



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Título del proyecto:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE REGULACIÓN DE ALUMBRADO EXTERIOR

Caso práctico: Implantación de sistemas de regulación en la instalación de alumbrado exterior de la Universidad Pública de Navarra

David Guerrero Martín

Ángel M^a Andueza Unanua

Pamplona, 27 de junio de 2014

RESUMEN

En este proyecto se estudian algunos sistemas de regulación para instalaciones de alumbrado exterior existentes en la actualidad. Se establece inicialmente una descripción teórica de los equipos correspondientes a estos sistemas.

Posteriormente se recogen los datos medidos en los análisis experimentales que se han realizado sobre ellos para caracterizarlos. Se ha considerado por un lado su comportamiento eléctrico, analizando los consumos energéticos en distintas situaciones. Por otro lado se han analizado sus rendimientos lumínicos.

Una vez caracterizados y comparados los sistemas de regulación seleccionados, se diseña su implantación en un caso práctico como es el campus de la Arrosadía de la UPNA sustituyendo partes o la instalación actual en su conjunto.

ÍNDICE

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Objetivos.....	9
1.2 Limitaciones.....	9
1.3 Metodología.....	9
1.4 Fases del proyecto.....	9
2. INSTALACIONES DE ALUMBRADO EXTERIOR.....	11
2.1 Evolución Histórica del Alumbrado Público Exterior	11
2.2 Partes de una Instalación de Alumbrado Exterior	12
2.2.1 Instalación Eléctrica de alimentación	12
2.2.2 Lámparas de Descarga	12
2.2.3 Luminarias	14
2.2.4 Balastos.....	16
2.3 Contaminación lumínica	21
Formas de emisión del flujo lumínico	21
2.4 Consumo energético del Alumbrado Exterior	21
2.5 Factores a tener en cuenta para la elección del alumbrado	22
2.5.1 Nivel de Iluminación, Consumo Energético y Coste Total	22
2.5.2 Disposición de las luminarias	24
2.5.3 Determinación de la altura.....	24
2.5.4 Determinación de la inter-distancia de las luminarias.....	24
3. SISTEMAS DE REGULACIÓN DE FLUJO LUMINOSO en alumbrado exterior	27
3.1 Clasificación de Sistemas de Regulación de Flujo Luminoso según la Línea de Mando.....	28
3.1.1 Regulación en cabecera	28
3.1.2 Regulación individual	28
3.2 Clasificación de Sistemas de Regulación de Flujo Luminoso según el Método de Regulación	29
3.2.1 Balastos de Doble Nivel de Potencia	29
3.2.2 Regulación DALI.....	30
4. materiales y métodos de trabajo	31
4.1 Equipos analizados experimentalmente	31
4.2 Equipos e instrumentos de medida.....	37

4.3	Metodología de trabajo	39
4.3.1	Análisis experimentales de rendimientos energéticos.....	39
4.3.2	Análisis experimentales de los rendimientos lumínicos	41
4.3.3	Evaluación económica de las propuestas.....	42
5.	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO ELÉCTRICO DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN.....	45
5.1	Rendimiento Energético del Balastro Electromagnético	45
5.1.1	Medición de los consumos eléctricos	45
5.1.2	Evaluación del factor de potencia	48
5.2	Rendimiento Energético del Balastro Electrónico	49
5.2.1	Resultados de las mediciones.....	49
5.3	Rendimiento Energético del balastro electrónico programable para la Regulación DALI	54
5.3.1	Caracterización de las curvas P-% luz y Q-% luz.....	54
5.3.2	Programación de estrategias de regulación para una noche	56
5.4	Comparación del rendimiento eléctrico de los sistemas de regulación analizados.....	58
5.4.1	Comparación del balastro electromagnético y el electrónico de doble nivel	59
5.4.2	Comparación entre balastros electrónicos programables DALI y balastros electromagnéticos.....	62
5.4.3	Comparación entre balastros electrónicos programables DALI y balastros electrónicos de doble nivel sin línea de mando (100%, 60%).....	63
6.	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO LUMÍNICO DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE ALUMBRADO EXTERIOR.....	65
6.1	Medición de los niveles de iluminación de los sistemas de regulación.....	65
6.1.1	Balastro electrónico de doble nivel a diferentes potencias y luminaria tipo globo.....	66
6.1.2	Balastro electrónico programable DALI a diferentes potencias	67
6.3	Determinación de las la inter-distancias admisibles de la luminaria Vital en función de la altura	69
6.4	Determinación de la inter-distancia de las luminarias a partir de los datos empíricos.....	70
7.	APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE ALUMBRADO EXTERIOR ANALIZADOS AL CAMPUS DE LA UPNA.....	73
7.1	Evaluación de la instalación actual.....	73
7.1.1	Adaptación de las luminarias en el entorno	73

7.1.2	Evaluación de la Distribución de los puntos de luz en la instalación de Alumbrado Exterior de La UPNA.....	75
7.1.3	Medición Experimental de Luxometrías en la Instalación de Alumbrado Exterior de la UPNA	78
7.1.4	Análisis de las luminarias actuales.....	79
7.2	Diseño de nuevas Instalaciones de alumbrado exterior en la UPNA según el sistema de regulación de flujo implantado	80
	PROPUESTA 1: Prescindir de los puntos de luz cuyo aporte al rendimiento lumínico de la instalación es mínimo.....	81
	PROPUESTA 2: Implantación de la regulación doble nivel.....	82
	PROPUESTA 3: Implantación del sistema de regulación DALI	84
7.2.1	Comparación de las propuestas	90
8.	CONCLUSIONES	91
	ANEXO 1: Comandos para la regulación DALI en lámparas de descarga	95
	ANEXO 2: Comparación de las medidas del balastro electrónico de doble nivel con los teóricos	96
	ANEXO 3: % de regulación media del en el sistema DALI comprado con el doble nivel en función de la época del año	105
	ANEXO 4: Porcentajes de la iluminancias del equipo de doble nivel respecto al DALI en distintos puntos	108
	Comparación de las iluminancias de servicio de cada equipo	108
	ANEXO 5: Grupos de control de regulación DALI	109
	ANEXO 6: Documentación gráfica	112

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

- Estudio de los sistemas de regulación de flujo luminoso de alumbrado exterior.
- Análisis experimental del rendimiento eléctrico y lumínico de equipos de regulación de flujo luminoso.
- Diseño de propuestas para la mejora energética de la instalación de alumbrado exterior de la Universidad Pública de Navarra implantando sistemas de regulación.

1.2 Limitaciones

El reciente desarrollo de la tecnología LED en el alumbrado exterior hace que sea una de las opciones más eficientes existentes en la actualidad, pero por motivos económicos no se ha podido tener acceso a un equipo de estas características y poder realizar análisis experimentales.

Los sistemas de regulación de alumbrado exterior que se han analizado en el presente proyecto han sido:

- Regulación de doble Nivel de potencia a través de un balastro electrónico.
- Regulación DALI con balastro electrónico programable.

El alumbrado exterior de la UPNA consta de varios tipos de luminarias, pero en este proyecto, se plantean posibles alternativas para sustituir o mejorar las luminarias tipo globo instaladas.

1.3 Metodología

- Análisis experimental del rendimiento eléctrico de los equipos de regulación de flujo luminoso a través de mediciones de sus consumos energéticos.
- Análisis experimental del rendimiento lumínico de los equipos de regulación de flujo luminoso con instrumentos de medida.
- Simulación de escenas empleando el software DIALUX EVO y DIALUX 4.12.
- Cálculo de niveles de iluminación, según parámetros geométricos, combinando los datos obtenidos en la simulación de escenas y los resultados de la medición instrumental.
- Diseño de propuestas para la renovación de la instalación de alumbrado exterior de la Universidad Pública de Navarra

1.4 Fases del proyecto

Una vez realizado un estudio teórico de los diferentes dispositivos utilizados para la regulación de flujo luminoso (potencia) en el alumbrado público se da paso a las siguientes fases del proyecto. Estas fases consisten en hacer pruebas sobre ellos para analizar sus rendimientos energéticos y lumínicos. A partir de los resultados obtenidos mediante las mediciones, se harán valoraciones de los resultados. Se compararán los datos empíricos con los teóricos para cada dispositivo. Posteriormente se realizan comparaciones entre ellos para determinar sus diferencias. Por último, en base a lo anterior, se desarrolla una serie de propuestas de mejora tomando como caso práctico la Universidad Pública de Navarra

El esquema que se ha seguido a la hora de realizar este proyecto es el siguiente:

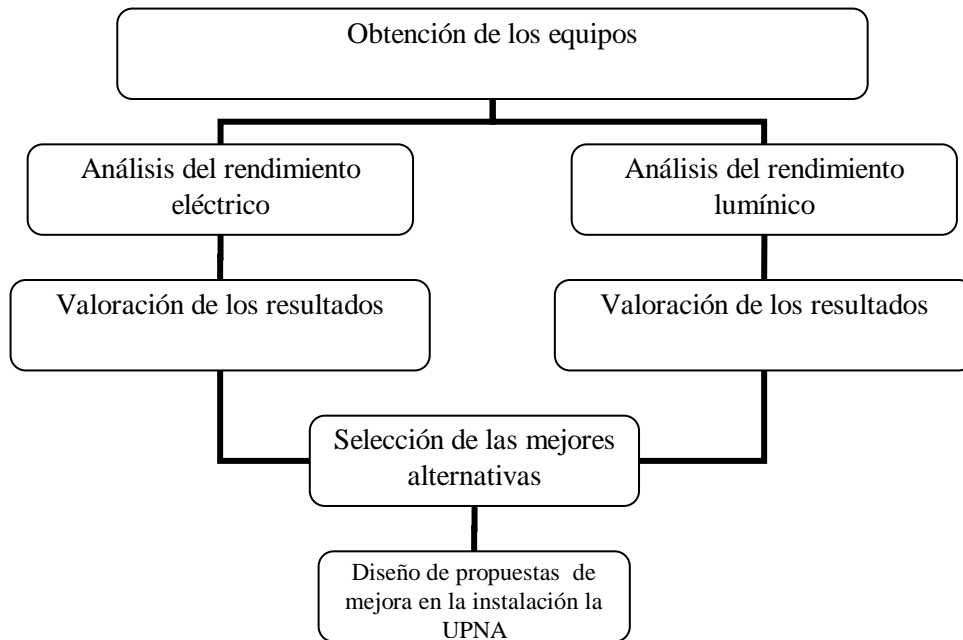


Figura 1.1: Esquema de las fases del proyecto.

2. INSTALACIONES DE ALUMBRADO EXTERIOR

Se puede referir la palabra alumbrado a la serie de luces o al sistema especialmente diseñado para el aporte de iluminación a un espacio.

El alumbrado público es el servicio público consistente en la iluminación de las vías públicas, parques públicos, y demás espacios de libre circulación que no se encuentren a cargo de ninguna persona natural o jurídica de derecho privado o público, diferente del municipio, con el objetivo de proporcionar la visibilidad adecuada para el normal desarrollo de las actividades.

Por lo general el alumbrado público en las ciudades o centros urbanos es un servicio municipal que se encarga de su instalación, aunque en carreteras o infraestructura viales importantes, corresponde al gobierno central o regional su implementación.

2.1 Evolución Histórica del Alumbrado Público Exterior

En 1879 Thomas Alva Edison patenta la bombilla incandescente. Esta lámpara producía luz por efecto joule mediante el calentamiento de un filamento metálico. El rendimiento lumínico era muy bajo, casi toda la energía (más del 90%) se disipaba en forma de calor o de radiación no perceptible.

Las lámparas de descarga de alta intensidad incrementaron notablemente el rendimiento lumínico (hasta cuatro veces mayor). La primera lámpara de descarga de alta intensidad fue la de Vapor de Mercurio desarrollada en los años 30.

Durante los años 30 también se dio impulso a las lámparas fluorescentes tubulares, que tenían una mejor eficacia lumínica, y un índice de reproducción cromática superior, pero su vida útil era inferior a las lámparas de Vapor de Mercurio.

En esta misma década se empiezan a utilizar las lámparas de Vapor de Sodio de Baja Presión a pesar de su color (prácticamente amarillo monocromático) y su baja reproducción cromática. Se trata de la lámpara con mayor eficacia existente.

En los 60 se da un gran impulso al desarrollo de las lámparas de descarga de alta intensidad (HID del inglés High Intensity Discharge), apareciendo primero las lámparas de Vapor de Sodio de Alta Presión y poco después los Halogenuros Metálicos

Las lámparas de Halogenuros Metálicos, a pesar de tener una menor eficiencia y vida útil que las lámparas de Vapor de Sodio de Alta Presión, producen una luz blanca con un elevado índice reproducción cromática, que incrementa el confort visual de las personas

El siglo XXI ha traído la introducción de la tecnología LED (diodo semiconductor emisor de luz inicialmente diseñado como un componente electrónico). Ha tenido una evolución constante. Tienen un rendimiento lumínico de hasta 150 lm/W. El LED no se comercializa en formato de bombilla, se trata de un elemento electrónico que se integra en una placa y posteriormente en un punto de luz. El rendimiento lumínico final depende de todo el conjunto.

2.2 Partes de una Instalación de Alumbrado Exterior

Toda instalación destinada al alumbrado exterior, ya sea de carácter público o privado, tiene como base un circuito eléctrico de baja tensión de alimentación, las luminarias y las lámparas necesarias para una adecuada iluminación del área en cuestión.

2.2.1 Instalación Eléctrica de alimentación

La alimentación se hace mediante las tres fases y el neutro. Las lámparas son las cargas y se alimentan con una tensión de 230 V. La forma de conectar las lámparas es fase-neutro, alternando la fase de un punto a otro consecutivo.

Está sujeto al Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y a la ITC-BT-09 correspondiente a instalaciones de alumbrado exterior.

Suelen calcularse las instalaciones aproximando el sistema a uno trifásico equilibrado. La máxima caída de tensión entre el origen de la instalación y cualquier punto de luz deberá ser menor o igual a un 3% del valor nominal. El Reglamento determina tener un factor de potencia mínimo de 0,90.

2.2.2 Lámparas de Descarga

Es la fuente o emisor luminoso de la instalación, por ello su elección constituye una de las mayores dificultades a la hora de diseñar una instalación, fundamentalmente debido a que tanto la potencia consumida, la duración de vida y el color de la luz, vienen condicionados por el tipo de lámpara.

▪ Principios de Funcionamiento

En el interior del tubo, se producen descargas eléctricas como consecuencia de la diferencia de potencial entre los electrodos. Estas descargas provocan un flujo de electrones que atraviesa el gas. Cuando uno de ellos choca con los electrones de las capas externas de los átomos les transmite energía y pueden suceder dos cosas:

La primera posibilidad es que la energía transmitida en el choque sea lo suficientemente elevada para poder arrancar al electrón de su orbital. Éste, puede a su vez, chocar con los electrones de otros átomos repitiendo el proceso. Si este proceso no se limita, se puede provocar la destrucción de la lámpara por un exceso de corriente. La consecuencia de esto es que la luz emitida por la lámpara no es blanca (por ejemplo en las lámparas de sodio a baja presión es amarillenta). La capacidad de reproducir los colores de estas fuentes de luz es, en general, peor que en el caso de las lámparas incandescentes que tienen un espectro continuo. Es posible, recubriendo el tubo con sustancias fluorescentes, mejorar la reproducción de los colores y aumentar la eficacia de las lámparas convirtiendo las nocivas emisiones ultravioletas en luz visible.

Los factores externos que más afectan al funcionamiento de la lámpara son la temperatura ambiente y la influencia del número de encendidos.

▪ Componentes

Las formas de las lámparas de descarga dependen según su clase. Todas cuentan con una serie de elementos comunes como el tubo de descarga, los electrodos, la ampolla exterior o el casquillo.

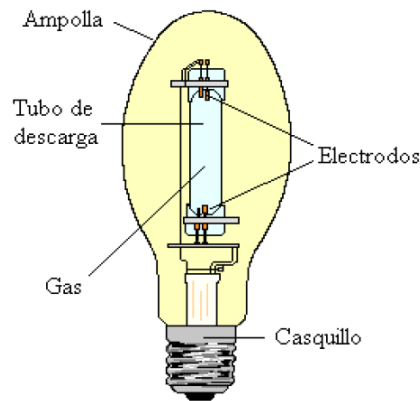


Figura 2.1: Partes comunes de una lámpara de descarga

▪ Clasificación

Las lámparas de descarga se pueden clasificar según el gas utilizado (vapor de mercurio o sodio) o la presión a la que este se encuentre (alta o baja presión). Las propiedades varían mucho de unas a otras y esto las hace adecuadas para unos usos u otros.

- Lámparas fluorescentes

Son lámparas de vapor de mercurio a baja presión. Las paredes interiores del tubo se recubren con polvos fluorescentes. Hay dos tipos de polvos:

- Emiten un espectro continuo
- Trifósforos (emiten un espectro con tres bandas de colores primarios que al mezclarse generan la luz blanca)

Eficacia sin balastro: 38-91 (lm/W) Vida útil: 12500 (horas)

- Lámparas de vapor de mercurio a alta presión

La radiación ultravioleta característica de la lámpara a baja presión pierde importancia respecto a las emisiones en la zona visible.

Eficacia sin balastro: 40-63 (lm/W) Vida útil: 25000 (horas)

- Lámparas de luz de mezcla

Mezcla de lámpara de mercurio a alta presión y lámpara incandescente.

Eficacia sin balastro: 19-28 (lm/W) Vida útil: 9000 (horas)

- *Lámparas con halogenuros metálicos*

Añadiendo yoduros metálicos al tubo de descarga se consigue mejorar la capacidad de reproducir color de la lámpara de vapor de mercurio. Cada sustancia aporta líneas nuevas al espectro.

Eficacia sin balastro: 75-95 (lm/W) Vida útil: 11000 (horas)

- *Lámparas de vapor de sodio a baja presión*

La descarga eléctrica se produce en un tubo con vapor de sodio a baja presión formándose una radiación monocromática característica. El color amarillento producido está muy próximo al límite de sensibilidad del ojo humano.

Eficacia sin balastro: 100-183 (lm/W) Vida útil: 23000 (horas)

- *Lámparas de vapor de sodio a alta presión (VSAP)*

Tienen una distribución espectral que abarca casi todo el espectro visible proporcionando una luz blanca dorada mucho más agradable que la reproducida a baja presión.

Eficacia sin balastro: 70-130 (lm/W) Vida útil: 23000 (horas)

2.2.3 Luminarias

La definición de luminaria según Norma UNE-EN 60-59-1. es:

‘Aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y la protección de las lámparas (excluyendo las propias lámparas) y, en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación.’

En definitiva, son aparatos que sirven de soporte y conexión a la red eléctrica a las lámparas, pero que a la vez, cumplen una serie de características ópticas, mecánicas y eléctricas. Las más importantes son:

- Distribuir el flujo luminoso producido por las lámparas.
- Mantener la temperatura de la lámpara dentro de los límites exigidos.
- Anclar la lámpara para que mantenga una posición estable y determinada en el alumbrado.
- Desarrollar diseños de interés estético.
- Garantizar la economía de medios facilitando la instalación y los trabajos de mantenimiento.
- Proteger a la lámpara contra fenómenos atmosféricos, golpes, etc.
- Las luminarias utilizadas para el alumbrado exterior, se rigen según la Norma UNE-EN 60598-2-3 y corresponde a cada fabricante el cumplimiento de dicha normativa.
- Cada punto de luz debe tener corregido el factor de potencia de forma que éste sea mayor o igual a 0,90.

▪ Componentes de una luminaria convencional

- *Cuerpo o envoltente principal*

Soporta estructuralmente los conjuntos óptico y eléctrico de la luminaria, por tanto, debe ser resistente mecánicamente, ligero de peso y con excelentes propiedades de dispersión, resistencia térmica y duración, además de cumplir una misión estética.

- *Bloque óptico*

Puede estar formado por reflector o refractor y difusor. Los reflectores. Son determinadas superficies en el interior de la luminaria que modelan la forma y dirección del flujo de la lámpara. Los difusores son el elemento de cierre o recubrimiento de la luminaria en la dirección de la radiación luminosa.

- *Portalámparas Integral*

Parte de la luminaria que soporta la lámpara y asegura el contacto eléctrico con ésta, y que está diseñada como parte solidaria de la luminaria.

- *Equipos auxiliares*

Indispensables para el funcionamiento seguro y estable de la gran mayoría de lámparas, excepto de las lámparas incandescentes, luz mezcla y algunas halógenas todas precisan de equipos auxiliares para su funcionamiento, pues su simple conexión a la red eléctrica, no conseguiría iniciar su funcionamiento o al hacerlo generaría un crecimiento continuo de la intensidad que constituiría su auto destrucción.

▪ Equipos auxiliares

Las lámparas de descarga en general tienen una característica tensión-corriente no lineal y ligeramente negativa, que da lugar a la necesidad de utilización de un elemento limitador de la intensidad que se denomina genéricamente balastro, para evitar el crecimiento ilimitado de la corriente y la destrucción de la lámpara cuando ésta ha encendido.

- *Arrancador*

Dispositivo de encendido que produce impulsos de tensión para encender una lámpara de descarga, pero que no asegura el precalentamiento de los electrodos. Se usa en las lámparas de halogenuros metálicos y las de sodio de alta presión pues necesitan tenciones de encendido muy elevadas que no puede suministrar la reactancia por sí sola.

Las características más importantes a tener en cuenta son:

- Tensión de pico
- Corriente máxima
- Posición de fase
- Tensión de conexión
- Tensión de interrupción
- Capacidad de carga

- *Condensador*

El funcionamiento del conjunto lámpara-balasto genera un consumo de energía reactiva que produce un incremento de intensidad eléctrica y un sobre costo del consumo. Para corregir este efecto, los equipos auxiliares suelen incorporar un condensador que compensa el factor de potencia del conjunto.

- *Balastro*

Debido al protagonismo que tiene este equipo auxiliar en este proyecto, se explica en el siguiente punto.

2.2.4 Balastos

El balastro, o balasto (del inglés ballast, «lastre»), estabiliza y limita el flujo de corriente para lámparas, ya sea un tubo fluorescente, una lámpara de vapor de sodio o mercurio, o una lámpara de haluro metálico. En su forma clásica, es una reactancia inductiva que está constituido por una bobina de alambre de cobre esmaltado, enrollada sobre un núcleo de chapas de hierro o de acero eléctrico.

Se dividen en dos grandes grupos, los balastos electromagnéticos y los electrónicos. Los más utilizados son:

- Balastro serie de tipo inductivo para dos niveles de potencia
- Balastro autorregulador
- Balastro autotransformador
- Balastro electrónico

Funciones de los balastos:

- Entrega la tensión de encendido en el arranque de la lámpara y la tensión de operación necesaria para su óptimo funcionamiento (voltaje continuo).
- Proporciona las condiciones específicas para un buen funcionamiento y vida plena de la lámpara (regulación).
- Controla y limita la energía eléctrica absorbiendo las variaciones del voltaje en la red en un amplio rango para trabajar en condiciones nominales. Limita la corriente y la potencia que llega a la lámpara.

Cada balastro está diseñado para hacer funcionar a un tipo de lámpara en concreto, a un voltaje determinado.

▪ Principio de funcionamiento de los balastos

- *Balastro electromagnético*

Un balastro electromagnético de tipo inductivo (el utilizado casi exclusivamente) consta de un arrollamiento de hilo de cobre en un soporte de material aislante, que actúa como devanado de excitación de un circuito magnético. Cuando por el arrollamiento pasa una corriente, se induce una tensión opuesta a la tensión de red.

En las lámparas de descarga, para una tensión fija, la corriente tiende a crecer indefinidamente y por lo tanto en el balastro tenderá a crecer también la tensión opuesta a la de red, llegando al final a un equilibrio con la lámpara hasta que quedan fijadas su tensión e intensidad (estabilización). Este equilibrio se podrá romper con variaciones en la excitación (variaciones tensión de red). Es por ello que para cada tensión de red se necesita un balastro diferente, con unas tolerancias que dependerán del tipo de balastos y del tipo de lámpara, aunque también existen reactancias con varias conexiones para distintas tensiones de red.

La tensión que cae en una reactancia o balastro tipo inductivo es, aproximadamente:

$$V_{\text{Balastro}} = I \times Z = \sqrt{R^2 + 2\pi f l} \approx I \times 2\pi f l$$

Ecuación 1: Caída de tensión en un balastro inductivo.

Donde:

- I = Corriente en lámpara (A).
- Z = Impedancia (Ω).
- R = Resistencia de la reactancia (Ω).
- f = Frecuencia de red (Hz).
- L = Inductancia en henrios (H), dependiente de parámetros constructivos.

Como la inductancia L es dependiente de parámetros constructivos, para una misma tensión en el balastro, la utilización de distintas frecuencias de red exigirá valores de L diferentes (diferentes balastos).

Para diferentes tensiones de red, como la tensión de la lámpara es constante, la tensión del balastro deberá ser diferente por lo que deberemos variar L (también diferente balastro). Por otro lado, para diferentes corrientes de lámpara (I), la tensión del balastro y por tanto la tensión en lámpara, será diferente, por lo que un mismo balastro puede llegar a funcionar con varias lámparas diferentes.

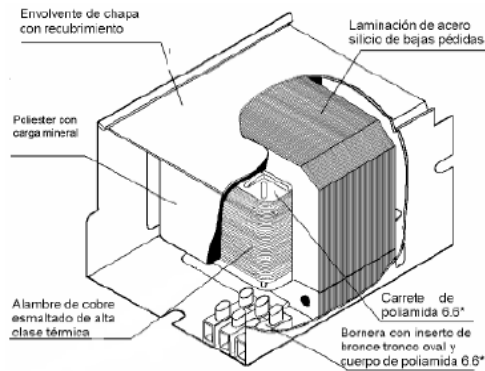


Ilustración 2.2: Partes de un balastro electromagnético.

- *Balastro electrónico*

El principio básico de un balastro electrónico, consiste en alimentar la lámpara en alta frecuencia (entre 35 y 70 kHz). Esto permite reducir el tamaño de la inductancia hasta incluirla en el mismo dispositivo electrónico.

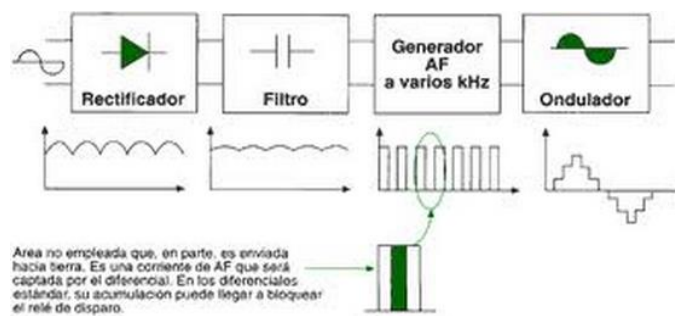


Figura 2.3: Esquema del funcionamiento de un balastro electrónico

- El primer bloque (1) está constituido por un filtro que impide que las perturbaciones de alta frecuencia del dispositivo se introduzcan en la red de alimentación.
- El segundo bloque (2) convierte la tensión alterna de 50 Hz de la red, en una tensión continua.
- El tercer bloque (3) está constituido por un convertidor de corriente continua a corriente alterna (DC/AC) que permite alimentar la lámpara en alta frecuencia y a una tensión apropiada.

El bloque (3) posee también un circuito que permite, si fuera necesario, el precalentamiento de los cátodos antes del arranque de la lámpara (este circuito es muy importante para garantizar la expectativa de vida útil de la lámpara).

Cuando la lámpara se enciende, gracias al funcionamiento en alta frecuencia, el arco no debe ser encendido en cada pasaje por cero de la tensión de red, porque traería como consecuencia una pérdida de energía y una reducción del flujo luminoso. El funcionamiento en alta frecuencia tiene la ventaja de no reducir sensiblemente el flujo

luminoso en cada medio ciclo, lo que permite una eliminación natural del efecto estroboscópico.

Varios estudios han demostrado que la iluminación realizada con balastos electrónicos permite un mayor rendimiento visual. La alta frecuencia en juego es demasiado rápida para que sea detectada por el sistema nervioso.

La lámpara se comporta, desde el punto de vista de la rapidez del arranque, como una lámpara incandescente. El balasto electrónico, gracias a la facilidad con la cual puede generar una tensión elevada en el arranque, independientemente de la tensión de red, permite la eliminación del arrancador (eliminando los problemas anexos a su uso) y como consecuencia, una simplificación en el cableado de conexión.

Entre otras ventajas del balasto electrónico, cabe destacar que en el caso de una lámpara defectuosa, ésta última queda desconectada automáticamente a los fines de evitar reintentos de encendido tal como ocurre en una instalación tradicional con balastos electromagnéticos.

La depreciación del flujo luminoso en función de la temperatura, la cual es notable con el balasto electromagnético (10% de depreciación del flujo con un incremento de temperatura desde 20°C hasta 40°C), se reduce mucho con el balasto electrónico (5% de depreciación del flujo con un incremento de temperatura desde 20°C hasta 40°C).

Un efecto aún mucho más destacable es el de la estabilización del flujo luminoso frente a las variaciones de la tensión de red. Esto asegura un considerable ahorro de energía cada vez que la tensión de red aumenta. Por otro lado, en el caso en que debemos garantizar un nivel de flujo luminoso mínimo, evita el tener que considerar la necesidad de agregar más fuentes de luz para compensar la tensión de red mínima.

Dado que la frecuencia de funcionamiento es netamente superior a la frecuencia audible (alrededor de 30 kHz), se elimina la posibilidad de zumbidos de la frecuencia de 50Hz.

▪ **Ventajas de los equipos electrónicos**

- *Estabilización de la lámpara*

- Alargan la vida útil de la lámpara (Aumento de la vida hasta un 50/60%).
- Rectificación y filtrado de la corriente de la lámpara manteniéndola independiente de las fluctuaciones de la corriente de entrada.
- Control de arranques y encendidos de la lámpara.
- La lámpara no se ve afectada por las fluctuaciones de la tensión de la red.

- *Eficiencia*

- Para mismo flujo lumínico de la lámpara requiere una menor potencia consumida.
- El flujo lumínico no se ve afectado por las fluctuaciones de la tensión y corriente de la red eléctrica, manteniéndose constante.
- Flujo lumínico independiente del tiempo de vida de la lámpara hasta al menos las 100 últimas horas de funcionamiento.
- No se producen pérdidas térmicas por calentamiento
- Factor de potencia constante (entre 0.98 y 1).

- *Seguridad*
 - Arranque controlado, evitando el sobreamortiguamiento de corriente del arranque de los demás tipos.
 - Tiempo de encendido acorde con el tipo de lámpara; si la lámpara no arranca, el equipo se desconecta automáticamente.
 - Ausencia de efecto Flicker o parpadeo en el arranque
 - Desconexión automática en caso de fallos en la lámpara.

- *Simplicidad*
 - Menos cableado (sencillez de instalación).
 - No se necesitan equipos auxiliares (arrancador, condensador).

- *Ahorran Energía (más de un 60%)*
 - Sustituir una lámpara de nueva tecnología en un balasto magnético supone un ahorro cercano al 10%.
 - Ahorro entre el 15-30% de energía mediante la sustitución de un balasto magnético por un Equipo electrónico.
 - Si se trata de balasto regulable, se puede ahorrar hasta un 50%, dependiendo del número de niveles y su duración.
 - Hasta el 20% mediante el cambio de lámpara por una de menos potencia al mantener la eficacia lumínica.
 - Los sistemas de gestión de Alumbrado, añaden otro porcentaje de ahorro variable en función de las características utilizadas en dicho sistema.

Las otras ventajas de los balastos electrónicos respecto de los electromagnéticos son:

- Peso reducido.
- Dimensiones especiales, que se pueden adaptar al diseño de las luminarias.
- Eliminación del parpadeo en los electrodos de la lámpara.
- Factor de potencia elevado (alrededor de 0,95) sin la necesidad de agregar un capacitor de compensación adicional.
- Simplificación de la instalación (se tiene un solo dispositivo).
- Posibilidad de utilización con frecuencias de red de 50-60Hz y redes de DC.
- Posibilidad de variar el flujo luminoso de la lámpara (balastos dimerizables).
- Posibilidad de alimentar varias lámparas con un único balastro.

Por otro lado, los balastos electrónicos tienen un costo mayor, requieren un cuidadoso cableado y debe prestarse atención a la longitud del cable de conexión entre el balastro y la lámpara para asegurar un buen funcionamiento del conjunto.

Se presentan mayores problemas en cuanto a la CEM (Compatibilidad Electromagnética) tanto desde el lado de la alimentación como del lado de la lámpara.

La vida útil prevista para un balastro electrónico depende de la temperatura de trabajo y del porcentaje de fallas de los componentes electrónicos. Una temperatura excesiva puede deteriorar los componentes electrónicos hasta su ruptura. Para evitar esta situación, es necesario verificar que, en condiciones de funcionamiento normal, la temperatura máxima admitida en el punto marcado t_c (en la etiqueta del balastro) no sea en ningún caso superada.

2.3 Contaminación lumínica

La mayor parte de la contaminación lumínica es producida por el alumbrado exterior, aunque, el alumbrado de interiores que se escapa por la ventana, escaparates, también contribuyen. Los porcentajes que estiman son de un 70% debido a los alumbrados públicos y de un 30% para los privados.

Formas de emisión del flujo lumínico

- **Flujo directo desde la luminaria**

Es lo que más afecta al medio. Es la luz que se escapa directamente debido a un mal diseño de la luminaria o debido a un diseño en el que simplemente no se ha considerado la posible contaminación lumínica que pudiera generar. Se considera que a partir de los 70° hasta los 90° medidos desde la vertical que pasa por el punto de luz, es luz perdida que provoca deslumbramiento. A partir de 90° es luz que va hacia arriba y que directamente se pierde. El concepto de Flujo Hemisférico Superior instalado (FHSi) es el porcentaje del flujo total de la lámpara que se proyecta por encima del plano horizontal.

- **Reflexión de las superficies iluminadas**

Si vemos los objetos es porque la luz es reflejada por estos y llega hasta nuestros ojos. Si esta reflexión es en direcciones erróneas o con una mayor intensidad a la adecuada, es cuando se produce la contaminación lumínica.

- **Reflexión y refracción por partículas en suspensión**

Es el resplandor nocturno típico de las ciudades. Es causado por aerosoles, humos y partículas de polvo en suspensión. La cantidad de luz emitida en direcciones mayores de 90° ya sea FHSi como luz reflejada son la fuente de luz del velo lumínico. Reduciéndolos se consigue reducir el resplandor. Las longitudes de onda corta se dispersan mucho más que las de onda más larga.

2.4 Consumo energético del Alumbrado Exterior

La mayor parte de la energía eléctrica es generada en centros convencionales, es decir, no es proveniente de energías renovables. Todos los efectos negativos que puedan tener estas centrales, como pudiera ser, calentamiento de aguas, alteración de suelos subterráneos, modificaciones paisajísticas, emisión de gases nocivos, etc., son incrementados de forma innecesaria cuando el consumo energético no se corresponde con la tarea objetivo. Con esto se quiere hacer hincapié en la importancia de hacer un análisis energético cuando se quiera hacer una instalación de alumbrado y remarcar la importancia de diseñar las luminarias más adecuadas para cada situación evitando consumos y contaminaciones innecesarias.

Tomando como referencia estudios sectoriales, el alumbrado público es la instalación que causa mayor incidencia en el consumo energético de un municipio, pudiendo representar

el 54% sobre el total de los consumos energéticos de las instalaciones municipales y el 61% de electricidad. La importancia de las instalaciones de alumbrado público es tal que en algunos municipios supone hasta el 80% de la energía eléctrica consumida y hasta el 60% del presupuesto de los consumos energéticos del ayuntamiento.

Para el diseño de instalaciones de alumbrado exterior lo más eficiente posible, se implantan múltiples tecnologías de regulación del flujo luminoso. Estas tecnologías suponen un importante ahorro energético al disminuir la iluminancia en horas donde el escaso tránsito de vehículos y/o personas lo permite.

Las formas más destacadas y comúnmente utilizadas para regular el flujo luminoso se clasifican y explican en el capítulo 3. Algunas de ellas son objeto de análisis experimentales en el presente proyecto.

2.5 Factores a tener en cuenta para la elección del alumbrado

Son diversos los factores económicos, sociales y técnicos que determinan el sistema adecuado para cada instalación de alumbrado.

Existen numerosos métodos científico aplicables para la determinación del nivel de iluminación adecuado. Dado a que la consideración del nivel óptimo para cada situación depende, en un importante rango, de la subjetividad del observador experimental, los niveles a los que se llega son muy variables.

Observar instalaciones ya existentes permite diseñar otras nuevas basándonos en ellas. El problema que esto representa es la fuerte influencia que supone el basarse en casos anteriores. Algunos de estos problemas pueden ser aspectos relacionados con la eficiencia energética, calidad de las lámparas, antigüedad de las lámparas, etc.

En la actualidad se opta por la regulación del flujo luminoso en función de distintos parámetros como puede ser el horario, el flujo de gente, la actividad concreta que quiera llevarse a cabo, etc.

2.5.1 Nivel de Iluminación, Consumo Energético y Coste Total

El conflicto que se da a la hora de diseñar una instalación queda resumido en este triángulo formado por tres aspectos fundamentales:

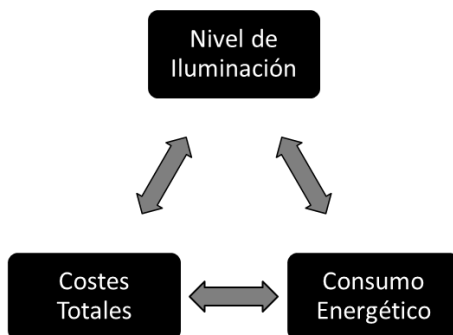


Figura 2.4: Parámetros para el diseño de una instalación de alumbrado exterior

▪ **Nivel de Iluminación:**

Si se calculan los costes de reposición de las lámparas, la limpieza y reparación de las luminarias y los equipos, se obtiene un período idóneo para llevar a cabo las labores de mantenimiento. Este período suele coincidir con la pérdida o depreciación luminosa global del conjunto que oscila entre el 30-33%.

El nivel de iluminación en servicio sería el que se obtiene previamente a estas operaciones de mantenimiento, que transcurrido ese período de tiempo, viene a ser un 70% del nivel luminoso inicial de la instalación, según las Recomendaciones Internacionales.

▪ **Energía consumida:**

Definida por el consumo de la lámpara así como por el resto de componentes o dispositivos necesarios para su correcto funcionamiento.

▪ **Coste Total de la Instalación:**

- Coste de la primera instalación, adquisición y colocación de todos los componentes.
- Coste de explotación o consumo energético
- Coste de mantenimiento: Reparación, limpieza y reposición. En este punto cobra vital importancia el dimensionado de la instalación en función del uso para el que sea diseñada.

Definidos los tres vértices, se trata de encontrar el punto de equilibrio entre éstos. Partiendo del nivel de iluminación de servicio que condicionará la tecnología adecuada, los materiales necesarios y los distintos componentes. La determinación de esto último será de lo que dependan los costes de mantenimiento y permitirán que se obtenga el nivel de iluminación óptimo con el mayor ahorro energético.

Para la elección del sistema de alumbrado se deben tener en cuenta otros parámetros como:

- Según el tipo de vía será necesario utilizar lámparas de mayor potencia o reducir la separación y/o la altura de los báculos de alumbrado.
- En función de la situación de la vía en el contexto global urbano y su uso.
- Forma de disposición de los báculos en planta.
- Altura del báculo.
- Determinación de la interdistancia.

2.5.2 Disposición de las luminarias

La forma en la que se distribuyen los puntos es un factor clave. La decisión que se tome tiene una gran influencia en la forma en la que se distribuye la emisión de luz en una vía. Las formas más típicas de distribución de luminarias son:

- *Unilateral*

Únicamente en uno de los márgenes de la vía, con lo que una parte queda mucho más iluminada que la otra. Es una solución muy económica pero por su baja calidad de alumbrado está en desuso.

- *Al tres bolillo*

Se basa en la alternancia de luminarias a ambos lados de la vía. Buena opción económicamente pero la uniformidad no es muy elevada.

- *Pareada*

Las luminarias se instalan enfrentadas a ambos lados de la vía. Presenta una gran uniformidad pero si no se distancian lo suficiente pueden provocar el efecto túnel.

- *Doble axial*

Colocación en el centro de la vía de un báculo que se bifurque en dos luminarias. Se abaratan los costos de instalación y obra civil.

La mejor opción en general se consigue con la combinación de todas ellas.

2.5.3 Determinación de la altura

Hay que tener en cuenta factores como el nivel de iluminancia deseada o la uniformidad. Para su cálculo se emplea el factor R que relaciona la altura del punto de luz con el ancho de la vía a iluminar.

$$R = \frac{\text{Altura del punto de luz}}{\text{Anchura de la vía}}$$

Según la disposición de las luminarias este factor debe ser:

Tabla 2-1: Rangos del factor R en función de la disposición de las luminarias.

Disposición	R
Unilateral	0,85-1
Tresbolillo	0,50-0,66
Pareada	0,33-0,50

Estos datos son orientativos. La elección de la altura debe realizarse en base a los niveles de iluminancia y uniformidad requeridos por la normativa. Una mayor altura favorece un reparto más uniforme del flujo lumínico, pero disminuye la iluminancia de servicio en la superficie de la vía.

2.5.4 Determinación de la inter-distancia de las luminarias

La iluminancia y la uniformidad son los que determinan la elección de separación óptima entre los puntos de luz.

Existen varios métodos de cálculo, pero, por su simplicidad y eficacia, destacan dos:

- El método de los coeficientes de utilización.
- El método de los nueve puntos.

Las luminarias se clasifican según tres parámetros: alcance, dispersión y control, que dependen de sus características fotométricas. Los dos primeros informan sobre la distancia a la que es capaz de iluminar en las direcciones longitudinal y transversal respectivamente. El control nos da una idea sobre el deslumbramiento que produce la luminaria a los usuarios.

- *Alcance*

Es la distancia determinada por el ángulo γ_{MAX} en que la luminaria es capaz de iluminar la calzada en dirección longitudinal. Este ángulo se calcula como el valor medio entre los dos ángulos correspondientes al 90% de I_{MAX} que corresponden al plano donde la luminaria presenta el máximo de la intensidad luminosa.

- *Apertura*

Se determina por el ángulo en que es capaz de iluminar la luminaria en dirección transversal a la calzada. Se define como la recta tangente a la curva isocandela del 90% de I_{MAX} proyectada sobre la calzada. Es paralela al eje de la calzada

- *Control*

Nos da una idea de la capacidad de la luminaria para limitar el deslumbramiento que produce. Se determina a partir del índice específico de la luminaria SLI. El valor de este índice es:

$$SLI = 13,84 - 3,31 \times \log(I_{80}) + 1,3 \times \log(I_{80}/I_{88}) + 1,29 \times \log(F) + C$$

Ecuación 2: Índice específico de una luminaria

- I_{80} = Intensidad luminosa a un ángulo de elevación de 80° , en un plano paralelo al eje de la calzada (cd).
- I_{80}/I_{88} = Relación entre intensidades luminosas para 80° y 88° .
- F = Área emisora de luz de las luminarias (m^2) proyectadas en la dirección de elevación a 76° .
- C = Factor de color, variable de acuerdo al tipo de lámpara (+0,4 para sodio baja presión y 0 para las otras).

Las relaciones entre los parámetros anteriores deben seguir los siguientes valores:

Tabla 2-2: Relación entre los parámetros fotométricos de una luminaria

Alcance	Apertura	Control
Corto $\gamma_{max} < 60^\circ$	Estrecha $\gamma_{90} < 45^\circ$	Limitado $SLI < 2$
Medio $70^\circ \geq \gamma_{max} \geq 60^\circ$	Media $55^\circ \geq \gamma_{90} \geq 45^\circ$	Moderado $4 \geq SLI \geq 2$
Largo $\gamma_{max} > 70^\circ$	Ancha $\gamma_{90} > 55^\circ$	Estricto $SLI > 4$

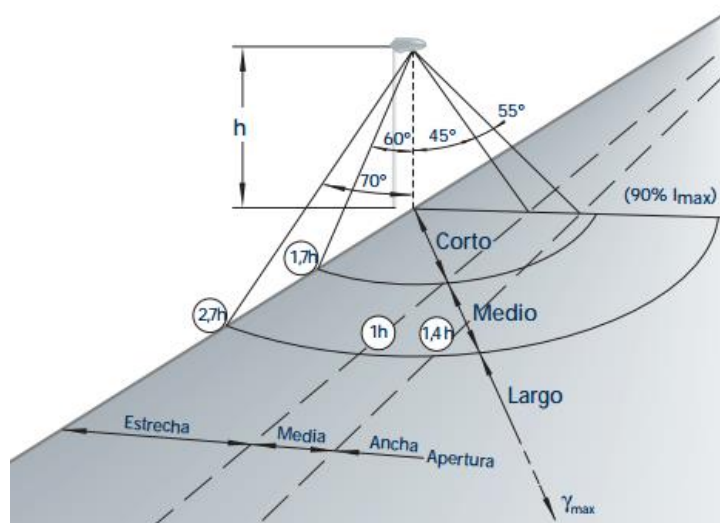


Figura 2.5: Parámetros lumínicos de una luminaria exterior

▪ **Método de los coeficientes de utilización:**

$$E = \frac{\Phi_{\text{útil}}}{S} = \frac{\Phi \cdot C_u \cdot f_d \cdot f_c}{D \cdot A}$$

Ecuación 3: Método de los coeficientes de utilización.

- Φ : Flujo de la lámpara en lúmenes
- C_u : Coeficiente de utilización de la lámpara
- f_c : Coeficiente de conservación de la lámpara
- f_d : Coeficiente de depreciación de la lámpara
- A: Ancho de vía
- D: Interdistancia entre luminarias

Este método se emplea para una primera aproximación. Deben ejecutarse otros métodos más precisos.

▪ **Método de los nueve puntos:**

Proceso iterativo a través de softwares especializados.

3. SISTEMAS DE REGULACIÓN DE FLUJO LUMINOSO EN ALUMBRADO EXTERIOR

Las instalaciones de alumbrado público están diseñadas de forma que durante las horas de tráfico intenso de vehículos y peatones, el nivel medio de iluminación sea suficiente para satisfacer las necesidades visuales. Los sistemas de regulación permiten que cuando el tránsito es menor, durante la mayor parte del tiempo en la mayoría de los casos, proporcionen menor cantidad de luz. Esto se supone un menor consumo de energía y por tanto se genera un ahorro en la instalación.

Una técnica ya en desuso, pero muy simple, consiste en apagar alternativamente puntos de luz, o apagar los de un lado solo de la calzada. Ello se llevaba a cabo desconectando una o dos fases de la alimentación eléctrica trifásica, o instalando dobles circuitos eléctricos de alimentación por cada calle, o instalando luminarias bi-lámpara y apagando una de ellas mediante líneas de mando o dobles circuitos. Estos sistemas en la actualidad están prácticamente descartados, excepto quizá el sistema bi-lámpara. Se producen zonas oscuras que pueden afectar tanto a la visibilidad como a la seguridad, con unas uniformidades en la iluminación inaceptables. Una deficiente uniformidad en el alumbrado, alternando zonas de la vía con fuerte iluminación con otras con débil alumbrado, fatiga al usuario e influye negativamente sobre el deslumbramiento.

En la actualidad se han desarrollado sistemas que solucionan estos inconvenientes. Tienen como finalidad común reducir simultáneamente el flujo emitido pero manteniendo la uniformidad de la misma. Es así como el costo de la energía eléctrica en sistemas de alumbrado se puede reducir por el uso de reguladores o atenuadores de flujo luminoso. Los reguladores son equipos o sistemas que reducen gradualmente la potencia y emisión luminosa de las lámparas.

Para atenuar sistemas de alumbrado exterior, es necesario verificar con el fabricante de lámparas los requerimientos para que éstas sigan desarrollando un correcto comportamiento en función de la regulación que se establezca sobre ella. Las características técnicas que deben considerarse a la hora de establecer una acción de regulación sobre una instalación son:

- *Eficacia:* La reducción en potencia a reducción en emisión luminosa no es proporcional en todos los sistemas, ya que depende del fabricante y la tecnología disponible.
- *Atenuación:* Cuando las lámparas HID son atenuadas por debajo del 50% de su potencia nominal pueden experimentar una degradación en su vida, eficacia, color y mantenimiento del flujo. De hecho se puede reducir la vida hasta el 90%.
- *Compatibilidad:* Algunos sistemas de atenuación no son compatibles con balastos electrónicos.
- *Parpadeo (flicker):* La atenuación en lámparas de vapor de sodio de alta presión puede producir parpadeo.
- *Color:* Las lámparas de VSAP pueden ser afectadas con la atenuación, reduciendo de 50 a 200 K su temperatura de color, produciendo luz más amarilla.

3.1 Clasificación de Sistemas de Regulación de Flujo Luminoso según la Línea de Mando

3.1.1 Regulación en cabecera

En este sistema un equipo colocado entre la línea y la luminaria (la carga), figura 3.1, controla la tensión nominal de alimentación de todos los puntos de luz.

El equipo entrega durante las horas de intenso tráfico de usuarios la tensión necesaria para que la instalación trabaje a pleno rendimiento de las lámparas. Una vez disminuye el tránsito por la zona iluminada, el equipo, mediante una programación horaria o una señal externa, reduce la tensión de la línea disminuyendo la potencia de las lámparas hasta los valores deseados con el consiguiente ahorro de energía.



Figura 3.1: Cuadro de mando para la regulación en cabecera y posicionamiento en la instalación.

3.1.2 Regulación individual

Se coloca en cada lámpara un equipo que, mediante un reloj electrónico interno o una señal externa, varía la tensión de alimentación o la corriente de lámpara reduciendo la potencia.

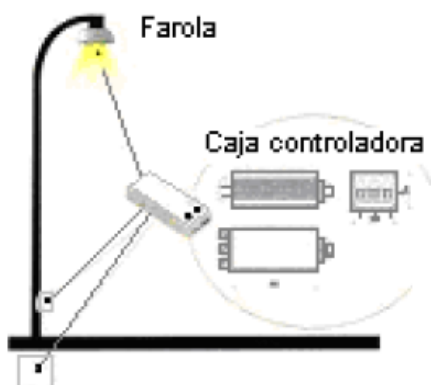


Figura 3.2: Emplazamientos posibles de la caja reguladora en regulación individual.

3.2 Clasificación de Sistemas de Regulación de Flujo Luminoso según el Método de Regulación

Los métodos más utilizados para la regulación del flujo luminoso son los siguientes:

- Regulación de potencia con circuitos electrónicos.
Control por ángulo de fase.
- Regulación de potencia con transformador.
Transformador con escobillas (utiliza un servo motor).
- Regulación de potencia con balastos.

Los dos primeros métodos se salen del alcance de este proyecto. Únicamente se explicarán algunas de las múltiples formas de regulación de potencia con balastos que han sido objeto de un análisis experimental durante la realización de éste.

Regulación de Potencia con Balastos

3.2.1 Balastos de Doble Nivel de Potencia

- **Balastro electromagnético de doble nivel de potencia**

Los balastos o reactancias para doble nivel, son balastos de construcción similar a los modelos estándar pero a los cuales se les ha añadido un bobinado adicional sobre un mismo núcleo magnético. De esta forma pueden obtenerse dos niveles de potencia.

El sistema con reactancia de doble nivel de potencia, se basan en balastos electromagnéticos como elementos de control inmediato de las lámparas. Esto implica pérdidas de potencia relativamente importantes

- **Balastos electrónicos de doble nivel**

Dispositivo compacto que realiza las funciones del equipo auxiliar y por tanto, sustituye a la reactancia electromagnética, condensador y arrancador en las VSAP. Lleva incorporado los elementos necesarios para efectuar de forma autónoma y automática la reducción del flujo luminoso de la lámpara y la potencia en determinados períodos de funcionamiento. Por tanto, no necesitan una línea auxiliar de mando para controlarlos con una señal externa.

Los balastos electrónicos de doble nivel, además de hacer que se consiga un ahorro mediante la activación del segundo nivel, permiten una reducción del consumo energético por su mayor eficiencia. En otras palabras, se logra un mayor rendimiento por las características del propio balastro al consumir éste una menor cantidad de energía.

3.2.2 Regulación DALI



DALI es un acrónimo que significa Digital Addressable Lighting Interface, es decir, Interfaz de Iluminación Direccional Digitalmente. Este sistema es un estándar internacional, de acuerdo a la norma IEC 62386. Se asegura la compatibilidad entre equipos de diferentes fabricantes marcados con el logo anterior.

Es un interfaz de regulación bidireccional con una estructura maestro-esclavo. La información fluye desde un controlador, que opera como maestro, hacia los equipos de iluminación que operan únicamente como esclavos. Los equipos de iluminación ejecutan los comandos o responden a las solicitudes de información recibidas.

La comunicación mediante las señales digitales se realiza a través de un bus o línea de control de dos hilos. Estos hilos de control pueden poseer polaridad positiva y negativa, aunque la mayoría de equipos están diseñados libres de polaridad para que la conexión sea indiferente. No se necesitan cables especiales apantallados, pudiendo realizarse el cableado conjunto de la línea de alimentación y del bus DALI con una misma manguera estándar de 5 hilos.

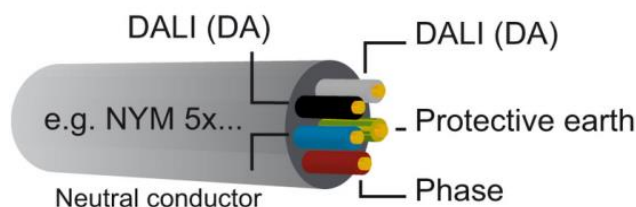


Figura 3.3: Cable de regulación DALI

La máxima caída de tensión a lo largo de la línea de control no puede ser superior a 2V con la corriente máxima del bus de 250mA. Por tanto, la máxima distancia de cableado permitida depende de la sección del cable, pero en ningún caso debe ser superior a 300m.

Una vez realizado el cableado, se realiza la configuración del sistema de iluminación DALI vía software. Se pueden crear hasta 16 escenas diferentes, direccionando los equipos de forma individual hasta un máximo de 64 direcciones. Se pueden organizar los equipos por grupos hasta un máximo de 16. La configuración puede ser cambiada en cualquier momento sin necesidad de volver a cablear.

Al no tener que crear los grupos de forma cableada, todos los equipos se conectan en paralelo al bus sin tener en cuenta la agrupación de los mismos. Sólo hay que evitar conectar los equipos en bucle o anillo cerrado. El encendido y apagado se realiza mediante comandos a través de la línea de control.

La interfaz DALI ofrece además una gran flexibilidad en el diseño de la instalación del alumbrado al permitir realizar estrategias de control de forma remota y a través de intuitivos comandos.

El sistema DALI posee una curva de regulación de luz logarítmica, ajustada a la sensibilidad del ojo humano, definida en la norma internacional IEC 62386. El rango de regulación posible está establecido entre el 0.1% y el 100%, estando determinado el nivel.

4. MATERIALES Y MÉTODOS DE TRABAJO

En este capítulo se explican todos los equipos que se han sido sometidos a un análisis experimental así, como todos los instrumentos de medida que se han empleado.

4.1 Equipos analizados experimentalmente

- Balastro electromagnético

Se han analizado los balastos instalados actualmente en la UPNA. El objetivo es comparar estos equipos con otras alternativas de mejora.

Estos no emplean ningún sistema de regulación de flujo luminoso como pueda ser el doble o triple nivel de potencia. Únicamente desarrollan las funciones básicas de los balastos electromagnéticos explicadas en el punto 2.1.4.



Figura 4.1: Balastro electromagnético

Se han estudiado otras tecnologías de regulación de flujo luminoso disponibles en el mercado. Para ello se han seleccionado los siguientes equipos que presentan mejoras energéticas sobre los anteriores. Cada uno de ellos tiene un modo de funcionamiento diferente, y por ello, se han tomado como posibles opciones de mejora alternativas.

- Balastro electrónico de doble nivel de potencia sin línea de mando

El dispositivo utilizado para la toma de medidas sobre los consumos en el laboratorio corresponde al modelo BE 170-EN-MH-SMI. Es un balastro fabricado por la empresa ELT de Zaragoza y sus características técnicas son las siguientes:

Es un balastro electrónico con regulación de potencia para lámparas de vapor de sodio de alta presión.

Reduce la potencia en lámpara en un 40% y el flujo luminoso en 50%.

Tiene una estimación de vida útil de 80.000 horas.



Figura 4.2: Balastro electrónico de doble nivel.

▪ **Funcionamiento**

La característica fundamental de estas consiste en que no es necesario instalar línea de mando para el control centralizado del cambio de nivel. Incorporan un circuito temporizado por equipo que se encarga de realizar el cambio de nivel al transcurrir el tiempo predeterminado desde la conexión. Bajo demanda se fabrican con otras temporizaciones.

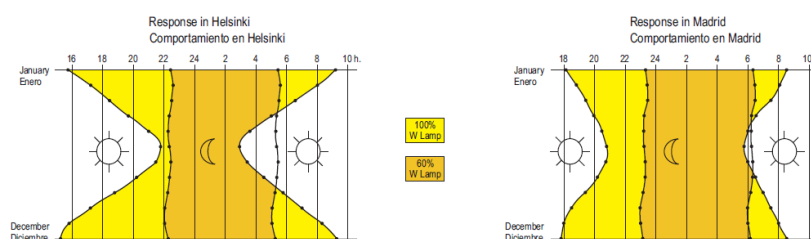
Cuentan con un circuito sincronizado de respuesta astronómica. Mediante un procesador se ajusta automáticamente el paso al nivel reducido en la parte central de la noche.

Mide diariamente la duración de la noche, memorizando la media de los tres últimos días y calcula el punto medio.

La programación estándar de entrada y salida de segundo nivel son de -2 horas y +5 horas respecto a ese punto medio de funcionamiento del alumbrado. Bajo demanda se fabrican con otros intervalos para el nivel reducido de potencia.

Si hay un encendido de duración <4h. (por labores de mantenimiento) el procesador no lo tiene en cuenta.

El sistema protege la lámpara ante sobretensiones de red por encima de los 260V, conmutando a nivel reducido de potencia si ésta se genera cuando la lámpara funciona a plena potencia y retornando al nivel inicial cuando baja de 250V.



SMI (electrónica)

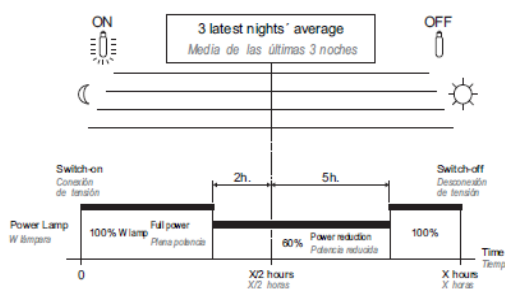


Figura 4.3 Programación horaria del doble nivel.

La conexión y desconexión la controla la fotocélula o reloj astronómico y el cambio de nivel lo realiza el equipo automáticamente. De este modo se asegura siempre el encendido de la lámpara a plena potencia, tal y como lo recomiendan los fabricantes de lámparas.

La implantación de los balastos electrónicos de doble nivel a la instalación actual de alumbrado exterior de la UPNA únicamente consistiría en colocarlos en sustitución de los electromagnéticos.

- **Balastro electrónico programable para regulación DALI**

El balastro electrónico utilizado ha sido el modelo DynaVision Prog Xt SON 70 de la marca Philips.

Los equipos electrónicos Xtreme (Xt) son de larga duración, tienen una estimación de vida útil de 80.000h y una gran fiabilidad.

Cuentan con protección a rayos, sobretensiones, temperatura, vibraciones, polvo y humedad.

Tienen una elevada eficacia y gran flexibilidad. Esta ha sido una de las principales ventajas que representan y lo que hizo que se analizara su comportamiento en el presente proyecto.

▪ **Funcionamiento**

El equipo integra diferentes funcionalidades de regulación y control que deben ser activadas mediante una sencilla programación. Para ello se cuenta con entrada DALI activada por defecto. Funcionalidades disponibles:

- Gestión en red punto a punto (entrada DALI)
- Control en grupo a través del hilo de mando
- Regulación de tensión
- Control autónomo
 - dynadimmer-5pasos
 - CLO (nivel flujo constante)
 - ALO (nivel de flujo ajustable)



Figura 4.4: Balastro electrónico programable DynaVision Prog Xt SON 70.

Para cerrar el círculo en el análisis de los dispositivos empleados en el alumbrado exterior y abarcar desde los más antiguos hasta lo más modernos disponibles en el mercado, lo ideal hubiera sido poder realizar experimentos con tecnología LED. Las razones por las que no se ha podido hacer lo que se deseaba en un inicio únicamente responden a cuestiones económicas. El reducido presupuesto con el que se contaba impidió la obtención de algún equipo LED. Al mismo tiempo, la tardía asignación de los presupuestos, provocó el aplazamiento de la iniciación del proyecto reduciendo considerablemente el tiempo para su ejecución.

- **Interface LCN8600/00 MultiOne USB2DALI**

Se ha empleado el LCN8600/00 MultiOne interface USB2DALI. Los nuevos equipos configurables con funcionalidades de control integradas permiten ser programados por esta herramienta, definiendo el funcionamiento de la luminaria para elevar al máximo el ahorro de energía y reducir al mínimo el impacto ambiental. Permite configurar las diferentes funciones de todos los equipos programables de Philips.



Figura 4.5 Interface USB 2 DALI

- **Software Philips Multione**

A la hora de realizar las diferentes medidas sobre el balastro de Philips DymaVision ProgXt SON 70 y la lámpara SON-T PIA Plus 70W hemos utilizado la interface Philips LCN8600 MultiOne interface USB2DALI y el software Philips Multione y Philips Multione Basic. El segundo es una versión más reducida del primero, por lo que se nombrará alguna de las múltiples acciones de control que presenta Philips Multione y que mayor inferencia pueda tener en el tipo de equipo empleado.

Las posibilidades que presenta a la hora de programar el balastro electrónico que lleva la luminaria utilizada se detallan a partir de los comandos que el propio programa emplea. Pueden verse en el anexo 1.



- Lámpara utilizada con el balastro electromagnético y el electrónico de doble nivel

La lámpara con la que se ha procedido a realizar las mediciones ha sido un modelo que se corresponde con las instaladas actualmente en el alumbrado exterior de la UPNA. El modelo es VIALOX NAV (SON)-E 70 W/I del fabricante OSRAM.

Las características de esta lámpara son:

- Lámpara de vapor de sodio de alta presión
- Factor de supervivencia (LSF) $\geq 95\%$ después de 12.000 h (para $P \geq 70W$)
- Ciclos de reposición de 3 años
- Potencia: 70 W
- Flujo luminoso: 5900 lúmenes.
- Casquillo: E-27
- Diámetro máximo: 71 mm
- Altura: 156 mm



Figura 4.6: Lámpara VSAP empleada con el balastro electromagnético y doble nivel.

Lámpara utilizada con el balastro electrónico programable DALI

La lámpara empleada ha sido el modelo MASTER SON-T PIA Plus 70 W. Es una lámpara de vapor de sodio de alta presión con un alto flujo luminoso y prolongada vida útil. Algunas de sus características técnicas principales son:

- Arrancador externo DynaVision Prog Xt SON 70.
- Casquillo E27.
- Vida al 5% de Fallos 17000 hr
- Vida al 10% de Fallos 20000 hr
- Vida al 20% de Fallos 23500 hr
- Vida al 50% de Fallos 30000 hr
- Flujo luminoso E_M 25°C 6600 Lm
- Eficacia lumínica nominal 91 Lm/W
- Mantenimiento Lúmenes a 2000h 90%
- Mantenimiento Lúmenes a 5.000h 86,5%
- Mantenimiento Lúmenes a 20.000h 81%
- Temperatura de Color 2000 K
- Etiqueta Eficiencia Energética A+



Figura 4.7: Lámpara VSAP empleada con el balastro programable DALI

- Luminaria tipo globo

Se trata de una luminaria de forma esférica. Cuenta con un refractor en el casquete semiesférico superior de forma que no se permite la salida plena del flujo luminoso hacia el cielo. A pesar de esto, tampoco se evita que salga parte del flujo luminoso hacia esa parte haciendo que se pierda una importante cantidad de potencia luminosa.



Figura 4.8: Luminaria tipo globo instalada en la UPNA

Luminaria Vital

Es la luminaria utilizada con el balastro electrónico programable y su correspondiente lámpara, del sistema de regulación DALI.

Cuenta con un reflector para distribuir la luz hacia las direcciones deseadas.

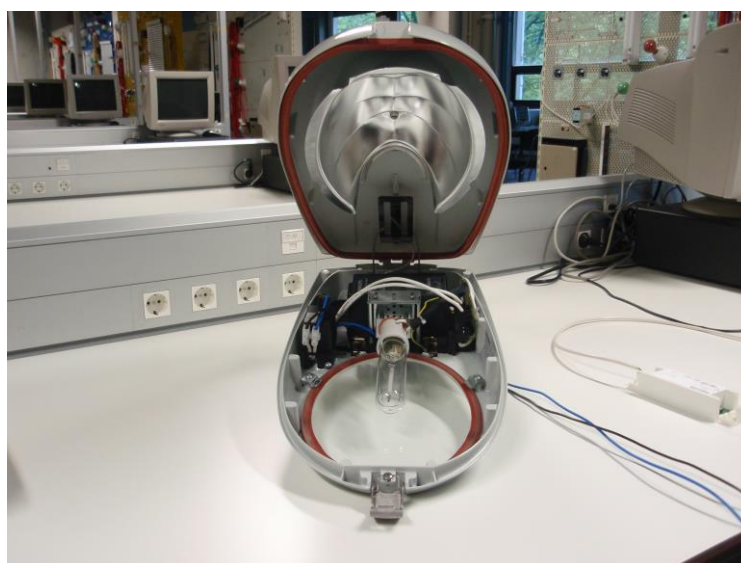


Figura 4.9: Luminaria Vital.

4.2 Equipos e instrumentos de medida

Los instrumentos empleados para la medición de los dispositivos de alumbrado exterior mencionados anteriormente, se clasifican en dos grupos:

- Equipos para la caracterización del rendimiento energético.
- Instrumentos para la caracterización del rendimiento lumínico.
- **Contador inteligente KNX y software ETS4**

Es un medidor de energía activa monofásico KNX de superficie. Entrega los datos de la potencia instalada y al consumo de energía activa acumulada. La precisión de éste es de $\pm 0,1$ KWh de energía activa y ± 1 W de potencia activa.



Figura 4.10: Contador inteligente.

- **Pasarela IP y software ETS4**

Los datos de energía registrados se podían supervisar y analizar centralizadamente a través de una interfaz web. Esto es posible a través de una pasarela IP que emplea comunicación Ethernet. De este modo se podía tener acceso de forma remota a los registros del contador introduciendo dirección lógica de éste en un buscador web. Con el software ETS4 se podía medir la tensión de red, la corriente de entrada, la potencia activa y un registro de la energía activa consumida cada 15 minutos.



Figura 4.11: Sistemas para la visualización remota de las mediciones.

A la hora de medir los consumos de los equipos hay que restar 12 W que correspondientes al bus y al contador.

- Luxómetro

Se ha utilizado un luxómetro facilitado por el personal de mantenimiento de la universidad. Éste no estaba calibrado, información facilitada por el equipo de mantenimiento, pero esto no ha supuesto un problema para el fin para el que se ha utilizado, únicamente presentaría problemas en cuestiones legales. La precisión del instrumento es de 0,1 lx.



Figura 4.12: Luxómetro

- Software DIALux evo y DIALux 4.12

Ambos son softwares que permiten realizar diseños de iluminación. Permiten realizar simulaciones de diferentes escenas y en función de los parámetros fotométricos de los puntos de luz y características geométricas de las zonas que se quieran evaluar. Como resultado de las simulaciones, entregan informes sobre los datos lumínicos de la instalación como la iluminancia media, mínima, máxima, uniformidad de la luz, etc.

Ambos tienen una mayor potencia para la simulación de espacios interiores, pero, la versión EVO, más reciente tiene una mayor capacidad para aproximar parámetros en exteriores.

4.3 Metodología de trabajo

4.3.1 Análisis experimentales de rendimientos energéticos

La metodología seguida ha sido diferente para cada equipo en función de sus características:

- **Balastro electromagnético**

Se ha dispuesto de tres balastos para poder realizar pruebas experimentales sobre ellos. La técnica seguida ha sido la de evaluarlos por separado, y conjuntamente de dos en dos (porque únicamente se contaba con dos lámparas). El objetivo era ver los consumos en distintas situaciones. Distintas situaciones hace referencia al número de horas y modo de conexión. Se pretendía comprobar si los resultados obedecen a datos similares para cada uno de los equipos y si se cumple la linealización para un sistema global.

- **Balastro electrónico de doble nivel**

En función de las especificaciones dadas por el fabricante y su modo de funcionamiento según los algoritmos programados en el propio balastro electrónico empleado, procedió a hacer una comparación entre los resultados teóricos y los prácticos. Para ello se conectó el balastro durante distintas horas para ver cómo afecta el tiempo de conexión a la estimación del tiempo intermedio (simulación del punto intermedio de la noche).

De este modo los cálculos teóricos obedecen a la premisa de que el balastro electrónico hace trabajar a la lámpara al 60% de su potencia nominal desde dos horas antes hasta cinco horas después de la hora del punto intermedio estimada en función de la media de los tres días anteriores.

Se procedió también a la conexión durante un periodo inferior a 4 horas para simular labores de mantenimiento y observar si afecta o no a la estimación de la media del día siguiente.

- **Balastro electrónico programable DALI**

Para poder trabajar sobre este dispositivo, hay que conectar la interface LCN8600/00 MultiOne interface USB2DALI al balastro electrónico y al ordenador. Una vez realizada la conexión se pueden utilizar los comandos del software Philips Multione que se deseen. Todo claro está, depende de las características que se quiera medir.

El primer objetivo era caracterizar la curva que defina la potencia activa que consume el conjunto balastro lámpara en función del % de salida de luz desde la lámpara. Para ello se utilizó la herramienta Adjustable Light Output (ALO) que facilita el software Philips Multione. Para ello se selecciona la opción Single Device Programming, Enable Power Suply, se ajusta el % de regulación deseada, Write to current device y Read from current device.

En la opción Summary sale por pantalla un resumen de todas las acciones de control realizadas sobre el dispositivo. A continuación se muestran dichas imágenes para cada una de las acciones de control realizadas para caracterizar la curva mencionada.

Ver anexo 1.

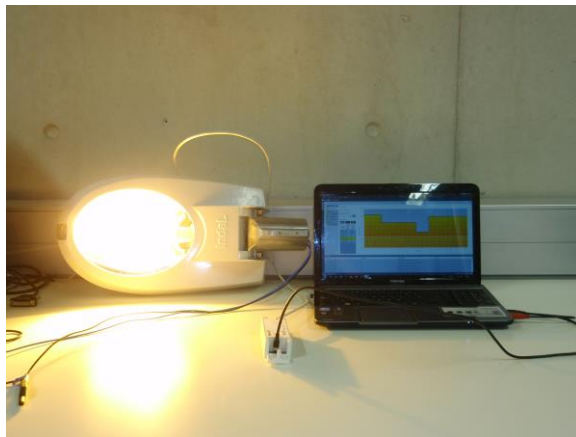


Figura 4.13: Forma de trabajo con el sistema de regulación DALI.

Una vez caracterizadas las curvas P-% luz y Q-% luz se procedió a realizar una serie de simulaciones con la opción Dynadimmer del software. Con una opción de programación se pueden ajustar los niveles de salida de luz y las franjas horarias en las que se quiere que se trabaje. Se pueden hacer un total de cinco variaciones de potencia dentro de una misma escena, es decir, se puede hacer que en una noche se trabaje a cinco niveles diferentes como máximo.

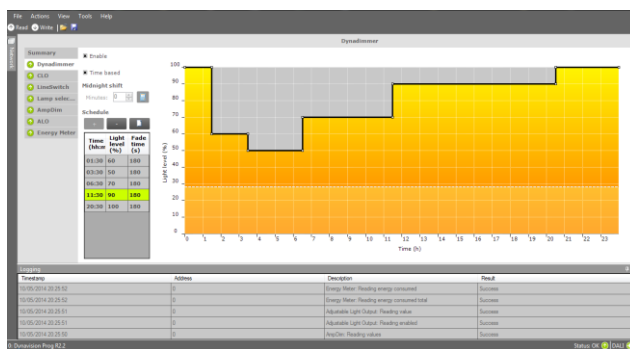


Figura 4.14: Ejemplo de programación con el sistema de regulación DALI.

Tanto para el caso del balastro electrónico de doble nivel, como para el programable DALI, se procedió después de las medidas a una comparación de los resultados con los datos teóricos.

La razón por la que con el balastro electromagnético no se procedió a la comparación de las mediciones con resultados teóricos, es porque no se contaba con datos por parte del fabricante de este dispositivo.

4.3.2 Análisis experimentales de los rendimientos lumínicos

La forma de medición ha consistido en la colocación de marcas en el suelo situadas cada una a 1 metro de distancia de la otra formando una cuadrícula como la de la figura 6.1. Esta cuadrícula en el suelo simulaba 5 metros hacia un lateral (dirección perpendicular al eje longitudinal del mástil de la luminaria) y 7 metros de altura (dirección paralela al eje longitudinal del mástil de la luminaria).

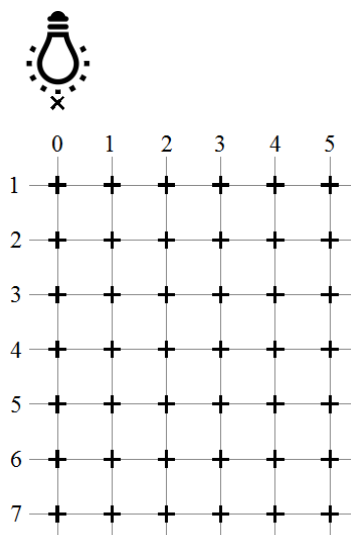


Figura 4.11: Puntos de medición de luxes

La intención era medir una mayor cantidad de metros lateralmente, pero, por cuestiones de espacio en los pasillos del edificio de los Tejos de la UPNA y exceso de obstáculos en el laboratorio de electrónica aplicada del mismo, ha resultado imposible. Para una mayor precisión de los resultados, tablas recogen las medias aritméticas de tres mediciones para cada uno de los casos analizados y puntos del espacio. Con ello se busca minimizar el error cometido en las mediciones. La oscuridad no era absoluta en la zona de mediciones. Sí se tomaron todas las medidas necesarias al alcance, como tapar alguna luz que pudiera alterar los resultados. De todos modos, la máxima cantidad de luxes medidos en la oscuridad era de 0,2 luxes.

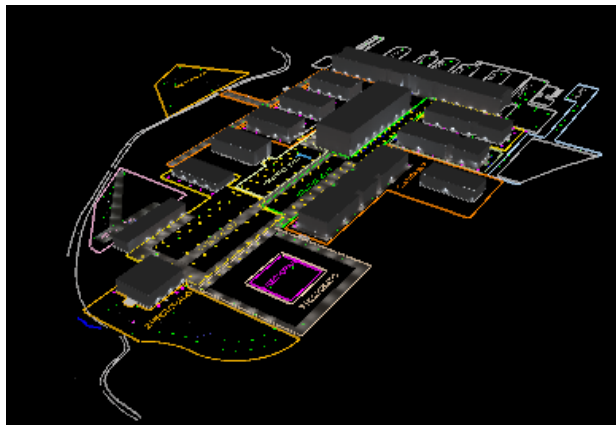
También se procedió a la medida de niveles de iluminación en otras direcciones y simulando diferentes alturas en el caso de la luminaria Vital. De este modo se obtuvieron datos suficientes para poder conocer si se contaba con la libertad suficiente como para poder definir su posición.

Simulaciones mediante DIALux evo y Dialux 4.12

Una vez obtenidos los diferentes niveles de luxes en distintos puntos del espacio y para diferentes alturas, se procedió a realizar simulaciones con estos softwares especializados.

Para ello diseñó un plano en 3D de toda la UPNA y se dividió todo el campus en áreas. La forma de definir las áreas fue a través de mediciones in situ en el propio campus y determinando qué zonas debían ser iluminadas y cuáles no.

De este modo, a partir de los resultados que se obtenían de la simulación y los que se tenían de las mediciones, se diseñaron las propuestas para la nueva instalación del alumbrado exterior del campus.



La razón por la que fue necesario realizar esa mezcla entre los resultados empíricos y los simulados, fue que el software, determinaba que había zonas en las que la iluminancia mínima era 0 y al comparar con las mediciones eso no se correspondía. Esto deja en evidencia lo que se explicaba anteriormente de que son programas orientados hacia la iluminación de interiores. A pesar de ello, ha servido de fuerte apoyo para determinar las iluminancias medias de servicio en cada una de las situaciones. A la hora de definir las iluminancias mínimas de servicio, se han utilizado los datos de las mediciones. Únicamente era necesario realizar este cálculo en los extremos de las áreas mencionadas.

4.3.3 Evaluación económica de las propuestas

En cada una de las propuestas se analiza el ahorro energético y económico anual así como la amortización (payback) de la inversión inicial en función del sistema de regulación que se implante en el alumbrado de la UPNA.

Para hacer una valoración económica de las propuestas, se ha estimado desde un punto de vista pesimista, un coste de 11 céntimos €/ KWh. Se prevé una subida del precio de la energía, en torno al 3% anual (a la par del IPC), lo que rentabilizaría aún más las inversiones. Estos datos se obtuvieron a partir de estudios de empresas especializadas en el sector como *Cenit Solar*.

La estimación del precio de recargo por consumo de energía reactiva para factores de potencia mayores 0,80 y menores de 0,95 se estima en 4,1554 céntimos €/ KVARh. Para el factores superiores, de 0,98-0,995, se paga un 35 de la energía reactiva consumida a 0,086998 €/ KVARh.

El impuesto eléctrico es del 4,864%, si bien se convierte en 5,11270% en aplicación de la ley del IVA (impuesto sobre el valor añadido; $100/(100-4,864) = 1,05113$; $1,05113 \times 4,864\% = 5,11270\%$).

A partir del calendario solar calculado para el 2014 por observatorio Astronómico Nacional del Instituto Geográfico Nacional para Latitud y longitud: 42 48 55, - 1 38 38 (posición geográfica de Pamplona), se estiman 4188 horas nocturnas al año.

Los precios estimados para las inversiones de las propuestas han sido:

Sustitución de balastro por balastos electrónicos de doble nivel: 69,30 €.

Sustitución de las luminarias tipo globo por la luminaria vital y sistema de regulación DALI: 500,29 €.

Colocación de una luminaria en un punto nuevo: 710,33 €.

Son datos estimados obtenidos de la base de datos del programa Presto. En estos precios se incluye el valor de los equipos, la mano de obra, el montaje necesario y el alquiler de maquinaria.

5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO ELÉCTRICO DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN

Se determinan los parámetros eléctricos de cada uno de los equipos analizados para establecer las comparaciones suficientes entre ellos y poder sacar conclusiones y definir, desde este punto de vista, cual es la mejor alternativa. Los datos de correspondientes a los consumos de energía y potencias medias totales, incluyen los consumos de los equipos de medida. Las potencias reactivas medias de las tablas, son el resultado de calcular la potencia aparente en función de la tensión y la intensidad que mostraba el programa ETS4.

5.1 Rendimiento Energético del Balastro Electromagnético

5.1.1 Medición de los consumos eléctricos

- Un balastro

Tabla 5-1 Resultados balastro unitario.

		DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
Horas totales	[h]	14	9	63	12	15
Energía consumida	[kWh]	1.3 ± 0,1	0.9 ± 0,1	6 ± 0,1	1.2 ± 0,1	1,4 ± 0,1
Potencia media total	[W]	92,87	100	95.24	100	93,33
Potencia media balastro y lámpara	[W]	78,86	86	81,24	86	79,33
Potencia Reactiva media balastro y lámpara	[VAr]	33,59	36,64	34,61	36,64	33,79

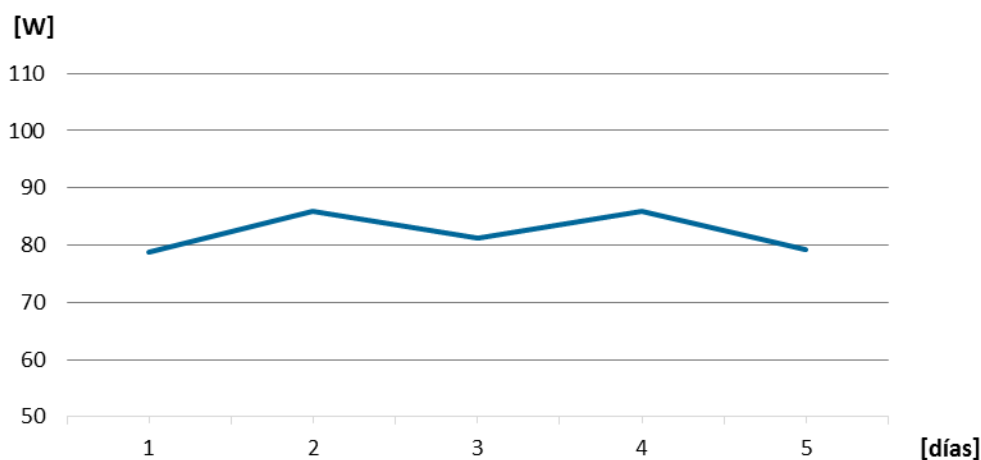


Gráfico 5.1 curva de potencia activa con equipos para un conjunto balastro-lámpara.

Se puede observar cómo la precisión del contador inteligente ($\pm 0,1$ kWh) hace que los resultados fluctúen debido a la pequeña potencia instalada. Se podría decir que la potencia activa oscila entre los 80-85 W aproximadamente fijándonos únicamente en los datos de potencia. Es aquí donde cobra gran importancia el número de horas de conexión del equipo. El efecto de un error de $\pm 0,1$ kWh, es inversamente proporcional a las horas de conexión, pues el porcentaje que representa es mucho menor. Es por ello que debemos guiarnos más por la medida del día 3, cuando estuvo conectado 63 horas.

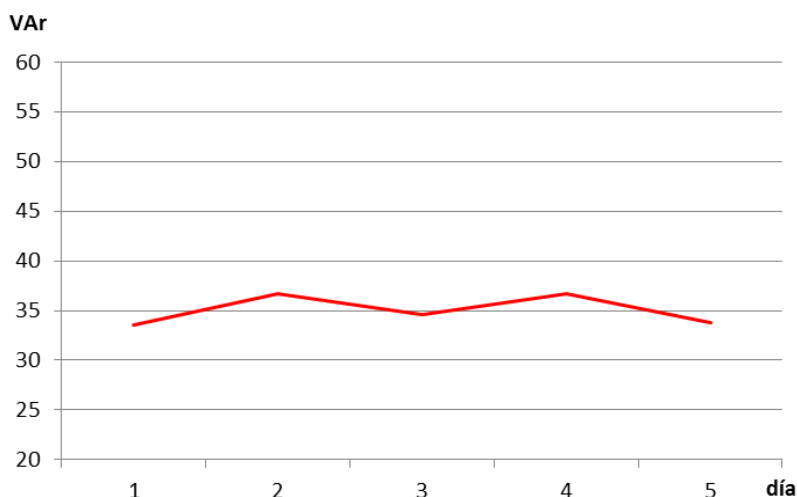


Gráfico 5.2: Potencia reactiva media para un conjunto balastro electromagnético-lámpara

Del mismo modo que ocurre en el gráfico de la potencia activa, se ven unas pequeñas variaciones de la potencia reactiva media. En este caso, se puede decir que la potencia reactiva de un conjunto balastro electromagnético-lámpara oscila entre los 33-36 VAr. Si se observa de nuevo el día 3 se ve cómo la potencia reactiva media oscila alrededor de 34-35 VAr.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la conexión de dos conjuntos balastro-lámpara en paralelo.

▪ Dos balastos en paralelo

Tabla 5-2 Resultados dos balastos en paralelo.

		DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4
Horas totales	[h]	17,5	15	12	15
Energía consumida	[kWh]	3 \pm 0,1	2,6 \pm 0,1	2,1 \pm 0,1	2,6 \pm 0,1
Potencia media total	[W]	173,40	173,33	175,00	173,33
Potencia media balastro y lámpara	[W]	159,40	159,33	161,00	159,33
Potencia Reactiva media balastro y lámpara	[VAr]	67,05	67,87	68,59	67,87

En esta grafica se observa como hay una importante variación en cuanto a la obtención de la potencia activa media. Además de las posibles limitaciones en la precisión del contador, pues sólo se muestra $\pm 0,1$ KWh, pero, también obedece a distintas realidades técnicas que afectan al equipo como pueden ser variaciones en la excitación (variaciones en la tensión de red).

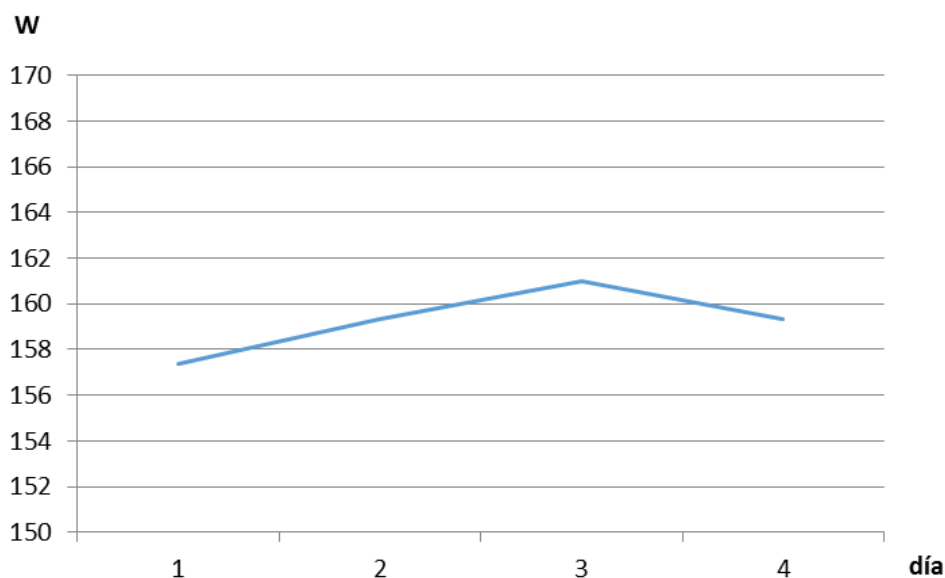


Gráfico 5.2 curva de potencia activa dos conjuntos balastro electromagnético-lámpara.

En este caso, como la potencia instalada es mayor, los resultados son más uniformes. La media de las potencias anteriores es de 79,9 W. A partir de este punto los cálculos posteriores, para que los resultados sean más intuitivos, se tomará como valor de la **potencia activa del conjunto balastro electromagnético-lámpara de 80W.**

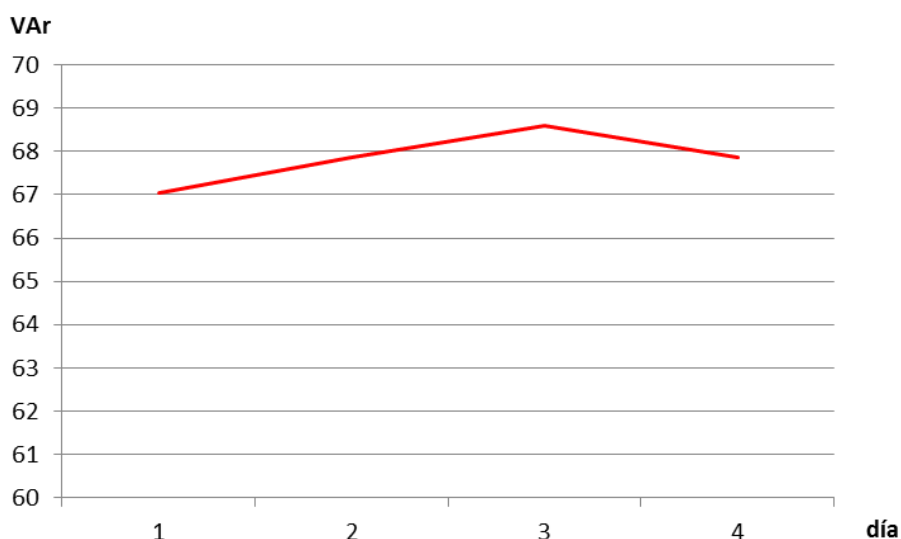


Figura 5.1: Curva de potencia reactiva media para dos balastos en paralelo

Se ve en este caso, al igual que en el anterior, esa mayor uniformidad en el valor de la potencia reactiva del conjunto.

5.1.2 Evaluación del factor de potencia

De forma genérica la tensión de excitación que otorga la red al conjunto formado por el balastro electromagnético y la lámpara V.S.A.P. es de 222-223 V según cada instante. La intensidad que circula por estos, una vez estabilizado, es de 0,39 A. A partir de estos datos sabemos que la potencia aparente entregada por la red al conjunto es de:

$$S = V \times I = 223 \times 0,39 = 86,97 \text{ VA}$$

A partir de estos datos se puede determinar cuál es el valor del factor de potencia y por ende la potencia reactiva instantánea como se ha mostrado en las tablas.

$$S \times \cos(\varphi) = P \longrightarrow \cos(\varphi) = P / S$$

$$\cos(\varphi) = 80/86,97=0,92$$

$$Q = P \times \tan(\varphi) = 34,08 \text{ VAr}$$

Podemos decir que como para esa pequeña variación en el voltaje la corriente y las potencias siguen siendo las mismas a merced de los datos leído en los instrumentos de medición, podemos afirmar que el factor de potencia del balastro electromagnético que está instalado actualmente en el campus universitario de la UPNA es de:

$$\cos(\varphi) = 0,92$$

$$P = 80 \text{ W}$$

$$Q = 34 \text{ VAr}$$

$$\cos(\varphi) = 0,92 \longrightarrow \varphi = 23,074^\circ \longrightarrow \tan(\varphi) = 0,426$$

$$Q = 34,08 \text{ Var}$$

Como alternativa para corregir el factor de potencia actual en busca de un valor coincidente con el del balastro electrónico analizado en el presente proyecto se calcula que:

$$\cos(\varphi') = 0,98 \longrightarrow \varphi' = 11,478^\circ \longrightarrow \tan(\varphi') = 0,203$$

$$P_C = P \times (\tan(\varphi) + \tan(\varphi')) = 80 \times (0,426 - 0,203) = 17,84 \text{ VAr}$$

$$C = (17,84 / (2\pi \times 50 \times 220^2)) \times 10^9 = 1173,274 \text{ }\mu\text{F}$$

5.2 Rendimiento Energético del Balastro Electrónico

5.2.1 Resultados de las mediciones

	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 6	DÍA 7	DÍA 8	DÍA 9	DÍA 10
[h]	60.75	12	12	12	12	15	15	15	3 h 55	15
[h]	*	60 h 45m	36 h 22m	28.25	12	12	13	14	15	15
[h]	*	30 h 22m	18 h 11m	14h 7min	6	6	6.5	7	7.5	7 h 30
[h]	*	-	-	-	1:00	00:30	01:30	01:45	-	02:00
[h]	*	-	-	-	8:00	7:30	8:30	08:45 h	-	09:00
[h]	0	0	0	0	7	7	7	7	0	7
[h]	60.75	12	12	12	5	8	8	8	3h 55m	8
[kWh]	5.6	1.1	1.1	1.1	0.9	1.1	1.2	1.1	0.37	1.2
[W]	92	91.66	91.66	91.66	75	73	80	73	92	80
[VAr]	18,681	18,612	18,612	18,612	15,23	14,823	16,245	14,823	16,681	16,245

Horas totales	Media de las 3 noches anteriores	Punto medio estimado	Hora de inicio de nivel mínimo (60%)	Hora final de nivel mínimo (60%)	Horas totales a nivel mínimo (60%)	Horas totales a máximo nivel (100%)	Energía consumida	Potencia media	Potencia reactiva media	* No hay datos	- Fuera de rango
---------------	----------------------------------	----------------------	--------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	-------------------	----------------	-------------------------	----------------	------------------

En el anexo 2 se adjuntan las comprobaciones de que los resultados obtenidos con las mediciones, se corresponden con los teóricos.

Según los datos ofrecidos para el año 2014 por el observatorio Astronómico Nacional del Instituto Geográfico Nacional del Ministerio de Fomento de España, con horario peninsular y balear de la salida y puesta del sol en Pamplona/Iruña con latitud y longitud: 42° 48' 55'', -1° 38' 38'' son:

- Día más corto: 24 de diciembre de 8:35-17:37 horas (9 horas y 2 minutos)
- Día más largo: 21 de junio de 6:28-21:49 horas (15 horas y 21 minutos)

La diferencia entre el día más largo y el más corto del año en Pamplona es de 6 horas y 19 minutos, que, dividido entre los días que los separan:

- Del 24 de diciembre al 21 de junio: 179 días. Media de 2,1 minutos de diferencia entre noches continuas.
- Del 21 de junio al 24 de diciembre: 183 días. Media de 2,07 minutos de diferencia entre noches continuas.

Es por ello que si no se da ninguna situación especial, el doble nivel hará su función en la zona intermedia de la noche. Bien es cierto que la noche más corta del año (y las cercanas) cuentan con alrededor de 8 horas y 40 minutos, por lo que el punto intermedio está a las 4 horas y 20 minutos desde la conexión, y, debido al algoritmo que sigue el balastro de doble nivel, el nivel de mínima potencia albergaría desde las 2 horas y 20 minutos de la conexión hasta las 9 horas y 20 minutos desde el mismo punto, es decir, que cuando se proceda a la desconexión se estará trabajando al mínimo nivel. Esto puede suponer una problemática si se considera que el tramo final de la noche precisa de iluminación máxima por cuestiones de seguridad o comodidad debido al importante flujo de personas que puede darse al coincidir con el horario de cambios de turnos en muchas industrias.

Debido a la concordancia entre los datos teóricos y empíricos, a partir de los primeros se extrapolarán los resultados para mostrar de forma más representativa las cualidades que nos ofrece el balastro de doble nivel sin línea de mando analizado.

Se eliminan los consumos debidos al contador y el bus que si se han considerado en la obtención de los resultados medidos en el laboratorio.

Horas de conexión	Tiempo al mínimo nivel	Tiempo al máximo nivel	P media	Q media	Energía	P al 100%	Q al 100%	Energía al 100%	ΔP	ΔQ	ΔE	P ahorrada	Q ahorrada	E ahorrada
[h]	[%]	[%]	[W]	[VAr]	[Wh]	[W]	[VAr]	[Wh]	[W]	[VAr]	[Wh]	[%]	[%]	[%]
8	75,0	25,0	56,6	11,5	452,8	77,6	15,7	620,8	21	4,3	168	27,1	27,1	27,1
9	72,2	27,8	57,4	11,6	516,4	77,6	15,7	698,4	20,2	4,1	182,0	26,1	26,1	26,1
10	70,0	30,0	58	11,8	580,0	77,6	15,7	776,0	19,6	4,0	196	25,3	25,3	25,3
11	63,6	36,4	59,8	12,1	657,6	77,6	15,7	853,6	17,8	3,6	196,0	23,0	23,0	23,0
12	58,3	41,7	61,3	12,4	735,1	77,6	15,7	931,2	16,3	3,3	196,1	21,1	21,1	21,1
13	53,8	46,2	62,5	12,7	812,8	77,6	15,7	1008,8	15,1	3,1	196,1	19,4	19,4	19,4
14	50,0	50,0	63,6	12,9	890,4	77,6	15,7	1086,4	14	2,8	196,0	18,0	18,0	18,0
15	46,7	53,3	64,5	13,1	968,0	77,6	15,7	1164,0	13,1	2,6	196,0	16,8	16,8	16,8
16	43,7	56,3	65,3	13,3	1145,6	77,6	15,7	1241,6	12,3	2,5	196,0	15,8	15,8	15,8

Tabla 5-3: Relaciones entre el nivel de máxima potencia y nivel de ahorro en función de las horas de conexión.

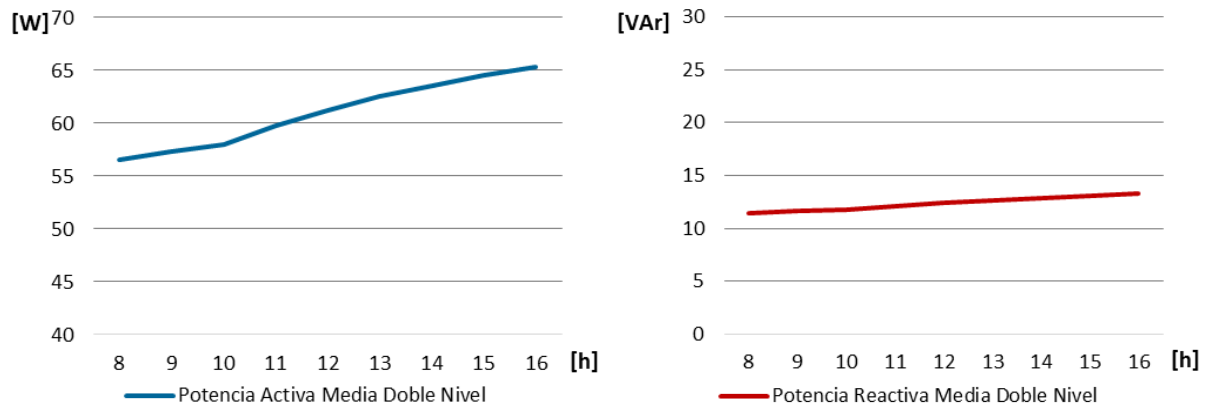


Gráfico 5.3 Gráficas de las potencias activa y reactiva media del doble nivel en función del número de horas de conexión.

Puede verse como el valor de las potencias medias del doble nivel son mayores conforme aumentamos el número de horas de conexión. Esto se debe a que el nivel de ahorro, siempre se activa durante 7 horas, por tanto, el porcentaje de tiempo que está activado, es menor durante las noches más largas.

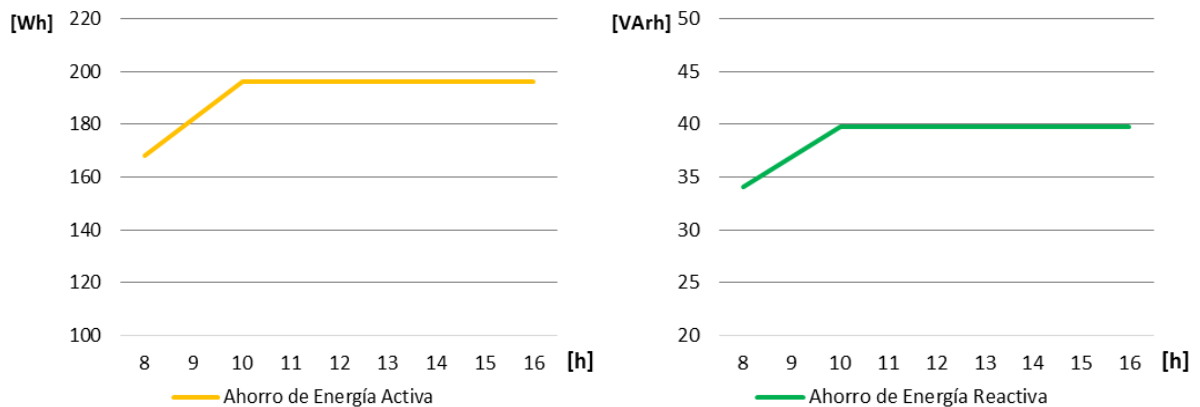


Gráfico 5.4 Se presentan los ahorros de energía activa y reactiva.

En los gráficos se muestra como a partir de las 10 horas de conexión se llega al máximo nivel de ahorro de energía debido a que se aplica el mínimo nivel al 100% de su disponibilidad, es decir, se completan las 7 horas que nos ofrece el dispositivo.

Para un reconocimiento más intuitivo, a continuación se muestra este efecto en porcentajes de ahorro de energía.

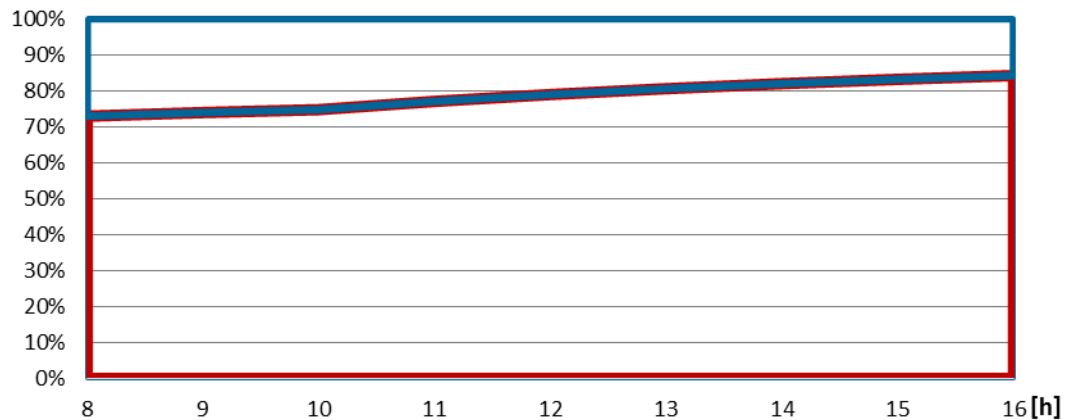


Gráfico 5.5 Ahorro de energía activa (%) por la activación del doble nivel.

Se ve el resultado debido a los algoritmos internos, que postulan el comportamiento del procesador de respuesta astronómica que lleva instalado el balastro electrónico. Durante siete horas hace trabajar a la lámpara al 60% de su potencia máxima. Es por ello que como se puede ver, en las noches más cortas del año, este ahorro supone un % mayor que para otras épocas del año donde lógicamente las siete horas de mínimo nivel tienen un peso menor. No obstante, por comunicación del fabricante, se puede programar el balastro de distinta forma para que cumpla otras especificaciones en función de distintos objetivos (destinación de la iluminación) o en función de distintos lugares geográficos con diferentes latitudes y por tanto distinto calendario solar.

5.3 Rendimiento Energético del balastro electrónico programable para la Regulación DALI

Como ya se ha explicado, este sistema permite tener un pleno control de regulación del flujo luminoso mediante una señal externa. Es el usuario el encargado de diseñar las estrategias de control óptimas para cada situación quien decide cuándo y cuánto se regula el flujo. Es por esto, que la forma de caracterizar este sistema es a través de las curvas de potencia en función del % de regulación, es decir, en función de la cantidad de luz que se emita.

5.3.1 Caracterización de las curvas P-% luz y Q-% luz

Durante el tiempo de estabilización (10 minutos), el equipo trabaja al 100% de potencia. Una vez transcurrido este tiempo trabaja conforme a las órdenes manadas.

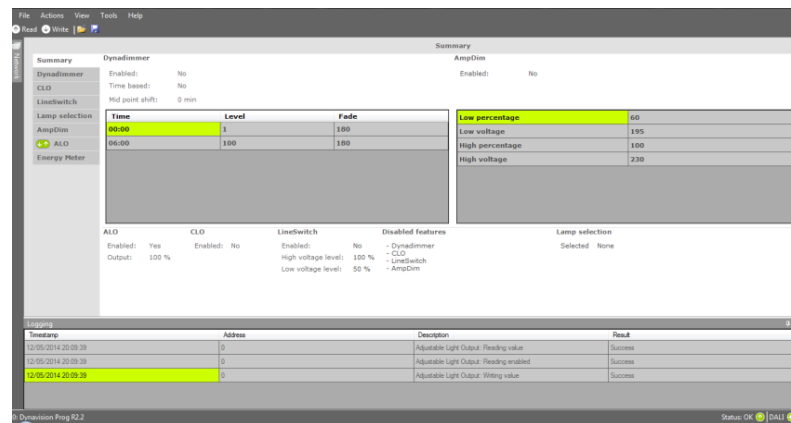


Ilustración 5-1: Ejemplo de la programación seguida con el software Phips Multione para la caracterización de las curvas de potencia.

Los resultados obtenidos en función del % de salida de luz son:

Tabla 5-4: Potencia activa y reactiva en función del % de regulación para el sistema de regulación DALI

% de Nivel de Luz de Salida	Potencia Activa del conjunto	Potencia Reactiva del conjunto
	Balastro-Lámpara	Balastro-Lámpara
	[W]	[VAr]
≤25	35	11,5
30	36	11,8
35	38	12,5
40	42	13,8
45	46	15,1
50	48	15,7
55	52	17,1
60	54	17,7
65	57	18,7
70	60	19,7
75	63	20,7
80	66	21,7
85	69	22,7
90	72	23,7
95	74	24,3
100	76	25,0

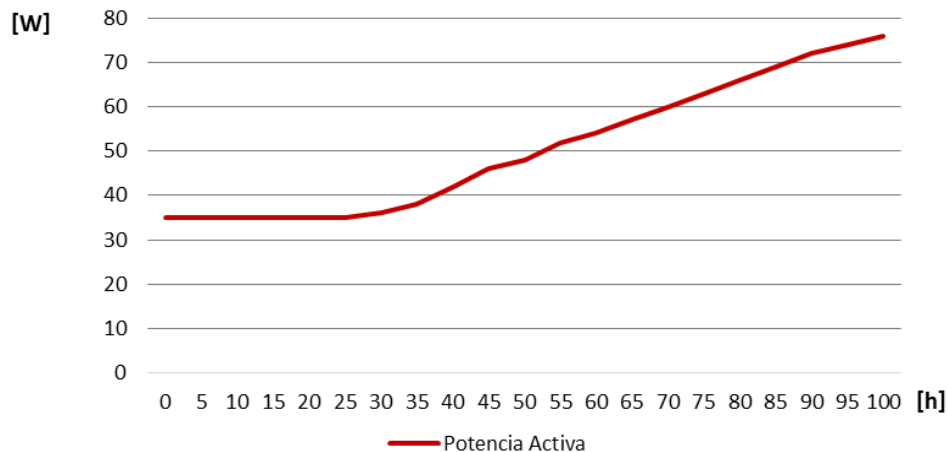


Gráfico 5.6 Potencia Activa del conjunto Balastro-Lampara del sistema DALI.

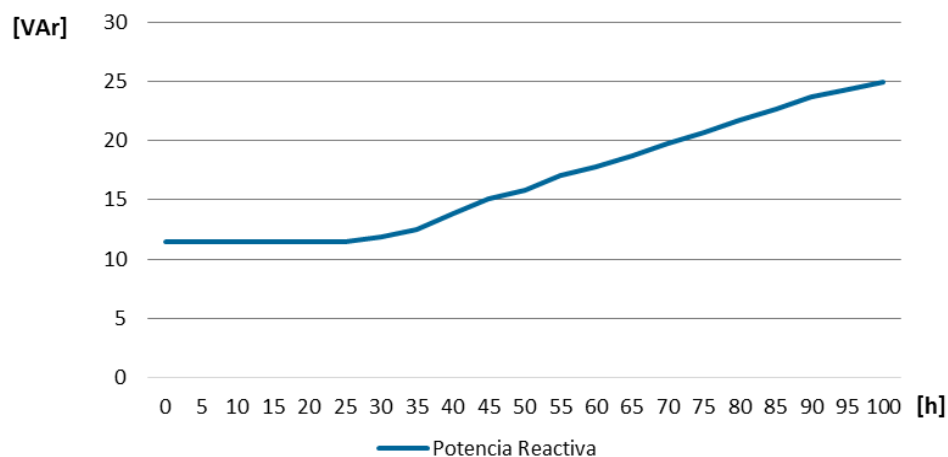


Gráfico 5.7 Potencia Reactiva del conjunto Balastro - Lámpara del sistema DALI.

En las gráficas anteriores se observa cómo se mantiene una linealidad muy definida entre la potencia consumida por el balastro electrónico programable DALI y la lámpara de vapor de sodio de alta presión empleada. Esta linealidad se mantiene desde el 30% de nivel de lux de salida hasta el nivel máximo del 100%. Por debajo del 30% de nivel de luz, la regulación es inviable. El 30% representa el nivel de luz que corresponde a la mínima potencia necesaria para que el equipo se mantenga operativo. Si se programa por debajo de este nivel el conjunto en lugar de apagarse sigue trabajando igual que al 30%, es decir, si se mantiene el equipo conectado, como mínimo consumirá 35 W de potencia.

El factor de potencia facilitado por el fabricante es de 0,95. Se puede observar que el rendimiento de este equipo es algo inferior al balastro electrónico de doble nivel analizado en el capítulo anterior, el cual, tiene un factor de potencia de 0,98. A pesar de que inicialmente parezca que un menor factor de potencia suponga una menor eficiencia energética, la gran flexibilidad que tiene este equipo permite hacer infinidad de programaciones o escenarios llegando a obtener grandes ahorros.

5.3.2 Programación de estrategias de regulación para una noche

Una vez caracterizadas las curvas P - % luz y Q - % luz, se procede a realizar una serie de simulaciones con la opción Dynadimmer del software. Con esta opción de programación se pueden ajustar los niveles de salida de luz y las franjas horarias en las que se quiere que se trabaje. Se pueden hacer un total de cinco variaciones de potencia dentro de una misma escena, es decir, se puede hacer que en una noche se trabaje a cinco niveles diferentes como máximo.

▪ Prueba 1:

La conexión se llevó a cabo un sábado a las 20:30 horas. Las órdenes que se mandaron al dispositivo fueron:

- De 20:30 h a 01:30 h funcionar al 100% (76 W)
- De 01:30 h a 03:30 h funcionar al 60% (54 W)
- De 03:30 h a 06:30 h funcionar al 50% (48 W)
- De 06:30 h a 11:30 h funcionar al 70% (60 W)
- De 11:30 h en adelante funcionar al 90% (72 W)

La desconexión se hizo el lunes a las 08:00 horas. El contador inicialmente marcaba 133,8 KWh en el momento en el que se puso en marcha el dispositivo y 136,6 KWh en el momento de desconexión. Por tanto:

En 35,5 horas se consumió un total de 2,8 KWh de energía. Si se comparan con los resultados teóricos:

$$E_T = (76+12) \times 5 + (54+12) \times 2 + (48+12) \times 3 + (60+12) \times 5 + (72+12) \times 20,5$$

$$E_T = 2,834 \text{ KWh (coinciden los valores)}$$

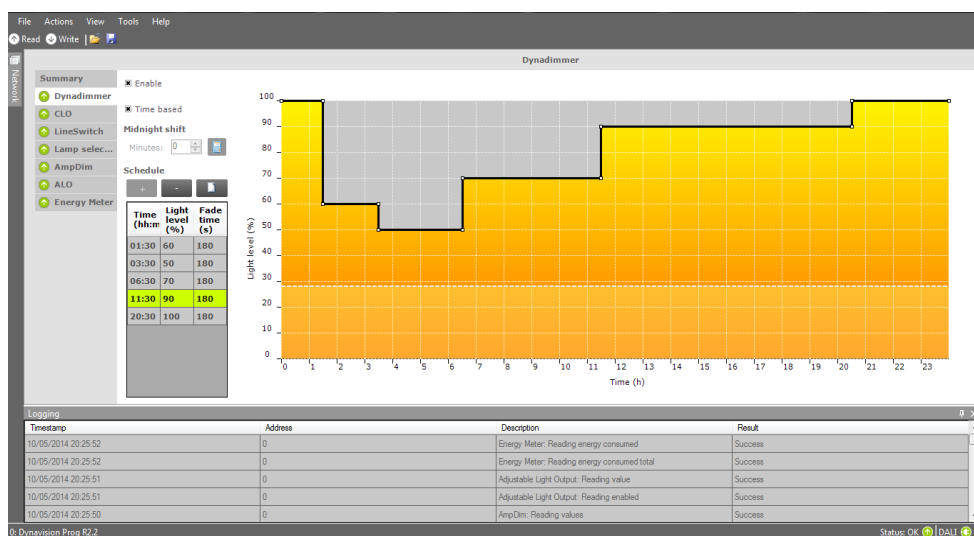


Figura 5.2: Estrategia de regulación DALI 1, para una noche.

Prueba 2:

- De 21:00 h a 01:00 h funcionar al 90% (72 W)
- De 01:00 h a 03:00 h funcionar al 70% (60 W)
- De 03:00 h a 06:00 h funcionar al 50% (48 W)
- De 06:00 h a 07:00 h funcionar al 60% (54 W)
- De 07:00 h en adelante funcionar al 90% (72 W)

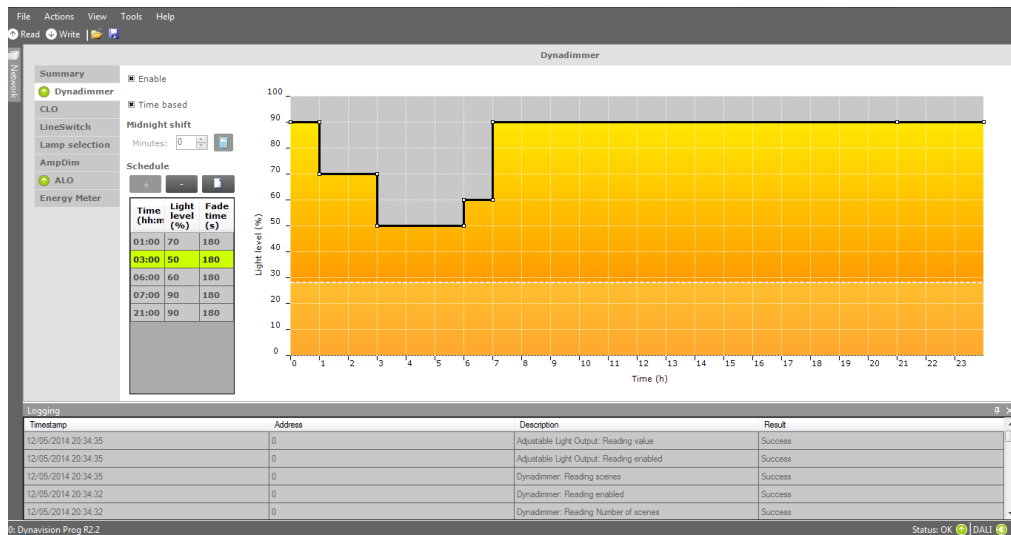


Figura 5.3: Estrategia de regulación DALI 2, para una noche.

La conexión se llevó a cabo a las 21:00 h (136,7 KWh) y la desconexión a las 08:30 h del día siguiente (137,6 KWh). Por tanto en un total de 11,5 horas el consumo energético marcado por el contador era un total de $0,9 \pm 1$ KWh. Si se compara este dato leído en el contador con los cálculos teóricos:

$$E_T = (72+12) \times 4 + (60+12) \times 2 + (48+12) \times 3 + (72+12) \times 1,5 + (72+12) \times 1$$

$$ET = 0,862 \text{ KWh}$$

Observamos cómo se corresponden perfectamente los cálculos teóricos con las medidas de los consumos en función de las distintas programaciones simulando una noche. Esto nos permite, sin necesidad de realizar exhaustivas simulaciones, el poder determinar de forma teórica la forma de programación de la noche. Se puede realizar en función de diferentes parámetros como pudiera ser el clima, la época del año, etc. Éste último es muy importante considerando que se trata de mejorar la instalación de una universidad. Esto significa que hay épocas del año donde el tránsito por la universidad será mínimo así, como otras épocas en las que se flujo de personas será importante.

Otro de los factores más beneficiosos de esta alternativa, es la posibilidad de crear múltiples escenarios y grupos. Se pueden alumbrar a alta potencia zonas donde se prevén flujos o tránsitos importantes, mientras que en otras se puede minimizar la iluminancia con el fin de ahorrar en costos y evitar una contaminación lumínica innecesaria.

5.4 Comparación del rendimiento eléctrico de los sistemas de regulación analizados.

A partir de los datos obtenidos en los apartados anteriores, se procede a realizar una comparativa entre los distintos rendimientos energéticos de cada uno de los dispositivos sometidos a análisis.

Inicialmente se comparan los dos sistemas de regulación estudiados para poder implantar en la universidad, con el sistema actual, es decir, se trata de ver las disminuciones en el consumo de energía eléctrica que supondría el implantar estos sistemas de regulación respecto a los equipos con balastro electromagnético y VSAP actuales.

Seguidamente se realizará una comparativa entre los balastos electrónicos programables para la regulación DALI y los balastos electrónicos de doble nivel sin línea de mando que con anterioridad se ha demostrado que representaban una buena alternativa en el ahorro energético de la instalación. La flexibilidad que ofrece la regulación DALI complica el hacer una comparación objetiva entre los sistemas. Por ello la forma de demostrar las diferencias entre estos dispositivos, ha sido obteniendo el % de nivel de regulación medio necesario, de forma que se igualen las potencias activas medias en función del número de horas de duración de la noche (según la época del año).

En definitiva el objeto de este capítulo es:

- Representar la mejora que pueden suponer los balastos electrónicos programables DALI respecto a los electromagnéticos actuales.
- Comparación entre las dos propuestas de mejora.

5.4.1 Comparación del balastro electromagnético y el electrónico de doble nivel

En función del análisis experimental de los rendimientos eléctricos de cada uno de ellos se concluyen los siguientes aspectos.

Tabla 5-5 Comparación del factor de potencia de los diferentes balastros

Factor de potencia	B. Electromagnético	B. Electrónico
	0,92	0,98

Hay una importante diferencia entre los factores de potencia de los balastros, signo esencial en la determinación de la eficiencia de cualquier dispositivo. Hay que resaltar la importancia del factor de potencia del doble nivel, pues, al ser superior de 0,95 no tiene un recargo económico por consumo de energía reactiva.

▪ Potencia Activa Media

La diferencia entre las potencias activas de los dispositivos se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 5-6 Diferencias de potencia activa entre el conjunto balastro electromagnético-lámpara y el conjunto balastro electrónico de doble nivel-lámpara.

Tiempo de conexión [h]	Potencia Activa B. Electromagnético [W]	Potencia Activa B. Electrónico [W]	Diferencia de Potencia Activa [W]
8	80	56,60	23,40
9	80	57,38	22,62
10	80	58,00	22,00
11	80	59,78	20,22
12	80	61,26	18,74
13	80	62,52	17,48
14	80	63,60	16,40
15	80	64,53	15,47
16	80	65,35	14,65

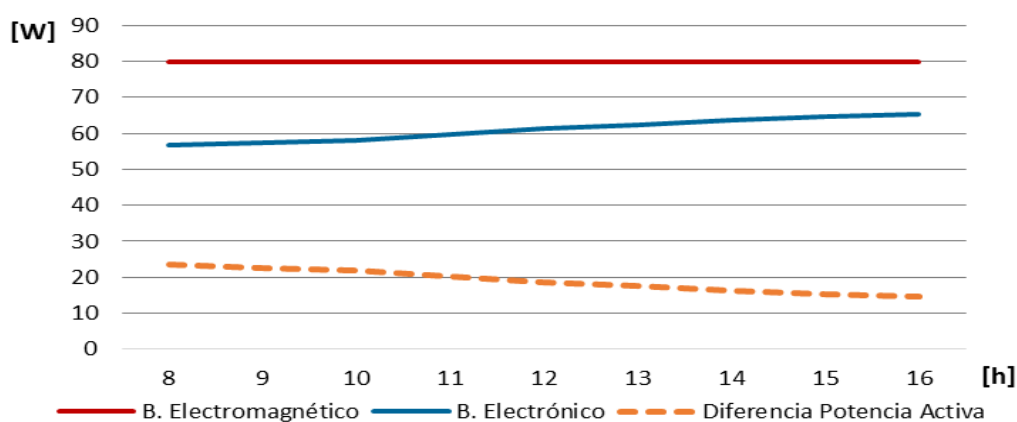


Gráfico 5.8 Diferencia de potencia activa entre balastro electrónico y el electromagnético.

Se muestra cómo la tendencia de las potencias activas instantáneas aproximarse con el incremento del tiempo de conexión como consecuencia de la menor influencia del modo de ahorro (al 60%) del balastro electrónico. Es cierto que más de 16 horas carece de sentido el que esté en funcionamiento la luminaria bajo condiciones de normalidad. Por tanto vemos la importancia de la disminución de la potencia entre el caso del antiguo balastro electromagnético y el moderno electrónico. Porcentualmente, la disminución entre uno y otro oscila entre el 24,56% en el caso de conexión máxima de tiempo con 16 horas bajo condiciones normales de las noches más largas del año, y, un 29,25% en el caso de conexiones de 8 horas donde la diferencia es máxima.

▪ Potencia Reactiva Media

Tabla 5-7 Diferencia de potencia reactiva media entre el conjunto balastro electromagnético-lámpara y el conjunto balastro electrónico de doble nivel-lámpara

Tiempo de conexión [h]	Potencia Reactiva B. Electromagnético [VAr]	Potencia Reactiva B. Electrónico [VAr]	Diferencia de Potencia Reactiva Media [VAr]
8	34,08	11,49	22,59
9	34,08	11,65	22,43
10	34,08	11,78	22,30
11	34,08	12,14	21,94
12	34,08	12,44	21,64
13	34,08	12,70	21,38
14	34,08	12,91	21,17
15	34,08	13,10	20,98
16	34,08	13,27	20,81

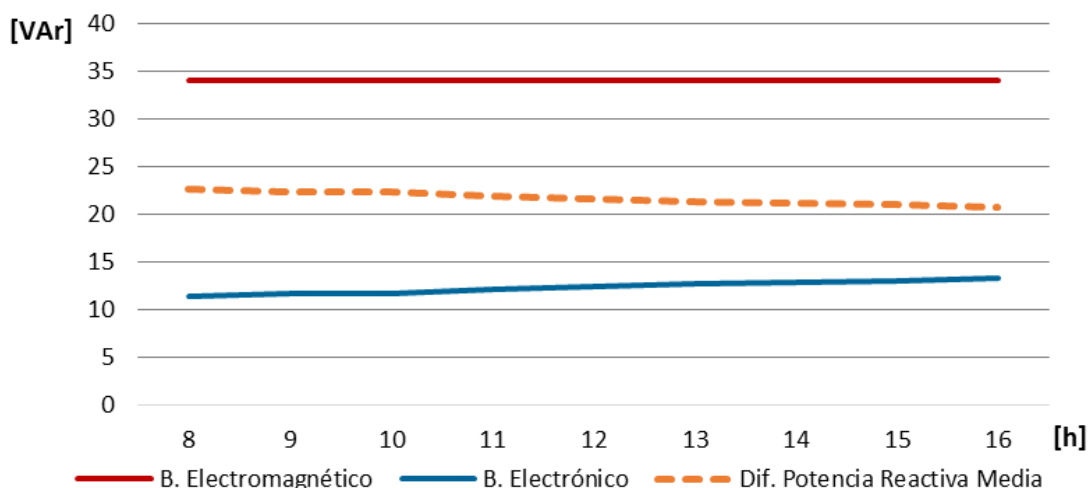


Gráfico 5.9 Diferencia de potencia reactiva media.

▪ Energía Consumida y Ahorro de Energía

Tabla 5-8 Comparación de ahorro de energía activa y reactiva

Tiempo de conexión [h]	Energía Activa			Energía Reactiva	
	Energía B. Electromagnético	Energía B. Electrónico	Ahorro	Consumo	Ahorro
	[Wh]	[Wh]	[%]	[VAr]	[%]
8	640	452,8	29,3	22,5	77,2
9	720	516,4	28,3	22,4	79,3
10	800	580,0	27,5	22,3	81,1
11	880	657,6	25,3	21,9	86,8
12	960	735,1	23,4	21,6	92,4
13	1040	812,8	21,8	21,3	97,9
14	1120	890,4	20,5	21,1	103,3
15	1200	968,0	19,3	20,9	108,5
16	1280	1045,6	18,3	20,8	113,7

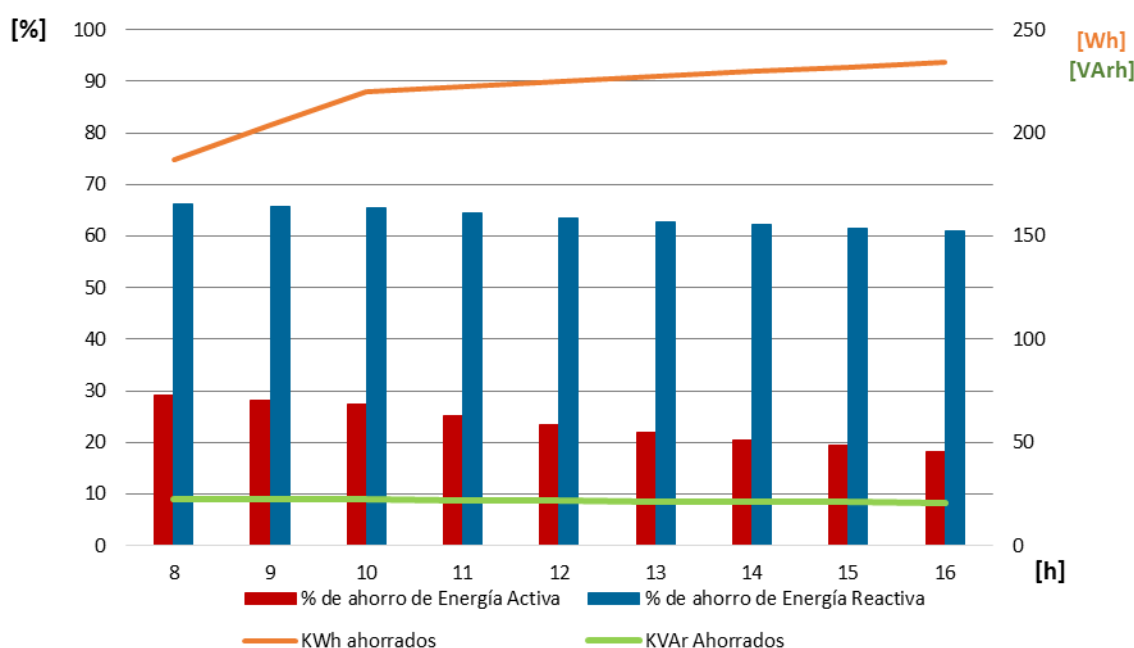


Gráfico 5.10. Muestra el porcentaje de energía activa y reactiva entre los dos balastos (barras) y el ahorro energético en kWh y VARh en cada una de las energías (líneas).

Es notable cómo de beneficioso es la colocación de un balastro electrónico en lugar de uno electromagnético como los ensayados. El ahorro de energía es muy importante en cualquiera de las situaciones del año, bien es cierto que el porcentaje de ahorro es mayor en las noches cortas.

Lo más destacable, sin dudas, es la gran disminución en el consumo de potencia reactiva que se da con la implantación de los balastos electrónicos. Este ahorro oscila entre el 61-67% como se muestra en la siguiente tabla:

5.4.2 Comparación entre balastos electrónicos programables DALI y balastos electromagnéticos.

Al no poder ser regular los electromagnéticos de ninguna forma, consume junto con la lámpara 80 W siempre. El factor de potencia de éstos es de 0,92, por lo que la potencia reactiva que consumen en todo instante de tiempo es de 34,08 VAr. La principal razón de estos consumos es la baja eficiencia de los balastos electromagnéticos y su modo de funcionamiento. Sólo el propio balastro consume un 12,5% de la potencia demandada por el conjunto balastro lámpara (como norma general todo balastro electromagnético consume entre un 10-15% de la potencia en lámpara). Esto implica un gasto superfluo que lo deja en clara desventaja cuando es comparado con cualquier balastro electrónico de fabricación más reciente.

Los balastos electrónicos programables tienen una ventaja desde el inicio pues sólo consumen 6 W cuando se trabaja a potencia nominal. Es el mayor gasto para estos balastos y únicamente cuando el nivel de luz de salida es del 100%. Cuando se disminuye el nivel de salida de luz, el consumo de estos también disminuye manteniendo siempre el factor de potencia en 0,95. Así pues haciendo un análisis desde el punto de vista más pesimista para un balastro electrónico programable que es trabajando siempre al 100% podemos hacer las siguientes comparaciones:

Tabla 5-9: comparación de P,Q y F.P. del DALI y el electromagnético

Balastro Electromagnético	Balastro Electrónico Programable DALI (al 100% para todo t)
P = 80 W	P = 76 W
cos (φ) = 0,92	cos (φ) = 0,95
Q = 34,08 VAr	Q = 24,98 VAr

A continuación se representan los ahorros de energía activa del balastro electrónico DALI respecto al electromagnético.

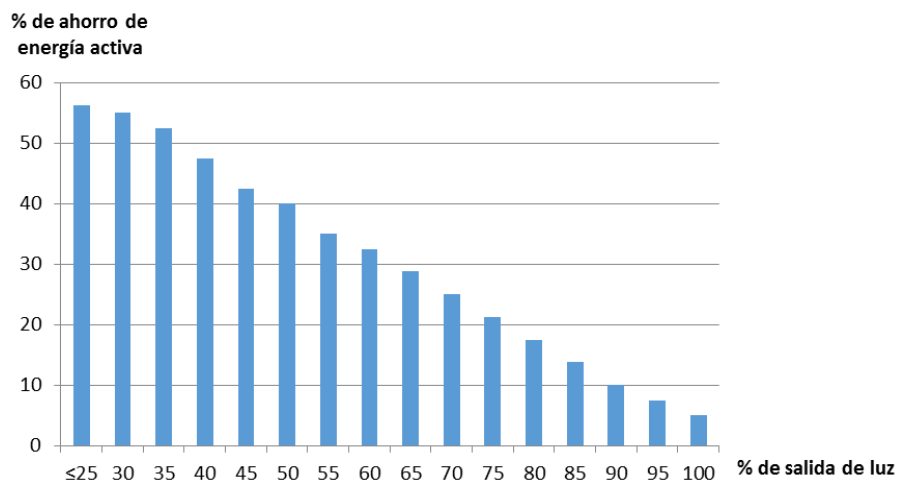


Figura 5.4: % de ahorro de energía activa de DALI respecto al electromagnético según el % de salida de luz

5.4.3 Comparación entre balastos electrónicos programables DALI y balastos electrónicos de doble nivel sin línea de mando (100%, 60%).

La potencia media de los balastos electrónicos de doble nivel depende del número de horas en las que se conecte. El comportamiento de éste siempre es igual, como ya se ha explicado. Su modo de funcionamiento le permite trabajar con un factor de potencia de 0,98 en ambos niveles. Bien es cierto que el factor de potencia del balastro programable es de 0,95. Esto puede suponer una desventaja frente al otro, pero la gran flexibilidad que ofrece al poder ser regulado en todo momento a la potencia deseada hace que sea muy competitivo.

La forma que se ha seguido para poder compararlos es estableciendo los niveles de regulación medios del DALI para poder igualar la potencia activa de éste a la del doble nivel en función del número de horas de conexión.

Tabla 5-10: % de regulación medi del sistema DALI para consumir la misma energía activa que el sistema de doble nivel en función de la época del año.

Tiempo de conexión [h]	Balastro Electrónico de doble nivel		% regulación DALI*	DALI
	P_{media} [W]	Q_{media} [VAr]		Q_{media} [VAr]
8	56,6	11,4	64,3	18,6
9	57,3	11,6	65,3	18,8
10	58,0	11,7	66,6	19,0
11	59,7	12,1	69,6	19,6
12	61,2	12,4	72,1	20,1
13	62,5	12,6	74,2	20,6
14	63,6	12,9	76,0	20,9
15	64,5	13,1	77,5	21,2
16	65,3	13,2	78,9	21,5

Se muestran los niveles de medios de regulación de salida de luz del DALI que igualan la potencia activa media de este equipo con la potencia activa media del doble nivel.

El mayor factor de potencia del doble nivel obliga a que el % de nivel de salida de luz con DALI sea mínimo en todas las situaciones.

Hay que recordar que los de doble nivel trabajan al 100% y al 60% de potencia en lámpara, y, en este segundo caso, el nivel de iluminación es del 50% según los datos facilitados por el fabricante.

Los cálculos seguidos para la determinación de la tabla 5-11 pueden verse en el anexo 3.

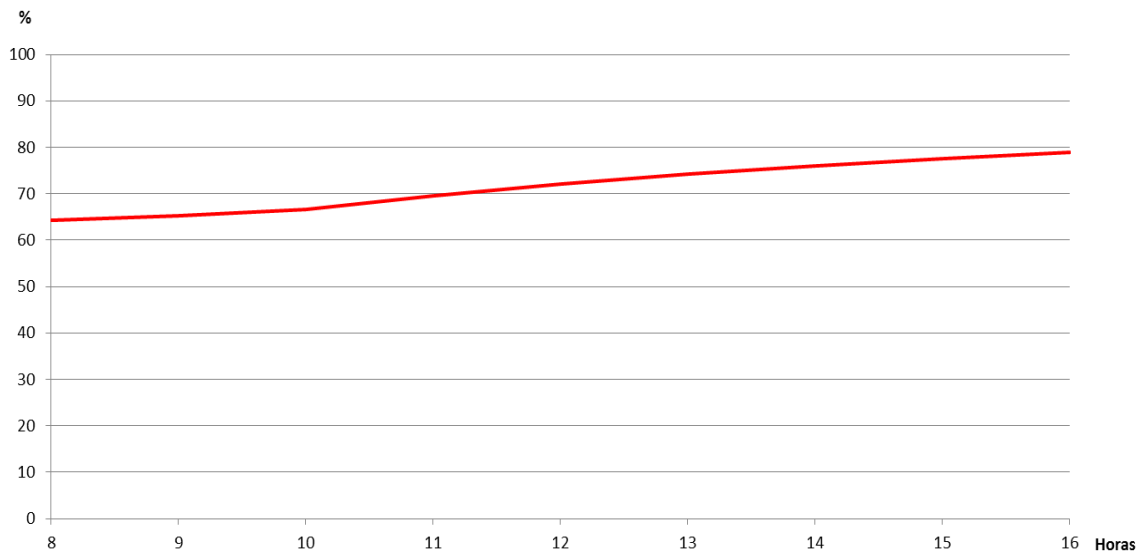


Gráfico 5.11: Curva del % de Nivel de Iluminancia Media en servicio del sistema DALI para consumir la misma potencia activa que el equipo de doble nivel.

Se puede comprobar en los datos anteriores cómo en las noches más cortas del año parece ser que el sistema DALI está más limitado a la hora de igualar su potencia activa media a la del doble nivel. No obstante hay que hacer mención a que se está hablando de % de nivel de iluminancia media respecto al 100% de su capacidad. En capítulos siguientes se analizarán los rendimientos lumínicos según el tipo de lámpara y balastro. Es por esto que todavía no se pueden sacar conclusiones en claro.

Es importante no perder noción del objeto práctico del presente proyecto; encontrar la solución más eficiente para la instalación del alumbrado exterior del campus de la UPNA en Pamplona. Con esto se quiere decir que, a la hora de definir las ventajas o desventajas de cada una de las tecnologías estudiadas, hay que tener en cuenta, tanto los horarios de tránsito por el campus con el calendario académico. Así pues si en el análisis anterior se presume una menor competitividad del balastro programable DALI en las noches más cortas del año, hay que considerar que éstas se dan en el periodo estival, fechas en las que la universidad no permanece cerrada pero sí que el tránsito es mínimo, sobretudoo en horarios nocturnos, por lo que el nivel de iluminación podría ser ajustado al mínimo.

Resulta necesario valorar la gran flexibilidad que ofrece el balastro programable. Al poder programarse hasta cinco ciclos de luz distintos para una noche, puede ser que en horarios donde el balastro de doble nivel trabaja al 100%, éste trabajar a un nivel inferior.

6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO LUMÍNICO DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE ALUMBRADO EXTERIOR

6.1 Medición de los niveles de iluminación de los sistemas de regulación.

En este capítulo se muestran los resultados de las mediciones hechas para caracterizar el rendimiento lumínico de los dispositivos. La metodología que se ha seguido es la explicada en el capítulo 4. Como recordatorio, las tablas recogen los luxes medidos en los puntos del espacio que se muestran el siguiente esquema:

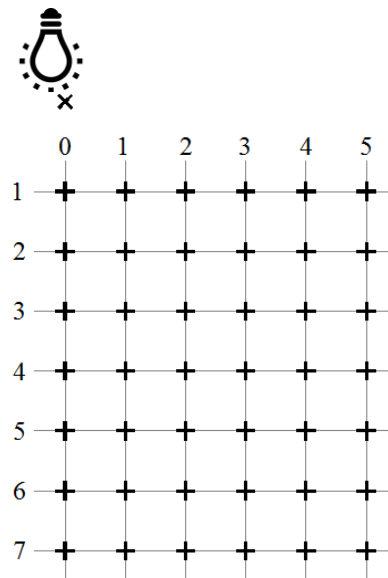


Figura 6.1: Esquema de los puntos geométricos donde se han medido los luxes mostrados en las tablas.

El eje de ordenadas representa la altura en metros de la luminaria. El eje de abscisas hace referencia a un desplazamiento en metros en la dirección del eje transversal de la luminaria partiendo desde el centro de ésta.

Para no resultar exhaustivo en el análisis de los resultados, en el siguiente apartado se procederá a realizar un análisis en conjunto de todos ellos.

6.1.1 Balastro electrónico de doble nivel a diferentes potencias y luminaria tipo globo

Tabla 6-1 Nivel de luxes en el espacio del sistema Doble Nivel para los dos niveles de potencia

Balastro electrónico de doble nivel						
100%						
	0	1	2	3	4	5
1	610	455	239	132,9	99	66,2
2	217	198	144,8	99,7	75,1	50,6
3	102,7	97,5	87	79,1	52,6	43,5
4	65	62	60,4	56,5	47,6	41,2
5	38	37,5	40,6	38,9	31,5	29,8
6	33	32,2	31	29,5	25,5	23,3
7	28,2	26,7	25,3	23,5	21,8	20,9

60%						
	0	1	2	3	4	5
1	305	227,5	119,5	66,4	49,5	33,1
2	108,5	99	72,4	49,8	37,55	25,3
3	51,35	48,75	43,5	39,5	26,3	21,7
4	32,5	31	30,2	28,2	23,8	20,6
5	19	18,75	20,3	19,4	15,75	14,9
6	16,5	16,1	15,5	14,7	12,75	11,6
7	14,1	13,35	12,65	11,7	10,9	10,4

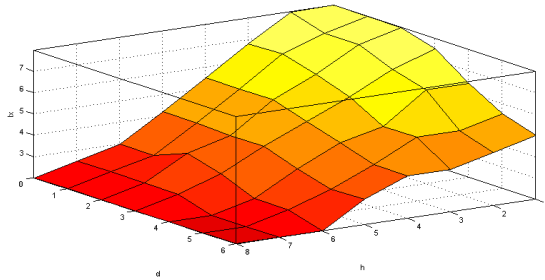


Figura 6.2: Representación 3D de luxes DN máximo nivel

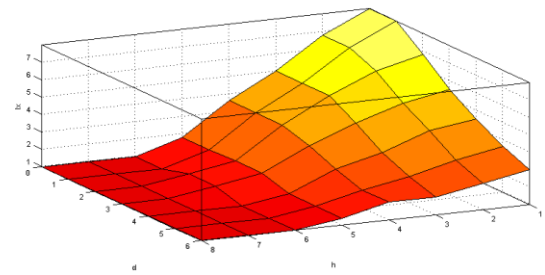


Figura 6.3: Representación 3D de luxes DN nivel de ahorro

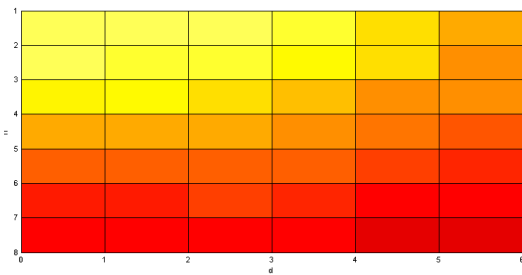


Figura 6.4 Representación 2D de luxes DN máximo nivel

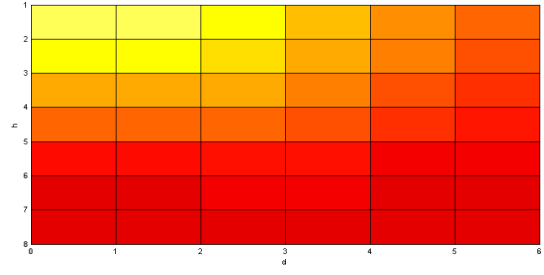


Figura 6.5 Representación 2D de luxes DN nivel de ahorro



La tabla de nivel luxes en los distintos puntos para el caso del doble nivel al 60% de potencia ha sido calculada teóricamente debido a que falló el equipo.

6.1.2 Balastro electrónico programable DALI a diferentes potencias

Tabla 6-2: Nivel de luxes en el espacio del sistema DALI al 100% y 75% de salida de luz

100%							75%						
	0	1	2	3	4	5		0	1	2	3	4	5
1	1647	621	180,7	60,2	16,3	11,4	1	1215	461	132,9	45,3	11,9	8,3
2	543	290	198,5	95,3	54,1	27,5	2	401,6	217,1	146,2	71,4	39,8	21,3
3	230	160,4	127,8	96,9	63,3	35,4	3	169,1	119,3	94,5	72,3	47,4	25,9
4	153,2	127,2	93,3	76,7	54,2	40,7	4	111,3	94,2	68,3	54,9	39,5	29,9
5	93,6	74,9	70,5	54,1	44,4	35,2	5	72,7	59,1	51,6	41,2	33,9	27,2
6	72,7	61,9	49,6	45,3	38,4	28,8	6	56,2	45,4	37,4	34,1	28,3	21,9
7	53,6	48,8	40,3	36,1	30,2	27	7	39,7	35,9	31,3	27,9	22,8	19,7

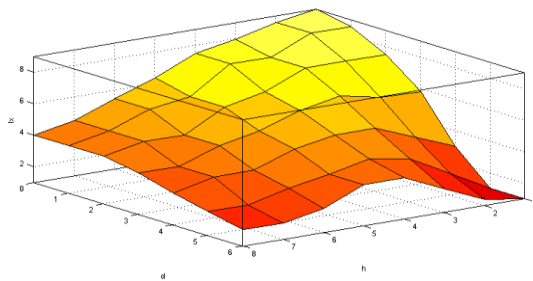


Figura 6.6: Representación 3D del nivel de luxes al 100% DALI

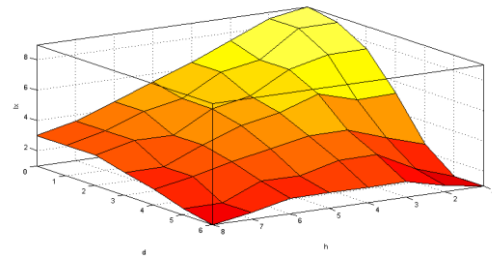


Figura 6.7: Representación 3D del nivel de luxes al 70% DALI

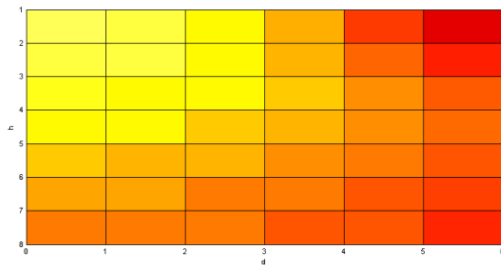


Figura 6.8: Representación 2D del nivel de luxes al 100% DALI

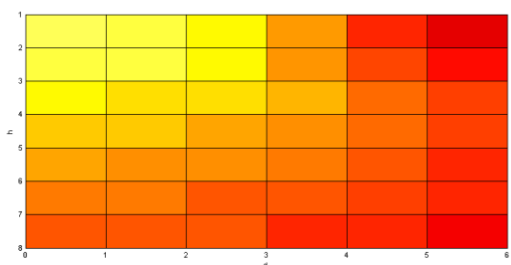


Figura 6.9: Representación 2D del nivel de luxes al 70% DALI

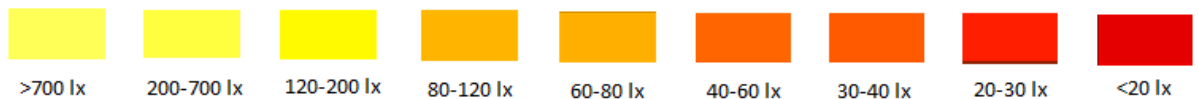


Tabla 6-3: Nivel de luxes en el espacio del sistema DALI al 50% y 30% de salida de luz

50%							30%						
	0	1	2	3	4	5		0	1	2	3	4	5
1	813,9	304,9	89,7	30,5	7,8	5,8	1	489,9	181,6	52,2	17,8	4,6	3,7
2	268,7	141,7	93,5	46,5	25,7	13,2	2	158,3	85,9	57,8	27,8	15,9	7,9
3	117,2	77,9	59,4	50,6	30,1	16,8	3	66,5	47,3	37,6	27,6	17,8	9,9
4	72	62	42,4	36,4	25,8	19,9	4	43,1	36,7	26,9	21,9	16,1	11,4
5	44,1	35,4	33,5	25,9	20,9	15,8	5	26,8	20,5	19,7	16,8	12,8	9,8
6	33,7	29,7	23,6	21,8	18,2	13,9	6	20,7	16,8	12,9	12,8	10,9	8,5
7	27,4	23,8	18,8	17,3	14,5	12,7	7	15,7	13,8	11,3	10,1	9,3	7,7

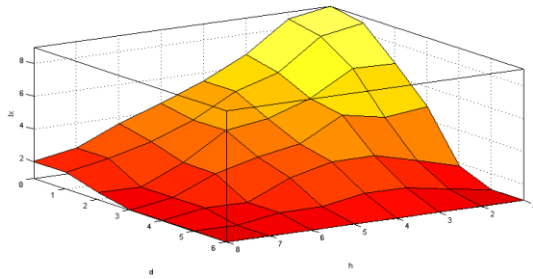


Figura 6.10: Representación en 3D del nivel de luxes al 50%

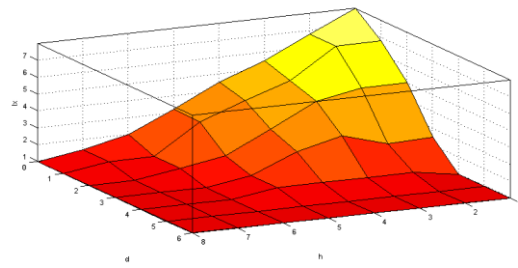


Figura 6.11: Representación en 3D del nivel de luxes al 30%

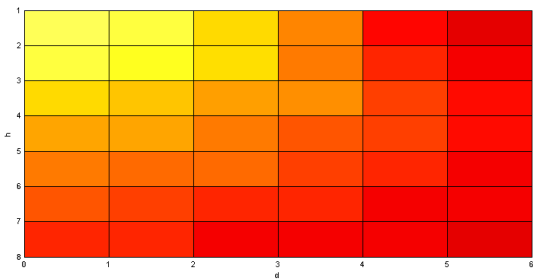


Figura 6.12: Representación 2D del nivel de luxes al 50% DALI

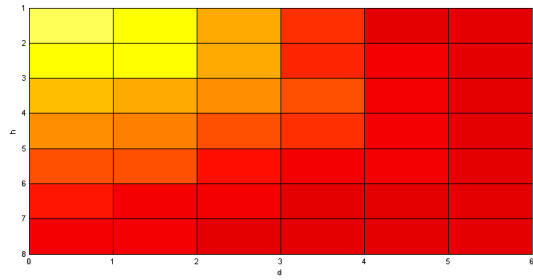


Figura 6.13: Representación. 2D del nivel de luxes al 30%



De forma general se ve cómo la distribución de la intensidad lumínica es mucho más tendida en el caso de la carcasa tipo globo que en la Vital.

En las tablas anteriores se han señalado los puntos más significativos del análisis del rendimiento lumínico. Se puede observar, como en el caso del balastro electrónico de doble nivel, el cual ha sido ensayado con luminaria tipo globo, se pierde una importante cantidad de flujo luminoso. Por perder se entiende, toda esa cantidad de flujo que se proyecta por encima de un ángulo de 70° como se ha explicado en el capítulo 2. Al mismo tiempo, se puede ver, como el uso de la luminaria Vital, que cuenta con un reflector en su parte superior, emite una mayor intensidad lumínica en las zonas más próximas a ellas. Esto manifiesta, el efecto del reflectar la luz hacia la superficie que se desea.

En el anexo 4 pueden verse los porcentajes de nivel de luxes del caso de la luminaria tipo globo respecto a la Vital.

En las figuras anteriores podemos ver los siguientes aspectos:

6.3 Determinación de las la inter-distancias admisibles de la luminaria Vital en función de la altura

Debido a la forma del reflector, a continuación se representan las iluminancias para distintas distancias al punto de iluminación tomando como referencia la base del mismo. Con esto se pretende, mediante la medición empírica, determinar la superficie que puede ser adjudicada a cada luminaria y poder determinar la inter-distancia de las farolas. Las mediciones para tal objeto se han tomado simulando 3 y 4 metros de altura para del punto de luz. Si bien como se demuestra la altura de 4 metros presenta un mejor rendimiento para minimizar los puntos de luz necesarios, debido a la distribución y altura de los árboles en muchos puntos del campus, obliga a que la altura de las luminarias sea de 3 metros en muchas ocasiones. De este modo, se conseguirán mejores resultados en estos puntos al evitar obstáculos. Bien es cierto que un factor importante a la hora de diseñar una instalación de alumbrado público es determinar la altura de poda de los árboles. El problema en la situación que se está analizando es que la distancia entre estos es muy reducida, por lo que la poda necesaria, si se colocaran a 4 metros las luminarias, dotaría de un aspecto poco agradable a los mismos.

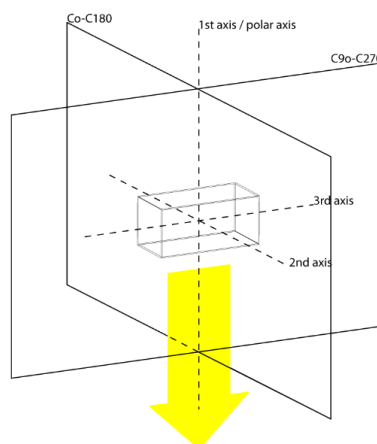


Figura 6.14: Representación de los planos C0-C180 y C90-C270.

En las siguientes tablas se recogen las iluminancias medidas en los distintos casos:

Tabla 6-4: Iluminancias en los planos C0-C180 y C90-C270 del equipo DALI y luminaria Vital para diferentes distancias y alturas.

Distancia [m]	Altura 3m		Altura 4m	
	Plano C90°-C270° [luxes]	Plano C0°-C180° [luxes]	Plano C90°-C270° [luxes]	Plano C0°-C180° [luxes]
0	211,2	210,3	138,2	137,3
1	183,8	185,8	94,1	98,1
2	195,2	154,2	99,2	86,3
3	163,6	111,4	79,8	75,2
4	74,4	82,3	72,1	65,4
5	32,9	73,8	49,6	54,1
6	19,9	61,3	21,6	44,2
7	14,3	44	15,5	32,6
8	9,5	27,4	12,1	24,7
9	6,6	14,3	9,2	17,3
10	5,4	6,1	7,1	12,1
11	4,3	4,3	5,5	9,9

En los datos anteriores podemos comprobar cómo, si se comparan con las tablas mostradas al inicio del capítulo, los valores de las iluminancias son menores. Esto es debido al cambio en las condiciones de medición. Al no estar apoyado en el suelo, no se produce ese reflejo que hacía que las medidas fueran superiores a lo que son en realidad. Además al no estar tan cerca de la pared y ser una pared de un material menos refractario, los rayos de luz que en las mediciones iniciales eran rebotados y recogidos por el luxómetro, en esta ocasión no ha sido así. Por tanto, debemos tomar como valores óptimos estos últimos resultados. No obstante, como las mediciones del inicio anterior han sido para comparar los dispositivos entre sí, al estar éstos bajos las mismas condiciones de entorno, se pueden tomar las conclusiones anteriores como válidas.

6.4 Determinación de la inter-distancia de las luminarias a partir de los datos empíricos

En función de los datos anteriores, se pueden determinar los siguientes aspectos:

Si el punto de luz se sitúa a 3 metros de distancia, el plano que estaría suficientemente iluminado y cumpliría la normativa es la siguiente:

Puede iluminar hasta 10 metros hacia delante, 10 metros lateralmente y 5 metros hacia detrás. Con estos se asegura que una luminaria por sí sola logra mantener una iluminancia mínima de servicio de 5 luxes siempre que se trabaje al 100%.

Si la altura del punto de luz es de 4 metros, disposición elegida siempre que el entorno y los obstáculos nos lo permitan, la superficie iluminada sería de 11 metros lateralmente, 11 metros hacia delante y 6 metros hacia detrás. Con esto se asegura que la luminaria mantiene los requisitos mínimos de iluminación según la normativa siempre que se trabaje al 100%.

Si bien es cierto que una de las ventajas más notorias del balastro electrónico programable DALI es su gran flexibilidad y el poder regular el nivel de salida de luz, podría entenderse como paradójico el que se diseñara la instalación para un nivel de salida de luz del 100%. Pues bien, es claro entender que, en los puntos de mínima iluminación que se encuentran en las zonas más alejadas de las luminarias, es aplicable en ellos el principio de superposición, por lo que habrá que sumar en ellos el nivel de iluminación que les llega de cada uno de los puntos de luz.

Así pues, al tomar una anchura de vía de 11 metros, donde llegan 9,9 luxes, cuando el nivel de iluminación es del 30%, en el punto en cuestión al estar a la misma distancia de dos luminarias le llegarán $2 \times 0.3 \times 9,9 = 5,94$ luxes, es decir, se superarían los 5 luxes mínimos de iluminancia según la normativa para vías peatonales.

Hay que señalar que estas conclusiones son respecto a los planos fotométricos principales de la figura anterior. Para poder conocer cómo es la distribución de la luz en el resto del área iluminada, es donde entra en juego la simulación con los softwares especializados DIALux evo y DIALux 4.12.

A continuación se comparan los datos obtenidos en el laboratorio para la carcasa Vital y el balastro programable con los niveles lumínicos tomados directamente en la instalación del campus en función de la altura del primero.

7. APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE ALUMBRADO EXTERIOR ANALIZADOS AL CAMPUS DE LA UPNA

Como se ha ido mencionando a lo largo del proyecto, se ha tomado como caso práctico para la aplicación de los sistemas de regulación de flujo luminoso el alumbrado exterior del campus de Arrosadía de la UPNA. Con ello, además de mostrar las ventajas y desventajas que tiene cada uno sobre el otro con un ejemplo real, se pretende hacer una propuesta para la mejora de la instalación de alumbrado exterior actual.

7.1 Evaluación de la instalación actual

7.1.1 Adaptación de las luminarias en el entorno

Observando los distintos lugares del campus de la UPNA, se ha visto que son muchas las luminarias que, por su disposición urbanística, se topan con importantes obstáculos (árboles) en su zona de proyección, llegando a producirse algunas situaciones notoriamente ineficientes.

Los distintos puntos de luz del campus, han sido clasificados en tres grandes grupos en función los obstáculos que impiden su óptima iluminación.

- libres de obstáculos
- los obstáculos impiden su óptimo alumbrado o están demasiado próximos a otros.
- los obstáculos minimizan su nivel de iluminación

A continuación se presentan unas cuantas imágenes donde se muestran las ineficiencias de las que se está hablando y sirven de ejemplos para denotar los criterios que se han tomado para la clasificación anterior de las luminarias.

▪ Luminarias libres de obstáculos



Ilustración 7-1: Imágenes tomadas en la UPNA de luminarias libres de obstáculos

- **Los obstáculos limitan su nivel de iluminación**



Ilustración 7-2: Imágenes tomadas en la UPNA de luminarias con obstáculos que limitan su eficiencia

- **Los obstáculos minimizan su nivel de iluminación**

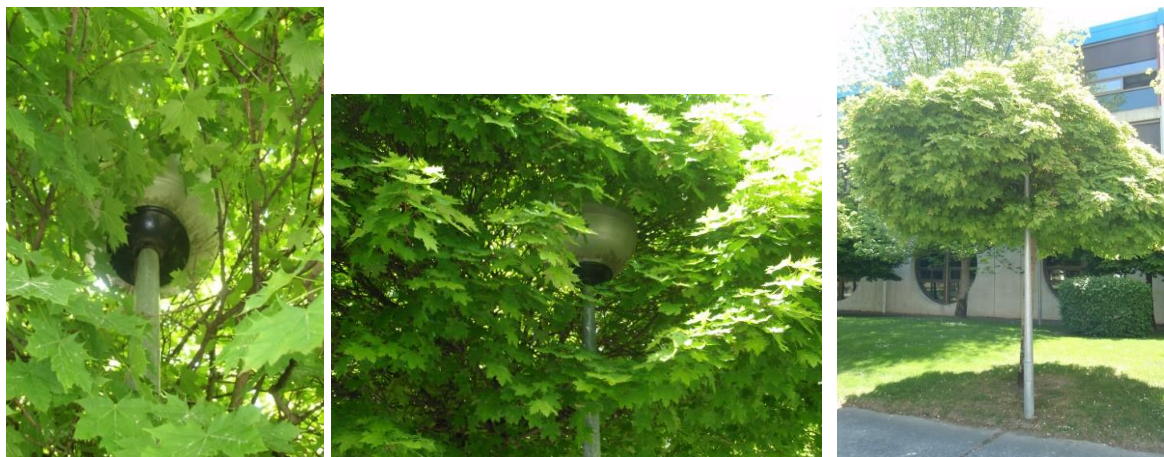


Ilustración 7-3: Imágenes tomadas en la UPNA de luminarias a las que los obstáculos minimizan su eficiencia

Quedan evidenciadas en las imágenes anteriores las ineficiencias e incoherencias que se encuentran en la instalación del alumbrado exterior del campus actual.

Estas situaciones demuestran la importancia de realizar un trabajo de campo y un análisis in situ de las distintas áreas de una zona cuando se quiere diseñar una instalación de alumbrado exterior y es la mayor eficiencia posible lo que se tiene como objetivo.

Es cierto que la distribución de los árboles en todo el campus representa un gran obstáculo a la hora de lograr una iluminación eficiente debido a su proximidad a los edificios y espesa frondosidad. No obstante, con un análisis exhaustivo de la distribución de los mismos e instalación de luminarias adecuadas para cada punto de luz, se pueden subsanar estas dificultades.

En función de la zona, la altura de los puntos de luz se verá condicionada, por tanto, por la proximidad de los árboles a éstas, así, como por el tipo de árbol (debido a su copa) del que se trate en cada situación a la hora de diseñar la nueva alternativa.

7.1.2 Evaluación de la Distribución de los puntos de luz en la instalación de Alumbrado Exterior de La UPNA

La instalación del alumbrado actual del campus universitario viene determinada en el siguiente plano. El plano fue facilitado por el personal de mantenimiento de la UPNA. En él podemos observar las distintas distribuciones de las luminarias. Es importante recordar que en el presente proyecto lo que se ha analizado es referente a las luminarias de tipo globo con lámparas de vapor de sodio de alta presión (como los analizadas en el capítulos anteriores).

Una vez obtenidos los planos se procedió a la comprobación de la concordancia entre la realidad y los mismos. Si bien es cierto que la aproximación era importante, hubo que realizar una serie de cambios en el plano a la hora de hacer el análisis de la forma más fiel posible a la realidad. A continuación se incluye el plano con las modificaciones realizadas. Del mismo modo se especifican en tablas todos los puntos de luz instalados en el campus.

En el plano se especifican las óptimas o inadecuadas colocaciones de las luminarias según el criterio mostrado anteriormente. Se han dividido los puntos de luz en los tres grupos explicados. La división por zonas ha sido respetada y seguida de la misma forma en todos los planos y propuestas siguientes. Obedece a la clasificación mantenida por el personal de mantenimiento en la universidad.

Tabla 7-1: Recuento y valoración del posicionamiento de las luminarias de la UPNA

Zona	LUMINARIAS		LIMITACIÓN POR OBSTACULOS		
	Totales	TIPO GLOBO	BAJA	MEDIA	ALTA
Aulario 1	5	0	5/0	0/0	0/0
Aulario 2	25	0	15/0	6/0	4/0
Aulario 3	6	0	6/0	0/0	0/0
Aulario 5,6	6	0	6/0	0/0	0/0
Biblioteca Este	55	55	0/34	0/11	0/10
Biblioteca Oeste	55	55	0/25	0/16	0/14
‘Los Olivos’ Ingeniería Agrónoma	31	31	0/16	0/13	0/2
ADI Tech	11	11	0/11	0/0	0/0
‘Los Pinos’ Ingeniería Industrial	18	18	0/14	0/3	0/1
‘Los Tejos’ Telecomunicaciones	32	32	0/17	0/9	0/6
‘Los Madroños’ CC.EE. 3A-1	44	44	0/34	0/10	0/0
‘Los Madroños’ CC.EE. 3A-2	41	30	9/26	2/2	0/2
‘Los Madroños’ CC.EE. 3A-3	21	12	9/3	0/5	0/4
Rectorado 1	59	59	0/37	0/16	0/6
Rectorado 2	37	37	0/26	0/10	0/1
Rectorado 3	28	26	2/26	0/0	0/0
Rectorado 4	2	0	2/0	0/0	0/0
Administración 1-2	23	23	0/16	0/7	0/0
Taller de Escuelas Técnicas	29	0	26/0	0/0	3/0



▪ Valoración de la distribución de los puntos de luz en la UPNA

A partir de esta tabla podemos hacer la siguiente clasificación del correcto o no posicionamiento de las luminarias totales de la instalación:

Tabla 7-2 Clasificación de las luminarias del campus de la UPNA

TOTALES	528
Posicionamiento Eficiente	365
Posicionamiento Intermedio	110
Posicionamiento Ineficiente	53
TIPO GLOBO	432
Posicionamiento Eficiente	285
Posicionamiento Intermedio	102
Posicionamiento Ineficiente	46

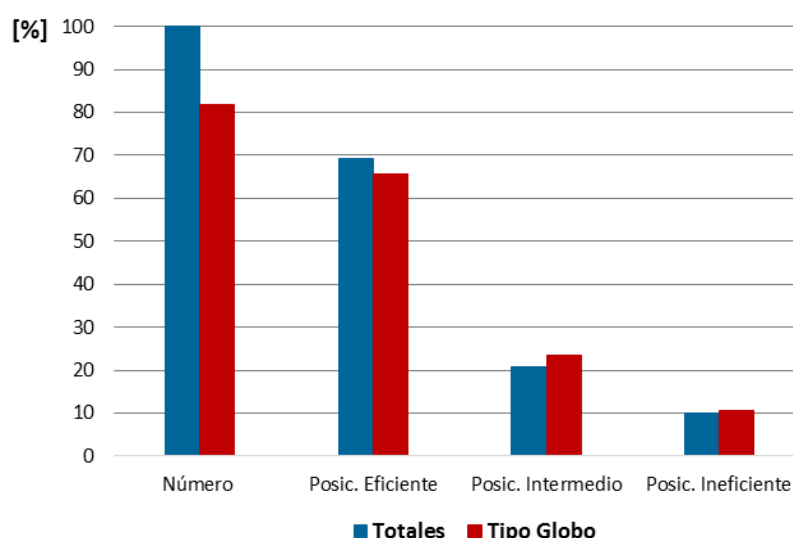


Gráfico 7.1 Muestra los porcentajes de la clasificación de las luminarias de la UPNA.

En términos **totales** considerando en un mismo grupo todos los tipos de luminarias distribuidas por el campo se obtienen los siguientes resultados.

El **69,13%** están colocadas en puntos **libres de obstáculos**.

El **20,83%** se ven **afectadas parcialmente** por elementos del medio o, por su elevada proximidad de unas con otras del mismo tipo o junto a luminarias de mayor iluminancia de servicio (claros ejemplos en la zona Madroños 3A-3), no tienen una óptima incidencia a niveles lumínicos sobre la superficie correspondiente.

El **10,04%** tienen un **posicionamiento erróneo** para alumbrar de forma eficiente.

El **82%** de las luminarias son lámparas de vapor de sodio de alta presión con carcasa esférica de **tipo globo** susceptibles de ser sustituidas en el presente proyecto.

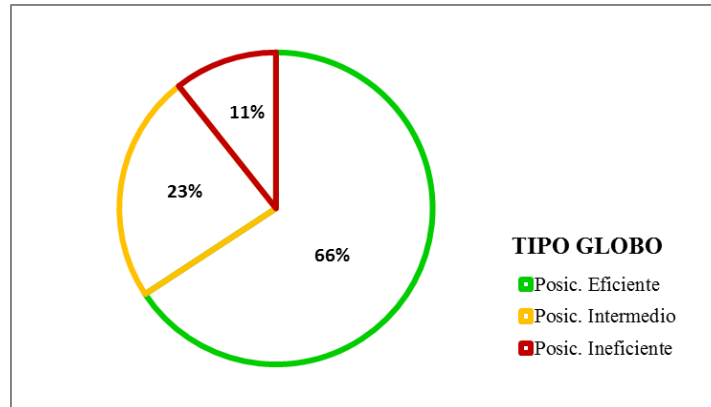


Gráfico 7.2 Resume el posicionamiento de las luminarias tipo globo.

El **65,82%** de las estas luminarias tienen un posicionamiento **correcto**. La luz emitida no se ve obstaculizada por elementos del entorno.

El **23,56%** tienen un posicionamiento que **no** permite el **óptimo** alumbrado por parte de las luminarias. Se ven afectadas parcialmente por elementos del medio.

El **10,62%** de las luminarias tipo globo están colocadas en puntos donde elementos del entorno **minimizan su nivel de iluminación** en la superficie deseada.

7.1.3 Medición Experimental de Luxometrías en la Instalación de Alumbrado Exterior de la UPNA

Para poder llegar a unas conclusiones más claras y realizar un análisis más enfocado al caso práctico que al teórico, en lugar de únicamente medir los dispositivos que están instalados en la UPNA en el laboratorio, se procedió a la toma de medidas en la propia instalación del campus. De este modo se pueden constatar distintos aspectos como, cuál es el efecto de los obstáculos en el alumbrado, cómo se hace notar el coeficiente de depreciación de la lámpara o cómo afectan los distintos estados de las carcassas (suciedad, opacidad, etc.) entre otros aspectos.

Para ello se procedió a la medición de uno de los mejores y más óptimos casos para hacer la comparación desde el punto de vista más pesimista.

La altura de la luminaria es de 3 metros, y, los resultados fueron:

Tabla 7-3: niveles de iluminación tomados en una zona despejada del campus de la UPNA

Distancia	[m]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Iluminancia	[lx]	28,6	25,4	23,8	20,1	18,3	16,5	14,5	8	7	6,5	6,3	5,1

Se observa, cómo a más metros la iluminancia toma una forma muy tendida, esto denota el intrusismo que presentan estos tipos de alumbrados. Hay que mencionar que estos datos han sido recogidos en uno de los mejores casos, como ya se ha dicho, pero también para uno de los casos donde se sustituyeron las carcassas de tipo globo por otras donde el casquete semiesférico superior de la carcassa de la luminaria es opaco. Esto significa que los datos obtenidos han sido medidos sobre un punto de luz con mejores condiciones a las evaluadas inicialmente en el laboratorio. Aun así, en otros muchos puntos de la zona del rectorado, el nivel de iluminancia mínima no se cumple, tomando medidas de 0,4 luxes en diversos puntos de la vía peatonal a iluminar e incluso valores de 0,1 luxes.



Ilustración 7-4 Imagen de una de las zonas a iluminar.

La relevancia de estos datos tan bajos de iluminación radica en que han sido tomados en puntos de tránsito (durante las horas de medición). La importante anchura que tiene esta zona puede provocar que en los extremos del camino se puedan llegar a iluminancias muy bajas ya, que si se pretende llegar a una óptima iluminación de absolutamente todos los puntos del mismo, suponga caer en un exceso de iluminación en muchas otras zonas. Esto, además de evidente exceso de consumo eléctrico, desde el punto de vista luminotécnico puede suponer una incomodidad para la sensibilidad del ojo.

7.1.4 Análisis de las luminarias actuales

El empleo de luminarias con reflectores adecuados, de tal forma que se dirija la luz hacia los puntos deseados, se convierte en un factor clave dadas las condiciones del entorno. Esto deja de manifiesto que, las luminarias de tipo globo que se encuentran actualmente instaladas en la universidad, no son la mejor opción por varios motivos:

No se dirige la luz hacia los puntos que se desean iluminar. Se ilumina de la misma forma los caminos de tránsito del campus como las zonas ajardinadas cuyo tránsito en horario nocturno es ínfimo. La forma de la carcassa, de tipo globo no es la mejor opción de dirigir la luz hacia el terreno y minimizar la contaminación luminosa.

7.2 Diseño de nuevas Instalaciones de alumbrado exterior en la UPNA según el sistema de regulación de flujo implantado

En este punto es donde se desarrollan las propuestas para implantar los sistemas de regulación de alumbrado exterior analizados a lo largo del proyecto.

Dichas propuesta se dividen en tres grupos y consisten en lo siguiente:

PROPUESTA 1: Prescindir de los puntos de luz cuyo aporte al rendimiento lumínico de la instalación es despreciable.

PROPUESTA 2: Implantación del sistema de regulación de **doble nivel**.

2.1: Sustitución de los balastos electromagnéticos actuales por balastos electrónicos de doble nivel para todas las luminarias.

2.2: Sustitución de los balastos electromagnéticos por balastos electrónicos de doble nivel suprimiendo luminarias prescindibles.

PROPUESTA 3: Implantación del sistema de regulación **DALI**

3.1: Sustitución de los balastos electromagnéticos actuales por balastos electrónicos programables con regulación DALI aprovechando el posicionamiento de las luminarias actuales.

3.2: Sustitución de los balastos electromagnéticos actuales por balastos electrónicos programables con regulación DALI redistribuyendo el posicionamiento de las luminarias para la mayor eficiencia.

Tabla 7-4: Balance económico actual

Energía Activa	145152	KWh/año
Energía Reactiva	61834	KVArh/año
Económico Energía Activa	15966,72	€/año
Económico Energía Reactiva	2569,48	€/año
Reducción del impuesto eléctrico	947,70	€/año
TOTAL	19.483,90	€/año

PROPUESTA 1: Prescindir de los puntos de luz cuyo aporte al rendimiento lumínico de la instalación es mínimo

El número de farolas con luminaria tipo globo de las que se puede prescindir, como se puede ver en la siguiente imagen, es de 46.

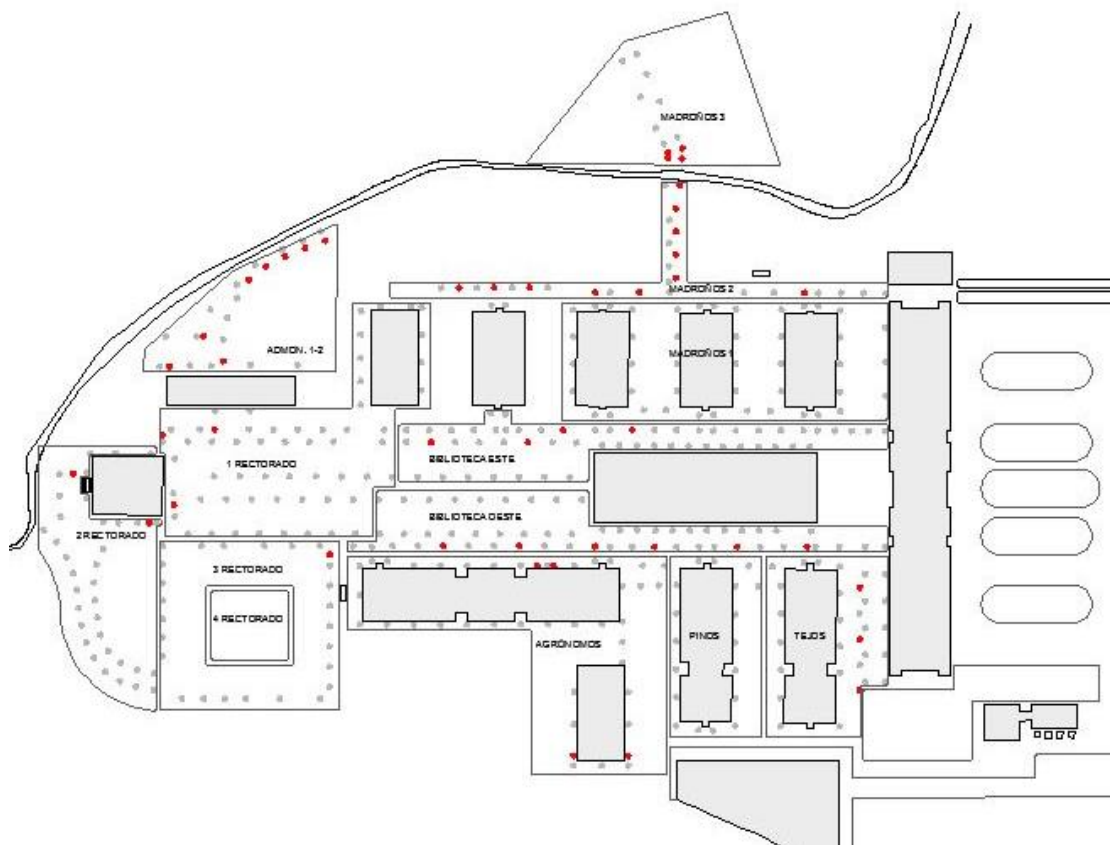


Figura 7.1 Se muestran las luminarias prescindibles para la Propuesta 1.

Éste ahorro hace referencia al hecho de prescindir de las luminarias cuya aportación lumínica es mínima (el 11% de las luminarias tipo globo). También podrían suprimirse otras luminarias cuyo aporte no es muy relevante.

Tabla 7-5 Resumen del ahorro con la PROPUESTA 1

Energía Activa	KWh/año	15456
Energía Reactiva	KVArh/año	6584,256
Económico Energía Activa	€/año	1700,16
Económico Energía Reactiva	€/año	273,51
Reducción del impuesto eléctrico	€/año	100,91
TOTAL	€/año	2.074,58
Inversión Inicial	€	0,00

PAYBACK	años	0,0
----------------	-------------	------------

PROPUESTA 2: Implantación de la regulación doble nivel

En el siguiente apartado se opta por sustituir las luminarias existentes por balastos electromagnéticos de doble nivel. Sin embargo, tras haber analizado por un lado la situación de cada luminaria actual y por otro la óptima distribución de los nuevos balastos a colocar, se plantean dos propuestas.

La primera de ellas sustituyendo las luminarias existentes por los balastos de doble nivel en su situación actual. En la segunda propuesta, se sustituyen las luminarias pero se prescinden varias de ellas dada su inutilidad con el nuevo sistema.

El posicionamiento de los puntos de luz seguiría manteniéndose debido a las características lumínicas que presentan este tipo de luminarias. La opción de una nueva redistribución se ha desechado debido a que la inversión inicial sería demasiado elevada teniendo en cuenta el número de puntos de luz que se requieren para poder cumplir los requerimientos mínimos de iluminación.

Hay que tener en cuenta que los valores lumínicos se mantendrán a lo largo del campus ya que, ni el posicionamiento ni las alturas de las luminarias actuales serán alterados.

- **Propuesta 2.1: Sustitución de los balastos electromagnéticos actuales por balastos electrónicos de doble nivel para todas las luminarias.**

Tabla 7-6 Resumen del ahorro con la PROPUESTA 2.1

Energía Activa	34473,60	KWh/año
Energía Reactiva	39376,51	KVArh/año
Económico Energía Activa	3792,10	€/año
Económico Energía Reactiva	1577,64	€/año
Reducción del impuesto eléctrico	274,54	€/año
TOTAL	5.644,27	€/año
Inversión Inicial	29.937,60	€
PAYBACK	5,3	años

- **Propuesta 2.2: Sustitución de los balastos electromagnéticos por balastos electrónicos de doble nivel suprimiendo luminarias prescindibles.**

El número de luminarias prescindibles en este caso es de 46. En la siguiente imagen se observa el número de luminarias que se utilizarán en esta propuesta.

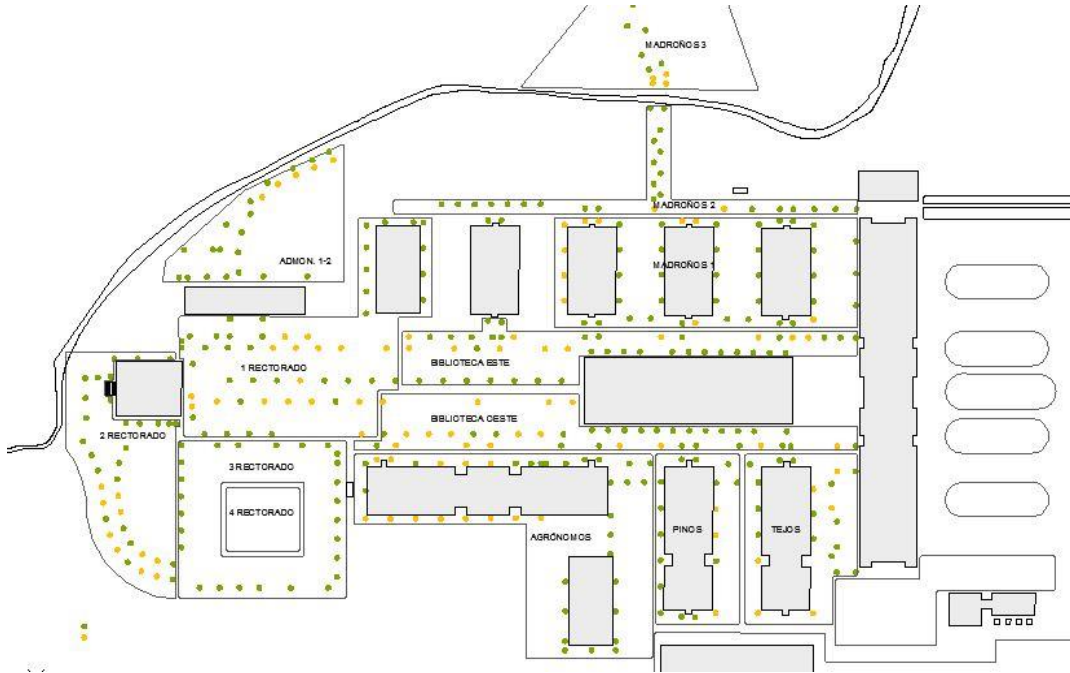


Tabla 7-7 Resumen del ahorro con la PROPUESTA 2.2

Energía Activa	46258,80	KWh/año
Energía Reactiva	41767,90	KVArh/año
Económico Energía Activa	5088,47	€/año
Económico Energía Reactiva	1683,25	€/año
Reducción del impuesto eléctrico	346,22	€/año
TOTAL	7117,94	€/año
Inversión Inicial	26.749,80	€
PAYBACK	3,76	años

PROPUESTA 3: Implantación del sistema de regulación DALI

Se propone la sustitución de toda la instalación de alumbrado exterior de la UPNA por luminarias nuevas sobre las que se puede emplear el sistema de regulación DALI. El cambio de las luminarias permite colocarlas a las alturas óptimas en función de la geometría del área a iluminar.

Para la implantación de este sistema se ha analizado dos posibilidades:

Sustituir las luminarias por otras nuevas respetando el posicionamiento de las actuales. Esta opción no es la tiene un mayor aprovechamiento de la potencia lumínica de los puntos de luz, pero sí representa una opción en la que la obra inicial necesaria no es tan agresiva.

Sustitución y redistribución de algunas luminarias encontrando el equilibrio entre la menor obra necesaria por reemplazamiento de éstas y el rendimiento lumínico consiguiendo una correcta uniformidad de la luz.

Para el análisis económico de estas luminarias, se ha supuesto la siguiente estrategia de control:

Con la opción DynaDimmer explicada en el punto 4.3.3 introduciendo el posicionamiento geográfico de la UPNA;

Pamplona/Iruña: latitud,- longitud: 42° 48' 55'', -1° 38' 38''.

Se programa el balastro electrónico de forma que los puntos de luz trabajen del siguiente modo:

- El 25% del tiempo de conexión emiten el 90% de luz
- El 25% del tiempo de conexión emiten el 750% de luz
- El 50% del tiempo de conexión emiten el 30% de luz

▪ Propuesta 3.1: Sustitución de luminarias sin redistribución

Se han colocado las nuevas luminarias en los puntos donde se obtiene una mayor calidad en la iluminación. Se han suprimido puntos en los que las características de las luminarias permiten prescindir de dichos puntos.

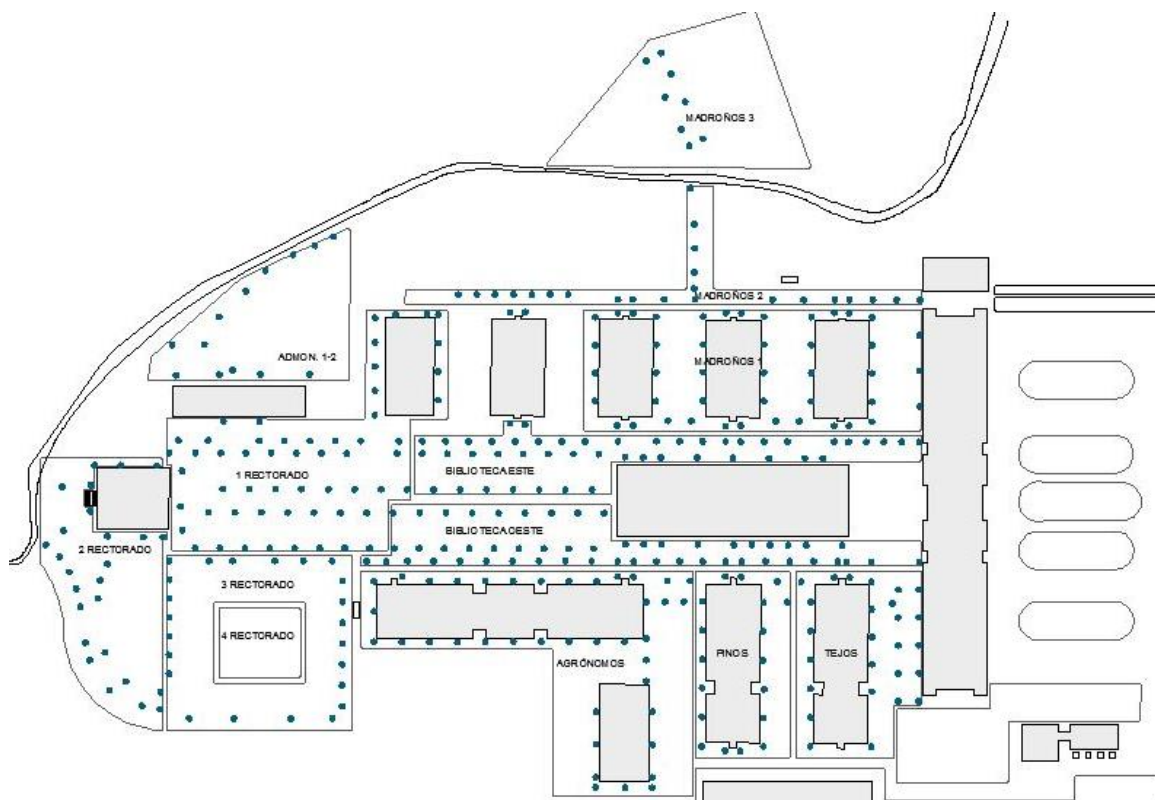


Figura 7.2 Se muestran las luminarias utilizadas en esta propuesta. El plano de planta de esta propuesta se encuentra en el anexo 4, plano 02.

Tabla 7-8 Número de luminarias propuestas y disminución respecto al estado actual.

ZONA	Actuales	Propuesta	Disminución	
			número	[%]
Tejos	30	26	4	13
Pinos	18	18	0	0
Agrónomos	42	39	3	7
Biblioteca Este	55	47	8	15
Biblioteca Oeste	55	52	3	5
Madroños 1	44	44	0	0
Madroños 2	30	25	5	17
Madroños 3	12	8	4	33
Administración	24	14	10	42
Rectorado 1	59	56	3	5
Rectorado 2	37	26	11	30
Rectorado 3	26	23	3	12
TOTAL	432	378	54	13 %

El problema de esta alternativa es la uniformidad. Cómo puede observarse en los resultados de la simulación del apartado anterior, al mantener fielmente el posicionamiento de las luminarias actuales, hay zonas en las que la distribución del flujo luminoso no es óptima ya, que se obtienen valores muy altos en determinadas áreas mientras que en otras, el valor es mínimo. Siguiendo únicamente este criterio de instalación no puede obtenerse una uniformidad que ronde el 40% como dicta la normativa para zonas de paso. El no desechar del todo esta opción, es porque debido a la localización de la UPNA en Pamplona, no es considerada una zona de paso, por lo que no se le aplica de forma estricta esta normativa. Tampoco hay proyectos en los que se vayan a construir nuevas edificaciones en las zonas colindantes de la universidad. Además, la proximidad de la universidad a calles destinadas al tránsito urbano (como la calle Tajonar), hace que no se prevea un cambio en la forma de entender la universidad en el ámbito vial.

A pesar de que legalmente no se prohíban, estas situaciones de no uniformidad en el alumbrado exterior de la UPNA, (actualmente se están dando estos casos como se explica en el punto.....), sí supone una incomodidad para el viandante, provocando ese efecto túnel desagradable para la percepción del ocular.

Tabla 7-9 Resumen del ahorro con la PROPUESTA 3.1

Energía Activa	56405,16	KWh/año
Energía Reactiva	33400,84	KVArh/año
Económico Energía Activa	6204,57	€/año
Económico Energía Reactiva	1387,47	€/año
Reducción del impuesto eléctrico	388,16	€/año
TOTAL	7980,20	€/año
Inversión Inicial	193.612,23	€
PAYBACK	24,2	años

▪ Propuesta 3.2: Sustitución redistribuyendo parte de las luminarias

En esta propuesta se realizan algunas redistribuciones de los puntos de luz. Esto conlleva un incremento de la inversión inicial debido a la obra civil necesaria para ello. La razón por la que se hace esta propuesta, es para conseguir una mayor uniformidad lumínica con el menor número de luminarias posibles.

Se han mantenido el máximo número de posicionamientos actuales para que la inversión inicial sea lo más económica posible. La siguiente tabla reúne el cambio de luminarias en cada zona y la figura muestra cómo queda la disposición final de las farolas.

Tabla 7-10 Número de farolas propuestas y de las cuales cuantas están redistribuidas. Finalmente en esta propuesta el número de farolas disminuye el 19%.

ZONA	Actuales	Propuesta	Redistribuidas	Disminución	
				num.	[%]
Tejos	30	26	0	4	13
Pinos	18	18	0	0	0
Agrónomos	42	39	0	3	7
Biblioteca Este	55	42	4	13	24
Biblioteca Oeste	55	45	5	10	18
Madroños 1	44	44	0	0	0
Madroños 2	30	25	0	5	17
Madroños 3	12	8	0	4	33
Administración	24	14	0	10	42
Rectorado 1	59	51	2	8	14
Rectorado 2	37	19	4	18	49
Rectorado 3	26	18	5	8	31
TOTAL	432	349	20	83	19 %

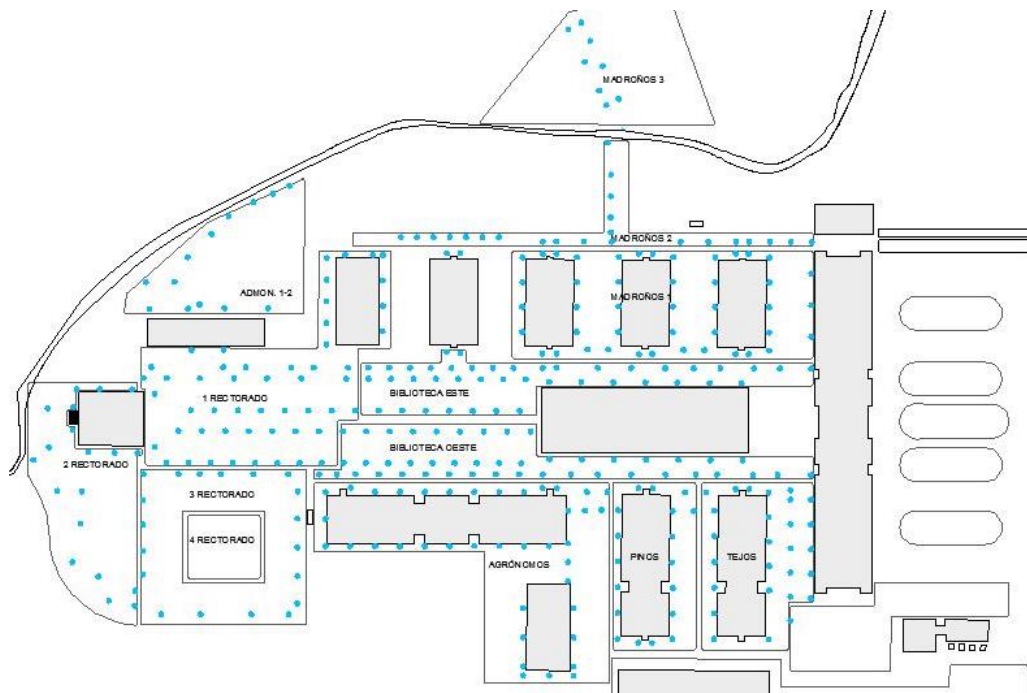


Figura 7.3 Luminarias de la propuesta 3.2. El plano de planta de esta propuesta se encuentra en el anexo 4, plano 03.

- *Posición, Estructura y Grupos de control*

Debido a las características del sistema de regulación DALI, se han dividido las luminarias en distintos grupos de control. Con esto se consigue tener una mayor precisión sobre las iluminancias de cada zona. Se ha buscado un equilibrio entre, el completo control de la regulación pero sin caer en excesivas acciones de control que dificulten la forma intuitiva de entender la inferencia de este sistema de control sobre la instalación. En el anexo 3 se determinan los grupos de control, el número de luminarias por grupo y el número de luminarias que se sitúan en un punto donde actualmente no hay ninguna.

- *Simulación con software*

A través del software DIALUX EVO, se han hecho estudios tanto para el campus universitario completo como para las distintas zonas de forma aislada debido al elevado coste computacional del anterior. El análisis mediante simulación del campus entero de forma conjunta, era esencial para ver los rendimientos lumínicos en las áreas intermedias y límites de las zonas en las que se ha clasificado éste, y poder reconocer las inferencias que tienen las luminarias de una zona en las áreas colindantes y poder hacer así, un análisis al completo estudiando el alumbrado exterior de la UPNA como sistema único.

Se han tomado medidas para distintos porcentajes de regulación de la salida de luz. Se han ido modificando las salidas de los distintos grupos de control y obtenido a partir de ellos las iluminancias medias, mínimas y coeficientes de uniformidad. Todos los resultados para hallados pueden verse en el anexo 3.

- *Estrategia de regulación propuesta*

Para determinar la estrategia de regulación, se ha partido de los datos obtenidos en el capítulo de análisis de rendimiento lumínico de los sistemas de regulación. Se ha procurado desarrollar una estrategia que compitiera con la regulación de doble nivel en términos eléctricos. Hay que recordar, como ya se ha demostrado en este proyecto, que la regulación DALI tiene un mayor rendimiento lumínico cuando el nivel de potencia en lámpara es el mismo que con el doble nivel. También es cierto que el consumo de energía reactiva es mayor para la regulación DALI. La estrategia de regulación

Los problemas en la uniformidad al alumbrar los alrededores de los departamentos radican en la aproximación de árboles a estos. Con un correcto mantenimiento de la flora del campus, podrían elevarse las luminarias de alrededor de estos departamentos y conseguir una mayor uniformidad del alumbrado. Sería necesario podar el árbol de forma que la parte que queda por encima de la acera que se pretende iluminar quedara libre de ramajes. Si por cuestiones estéticas se desechara esta opción, habría que valorar la opción de trasplantar el árbol alejándolo al menos 3 metros del edificio.

Tabla 7-11 Resumen del ahorro con la PROPUESTA 3.2

Energía Activa	68197,50	KWh/año
Energía Reactiva	36916,15	KVArh/año
Económico Energía Activa	7501,73	€/año
Económico Energía Reactiva	1534,01	€/año
Reducción del impuesto eléctrico	461,97	€/año
TOTAL	9497,71	€/año
Inversión Inicial	180.202,01	€
PAYBACK	18,97	años

7.2.1 Comparación de las propuestas

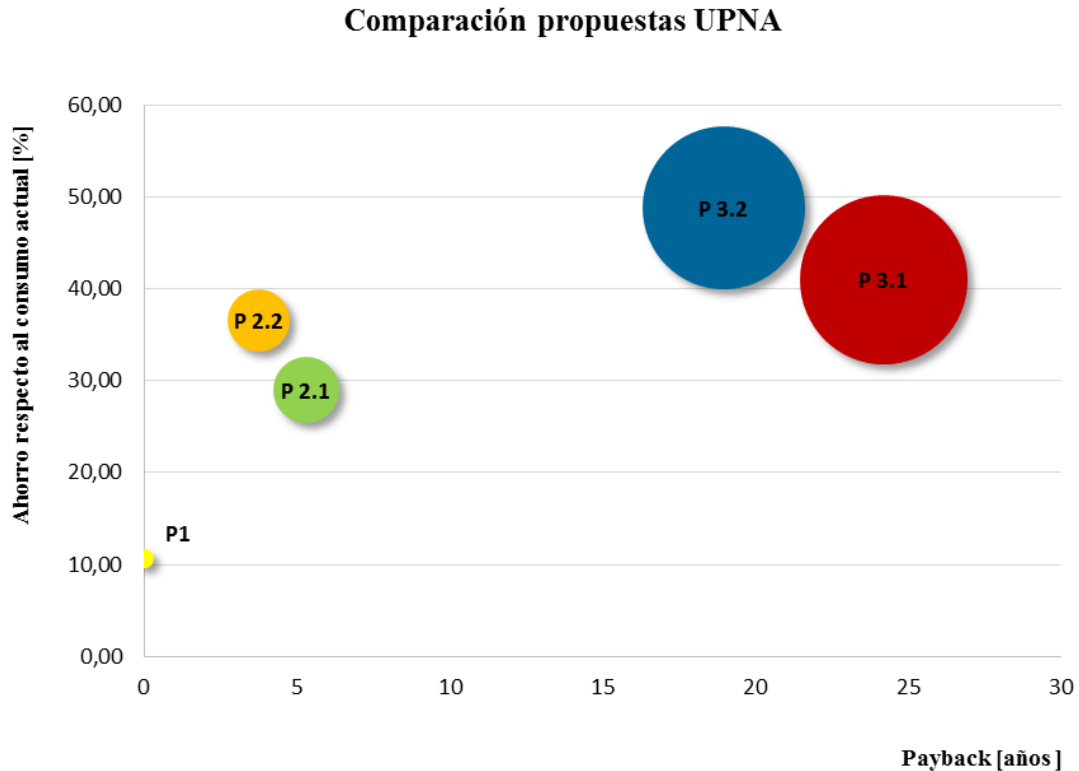


Gráfico 7.3 Gráfico resumen de las conclusiones de la comparación de las 5 propuestas presentadas.

En el gráfico anterior, el eje de ordenadas representa el % de ahorro de cada una de las propuestas respecto a la situación actual. El eje de abscisas el tiempo en años, que se tarda en recuperar la inversión inicial. El diámetro de los círculos representados, hace referencia a la cuantía de las inversiones.

Podemos ver, cómo la elevada inversión inicial necesaria para los dos casos en los que se propone la sustitución de las luminarias, es el gran lastre que sufren. Es cierto que la gran flexibilidad que tiene el sistema DALI, nos permite tener importantes ahorros, pero ese menor factor de potencia hace que la diferencia no sea tan notoria respecto al doble nivel, ya que entran en cotas de penalización diferentes como se ha explicado en el apartado de metodología.

Los paybacks de cada una de las propuestas lanzan claras sentencias sobre ellas. Dejan de manifiesto la importancia de realizar un correcto diseño inicial de una instalación de alumbrado. El coste que conlleva el renovar una instalación es muy elevado, o al menos con las opciones que se han manejado en este proyecto.

Para las características de la UPNA, considero que la mejor alternativa sería la 2.2. No obstante, sería conveniente realizar un análisis similar con la tecnología LED y poder llegar a conclusiones más rotundas.

8. CONCLUSIONES

Se ha podido comprobar que la implantación de sistemas de regulación en instalaciones de alumbrado exterior, puede suponer importantes ventajas.

El sistema de regulación de doble nivel tiene un elevado rendimiento eléctrico, sobre todo por su elevado factor de potencia, permitiendo un importante ahorro económico en la facturación de la energía eléctrica. El problema que puede tener este tipo de sistemas de regulación sin línea de mando, es que no se puede tener un control sobre el nivel de iluminación que se desee a una determinada hora y en un lugar concreto. La regulación automática que sigue este sistema puede hacer que la activación del nivel de ahorro ocupe una franja horaria muy cercana a los extremos de la noche y se considere que a estas horas sería más adecuado trabajar al máximo nivel de potencia por el posible tránsito de personas.

El sistema de regulación DALI es precisamente aquí donde adquiere una gran ventaja sobre el anterior. Tiene una gran flexibilidad, lo que permite tener un gran control sobre una instalación de alumbrado.

Se ha demostrado la relevancia de realizar un trabajo de campo a la hora de diseñar una instalación de alumbrado público, para evitar situaciones paradójicas como las que se pueden observar en la instalación de la UPNA. El modificar escasamente el emplazamiento y/o la altura de las farolas pueden suponer un importante cambio en la calidad del alumbrado así como un importante ahorro. Un minucioso estudio sobre la distribución de los puntos de luz, tiene una enorme inferencia sobre los dos aspectos anteriores.

Con las propuestas de mejora planteadas en este proyecto, se ve cómo es de vital importancia el implantar las mejores tecnologías disponibles en cada momento. Se ha visto renovar una instalación existente, supone una elevada inversión, retrasando la recuperación de la inversión en muchos años. A pesar de los lejanos horizontes temporales necesarios, a la hora de valorar la viabilidad de una posible renovación de una instalación de alumbrado exterior, existen ayudas públicas para mejoras energéticas que pueden hacer reducir enormemente el payback de las propuestas.

Desde un punto de vista más personal, debo señalar las partes positivas que me ha aportado la realización de este proyecto. Me ha permitido trabajar de primera mano con los sistemas de medida. El poder tocar, ver, cambiar... los equipos con los que he trabajado es sin duda lo que más me ha gustado. El poder realizar pruebas y no acotar mi trabajo a estar en frente del ordenador es lo que ha hecho que estuviera siempre con ganas y no me cansara.

Me llevo también, como factores muy positivos, todo lo que he aprendido a lo largo de la realización de éste. La luminotecnia es una rama que no se estudia en ninguno de los cursos de Ingeniería Industrial y la verdad es, que después de haberme adentrado en ella, he aprendido muchos conceptos de los que ignoraba su existencia..

Por último agradecer al lector la dedicación de su tiempo a la visualización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Departamento Técnico de Industrias Wamco S.A. (2009). *Balastros electrónicos. Mejora de energía. Mejor factor de potencia.*
- Farrás, J. G. (s.f.). *Iluminación. Riesgos generales.*
- González, J. I. (2010). *Generalidades de los sistema de regulación de flujo luinosos para el alumbrado público.* Veracruzada.
- Lizana, C. A. (2010). *Proyecto de mejora de la eficiencia energética en alumbrado público.* Arganda del Rey (Madrid).
- Mario Salvador Esparza González, H. M. (2003). *Pruebas experimentales a una lámpara de VSAP-150 W.* Mexico.
- metropolitana., U. A. (s.f.). *Lámparas de descarga. Confort lumínico.*
- Philips. (9 de enero de 2014). Obtenido de [www.philips.es: http://www.ecat.lighting.philips.es/1/equipos/hid/hid-electronic-outdoor/dynavision-programmable-xtreme-for-son/64784/cat/](http://www.philips.es:www.ecat.lighting.philips.es/1/equipos/hid/hid-electronic-outdoor/dynavision-programmable-xtreme-for-son/64784/cat/)
- *Catálogo 2014 de Philips.*
- Ribero, G. G. (2008). *Compatibilidad electromagnética de balastros electromagnéticos.* Mexico D.F.
- S.A., D. T. (2009). *Blastro electrónico. Ahorro de energía. Mejor factor de potencia.*
- SL, R. I. (s.f.). *Mejoras de los balastros electrónicos.*
- Technology, E. E. (2014). Catálogo general. 66.
- www.elt.es. (s.f.). Obtenido de <http://www.elt.es/productos/pdf/301040000.pdf>
- (2003). Manual práctico del alumbrado. En E. Harper. Limusa.
- (1981). Técnicas y aplicaciones de la iluminación. En L. C. Salazar.
- www.endesaonline.com. (9 de abril de 2014). Obtenido de http://www.endesaonline.com/ES/grandesclientes/productos_servicios/proyectos_electricos/index.asp

ANEXO 1

Los comandos de regulación que facilita el software Philips Multione para establecer la regulación DALI sobre lámparas de descargas son los siguientes:

Actilume:

Para la realización de grupos. Con un Philips LCN8600 MultiOne interface USB2DALI se pueden controlar hasta 16 grupos diferentes, donde cada uno tiene una dirección propia, y hasta un total de 64 dispositivos. Con este comando se pueden controlar los grupos de forma independiente y simultánea.

Line Switch:

Los dispositivos se pueden controlar de forma individual mandando órdenes a su propia dirección o de forma grupal, mandando las órdenes a la dirección del grupo siguiendo la lógica utilizada en domótica.

Adjustable Light Output:

Donde se determina el nivel de luz que se desea que emita. Se puede ajustar el flujo de luz de forma autónoma. En lugar de establecer los horarios, éste varía el flujo de luz en función de relojes crepusculares o sensores.

Amp Dim:

Se ajusta la salida de luz de la lámpara mediante el ajuste de la tensión de alimentación de la red a la que está conectado el dispositivo. También existe la opción Adjustable Output Current, donde lo que se regula es la corriente de la red, pero para aplicaciones LED.

Constant Light Output:

Se establece el nivel de luz que quiere que se emita. Es una aplicación muy útil cuando se llega al ciclo final de la vida útil de los equipos. Regula la potencia necesaria de forma que se mantenga el nivel de lúmenes establecidos.

DynaDimmer:

Para establecer horarios de regulación periódica. Ofrece la opción de insertar la localización geográfica donde se quiere diseñar la instalación introduciendo la latitud y longitud, así como la franja horaria correspondiente (latitud 42° 48' 55'', longitud: -1° 38' 38'' y GMT+1 para Pamplona/Iruña), para que sea el propio software el que calcule el punto intermedio de la noche en el día en cuestión y establecer un criterio de regulación en función a este punto. También puede incluirse una estimación de la luz en función del estado meteorológico para que se actúe en concordancia.

ANEXO 2

De forma genérica la energía eléctrica consumida por el balastro electrónico de doble nivel obedece a la siguiente forma:

$$E = t_T \times (P_{\text{bus}} + P_{\text{contador}}) + t_{60\%} (P_{\text{HID}60\%} + P_{\text{B.E.}60\%}) + t_{100\%} (P_{\text{HID}100\%} + P_{\text{B.E.}60\%})$$

$$E = t_T \times 14 + t_{60\%} (70 \times 0.60 + 4,8) + t_{100\%} \times (70 + 8)$$

La potencia activa media por tanto:

$$E/t_T = 14 + t_{60\%/t_T} (70 \times 0.60 + 4,8) + t_{100\%/t_T} \times (70 + 8)$$

La potencia reactiva se calcula en función del factor de potencia señalado por ELT como 0,98.

$$\cos(\varphi) = 0.98 \quad \varphi = 11,4783$$

$$Q = P \times \tan(\varphi) \quad Q = P \times 0,203$$

Tiempo medio estimado en horas de la duración de la noche n (t_n):

$$t_n = (t_{n-1} + t_{n-2} + t_{n-3})/3$$

Hora de inicio del nivel mínimo de potencia al 60% de la potencia máxima ($t_{n\ 60\%}^i$):

$$t_{n\ 60\%}^i = t_n/2 - 2$$

Hora final del nivel mínimo de potencia al 60% de la potencia máxima ($t_{n\ 60\%}^f$):

$$t_{n\ 60\%}^f = t_n/2 + 5$$

Día 1:

Al no contar con datos guardados sobre conexiones anteriores para la estimación del punto intermedio de trabajo, el balastro electrónico no ejerce ningún control sobre la lámpara de vapor de sodio, por lo que está todo el tiempo conectado al 100%.

Energía consumida durante 60,75 horas obedece a:

$$E = 92 \times 60,75 = 5,589 \text{ KWh}$$

Potencia reactiva:

$$Q = 92 \times \tan(11,4783^\circ) = 92 \times 0,203 = 18,681 \text{ VAr}$$

Día 2:

El tiempo medio que estima el propio balastro electrónico de la segunda noche coincide con el tiempo que estuvo conectado la primera. Al calcular la media a partir de las tres noches anteriores, existían dos posibilidades:

Que no calculara ninguna media y volviera a estar conectada al 100% durante todo el periodo que estuviera conectado o que sólo hiciera la media con los datos de los que dispusiera, que, en este caso sólo sería el registro de una única noche.

Al contactar con el servicio técnico de ELT se comunicó que en efecto realizaba la media de los registros que tuviera hasta el momento, por lo que el tiempo estimado para la segunda noche es el mismo que para primera.

El tiempo de duración de la noche estimado, por tanto, es de 60 horas y 45 minutos.

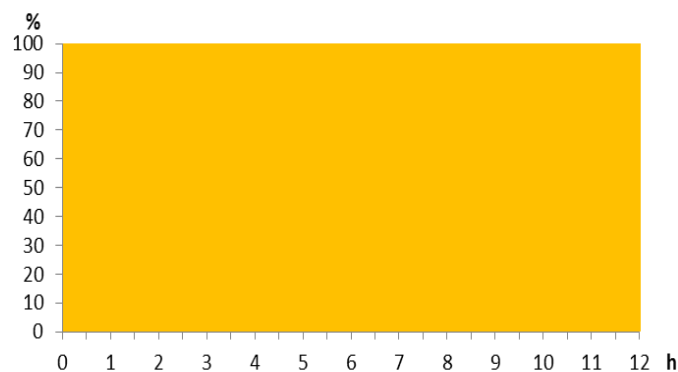
El punto intermedio de la noche es a las 30 horas y 22-23 minutos desde el momento en el que se pone en marcha, por lo que sería a las 03:22 o 03:23 AM pero de la noche siguiente, por lo que el control se queda fuera del rango de operación, manteniendo el nivel máximo de potencia a lo largo de toda la segunda noche.

Energía consumida durante 12 horas obedece a:

$$E = 92 \times 12 = 1,104 \text{ KWh}$$

Potencia reactiva:

$$Q = 92 \times \tan(11,4783^\circ) = 92 \times 0,203 = 18,681 \text{ VAr}$$



Día 3:

Del mismo modo, la duración estimada para la tercera noche es la media de únicamente las dos anteriores.

$$t_3 = \frac{60,75+12}{2} = 36,75$$

El punto intermedio será a las $\frac{36,75}{2} = 18,1875$

$t_{n\ 60\%}^i = 18,75 - 2 = 16,75$ horas desde el momento en el que se conecta, luego, queda de nuevo fuera de rango.

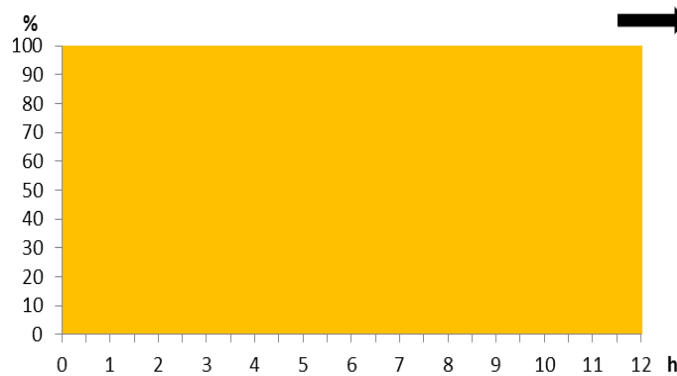
Por tanto, nuevamente el equipo trabaja al 100% durante todo el ciclo.

Energía consumida durante 12 horas obedece a:

$$E = 92 \times 12 = 1,104 \text{ KWh}$$

Potencia reactiva:

$$Q = 92 \times \tan(11,4783^\circ) = 92 \times 0,203 = 18,681 \text{ Var}$$



Día 4:

Estamos en la misma situación que en el día 3 ya que el tiempo medio estimado para la noche es:

$$t_4 = \frac{60,75+12+12}{3} = 28,25$$

El punto intermedio será a las $\frac{28,25}{2} = 14,125$

$t_{n\ 60\%}^i = 14,125 - 2 = 12,125$ horas desde el momento en el que se conecta, luego, queda de nuevo fuera de rango por 7,5 minutos.

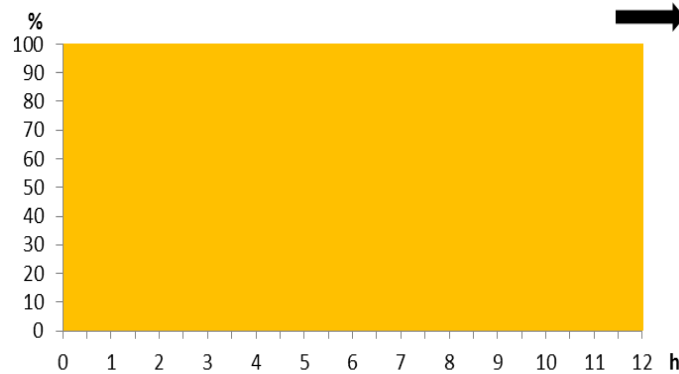
Los consumos coinciden por ello con los de los días 2 y 3:

Energía consumida durante 12 horas obedece a:

$$E = 92 \times 12 = 1,104 \text{ KWh}$$

Potencia reactiva:

$$Q=92 \times \tan(11,4783^\circ) = 92 \times 0,203 = 18,681 \text{ VAr}$$



Día 5:

En estas circunstancias es la primera de las noches en la que el doble nivel de potencia entra en juego.

$$t_5 = \frac{12+12+12}{3} = 12 \text{ horas}$$

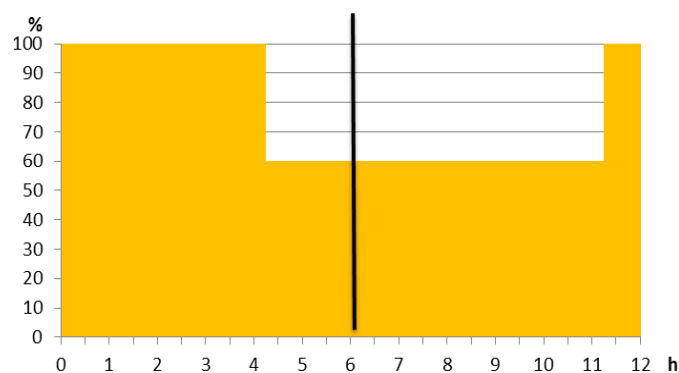
$$t_{n\ 60\%}^i = 12/2 - 2 = 4 \text{ horas}$$

$$t_{n\ 60\%}^f = 12/2 + 5 = 11 \text{ horas}$$

$$E=12 \times 14 + 7 (70 \times 0.60 + 4,8) + 5 \times (70 + 8) = 0,885 \text{ KWh}$$

$$P_{media} = \frac{0,8902}{12} \times 1000 = 74,183 \text{ W}$$

$$Q_{media} = P_{media} \times \tan(11,4783^\circ) = 15,063 \text{ Var}$$



Día 6:

Una vez visto que se ha estabilizado el balastro para noches de 12 horas se procede a un cambio de horario para seguir sacando conclusiones. Ahora se pasa a simular las noches más largas del año con 15 horas. Además de la simulación de otra época del año el objeto es la comprobación del efecto o no de un tiempo inferior a 4 horas en el circuito sincronizado de respuesta astronómica que lleva el balastro. La elección de 15 horas radica en el estudiar

el comportamiento dentro de un horario en el que se pueda ver directamente el nivel de iluminación ya que el equipo se ha analizado en el laboratorio de electrónica de la UPNA.

$$t_6 = \frac{12+12+15}{3} = 13 \text{ horas}$$

$$t_{6\ 60\%}^i = 13/2 - 2 = 4,5 \text{ horas}$$

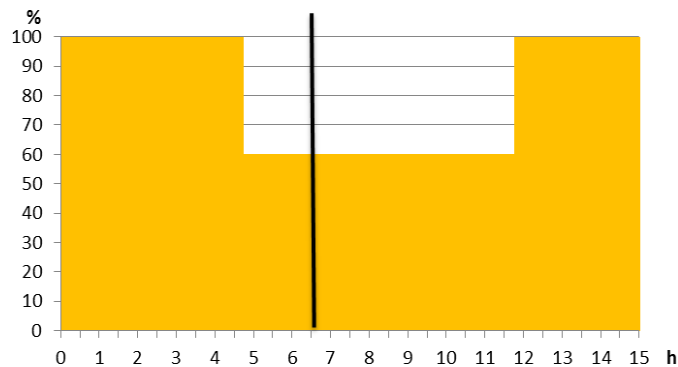
$$t_{6\ 60\%}^f = 13/2 + 5 = 11,5 \text{ horas}$$

$$E = 15 \times 14 + 7 (70 \times 0.60 + 5,4) + 8 \times (70 + 8) = 1,166 \text{ KWh}$$

$$P_{\text{media}} = \frac{1,166}{15} \times 1000 = 77,72 \text{ W}$$

Se puede observar la importante diferencia que hay entre el resultado obtenido empíricamente con los teóricos debido a la falta de precisión del contador electrónico.

$$Q_{\text{media}} = P_{\text{media}} \times \tan(11,4783^\circ) = 15,782 \text{ VAr}$$



Día 7:

De nuevo 15 horas de conexión en busca de una nueva estabilización en el balastro. Los resultados teóricos coinciden con los del día anterior, con la única diferencia de que hay un desplazamiento temporal de un retraso de media hora en la acción del doble nivel.

$$t_6 = \frac{12+15+15}{3} = 14 \text{ horas}$$

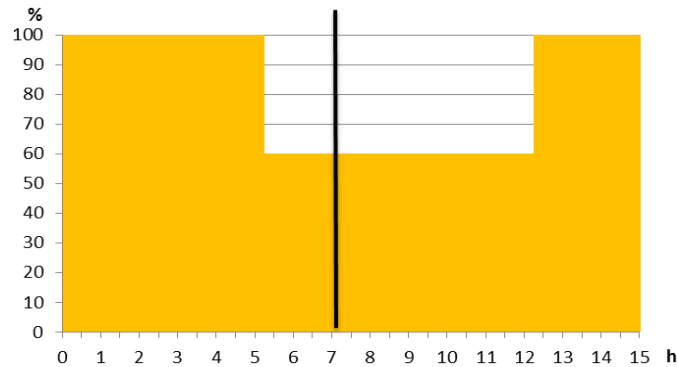
$$t_{6\ 60\%}^i = 14/2 - 2 = 5 \text{ horas}$$

$$t_{6\ 60\%}^f = 14/2 + 5 = 12 \text{ horas}$$

$$E = 15 \times 14 + 7 (70 \times 0.60 + 5,4) + 8 \times (70 + 8) = 1,166 \text{ KWh}$$

$$P_{\text{media}} = \frac{1,166}{15} \times 1000 = 77,72 \text{ W}$$

$$Q_{\text{media}} = P_{\text{media}} \times \tan(11,4783^\circ) = 15,782 \text{ VAr}$$



Día 8:

$$t_6 = \frac{15+15+15}{3} = 15 \text{ horas}$$

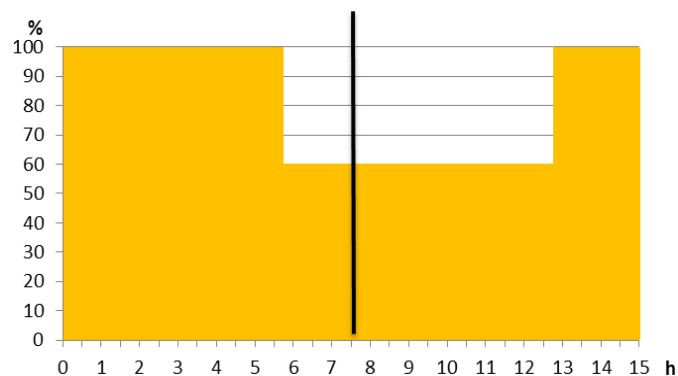
$$t_{6\ 60\%}^i = 14/2 - 2 = 5,5 \text{ horas}$$

$$t_{6\ 60\%}^f = 14/2 + 5 = 12,5 \text{ horas}$$

$$E = 15 \times 14 + 7 (70 \times 0.60 + 5,4) + 8 \times (70 + 8) = 1,166 \text{ KWh}$$

$$P_{media} = \frac{1,166}{15} \times 1000 = 77,72 \text{ W}$$

$$Q_{media} = P_{media} \times \tan(11,4783^\circ) = 15,782 \text{ VAr}$$



Día 9:

Con el objeto de comprobar una de las especificaciones expuestas por el fabricante, se evalúa un tiempo de conexión inferior a 4 horas simulando acciones de mantenimiento y ver si en efecto no tiene efecto sobre la estimación de los distintos tiempos en la siguiente noche.

$$t_6 = \frac{15+15+15}{3} = 15 \text{ horas}$$

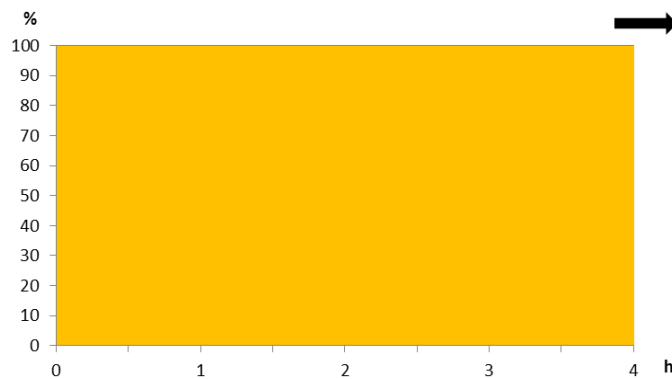
$$t_{60\%}^i = 14/2 - 2 = 5,5 \text{ horas}$$

Como solamente se conecta durante 4 horas, el nivel mínimo no entra en juego al estar fuera del rango de tiempo

$$E = 4 \times 14 + 0 (70 \times 0.60 + 5,4) + 4 \times (70 + 8) = 0,368 \text{ KWh}$$

$$P_{\text{media}} = \frac{0,3664}{4} \times 1000 = 92 \text{ W}$$

$$Q_{\text{media}} = P_{\text{media}} \times \tan(11,4783^\circ) = 18,681 \text{ VAr}$$



Día 10:

Se procede de nuevo a una conexión de 15 horas para ver si en efecto el día anterior no tiene efectos en los tiempos de control.

$$t_6 = \frac{15+15+15}{3} = 15 \text{ horas}$$

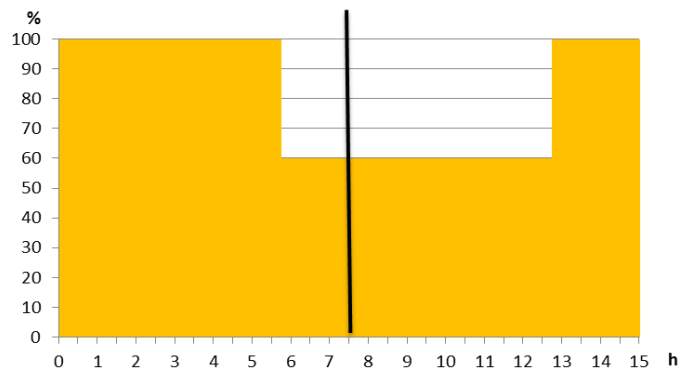
$$t_{60\%}^i = 14/2 - 2 = 5,5 \text{ horas}$$

$$t_{60\%}^f = 14/2 + 5 = 12,5 \text{ horas}$$

$$E = 15 \times 14 + 7 (70 \times 0.60 + 5,4) + 8 \times (70 + 8) = 1,166 \text{ KWh}$$

$$P_{\text{media}} = \frac{1,166}{15} \times 1000 = 77,72 \text{ W}$$

$$Q_{\text{media}} = P_{\text{media}} \times \tan(11,4783^\circ) = 15,782 \text{ VAr}$$



ANEXO 3

En este anexo se establecen los % de regulación medios en el sistema DALI que equiparan la potencia media consumida por éste a la del doble nivel.

8 horas, P = 56,6 W:

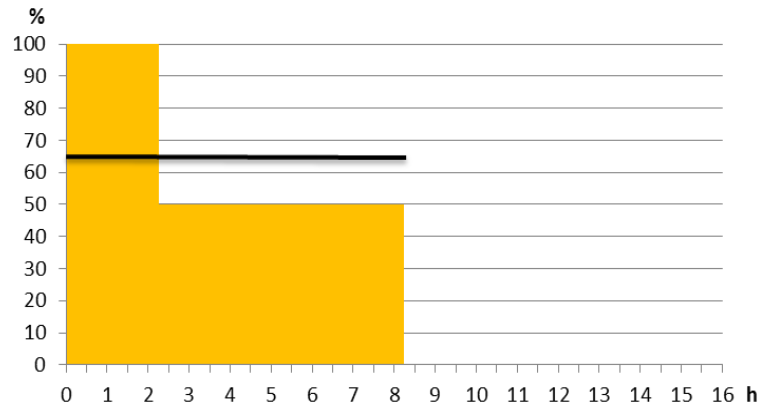
$$\frac{65 - X}{65 - 60} = \frac{57 - 56,6}{57 - 54}$$

$$X = 64,33\%$$

$$Q = 56,6 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 18,6 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 7,107 \text{ VAr}$$



9 horas, P = 57,378 W:

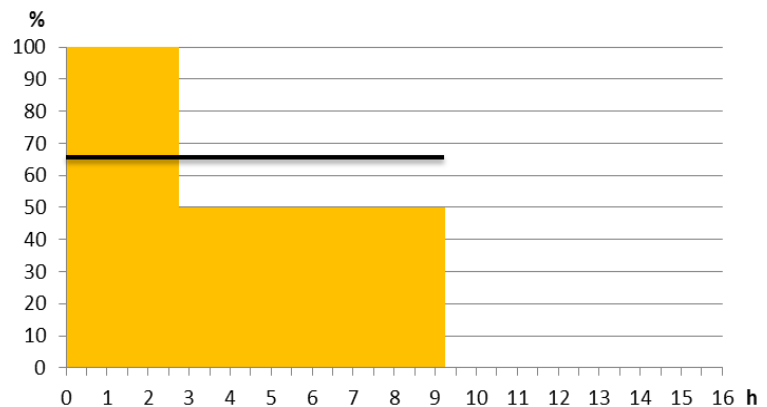
$$\frac{70 - X}{70 - 65} = \frac{60 - 57,378}{60 - 57}$$

$$X = 65,33\%$$

$$Q = 57,378 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 18,86 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 7,209 \text{ VAr}$$



10 horas, P = 58 W:

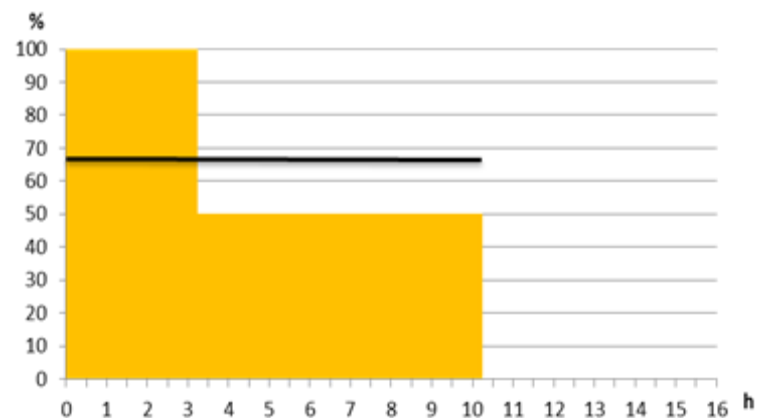
$$\frac{70 - X}{70 - 65} = \frac{60 - 58}{60 - 57}$$

$$X = 66,66\%$$

$$Q = 58 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 19,06 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 7,283 \text{ VAr}$$



11 horas, P = 59,782 W:

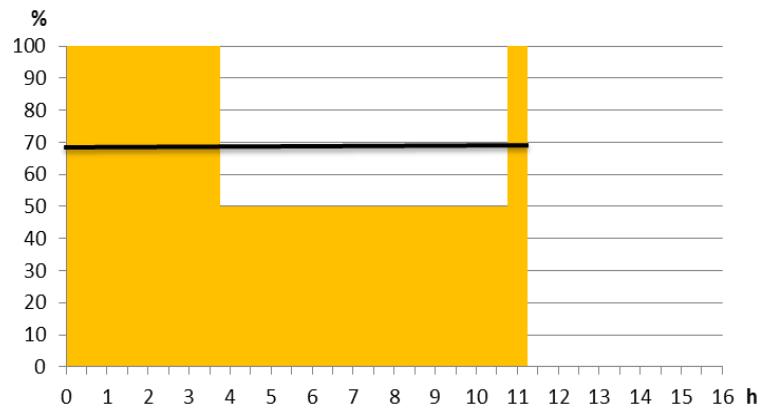
$$\frac{70 - X}{70 - 65} = \frac{60 - 59,782}{60 - 57}$$

$$X = 69,63\%$$

$$Q = 59,782 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 19,65 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 7,511 \text{ VAr}$$



12 horas, P = 61,29 W:

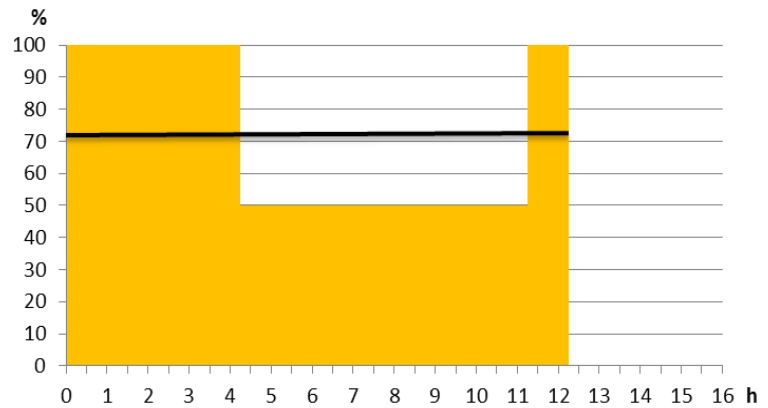
$$\frac{75 - X}{75 - 70} = \frac{63 - 61,29}{63 - 60}$$

$$X = 72,15\%$$

$$Q = 61,29 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 20,146 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 7,707 \text{ VAr}$$



13 horas, P = 62,52 W:

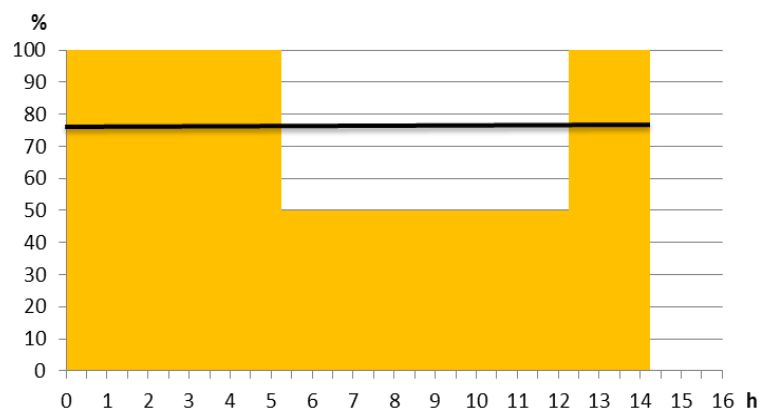
$$\frac{75 - X}{75 - 70} = \frac{63 - 62,523}{63 - 60}$$

$$X = 74,2\%$$

$$Q = 62,523 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 20,55 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 7,854 \text{ VAr}$$



14horas, P = 63,6 W:

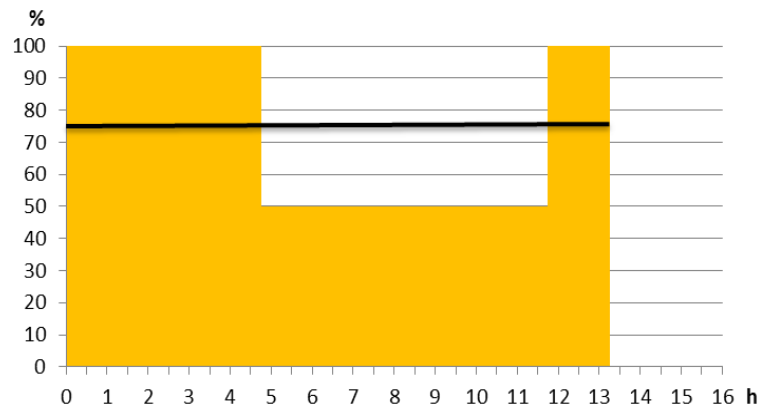
$$\frac{80 - X}{80 - 75} = \frac{66 - 63,6}{66 - 63}$$

$$X = 76\%$$

$$Q = 63,6 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 20,9 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 7,986 \text{ VAr}$$



15 horas, P = 64,53 W:

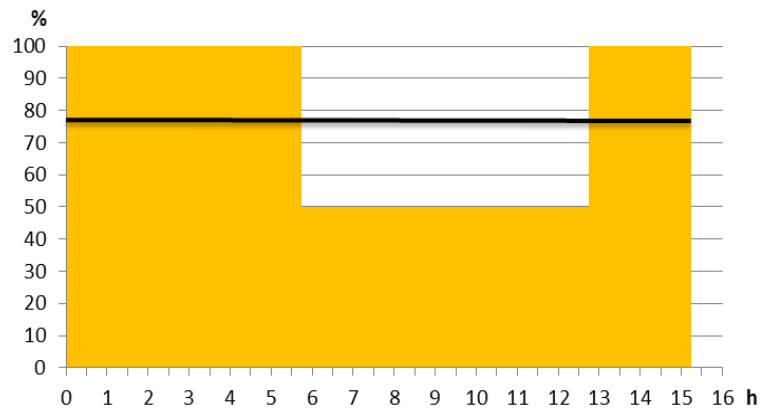
$$\frac{80 - X}{80 - 75} = \frac{66 - 64,533}{66 - 63}$$

$$X = 77,55\%$$

$$Q = 64,533 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 21,21 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 8,106 \text{ VAr}$$



16 horas, P = 65,35 W:

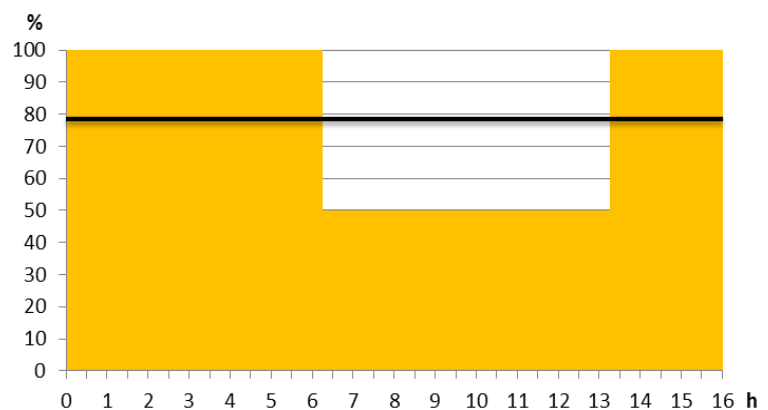
$$\frac{80 - X}{80 - 75} = \frac{66 - 65,35}{66 - 63}$$

$$X = 78,92\%$$

$$Q = 65,35 \times \tan(18,595)$$

$$Q = 21,48 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = 8,21 \text{ VAr}$$



ANEXO 4:

Comparación de las iluminancias de servicio de cada equipo

En este apartado se representa la relación entre las iluminancias para el caso del balastro electromagnético y el electrónico de doble nivel enfrentados al electrónico programable DALI.

En la siguiente tabla se representa la relación entre las iluminancias de uno y otro a través de los siguientes porcentajes. Éstos representan para cada uno de los puntos estudiados, qué % de luxes de los luxes medidos para el balastro electrónico programable al 100% son achacables al electromagnético y al doble nivel al 100% y al 60%.

Tabla 0-1: % de luxes del D.N. respecto a DALI al 100%

100% de doble nivel respecto a DALI 100%							60% de doble nivel respecto a DALI 100%						
	0	1	2	3	4	5		0	1	2	3	4	5
1	37,0	73,2	132,2	220,7	607,3	580,7	1	18,5	36,6	66,1	110,3	303,6	290,3
2	39,9	68,2	72,9	104,6	138,8	184	2	19,9	34,1	36,4	52,3	69,4	92
3	44,6	60,7	68,0	81,6	83,1	122,8	3	22,3	30,3	34,0	40,8	41,5	61,4
4	42,4	48,7	64,7	73,6	87,8	101,2	4	21,2	24,3	32,3	36,8	43,9	50,6
5	40,6	50,0	57,5	71,9	70,9	84,6	5	20,3	25,0	28,7	35,9	35,4	42,3
6	45,3	52,0	62,5	65,1	66,4	80,9	6	22,6	26,0	31,2	32,5	33,2	40,4
7	52,6	54,7	62,7	65,1	72,1	77,4	7	26,3	13,8	11,3	10,1	9,3	38,7

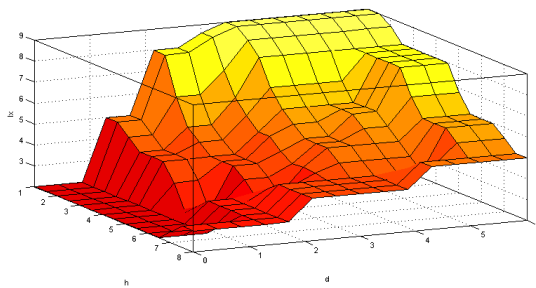


Figura 0.14 y 6.16: diferencia en % de luxes en 3D D.N. a máxima potencia y DALI al 100%

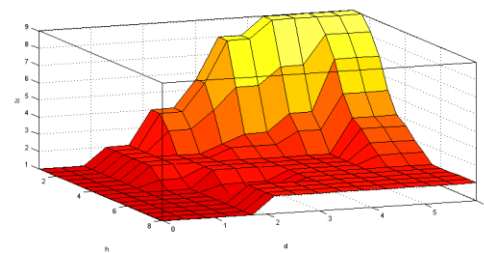
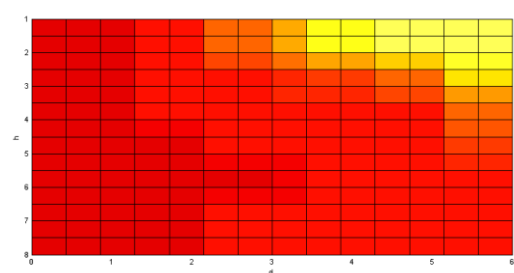
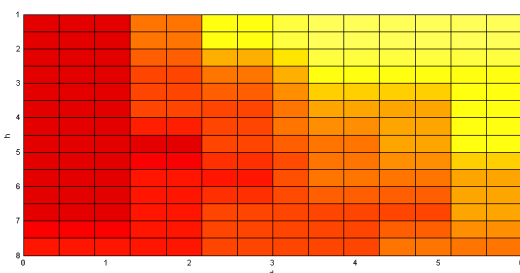


Figura 0.15 y 6.17 diferencia en % de luxes de en 3D D.N. a mínima potencia y DALI al 100%



ANEXO 5: Grupos de control de regulación DALI

Propuesta 3.1: grupos de control

Desglose de la propuesta 3.1								
ZONA	ACTUAL ES	PROPUEST A	DISMINUCIÓN	ALTURA [m]	BRAZO [m]	EMEDIA al 100%	EMINIMA al 100%	UMEDIA al 100%
Aulario Zona	10	10	0	4	1	14	5	0,36
Aulario- Tejos Depto.	11	7	4	4	2	14	5,5	0,39
Tejos y Pinos	32	32	0	4	1	12	4	0,33
Biblioteca S	25	18	7	5	2	17	8	0,47
Biblioteca T Depto.	24	24	0	4	1	18	8	0,44
Olivos	28	26	2	5	2	11	4,5	0,41
ADI Tech	8	8	0	5	2	16	8	0,50
Biblioteca- Rectorado S	34	32	2	4	1	11	4	0,36
Biblioteca- Rectorado T	36	35	1	4	1	10	4	0,40
Biblioteca- Rectorado Centro Edif.	30	30	0	5	2	17	6,5	0,38
Rectorado (Frontal) Edif.	7	6	1	5	2	18	6	0,33
Rectorado (Trasera)	16	13	3	4	1	18	6	0,33
Rectorado Parking Acceso	20	20	0	4	1	18,5	8,5	0,46
Rectorado Parking Edif.	23	20	3	4	1	*	*	*
Sóforas (Frontal) Edif.	2	2	0	4	1	*	*	*
Sóforas (Trasera)	23	13	10	5	2	*	*	*
Sóforas- Cafetería	14	14	0	4	1	*	*	*
Camino parking S	10	5	5	5	2	12	4,5	0,38
Parking Sadar	11	7	4	4	1	*	*	*
Deptos. Madroños	36	36	0	4	1	13	5,5	0,42
Comedor	12	12	0	4	1	*	*	*
Zonas entre edificios	20	20	0	5	2	*	*	*

Propuesta 3.2: grupos de control

Desglose de la propuesta 3.2							
ZONA	ACTUALES	PROPUESTA	REDISTRIB.	DISMINUCIÓN	E _{MEDIA} al 100%	E _{MINIMA} al 100%	U _{MEDIA} al 100%
Aulario	10	10		0	14	5	0,36
Zona Aulario-Tejos	11	7		4	14	5,5	0,39
Depto. Tejos y Pinos	32	32		0	12	4	0,33
Biblioteca S	25	15	4	10	17	8	0,47
Biblioteca T	24	19	9	5	18	8	0,44
Depto. Olivos	28	26		2	11	4,5	0,41
ADI Tech	8	8		0	16	8	0,50
Biblioteca -Rectorado S	34	23	8	11	11	4	0,36
Biblioteca -Rectorado T	36	28	9	8	10	4	0,40
Biblioteca -Rectorado Centro	30	30		0	17	6,5	0,38
Edif. Rectorado (Frontal)	7	6	2	1	18	6	0,33
Edif. Rectorado (Trasera)	16	13		3	18	6	0,33
Rectorado Parking Acceso	20	20	2	0	18,5	8,5	0,46
Rectorado Parking Edif. Sóforas (Frontal)	23	17	5	6	*	*	*
Edif. Sóforas (Trasera)	2	2		0	*	*	*
Edif. Sóforas (Trasera)	23	13		10	*	*	*
Sóforas-Cafetería	14	14		0	*	*	*
Camino parking S	10	5		5	12	4,5	0,38
Parking Sadar	11	7		4	*	*	*
Deptos. Madroños	36	36		0	13	5,5	0,42
Comedor	12	12		0	*	*	*
Zonas entre edificios	20	20		0	*	*	*

Alguno de los grupos de control no han sido analizados en esta tabla debido a su interacción con otro tipo de luminarias o por la incertidumbre en cuanto al área a evaluar.

GRUPO DE CONTROL	Nivel 1					Nivel 2					Nivel 3				
	%	E _{med}	E _{min}	E _{max}	U _{med}	%	E _{med}	E _{min}	E _{max}	U _{med}	%	E _{med}	E _{min}	E _{max}	U _{med}
Aulario (Oeste)	90	13	4,5	21	0,35	65	10	4	17	0,40	40	6	2,4	10	0,40
Aulario (Este)	90	13	5	22	0,39	65	10	4	18	0,40	40	6	2,5	10	0,42
Zona Tejos-Aulario	90	13	5,2	85	0,40	75	10	4	19	0,40	50	7	3	12	0,43
Pinos-Tejos (Laterales par)	90					75					40				
Pinos-Tejos (Laterales impar)	80	11	3,5	77	0,32	60	9	2	60	0,23	30	4	1	26	0,25
Pinos-Tejos (Entradas)	90	14	5,75	29	0,41	75	10	4	24	0,40	50	6	2	17	0,36
Zona departamentos (Tejos y Pinos)	90	15	7	31	0,46	65	10	4	19	0,40	50	8	3	15	0,38
ADI Tech (Laterales y trasera)	90	14	7,5	30	0,5	60	9	3,5	23	0,39	25	5	2	8	0,40
ADI Tech (Frontal)	90	16	7	42	0,43	60	9	4	25	0,50	25	5	2	9	0,40
Olivos (Frontal par)	90					75					50				
Olivos(Fron. impar)	80	10	3	22	0,30	60	8	3	17	0,38	40	5	2	10	0,40
Olivos (laterales y trasera par)	90					70					25				
Olivos (laterales y trasera impar)	80	10	4	25	0,40	60	9	4	18	0,44	25	3	1	7	0,33
Rectorado Parking (par) 1	90					75					50				
Rectorado Parking (impar)	80	16	7	24	0,43	60	10	4	25	0,40	50	8	3	15	0,38
Acceso Rectorado Parking dch	90					75					50				
Acceso Rectorado Parking izq.	80	15	6	26	0,4	60	11	4	19	0,36	50	7	2	12	0,29
Rectorado (Laterales y trasera)	80					60					50				
Rectorado (Frontal)	80	16	5,5	29	0,37	60	12	4	21	0,33	40	8	3	4	0,38
Rectorado Centro (Tajonar)	90					60					40				
Rectorado Centro (Sadar)	80	15	5	23	0,33	60	10	3	15	0,33	40	4	2	17	0,5
Biblioteca-Rectorado Este (T)	90					80					70				
Biblioteca-Rectorado Oeste (S)	90	9	3,5	21	0,39	70	7	2,5	17	0,36	60	6	2	15	0,33
Biblioteca-Rectorado Oeste (T)	90					80					70				
Biblioteca-Rectorado Este (S)	90	9	3,5	21	0,39	70	7	2,5	17	0,36	60	6	2	15	0,33
Biblioteca Este (Sadar)	90					70					50				
Biblioteca Este (Tajonar)	90	15	6	25	0,4	80	12	5	20	0,42	50	8	3	13	0,38
Biblioteca Oeste (Sadar)	90					70					50				
Biblioteca Oeste (impar)	90	16	7	25	0,43	80	12	5	20	0,42	50	8	3	13	0,38
Departamentos Oeste (Entrad)	90	14	6	29	0,43	75	10	4	24	0,40	50	6	2,5	18	0,41

ANEXO 6: Documentación gráfica

Plano 01: Estado actual de la instalación lumínica de la UPNA

Plano 02: Propuesta 3.1

Plano 03: Propuesta 3.2