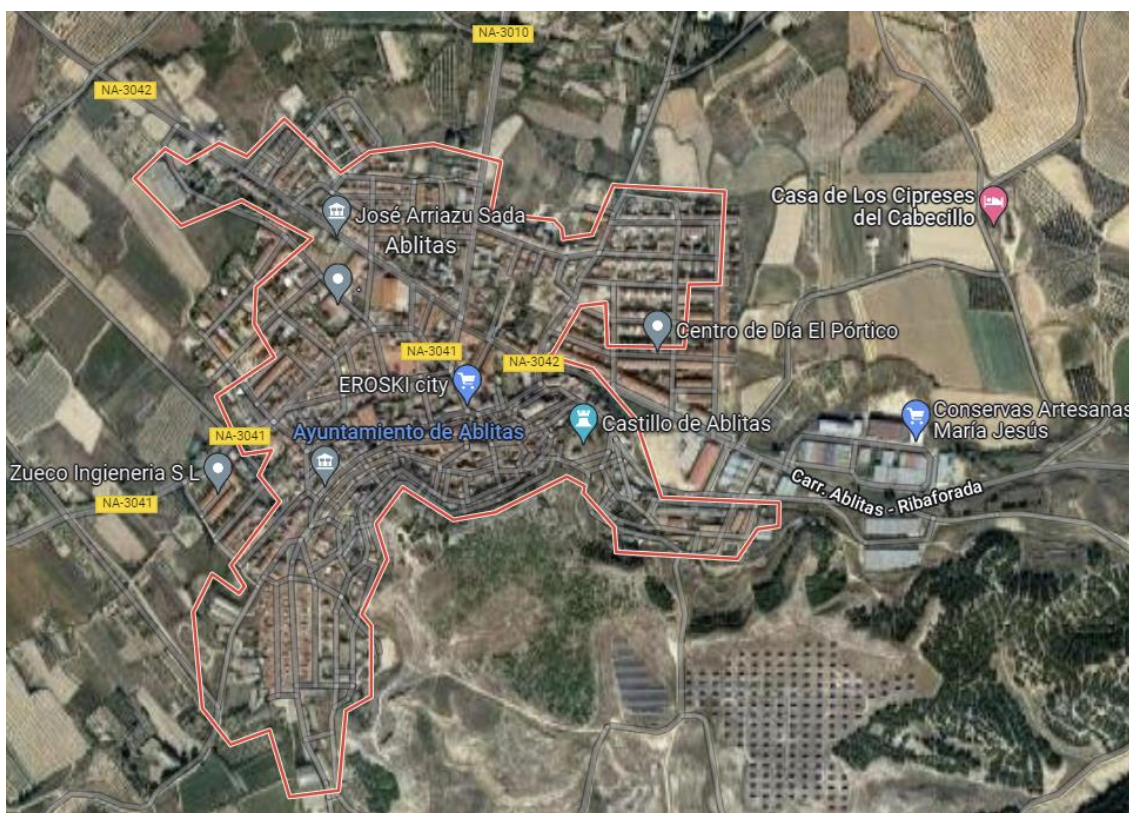


Imagen 1 - Mapa satelital de Ablitas. Fuente: Google Maps

3.2. Explicación y problemática general

Ablitas se trata de un pequeño municipio en el que se han ido creando puntos de luz a medida que ha sido necesario. De esta manera, la organización,

características y estado de estos puntos de luz no sigue un orden ni agrupación estratégico.

Tal y como se indica en el Boletín oficial del estado, “Por Real Decreto 1890/2008 de 14 de noviembre, se aprobó el Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior (REEIAE) como un nuevo marco legal necesario para mejorar la eficiencia energética en las instalaciones de alumbrado público exterior mediante la regulación de los niveles máximos de iluminación de los espacios en función de la actividad que se realiza en ellos, de la incidencia de la iluminación hacia otros espacios y por la exigencia de un nivel mínimo de eficiencia energética para los puntos de luz” (España, 2022).

Con esto en mente, el ayuntamiento de Ablitas se propuso hacer un estudio de la eficiencia energética que actualmente tenía el municipio en cuanto a su sistema de iluminación pública. Desde las primeras fases del estudio se adivinó la necesidad de efectuar un cambio significativo que permitiera un ahorro significativo del consumo eléctrico anual del municipio teniendo en cuenta, además, el hecho de poder acercar al pueblo a la idea de Smart City. Por este motivo, durante el año 2021 se aprobó en el municipio un proyecto de mejora energética del alumbrado público exterior del término municipal.

A partir de este punto se decide generar una memoria técnica sobre el alumbrado público del municipio con el objetivo de conocer qué puntos específicos suponen un problema en cuanto a eficiencia energética del pueblo y cuáles de estos puntos pueden ser corregidos con facilidad.

Así pues, para entender en qué punto se va a enfocar este trabajo es interesante conocer la distribución actual del municipio en cuanto a sistema eléctrico de alumbrado público. En concreto, se trata de un sistema gobernado por 8 cuadros de mando gestionando el encendido y apagado de un total de 806 luminarias. De todas las luminarias menos del 25% están basadas en tecnología LED. El resto de ellas se basan en tecnología de vapor de sodio a alta presión. Tal y como se ha comentado en apartados anteriores este tipo de lámparas presentan una luz de color amarillo brillante y no están consideradas, actualmente, lámparas con buena eficiencia energética.

Una vez se conocen los componentes principales que se encuentran en la instalación se ha decidido, para el caso de estudio de este trabajo, centrarse en uno de los ocho cuadros de mando. De esta manera será posible analizar a fondo cuáles son sus ventajas e inconvenientes y poder hacer una propuesta de actuación para mejorar su eficiencia energética.

3.3. Cuadro de Mando (ABLIC1)

El cuadro de mando escogido para el estudio es el ABLIC1. Se trata de un cuadro ubicado al sur del municipio y se encarga de gestionar el encendido y apagado de la zona que le rodea.

Existen dos motivos que han hecho que este trabajo se decante por el estudio de este cuadro de mando en concreto. El primero es que se trata de un cuadro de control de tres tipos de luminarias (tal y como se verá en apartados posteriores), que son los tres tipos que se encuentran en el municipio. Así que es representativo con el resto del pueblo. El segundo motivo es que se encuentra en una zona ubicada a las afueras de Ablitas así que, en caso de querer tirar hacia delante este proyecto, implicaría una afectación mínima a los vecinos en cuanto a obras. De esta manera, se podría utilizar como prueba piloto con mayor facilidad.

En la siguiente imagen se puede apreciar el área de gestión del cuadro.



Imagen 2 - Ubicación cuadro de mando ABLIC1. Fuente: Google Maps

3.3.1. Funcionamiento de ABLIC1

Un cuadro de mando de alumbrado público tiene un funcionamiento, en parte, similar a uno de una vivienda. Se trata de un conjunto de mecanismos que controlan el encendido y apagado de ciertos elementos eléctricos conectados al mismo.

El ABLIC1, como el resto de los cuadros de mando del alumbrado público de Ablitas, se rige mediante un sistema de encendido basado en célula fotoeléctrica. Este tipo de sistemas, tal y como se ha comentado en el apartado 2.3.2 de este mismo documento, provocan el encendido y apagado de las cargas que tienen conectadas según la luminosidad que se detecta en un punto específico.

De cara a características eléctricas, se conoce que está operando con una tensión de alimentación Trifásica 380 V. La potencia contratada para el mismo es de 6.6 kW con una tarifa de 2.0 DHA. Este tipo de tarifa es la correspondiente a suministros eléctricos entre 0 y 10k W e implica un amperaje de 2.0 A con discriminación horaria (el precio monetario de la energía será diferente en horario diurno y en horario nocturno).

En la imagen posterior se puede apreciar el interior de dicho cuadro de mando. En ella se pueden ver interruptores, relés y enlaces que permiten conectar la red eléctrica de baja tensión (380-400 V entre fases y 230 V entre fases y neutro) con las luminarias.



Imagen 3 - Interior del cuadro de mando ABLIC1. Fuente: Ayuntamiento de Ablitas

3.3.2. Luminarias

El cuadro de Mando ABLIC1 controla un total de 49 luminarias. Estas son de 3 tipos diferentes y se tienen 2 tecnologías: LED y Vapor de Sodio.

La siguiente tabla muestra las características de todas estas luminarias con un identificador que servirá para los siguientes apartados de este trabajo.

ID	Área/Calle	Uds.	Tipo	Tecnología	Potencia	Equipo
ABLIL1000	San José Alta	6	Funcional	Sodio	150 W	21 W
ABLIL1001	Eras Altas	3	Funcional	Sodio	150 W	21 W
ABLIL1002	Yeseria	2	Funcional	Sodio	150 W	21 W
ABLIL1003	Eras Altas	7	Funcional	Sodio	150 W	21 W
ABLIL1004	Cuevas San Miguel	2	Funcional	Sodio	150 W	21 W
ABLIL1005	Lirios	10	Funcional	Sodio	150 W	21 W
ABLIL1006	San José Alta	10	Globo	Sodio	100 W	16 W

ABLIL1007	San José Baja	9	Funcional	LED	50 W	-
-----------	---------------	---	-----------	-----	------	---

Tabla 1 - Características luminarias ABLIC1. Fuente: Ayuntamiento de Ablitas

De esta tabla se pueden sacar bastantes conclusiones. En primer lugar, es posible apreciar con facilidad la diferencia de potencia que suelen necesitar las lámparas basadas en tecnología LED si se comparan con otro tipo de lámparas más tradicionales (de sodio, en este caso). Además, se puede ver que solo un pequeño porcentaje de las luminarias de este cuadro de mando utilizando LED, cosa que va a provocar que la potencia a contratar por el cuadro sea mayor a si todas o la mayoría de las luminarias utilizaran esta tecnología.

Por otro lado, se pueden diferenciar dos columnas para la evaluación de la potencia. La primera de ellas representa la potencia necesaria para que una luminaria en concreto esté funcionando al 100% de su capacidad. La segunda corresponde a la potencia que consumirá un equipo auxiliar (driver) que necesita dicha luminaria para operar al 100%. De esta manera, a grandes rasgos se puede entender que para el correcto funcionamiento de una luminaria ABLIL1000 son necesarios $150+21 = 171$ W, mientras que para una luminaria ABLIL1007 serán necesarios 50 W.

Por último, se puede comentar los diferentes tipos de lámparas. En el caso de este cuadro de mando se tienen dos tipos: funcional y globo. Las lámparas de iluminación funcional son aquellas que se deben emplear para proporcionar luz con el objetivo de cumplir una misión específica. En el caso de las farolas o balizas tienen la función de iluminar la vía pública para que los peatones y vehículos puedan transitar con comodidad. En contra, las lámparas tipo globo no están diseñadas para iluminar un sector específico, sino para crear una sensación de luminosidad constante en un gran habitáculo.

3.3.3. Ventajas e inconvenientes

Para poder realizar una mejora al sistema existente se deben tener en cuenta las principales ventajas y desventajas que le caracterizan.

La principal ventaja que se puede apreciar es que el sistema de encendido de las luminarias está basado en una célula fotoeléctrica, así que solo tendremos consumo eléctrico cuando la luz ambiental natural baje de ciertos niveles. Esto hace que no se tengan que estar estableciendo horarios de encendido y apagado dependiendo de la época del año e implica que el sistema de gestión es muy sencillo. De esta manera se evitan posibles errores que pudiera provocar un sistema de comunicaciones basado en una unidad centralizada (un procesador que dé órdenes concretas, por ejemplo) e implica que caso que se quieran añadir más luminarias, el proceso para hacerlo será sencillo (siempre que el propio cuadro de mando lo permita y tenga conexiones disponibles).

Como desventajas significativas se pueden destacar dos. La primera y más obvia es que se está utilizando tecnología de iluminación de alto consumo de potencia comparándolo con tecnologías actuales. Esto implica que el sistema (cuadro de mando + luminaria) necesite una elevada potencia instantánea para operar al 100% y que, por tanto, la potencia contratada para este cuadro eléctrico sea también elevada. Actualmente, existen varias tecnologías en el mercado que mejoran la eficiencia energética de una lámpara si se compara con la tecnología principalmente usada en este cuadro de mando (vapor de sodio).

La segunda desventaja es la poca capacidad de interacción con los actuadores que controla, es decir, con las luminarias. De aquí se pueden destacar dos características. La primera de ellas es que el sistema no está pensado para establecer órdenes más complejas tanto de encendido/apagado como de regulación de la luminosidad que deben emitir las luminarias. Esto significa que el cuadro de mando no puede decidir sobre el apagado de ciertas luminarias para ahorrar energía o la limitación de la potencia atribuida a cada luminaria con el objetivo de minimizar su consumo. La segunda característica es que la mayoría de las luminarias no están preparadas para esta regulación de potencia. Es decir, las lámparas basadas en vapor de sodio operan adecuadamente únicamente a una potencia concreta (en estos casos 150 y 100 W), pero al alimentarse con una potencia menor se produce gran inestabilidad en el tono de emisión de luz, cosa que provoca dificultades en cuanto a la regulación de la intensidad de emisión de luz de estas (Poza, 2009).

3.3.3.1. Contaminación lumínica

Un apartado concreto que es interesante tratar en cuanto a las ventajas o desventajas de un sistema de iluminación de alumbrado público es la contaminación lumínica. Este concepto se puede definir como la alteración de la oscuridad natural del entorno durante la noche provocada por luz que no está siendo aprovechada en su totalidad. Se ha demostrado que esto puede generar impactos en la salud de los seres vivos (luminica, 2022), así que es un tema que tratar en cualquier proyecto de iluminación en exteriores.

Una de las manifestaciones más significativas de este fenómeno es la dispersión hacia el cielo. Esta se origina por una mala instalación de las luminarias, cuyos haces de luz no están dirigidos exclusivamente hacia el suelo y se desvían en todas direcciones, disminuyendo de esta manera la oscuridad de los cielos.

En el sistema que se está tratando (ACLIC1 y sus luminarias), como se ha comentado en apartados anteriores, existen dos tipos de farolas o lámparas. Las funcionales están situadas a una distancia de entre 4 y 10 metros del suelo

y están pensadas para dirigir los haces de luz hacia el suelo, así que no se tendrán en cuenta, en principio, como desventajas en cuanto a la contaminación lumínica.

No obstante, el sistema también dispone de farolas tipo globo. Estas dirigen gran parte de sus haces de luz en dirección horizontal y hacia el cielo, así que se deberían tener en cuenta como elementos que provocan contaminación lumínica en el municipio.

En la figura inferior se pueden apreciar ejemplos de los dos tipos de farolas comentados.



Imagen 4 - Farolas tipo Funcional (izquierda) y Globo (derecha). Fuente: Ayuntamiento de Ablitas

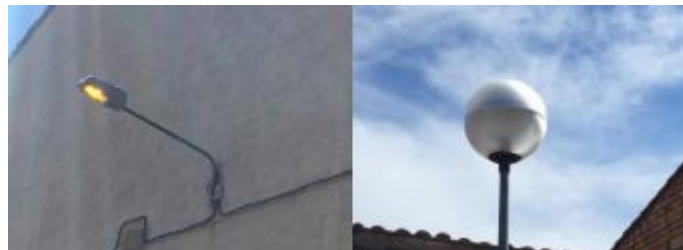


Imagen 5 - Farolas tipo Funcional y Globo: detalle. Fuente: Ayuntamiento de Ablitas

3.3.4. Cálculos de consumo eléctrico anual

Para poder comparar el sistema actual con un sistema que pretenda mejorarlo, aparte de conocer las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, es interesante hacer un estudio del consumo eléctrico en un espacio de tiempo (anual, en este caso) que realizarán ambos sistemas bajo ciertas condiciones.

En este caso, gracias a la memoria técnica complementaria al plan del director sobre el proyecto en cuestión se puede conocer que el consumo eléctrico del cuadro de mando en cuestión y sus respectivas luminarias ha sido de **23,929.130 kWh en el último año.**

A continuación, se decide calcular la potencia instantánea del sistema suponiendo que todas las luminarias están operando al 100% de su potencia de uso óptimo. Para ello, se debe hacer una suma de las potencias de todas las luminarias:

ID	Uds.	Potencia luminarias (W)	Potencia Equipo (W)	Total (W)
ABLIL1000	6	150 W	21 W	1026
ABLIL1001	3	150 W	21 W	513
ABLIL1002	2	150 W	21 W	342
ABLIL1003	7	150 W	21 W	1197
ABLIL1004	2	150 W	21 W	342
ABLIL1005	10	150 W	21 W	1710
ABLIL1006	10	100 W	16 W	1160
ABLIL1007	9	50 W	-	450

Tabla 2 - Potencias luminarias ABLIC1

En esta tabla lo único que vale la pena aclarar es que la columna "Total" se obtiene sumando la potencia de la luminaria y la del equipo y multiplicarlo por las unidades de dicha luminaria.

De esta manera, la potencia total requerida por todas las iluminarias pertenecientes al cuadro ABLIC1 será la suma de las potencias de la columna "Total" de la Tabla 2. Así pues, se obtiene una **potencia calculada de 6.74 kW**, muy cercana a los 6.6 kW de potencia contratada para este cuadro de mando.

En este punto interesa encontrar la cantidad total de horas que las luminarias han estado encendidas. Para ello se puede dividir directamente el consumo anual entre la potencia calculada:

$$E = P \cdot t \rightarrow t = \frac{E}{P} = \frac{23929.130}{6.74} = 3550.32 \text{ horas} = t$$

Ecuación 1 - Relación entre Energía, Potencia y Tiempo

Así pues, se tiene en cuenta que, durante el periodo de un año, el total de horas que las luminarias están encendidas es de 3550. Esto, teniendo en cuenta que un año tiene 365 días, implica que cada día las luminarias están encendidas, de media, **9.73 horas/día**. Es importante recalcar que este valor

está calculado en término medio, puesto que al tratarse de un sistema con encendidos y apagados regidos por célula fotoeléctrica, según la época del año y las condiciones climáticas la cantidad de horas reales de encendido y apagado de las luminarias variarán.

4. Sustitución de luminarias

Este apartado tendrá el objetivo de proponer una alternativa que mejore las principales desventajas comentadas en los apartados anteriores. Para ello se enfocará la propuesta en la sustitución de las principales luminarias que implican un alto consumo eléctrico.

De esta manera, inicialmente se deberá partir de una serie de consideraciones técnicas de obligado o recomendado cumplimiento por los organismos y comités relacionados con la eficiencia en sistemas de alumbrado público y Smart Cities. A continuación, se hará una selección de las luminarias que cumplan con estas consideraciones técnicas y se procederá a rehacer los cálculos de consumo energético teniendo en cuenta estas nuevas luminarias. Finalmente, se comentarán las ventajas y desventajas de este sistema alternativo haciendo algo de énfasis en la contaminación lumínica.

4.1. Consideraciones generales

Para poder seleccionar adecuadamente qué tipo de luminarias serían las más indicadas para la realización de este proyecto se parte, principalmente, del reglamento de eficiencia energética REEIAE. En concreto, se tendrá en cuenta la Instrucción Técnica Complementaria EA – 04 (ITC-EA-04 en adelante), en la que aparecen los requisitos que deben cumplir los componentes y sistemas que forman parte de una instalación de alumbrado exterior en el territorio español.

La **eficacia de una luminaria** mide la cantidad de flujo luminoso (o luminosidad) emitida por una fuente en relación con la potencia que se necesita para generarla (lux/W). Según el ITC-EA-04 las luminarias deben cumplir las condiciones que aparecen en la siguiente tabla:

	Luminaria Funcional	Luminaria Ambiental
Eficacia mínima, tonalidad \geq 2700 K	90 lm/W	65 lm/W
Eficacia mínima, tonalidad $<$ 2700 K	85 lm/W	60 lm/W

Tabla 3 – Eficacias de luminarias. Fuente: ITC-EA-04

La tonalidad es la sensación que percibe el ser humano ante una luz determinada y se mide en Kelvin (K). Para escoger un valor adecuado de tonalidad se intentará replicar el color de la luz solar, puesto que será lo más cómodo para los ciudadanos del municipio. El tono de luz solar (también conocido como tono neutro) se encuentra **entre los 4000 K y los 4500 K** (bricoprofesional, 2022), así que se deberán seleccionar luminarias de esta

tonalidad. Esto implica que la eficacia mínima de estas luminarias debe ser superior a los **90 lm/W**.

Por otro lado, también se debe tener en cuenta el parámetro de eficiencia de la luminaria. Este se define, según la Instrucción Técnica Complementaria EA – 01 del REEIAE (ITC-EA-01 en adelante) 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”. Así pues, se puede calcular de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{S \cdot E_m}{P} \left(\frac{m^2 \cdot lux}{W} \right)$$

Ecuación 2 - Eficiencia de una luminaria

El parámetro P se refiere a la potencia de la luminaria en Watts, el parámetro S indicará la superficie iluminada por la luminaria en metros cuadrados, y E_m indica la iluminancia de esta luminaria en lux.

Pese a que es un parámetro que se debe tener en cuenta y conocer, la mayoría de los fabricantes de luminarias para alumbrado exterior ya aseguran valores de eficiencia energética mínima superiores a los 22 m²·lux/W, que es lo mínimo que se pone como requisito en la instrucción técnica ITC-EA-01. De esta manera, no se tendrá como factor determinante para tener en cuenta para la elección de las luminarias en los siguientes apartados.

Por último, se puede hacer un inciso en comentar aspectos relacionado con el precio de las luminarias a instalar y la propia instalación de estas. Al tratarse de un proyecto de compra pública el precio de este será un aspecto importante para que el ayuntamiento escoja esta alternativa con respecto a otras propuestas de otros organismos. Así pues, una vez encontrados los requisitos mínimos que deben cumplir las nuevas luminarias se debe tener en cuenta el factor calidad/precio de estas, el coste que pueda tener su instalación y llegar a un punto de equilibrio que favorezca la elección de esta alternativa por parte del ayuntamiento.

4.2. Sustitución de luminarias de vapor de sodio por luminarias LED

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores las luminarias basadas en tecnología de vapor de sodio requieren de una gran cantidad de potencia en comparación con las luminarias LED. Por este motivo se ha decidido que el primer requisito que deben tener todas las luminarias de la instalación es que estén basadas en esta tecnología.

Actualmente, el cuadro de mando ABLIC1 consta de tres tipos de luminarias diferentes. Una de ellas ya está basada en tecnología LED, así que para ahorro de coste en la posible implantación del proyecto se ha decidido que se sigan utilizando esas mismas luminarias. Con esto en mente se procede a la elección de las nuevas luminarias LED que sustituirán a las que están basadas en vapor de sodio.

Inicialmente se plantean las características que se requieren para estas luminarias más allá del tipo de tecnología:

- Potencia nominal de luminaria variable entre 30 y 60 W. Se escogen estos niveles porque son los típicos en luminarias LED para alumbrados público exterior.
- Flujo luminoso de luminaria entre 3500 y 6500 lm para 4000K. Igual que en cuanto a la potencia nominal, son valores estándar para luminarias led de alumbrado exterior.
- Tonalidad entre 2700 K y 4500 K. De esta manera, en un futuro se podría hacer otro proyecto de regulación de tonalidad de las luminarias, consiguiendo sensaciones más cálidas y suaves (que corresponden al rango de los 2700 K a 3000 K).
- Eficacia mayor de 115 lm/W. Esto es, aproximadamente, un 25% de eficacia superior a la mínima que marca la normativa. El objetivo es encontrar luminarias que sean punteras en cuanto a la eficacia para que, así, la inversión sea más interesante en el largo plazo. Además, las lámparas de vapor de sodio tienen una eficacia luminosa máxima de 110 lm/W, así que con este valor se asegura el sorpasso al sistema original en términos de eficacia.

Con esto sobre la mesa se puede pasar a la elección de modelos concretos para cada caso. Como en la instalación original se tenían farolas para iluminación funcional y farolas tipo globo se intentará respetar el mismo esquema en la propuesta de sustitución de luminarias.

De cara a las farolas funcionales se pueden reemplazar por la siguiente farola: Farola LED para Alumbrado Público 50W IP65 Lumileds (iluminashop.com, 2022). Las principales características de esta farola son las siguientes:

- Potencia: 50 W
- Flujo luminoso: 6000 lm
- Tensión de alimentación: 180-265 V (continua)
- Temperatura del color (tonalidad): Blanco Neutro 4500 K
- Eficacia: 120 lm/W

- Precio: 32 €

Por otro lado, la farola tipo globo se podría reemplazar por la siguiente: Filux F5242 (Amazon - Filux F5242, 2022). Sus características más significativas son las siguientes:

- Potencia: 40 W
- Flujo luminoso: 4800 lm
- Tensión de alimentación: 220 V (continua)
- Temperatura del color (tonalidad): Blanco Neutro 4000 K
- Eficacia: 120 lm/W
- Precio: 324 €

Únicamente cabe recalcar que la eficacia de las lámparas se ha calculado directamente dividiendo el flujo luminoso entre la potencia nominal de las mismas.

4.3. Cálculos de consumos de nuevas luminarias

Al tener claras qué luminarias se proponen usar en sustitución a las originales es interesante rehacer los cálculos de consumo de potencia.

Para ello inicialmente se decide calcular la potencia instantánea del sistema suponiendo que todas las luminarias están operando al 100% de su potencia de uso óptimo. Para ello, se ha creado la siguiente tabla similar a la Tabla 2 con las potencias de todas las luminarias (al tener todas las luminarias basadas en tecnología LED no se requiere de equipo auxiliar, así que la cuarta columna de la tabla 2 no tiene sentido):

ID	Uds.	Potencia luminarias (W)	Total (W)
ABLIL1000	6	50	300
ABLIL1001	3	50	150
ABLIL1002	2	50	100
ABLIL1003	7	50	350
ABLIL1004	2	50	100
ABLIL1005	10	50	500
ABLIL1006	10	40	400
ABLIL1007	9	50	450

Tabla 4 - Potencias luminarias LED ABLIC1

De esta manera, la potencia total requerida por todas las luminarias pertenecientes al cuadro ABLIC1 una vez se hayan sustituido será la suma de las potencias de la columna "Total" de la Tabla 4. Así pues, se obtiene una **potencia calculada de 2.35 kW**, que es mucho menor a los 6.74 kW calculados en el apartado 3.3.4 de este mismo documento.

En este punto cabe recordar que, según lo calculado, las luminarias estarán encendidas una media de 9.73 horas por día, cosa que implica un total de 3550 horas anuales (teniendo en cuenta 365 días por año). De esta manera es posible hacer el cálculo del consumo eléctrico anual del cuadro ABLIC1 reemplazando las luminarias de vapor de sodio por luminarias LED más eficaces mediante la siguiente expresión:

$$E = P \cdot t = 2.35 \cdot 3550.32 = \mathbf{8343 kWh} = E$$

Ecuación 3 - Consumo anual ABLIC1 con luminarias LED

Una vez se conoce el valor del consumo eléctrico anual se pueden valorar los aspectos positivos y negativos de esta propuesta, siempre en comparación con el sistema original.

4.4. Ventajas e inconvenientes

Al igual que se ha hecho en relación con el sistema original, para valorar adecuadamente las ventajas e inconvenientes del sistema basado en tecnología LED se procede al análisis de tres aspectos: tipo de encendido/apagado, consumo eléctrico y la capacidad de interacción entre el cuadro de mando y las luminarias.

En este caso, el tipo de encendido y apagado del sistema se seguirá basando en el accionado del sistema a través de una célula fotoeléctrica. Esto, como se ha comentado, es un punto positivo del sistema, pero no se puede considerar como una ventaja con respecto al sistema tradicional.

De cara a la capacidad de interacción del cuadro de mando con las luminarias se tiene que, al igual que en el caso original, el cuadro de mando no puede decidir sobre el apagado de ciertas luminarias para ahorrar energía o la limitación de la potencia atribuida a cada luminaria con el objetivo de minimizar su consumo. No obstante, en este caso se tienen luminarias que sí que están pensadas para poder realizar una regulación de potencia. Esto es porque en este tipo de lámparas la relación entre potencia inyectada en la luminaria (tensión) y flujo luminoso emanado por esta es constante. A mayor tensión de entrada mayor será el flujo luminoso, y cuando la tensión sea máxima (230 V) la luminaria estará consumiendo la potencia óptima emanando el máximo flujo

luminoso. Esto se puede considerar una ventaja, puesto que hace que el sistema sea escalable de cara a futuros proyectos de regulación de luminosidad en la vía pública.

Otro aspecto interesante para tener en cuenta es la capacidad de utilización del sistema original si únicamente se pretenden cambiar las luminarias. En este caso se encuentra una ventaja significativa en el hecho que la tensión de alimentación de las luminarias LED ya se ha escogido para que sea la misma tensión requerida por las luminarias originales. Este hecho, sumando a que la potencia consumida por las nuevas luminarias es menor a la consumida por las originales implica que no sea necesaria la inclusión de cableado adicional (siempre y cuando los cables originales estén en buen estado). Así pues, como los modelos de luminarias que se han decidido contienen, además de la luminaria, la propia lámpara como tal, únicamente se tendría que verificar si el poste o método de sujeción de la luminaria original puede usarse para estas nuevas luminarias. Al no tener información de cómo son estos postes no se considera su estudio en este proyecto.

Finalmente, la diferencia de consumo eléctrico entre el sistema basado en LED y el sistema original hacen que este nuevo sistema sea muy conveniente. Para hacerse una idea numérica es interesante mostrar la porción de consumo eléctrico que representa el hecho de sustituir todas las luminarias (que no eran LED) por LED de la siguiente manera:

$$\% \text{ consumo} = \frac{\text{consumo sistema LED}}{\text{consumo original}} \cdot 100 = \frac{8343}{23929.130} \cdot 100 = 34.89 \%$$

Ecuación 4 - Porción de consumo sistema LED vs sistema original

Esta fracción de consumo representa un **ahorro aproximado del 65%** de la energía eléctrica si se compara la nueva alternativa con el esquema original.

4.4.1. Contaminación lumínica

Antes de finalizar este apartado se debe hacer mención especial a los temas relacionados con contaminación lumínica.

Primeramente, se puede mencionar las tonalidades de la luz. Como se ha apreciado en los apartados anteriores las luminarias LED utilizadas proporcionan tonalidades máximas entre 4000 K y 4500 K, cosa que equivale a las tonalidades recibidas por la luz sola en la superficie terrestre. Sobrepasar estos valores implicaría una sensación de luz azulada que puede provocar malestar en la ciudad y problemas de vista para los animales (incluidos los humanos), puesto que los sistemas oculares no están biológicamente diseñados para soportar este tipo de tonalidades durante un periodo prolongado. De esta manera, seleccionando este tipo de luminarias se asegura

que no se va a provocar un daño físico o incomodidad a los habitantes del municipio.

Por otro lado, y más importante, está la sustitución de la lámpara de vapor de sodio tipo globo por una lámpara con diseño similar, pero que únicamente emite luz en dirección al suelo. De esta forma se consigue minimizar el efecto de dispersión de haces de luz hacia el cielo, reduciendo la contaminación lumínica.

En la figura inferior se puede apreciar el diseño de esta lámpara.



Imagen 6 - Diseño luminaria Filux F5242 invertida. Fuente: Amazon

5. Regulación de luminarias

Esta sección de la memoria tiene como objetivo proponer, de manera teórica y descriptiva, un sistema que se pueda utilizar en el caso de uso que permita la regulación de intensidad lumínica de las luminarias. Para ello se parte de la idea de que la sustitución de las luminarias tradicionales por las luminarias LED se ha realizado con éxito.

Una vez vistos los protocolos de modulación LED en el apartado 2.3.5 de este documento se ha decidido que el sistema más interesante para implantar en el caso de uso concreto es uno basado en tecnología DALI. Así pues, en primer lugar, se especificará con algo más de detalle cómo funciona el sistema DALI y por qué es una solución interesante para el control de las luminarias del cuadro ABLIC1. Posteriormente, se indicarán qué elementos son necesarios añadir a la instalación para poder usar esta tecnología. A continuación, se hará una propuesta de regulación de potencia para las iluminarias basada en franjas horarias. Finalmente, se volverán a rehacer los cálculos de consumos eléctricos de las luminarias teniendo en cuenta que se están regulando mediante el sistema DALI.

5.1. Consideraciones generales de DALI

Como se ha comentado en el apartado 2.3.5.2 de este documento, DALI es un protocolo que permite establecer un flujo de información bidireccional entre un controlador controlador, que actúa como maestro, y una o varias luminarias, que actúan como esclavos.

Para uso común el sistema no requiere de cableado especial apantallado. Lo que se suele hacer es utilizar un solo cableado conjunto en el que se incluya la línea de alimentación de las luminarias, los cables de bus DALI y una toma a tierra. En la imagen inferior se puede apreciar un ejemplo de este tipo de cableados.

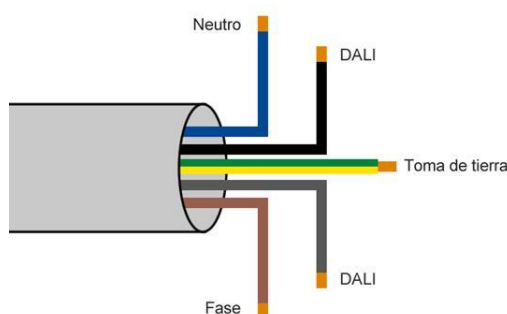


Imagen 7 - Cableado básico sistemas DALI. Fuente: blog.ledbox.es

Un punto interesante que tratar es la longitud del cableado de la instalación. Para ello se debe considerar que la máxima caída de tensión a lo largo de la línea de control DALI no puede ser superior a 2 V. Además, la intensidad máxima que circule por estos cableados no debe ser superior a 250 mA. En el caso concreto de nuestra instalación no se especifica la distancia a la que se encuentran las luminarias del cuadro de mando (donde se debería ubicar el maestro DALI), así que no se puede hacer cálculo de la caída de tensión real de la línea de bus ni de las estimaciones del valor de sección de estos cables.

Por otro lado, el sistema DALI permite la configuración de hasta 16 escenas diferentes o redireccionamiento de 64 equipos individuales mediante un rango de tensiones de control que oscila entre los 9.5 y los 22.5 Voltios. La idea original es que nuestro sistema solo tenga una escena (todas las luminarias seguirán la misma estrategia, todas se encenderán, regularán y apagarán a la vez). Además, para el cuadro ABLIC1 se han considerado un total de 49 luminarias, así que el sistema DALI con un único maestro podría ser suficiente para controlarlas todas.

Una vez se tienen en mente estas consideraciones se pueden listar los elementos que requiere el sistema actual (teniendo en cuenta que se ha hecho la instalación de luminarias LED) para poder funcionar con DALI.

5.2. Elementos necesarios para poder utilizar DALI en el caso de uso

Además de disponer luminarias LED que sean compatibles con el sistema de regulación DALI, un esquema típico debe tener los siguientes componentes:

- DALI MASTER: Es el encargado de establecer el control sobre el resto de los elementos del sistema. Debe ser el núcleo de la instalación, así que debería situarse en el habitáculo del cuadro de mando. Un ejemplo podría ser el DALI Master dimmer SR-2400LC (LEDBOX, 2022).
- Drivers: Suministran la corriente eléctrica a través de las órdenes recibidas por el DALI MASTER. En el caso en cuestión se necesitará un elemento que pueda transformar la señal de control DALI (9.5 - 22.5 V) a una tensión de operación del rango de 100 – 230 V (coincidiendo los 230 V con la tensión máxima de operación de las luminarias LED seleccionada en el apartado 4.2). Un ejemplo de producto que se podría utilizar es el RE DA2 LE3 (dinuy, 2022). En la figura siguiente se puede apreciar qué conexión será necesaria entre la luminaria, el maestro DALI y el driver.

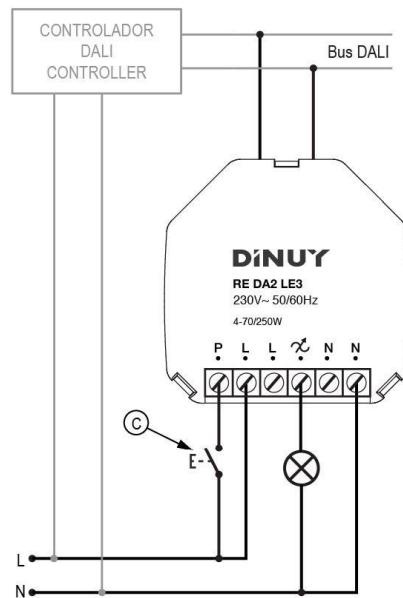


Imagen 8 - Esquema driver DALI RE DA2 LE3. Fuente: dinuy.com

Otros elementos comunes pueden ser paneles de control, sensores, repetidores y herramientas de configuración y monitorización (para los sistemas más avanzados) (blog.ledbox.es, 2022). No obstante, de momento no se tendrán en cuenta para la realización del sistema, puesto que se trata de una prueba de concepto más sencilla.

Por último, vale la pena añadir que en la instalación actual ya existen los cables de alimentación a las luminarias. Esto es, si se mira la Imagen 8, las líneas L y N. Dado que ya existen, no hace falta sustituirlas por un cableado específico que incluya los cables de alimentación y los cables de control DALI (Imagen 7), sino que únicamente será necesaria la inclusión de los cables de control (“Bus DALI” de la Imagen 8). Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima del cable es de 2 V y que la máxima corriente del sistema es de 250 mA, si se tiene en cuenta que la distancia entre las luminarias y el cuadro de mando es la máxima permitida por DALI (es decir, 300 m), se podría calcular el área de este cableado de la siguiente manera:

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I}{\Delta V}$$

Ecuación 5 - Expresión sección de un cable

En esta expresión el parámetro ρ corresponde el coeficiente de resistividad del material del cable. Suponiendo que este material es cobre, que tiene un valor de $\rho = 0.017 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, se puede sustituir en la expresión anterior para idear el área de dichos cables:

$$S(mm^2) = \frac{2 \cdot 0.017 \cdot 300 \cdot 0.25}{2} = 1.275 mm^2$$

Ecuación 6 - Sección mínima de cable control DALI

Así pues, teniendo en cuenta las condiciones mencionadas anteriormente, se podría escoger un cableado para el bus DALI con una sección estándar de 1.5 mm².

5.3. Propuesta de regulación de intensidad lumínica

Una vez claro el funcionamiento del sistema DALI y los elementos necesarios conviene decidir en qué medida va a afectar la regulación al sistema actual con las luminarias LED.

Como se ha visto, DALI ofrece muchas posibilidades de control de un sistema de iluminación. No obstante, para este proyecto, se ha decidido poner el foco únicamente en el control de la potencia consumida por las luminarias y dejar de lado otros elementos que puedan dar más información al DALI maestro para poder realizar una regulación de las luminarias en más detalle, pero que también supondrían una mayor complejidad del sistema.

Como se ha visto en apartados anteriores el encendido y apagado de las luminarias en el municipio de Ablitas se efectúa mediante una célula fotoeléctrica. Además, se conoce que las luminarias están encendidas, de media, 9.73 horas al día durante todo el año. Así pues, se ha decidido establecer franjas horarias entre las cuales la potencia suministrada a las luminarias variará, cambiando asimismo la luminosidad que las luminarias desprenderán.

Un ejemplo de perfil de demanda de potencia teniendo en cuenta que las luminarias están operativas 9.73 horas al día (es decir, 9 horas y 44 minutos) puede ser el siguiente:

- De 00:00 hasta 03:30 → Las luminarias estarán funcionando al 100% de su potencia máxima. Las primeras horas de iluminación del alumbrado público suelen ser las que requieren de más luminosidad en la vía pública, así que tiene sentido que las luminarias estén funcionando a máxima potencia.
- De 03:30 hasta 05:00 → Las luminarias estarán funcionando al 85% de su potencia máxima. Se trata de la franja horaria en la que la mayor parte de la actividad ya no se realiza en las calles, así que se podría reducir la luminosidad de las vías.

- De 05:00 hasta 07:00 → Las luminarias estarán funcionando al 65% de su potencia máxima. Coincide con una franja horaria en la que la mayoría de los ciudadanos estarán durmiendo, así que tiene sentido reducir considerablemente la luminosidad de la vía pública.
- De 07:00 hasta 09:44 → Las luminarias estarán funcionando al 100% de su potencia máxima. Se trata de las horas anteriores a la salida de sol, en la que gran parte del sector laboral ya empieza su jornada. Por este motivo tiene sentido restablecer la luminosidad de la vía a valores máximos hasta que amanezca completamente.

En este caso hay que recalcar que en los términos horarios no corresponden a la hora del día concreta de encendido o regulación de las luminarias. Se entiende por “00:00” la hora de encendido del sistema y por “09:44” la hora de apagado del sistema.

Una vez seleccionado este perfil de demanda de potencia se puede calcular cuán significativo sería aplicar regulación de potencia de luminarias si se compara con el sistema basado en luminarias LED sin regulación y con el sistema original basado en lámparas de vapor de sodio.

5.4. Cálculos de consumos utilizando sistema DALI

A raíz de la propuesta de regulación horaria del apartado anterior se decide calcular la potencia instantánea del sistema. En este caso no tiene sentido representar los datos en formato tabla, como la Tabla 2 sobre la potencia suministrada a las luminarias con el sistema original, o como la Tabla 4 que representa lo mismo para el sistema LED. Para ello, se ha creado el siguiente gráfico que pretende representar la variación de demanda de potencia del sistema.

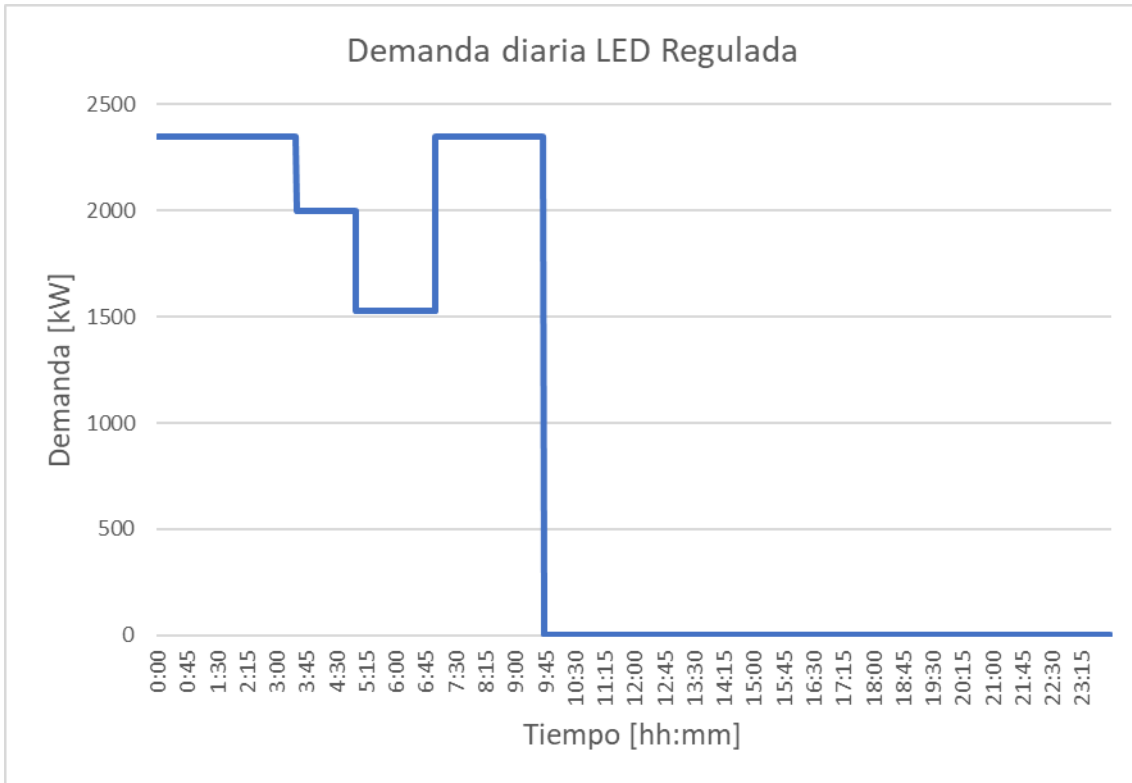


Imagen 9 - Perfil de demanda diario sistema LED Regulado

En este caso, se puede apreciar visualmente que la potencia inicial es la calculada en el apartado 4.3, es decir, 2.35 kW. Cuando las luminarias lleven, de media, 3 horas y media encendidas se aprecia que la demanda de potencia desciende a hasta los 2 kW (correspondientes al 85% de 2.35 kW). Posteriormente, cuando las luminarias lleven 5 horas encendidas la demanda baja todavía más, hasta los 1.53 kW. Finalmente, a las 7 horas de encendido del sistema la demanda subirá de nuevo a los 2.35 kW hasta el apagado de este.

Con esto en mente, se puede calcular el consumo energético diario como la suma del consumo energético de cada fase, de la siguiente manera:

$$E_d = P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + P_3 \cdot t_3 + P_4 \cdot t_4$$

$$E_d = 2.35 \cdot 3.5 + 2 \cdot 1.5 + 1.53 \cdot 2 + 2.35 \cdot 2.73 = 20.69 \text{ kWh}$$

Ecuación 7 - Consumo eléctrico diario sistema LED Regulado

Así pues, teniendo en cuenta que un año tiene 365 quedaría un consumo anual de **7752.5 kWh**. Con este valor en mente se pueden evaluar las ventajas e inconvenientes del sistema basado en LED con regulación DALI en comparación con el resto de los sistemas comentados.

5.5. Ventajas e inconvenientes

Para empezar a analizar este apartado se puede comentar el principal inconveniente de este sistema, y es la complejidad y el impacto económico que tendrá. De momento, la única función del maestro DALI es enviar las órdenes de encendido, regulación y apagado a las luminarias, pero ya es suficiente para que se puedan introducir situaciones de fallo no deseadas. Tanto en el sistema original como en el sistema basado en LED se ha supuesto que la potencia que alimenta las luminarias va directamente desde el cuadro de mando. En este caso el cuadro de mando se tendrá que reestructurar para incorporar el sistema DALI (como se ha comentado, el maestro DALI se debería ubicar en el cuadro de mando) y se deberían añadir cableado y elementos externos (drivers) entre el cuadro de mando y las luminarias. Los cableados dedicados a proporcionar alimentación a las luminarias sí que podrían ser los mismos que se utilizan en el sistema original, ya que se estará trabajando con la misma tensión de alimentación y menor potencia. Dada la sencillez esquemática del primer sistema estos cambios implican una complejidad significativa.

De cara al consumo de energía anual se puede apreciar una leve disminución en comparación con el sistema basado en luminarias LED sin regulación. Si se utiliza la Ecuación 4 se puede encontrar con facilidad que esto supone una reducción aproximada del 7%. Este valor es tan bajo porque la mayoría del tiempo de encendido se ha decidido que las luminarias sigan trabajando al 100% de su potencia. Si se hace la comparación con el sistema original se detecta una reducción de consumo eléctrico aproximado del 68%, cosa que es muy significativo por el hecho del uso de luminarias con menor demanda de potencia y no tanto por el hecho de la regulación como tal.

Desde luego la principal ventaja de la inclusión de un sistema de regulación basado en DALI es, en primer lugar, la capacidad de interacción que va a tener el núcleo del sistema (cuadro de mando) con las luminarias. Esto implica que, por ejemplo, si en un futuro se detecta que algunas de esas luminarias no necesitan funcionar con tanta potencia es muy sencillo regularlas al nivel que se desee sin tener que hacer ningún tipo de instalación física. Del mismo modo el sistema actual permite que sea escalable a futuro. Un ejemplo podría ser la inclusión de sensores de presencia cerca de cada luminaria que indicaran al maestro DALI si hay ciudadanos cerca. En este caso el maestro podría tomar la decisión de apagar completamente dichas luminarias hasta que se perciba presencia de gente.

6. Líneas futuras y mejoras

En este apartado se comentarán toda una serie de ideas que aportarían valor a este proyecto pero que no se han contemplado para la realización de este. Se hablará de tres aspectos: la realización de un estudio económico, el diseño del sistema DALI para el cuadro de mando escogido y la extensión de todo el estudio para el resto de los cuadros de mando del municipio.

6.1. Realización de estudio económico

En cualquier proyecto es interesante hacer un estudio económico que permita saber con el máximo detalle posible el gasto del proyecto y una previsión del plazo retorno de la inversión. En este proyecto en particular se ha considerado que estos aspectos podrían formar parte de un proyecto independiente debido a la cantidad de horas de trabajo que necesitaría. No obstante, se ha querido mencionar ciertos aspectos clave que puedan ayudar a tener una idea aproximada del coste de realización del proyecto y el ahorro anual que supondría la implantación de este.

Para este apartado se tendrá en cuenta que el sistema final estará compuesto por los elementos definidos en el apartado 5 de este proyecto, es decir, suponiendo que se ha decidido realizar la sustitución de luminarias y la regulación de estas.

De esta manera se pueden identificar, inicialmente, 2 principales elementos de inversión:

- La propia creación de este proyecto.
- La compra de los elementos necesarios (tanto luminarias como elementos del sistema DALI).

De cara a la creación de este proyecto se ha estimado que la dedicación de tiempo del ingeniero encargado de ejecutarlo ha sido de 300 horas. Así pues, si se tiene en cuenta que el coste por hora de un ingeniero de proyectos es, de media, de 45 €/hora (suele oscilar entre los 30 y 60 €/hora), se prevé un gasto de **13500 €** en la realización este proyecto como tal.

A continuación, se estudiará el coste de los elementos necesarios. Para hacerlo más ameno se ha realizado una tabla donde aparecen los elementos, unidades y precios por unidad.

Elemento	Unidades	Precio Unidad (€)	Precio Total (€)
Lumileds 50W	30	32	960

Filux F5242	10	324	3240
DALI Master SR-2400LC	1	50	50
Driver DALI RE DA2 LE3	49	170	8,330
TOTAL			12580

Tabla 5 - Costes de elementos sistema de regulación de luminarias

De esta tabla destacan dos consideraciones. La primera es que se ha considerado que las luminarias LED que ya tenía el sistema original también utilizarán el Driver DALI para poder formar parte del sistema de regulación. La segunda es que no se ha considerado el coste del cableado, puesto que las medidas no se han podido calcular en este proyecto.

Pese a que haya muchos otros puntos de gasto (como la programación del sistema DALI, la instalación de los componentes en el municipio, etc.) en este caso se supondrá que el coste del proyecto se encuentra en $13500 + 12580 =$ **26080 €**.

A continuación, se procederá a estudiar el coste anual del sistema original y del sistema con regulación de luminarias LED propuesto. Para ello se parte de un dato aproximado de precio de kWh en España de 0.182 €. Esto corresponde al precio medio de 2021 (Roams, 2021).

La diferencia de consumo eléctrico anual de los dos sistemas es de $23929 \text{ kWh} - 7753 \text{ kWh} = 16176 \text{ kWh}$. Esto se traduce, si se tiene en cuenta el precio medio, a un ahorro de **2944 €** anuales. De esta manera, se podría estimar que el retorno de la inversión se conseguiría en un plazo de 9 años.

Cabe recalcar que estos últimos cálculos se han hecho teniendo en cuenta el precio del kWh en España en 2021. No obstante, cada año se prevén subidas de los precios de la electricidad, así que este retorno de la inversión será menor a medida que más se encarezca la electricidad en el país.

6.2. Diseño/programación del sistema DALI para ABLIC1

En el apartado 5 de este proyecto se ha propuesto las principales ideas que hay que tener en mente en el momento de utilizar el protocolo DALI para la regulación de las luminarias del cuadro de mando ABLIC1. En este caso el objetivo principal ha sido demostrar que el sistema con luminarias LED se puede adaptar con facilidad para poder incluir regulación de luminarias. De esta manera se ha apreciado una posible disminución del consumo eléctrico anual del sistema formado por el cuadro de mando y las luminarias.

Además, se ha comentado que el sistema estará regulado por franjas horarias en el que a partir de cierto tiempo desde el encendido de las luminarias la potencia suministrada a estas se irá reduciendo y aumentando.

Así pues, sería interesante la realización del diseño completo y programación del sistema basado en protocolo DALI para que se pueda ejecutar la idea comentada teniendo en cuenta el esquema de luminarias de ABLIC1 y la regulación horaria comentada. Esto podría formar parte, por ejemplo, de un Trabajo de Fin de Grado o de Máster de ingeniería de Telecomunicaciones.

6.3. Extensión del estudio para el resto de los cuadros de mando del municipio

Por último, y una vez se haya realizado un estudio económico detallado y el diseño del sistema DALI para el cuadro de mando ABLIC1 sería interesante extender el estudio para el resto de los cuadros de mando. Esto es un punto interesante, puesto que las tecnologías del resto de cuadros son las mismas que las del ABLIC1, así que gran parte del estudio estará hecho y solo habrá que replicarlo con algunos matices.

En este caso, se podría disponer de un sistema centralizado que reciba datos de todos los maestros DALI del municipio y pueda cambiar la programación de ellos. Así se podrían tomar ciertas decisiones en cuanto a la iluminación y consumo energético del municipio que permitan que este se acerque a la idea de Smart City.

7. Conclusiones

Para poder llevar a cabo unas conclusiones que puedan representar las lecciones aprendidas en el desarrollo de este proyecto es interesante repasar los aspectos más representativos del mismo.

En el apartado 1 se han comentado aspectos introductorios que relacionan la eficiencia de los sistemas de iluminación pública con el concepto de Smart City. Además, se ha definido tanto la planificación del trabajo como sus objetivos principales, cosa que permite evaluar en qué grado el proyecto final ha estado alineado con las ideas iniciales.

Con esto en mente, a continuación, se recordarán y se valorarán uno por uno los objetivos iniciales del proyecto:

1. *Estudio de los sistemas convencionales de iluminación pública, haciendo hincapié en términos de eficiencia energética y contaminación lumínica.* Este objetivo se ha cumplido en dos apartados distintos del proyecto. Inicialmente en el apartado 2.1.1 se han comentado los sistemas de iluminación tradicionales y la tecnología de iluminación que se usa en ellos. Por otro lado, en el apartado 3.3.3 se ha hecho hincapié en las ventajas e inconvenientes de los sistemas tradicionales (en concreto, sobre el cuadro de mando ABLIC1), tanto en cuanto a eficiencia energética como de cara a contaminación lumínica.
2. *Estudio de sistemas alternativos de iluminación pública y elección del más adecuado.* En el apartado 2.1.2 de este proyecto ya se ha adelantado que la tecnología LED y su auge y abaratamiento en los últimos años ayudaban a que la elección de esta tecnología sea clara con relación a tecnologías de iluminación tradicionales. Además, a lo largo del proyecto se han comentado los principales protocolos de modulación de tecnología LED escogiendo el protocolo DALI para este caso de uso.
3. *Demostración de las ventajas e inconvenientes de ambos tipos de sistemas (tradicionales y más eficientes).* Este objetivo se ha conseguido cumplir aplicándolo al caso de uso del proyecto (ABLIC1) y al estudio que se ha ido haciendo en torno a este. En concreto, se ha tratado en los apartados 3.3.3 y 4.4.
4. *Propuesta de una solución que permita mejorar los inconvenientes de los sistemas tradicionales para una ciudad concreta.* Este objetivo se ha visto algo modificado. La idea inicial era evaluar toda una ciudad y hacer una propuesta que consiguiera, en parte, minimizar el gasto eléctrico en cuanto a alumbrado público. No obstante, una vez se ha empezado a

trabajar, se ha decidido centrar el estudio únicamente en una sección concreta de esta ciudad. En este caso el estudio se ha enfocado en un solo cuadro de mando que podía representar la variedad de luminarias del municipio. Debido a este desvío de los objetivos iniciales se ha decidido hacer, además, un estudio de regulación de luminarias para proponer una alternativa más al caso de uso del proyecto.

5. *Simulación del consumo eléctrico de la misma ciudad con ambos sistemas (el tradicional y el nuevo diseño).* Este objetivo también se ha tenido que ver modificado. Inicialmente se partía de una idea en que se conseguirían datos más concretos del sistema de iluminación pública de un municipio y se podría hacer una simulación más realista (por ejemplo, con horarios concretos de encendido y apagado de las luminarias durante todo un año). Al no tener datos tan concretos se ha tenido que establecer un perfil de demanda de potencia de media diario del cuadro de mando ABLIC1 en el estado actual y evaluar cómo cambiaría el perfil de demanda si se aplicaran los diseños aportados. En este caso es interesante mostrar el siguiente gráfico.



Imagen 10 - Comparativa de demandas de potencia diarias de los tres sistemas

En este caso, en color naranja aparece la demanda de potencia del sistema tradicional (constante a 6.74 kW), en color gris aparece la del sistema LED sin regulación de luminarias (constante a 2.35 kW) y en azul la del sistema LED con regulación de luminarias. En todos los casos, el tiempo de encendido se ha estimado que ha sido el mismo, de 9.73 horas por día.

6. *Estudio de los efectos, en el ámbito de contaminación lumínica, del uso del nuevo sistema en relación con el tradicional para dicha ciudad.* Este objetivo sí que ha sido cumplido en su totalidad. En este caso se pueden

apreciar los resultados en el apartado 3.3.3.1 en cuanto al sistema tradicional y en el apartado 4.4.1 en cuanto al sistema LED.

Como se ha podido apreciar los principales objetivos del proyecto se han podido cumplir. Los que no se han asumido en su totalidad han sido por la confianza inicial del autor de este trabajo en cuanto a la obtención de datos reales de una ciudad. En este caso es importante aprender la lección de no subestimar aspectos del proyecto que pese a que inicialmente no parezcan tan significativos o complicados lo acaben siendo.

Con respecto a la planificación de la metodología que se pretendía llevar de cara a la realización del proyecto se puede comentar que ha sido un éxito en su mayoría. Si se echa un vistazo a la planificación inicial (apartado 1.4 de este proyecto) se apreciará que no había mucho margen para la finalización del trabajo. El hecho de haberlo podido finalizar antes de la fecha límite es una hazaña que es interesante recalcar. No obstante, hay aspectos que se deben tener en mente:

1. En el apartado 1.3 de esta memoria se ha comentado que se puede proponer un sistema de ciudad mixto en el que algunas zonas sigan operando con iluminación tradicional y otras operen con un sistema más eficiente. Finalmente, como el estudio se ha hecho únicamente con un cuadro de mando este escenario no ha aplicado.
2. En la planificación del proyecto se puede apreciar que la elección de la ciudad sobre la cual hacer el estudio tenía una duración aproximada de diez días. Como se ha comentado en párrafos anteriores esta tarea no se consideraba tan grande como ha acabado siendo. Finalmente, ha sido una de las tareas más significativas del proyecto en cuanto a dedicación se refiere.

Con esto en mente únicamente cabe finalizar diciendo que para el autor ha sido un trabajo lleno de retos, pero a fin de cuentas exitoso.

8. Glosario

DALI: Digital Addressable Lighting Interface. Se trata de un protocolo de regulación de luminarias basadas en tecnología LED.

LED: Light-emitting diode. Es una fuente de luz que basa su funcionamiento en la corriente eléctrica que atraviesa un material semiconductor.

Smart City: Ciudad Inteligente. Se trata de un ideal de ciudad que aplica tecnologías TIC para mejorar ciertos aspectos de su funcionamiento.

Iluminación pública: También conocido como alumbrado público. Es un sistema de iluminación controlado y mantenido por los servicios municipales para proporcionar luz artificial en la vía pública.

Iluminación tradicional: Se entiende como tecnologías de iluminación anteriores a la implantación de la tecnología LED.

Eficiencia energética: Relación entre el producto de la superficie iluminada por la iluminancia media en servicio de la instalación entre la potencia activa total instalada.

Cuadro de mando/control: Conjunto de mecanismos que controlan el encendido y apagado de elementos eléctricos conectados al mismo.

Perfil de demanda: Evolución de la potencia demandada por un sistema en función del tiempo.

9. Bibliografía

(2015). Obtenido de FuturEnergy:

https://www.futureenergyweb.es/pdf/articulos/2015-11/FuturEnergy-Nov15_31-32.pdf

(2022). Obtenido de CASADOMO:

<https://www.casadomo.com/comunicaciones/iluminacion-inteligente-mediante-tecnologia-power-over-ethernet-caso-torre-europa>

(2022). Obtenido de gtled.com:

<https://www.gtled.com/sistema-de-regulacion-led-1-10v-de-gtled/>

(2022). Obtenido de wago.com: <https://www.wago.com/es/dali>

(2022). Obtenido de interact-lighting.com:

<https://www.interact-lighting.com/es-ar/case-studies/guadalajara>

(2022). Obtenido de Nobbot:

<https://www.nobbot.com/futuro/alumbrado-inteligente-para-las-smart-cities-eficiencia-energetica-y-ahorro-economico/>

(2022). Obtenido de gecurrent.com:

<https://www.gecurrent.com/la-es/sistemas-control/lightgrid>

Amazon - Filux F5242. (2022). Obtenido de

https://www.amazon.es/dp/B07CC6YZ5C/ref=asc_df_B07CC6YZ5C165015420000

Barcelona, A. d. (2022). *Ajuntament de Barcelona*. Obtenido de Ajuntament de Barcelona:

<https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/es/servicios/la-ciudad-funciona/mantenimiento-del-espacio-publico/gestion-energetica-de-la-ciudad/gestion-del-alumbrado-publico>

blog.ledbox.es. (2022). Obtenido de

<https://blog.ledbox.es/informacion-led/instalacion-de-luminarias/sistema-dali-de-iluminacion>

bricoprofesional. (2022). Obtenido de

<https://bricoprofesional.com/blog/tonalidades-de-luz/>

Carracedo, J. (2022). <https://smart-lighting.es/>. Obtenido de

<https://smart-lighting.es/tecnologias-comunicacion-inalambricas-iluminacion-vial-exteriores/>

Church, N. (2022). *sp.schreder.com*. Obtenido de

<https://sp.schreder.com/es/blog/sistemas-de-iluminacion-inteligente-de-schreder-adaptan-la-luz-en-tiempo-real-para-proteger>

dinuy. (2022). Obtenido de https://dinuy.com/es/productos/reguladores-de-luz_reguladores-de-luz/lamparas-y-tiras-led_lamparas-y-tiras-led/regulador-rlc+led-con-entrada-dali/dali-2-re-da2-le3/

EcuRed. (2022). Obtenido de https://www.ecured.cu/L%C3%A1mparas_de_vapor_de_mercurio

España, G. d. (2022). Obtenido de RD 1890/2008: <https://www.mitma.es/carreteras/normativa-tecnica/13-iluminacion/reglamento-de-eficiencia-energetica-en-instalaciones-de-alumbrado-exterior-rd-18902008>

ESTRADA, L. T. (2021). *Metrópoli MID*. Obtenido de metropolimid: <https://metropolimid.com.mx/en-contexto-smart-city/>

Garrett, C. (2022). *Selectra*. Obtenido de <https://climate.selectra.com/>: <https://climate.selectra.com/es/actualidad/precio-luz-subida>

iluminashop.com. (2022). Obtenido de <https://iluminashop.com/led-producto/iluminacion-industrial-led/farolas-led-alumbrado-publico/farola-led-para-alumbrado-publico-50w-ip65-chip-sanan>

ILUMINET. (2022). Obtenido de <https://www.iluminet.com/control-iluminacion-dmx-dali-atenuador/>

ILUMINICA. (2022). Obtenido de iluminica.com: <http://iluminica.com/la-eficiencia-luminosa-y-los-sistemas-led/>

luminica. (2022). Obtenido de <https://luminica.mma.gob.c>: <https://luminica.mma.gob.cl/que-es-la-contaminacion-luminica/>

lutron.com. (2022). Obtenido de <https://www.lutron.com/>

Marín, E. M. (2022). Obtenido de une.org: <https://revista.une.org/32/ctn-178-ciudades-inteligentes.html>

Méndez, J. J. (2022). Obtenido de eSmartCity: <https://www.esmartcity.es/comunicaciones/luz-datos-iluminacion-inteligente-alumbrado-publico>

Ministerio de Asuntos Económicos. (2017). Obtenido de Gobierno de España: <https://avancedigital.mineco.gob.es/es-es/Novedades/Paginas/plan-nacional-territorios-inteligentes.aspx>

Montserrat, C. M. (2022). *Curso on-line de iluminación*. Obtenido de <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/index.php>

Poza, L. (2009). *Regulación y control de la luz artificial*. Obtenido de <https://www.tecnicaindustrial.es/>: <https://www.tecnicaindustrial.es/regulacion-y-control-de-la-luz-artificial/>

UNE. (2022). Obtenido de une.org:

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/comites-tecnicos-de-normalizacion/comite?c=CTN%20178>

Yusta, C. (2019). Iluminación inteligente: el primer paso hacia la 'smart city'. *El Español*. Obtenido de

https://www.elespanol.com/ciencia/tecnologia/20190806/iluminacion-inteligente-primer-paso-smart-city/418208613_0.html

10. Anexos

10.1. Cálculos de porción de consumo del sistema DALI en comparación con el sistema LED sin regulación y el sistema original

$$\begin{aligned} \% \text{ consumo DALI vs LED} &= \frac{\text{consumo sistema DALI}}{\text{consumo sistema LED}} \cdot 100 = \frac{7752.5}{8343} \cdot 100 \\ &= 92.92 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ consumo DALI vs Original} &= \frac{\text{consumo sistema DALI}}{\text{consumo original}} \cdot 100 \\ &= \frac{7752.5}{23929.130} \cdot 100 = 32.41 \% \end{aligned}$$