

1. Introducción

Entre las principales actividades que implican consumo de energía en todo el mundo un porcentaje significativo, de aproximadamente el 20% de esta, se gasta en iluminación. Un actor importante de esta porción es el alumbrado público que, con un 2,3% del total, tiene un gran impacto en la percepción de seguridad y calidad de vida de los ciudadanos que habitan los núcleos urbanos (Beccali et al., 2017). Aunque ese porcentaje puede considerarse pequeño, se estima que sus costes anuales de energía eléctrica relacionados oscilarán entre los 23,9 y los 42,5 mil millones de dólares en 2025 (Sedziwy y Kotulski, 2016). En el caso específico de España, en 2010 se contabilizaron alrededor de 4,8 millones de puntos de luz instalados con una potencia media de 180 W y un uso anual de 4.200 h (De Paz et al., 2016).

Estas instalaciones ocupan, en promedio, entre el 40% -en municipios pequeños- (Ozadowicz y Grela, 2017) y el 12% -en las grandes ciudades europeas- (Wojnicki, Ernst y Kotulski, 2016) de los presupuestos de sus administraciones públicas. Varios estudios indican que el potencial de ahorro que se puede lograr al modernizar estas instalaciones es superior al 30% si se renuevan con tecnologías de iluminación más eficientes (Valentová, Quicheron y Bertoldi, 2015). Sin embargo estos porcentajes pueden ser mucho mayores si también se instalan sistemas de regulación y control de las mismas (Beccali et al., 2015).

Esta realidad coexiste con una revolución tecnológica que se está produciendo en el mercado de los productos de iluminación que está sufriendo, como muchos otros campos tecnológicos, un proceso de digitalización que está cambiando profundamente los fundamentos de esta industria generando equipos no solo mucho más eficientes sino también con la capacidad de control y regulación más elevada desarrollada hasta el momento (Gutierrez-Escolar et al., 2015).

La gran importancia que se le está dando a los criterios de eficiencia energética está generando impulsos legislativo que obligan al cumplimiento de nuevos estándares de ahorro energético (Mahoor, Salmasi y Najafabadi, 2017) adaptando racionalmente los niveles de iluminación y los consumos de las instalaciones de alumbrado público de las ciudades (Jagerbrand, 2016). Este contexto ha provocado el desarrollo de numerosas líneas de trabajo para generar sistemas y metodologías que permitan regular los flujos luminosos de luminarias para que puedan operar al máximo de su capacidad nominal cuando sea necesario o trabajar con una reducción de flujo lumínico de las mismas cuando las necesidades de iluminancia no sean tan altos como, por ejemplo, en una carretera con muy poco tráfico en las altas horas de la madrugada.

Uno de los primeros equipos diseñados para poder realizar esta disminución de la intensidad de la iluminación se desarrolló hace más de 40 años (patente de los Estados Unidos 4189664^a). Su forma de trabajar se basa en la colocación de dispositivos en los cuadros eléctricos que permiten, primero, una reducción constante de los valores de la tensión que se aplica en las líneas de transmisión de potencia del equipo y, posteriormente, aplicar micro cortes periódicos en la señal eléctrica senoidal de la misma, reduciendo la energía que se transmite por esta línea.

Estos equipos trabajan directamente sobre los valores de la red de potencia eléctrica y son complejos y caros. Además, requieren de un mantenimiento periódico continuado. Estos dos problemas son los que se buscan eliminar con la aplicación de la electrónica para conseguir este mismo objetivo de modo que estos procesos de control de flujo se produzcan utilizando señales digitales de mínima potencia (Kovacs et al., 2016). Los nuevos balastos y controladores electrónicos para luminarias convencionales o los drivers usados en luminarias LEDs, han permitido aprovechar las posibilidades que ofrece la incorporación de

los procesadores digitales actuales que incluyen puertos de comunicaciones y la capacidad de contar tiempos y ejecutar acciones basadas en esta medida de manera sencilla y eficiente (Kaleem, Yoon y Lee, 2016).

2. Sistemas de control de instalaciones de iluminación

Los esfuerzos para aprovechar la inclusión de estas nuevas unidades de control digital en luminarias se han centrado en interconectar los equipos mediante un bus de datos con el que conectarse a un sistema de control central enviando y recibiendo paquetes de datos para el intercambio de información y la regulación específica de la intensidad de luz emitida.

Poder regular el flujo luminoso de los equipos de alumbrado para adaptar dinámicamente la iluminación a las necesidades específicas de sus entornos es una propuesta potenciada por diferentes regulaciones actuales de ahorro de energía y sostenibilidad (Liang y Xu, 2017). En estos casos, el equipo debe funcionar a la máxima potencia en la puesta en marcha, reduciendo el flujo de luz en las horas de madrugada cuando el número de usuarios de la vía se reduce y puede aumentarlo nuevamente cerca del amanecer al crecer nuevamente su uso.

Diferentes estudios como los de Wojnicki, Ernst y Kotulski (2016) o Jagerbrand (2016) indican que el uso de esta metodología permite ahorrar entre un 6% y un 50% de la energía consumida, según el tipo de vía y la tecnología de iluminación y regulación existente en comparación con la misma instalación sin sistemas de regulación.

Los tres sistemas de comunicación para sistemas de telegestión que se han impuesto en el mercado permiten realizar tareas de supervisión y toma de información de las luminarias como sus valores exactos de consumo o alarmas operativas. Estos buses de comunicaciones pueden ser líneas eléctricas de propósito específico, la base de la línea de potencia a la que se añaden moduladores de señales que trabajan sobre esta o sistemas de comunicaciones inalámbricas en radio frecuencia (RF):

- Los buses digitales cableados específicos se han generalizado en instalaciones de iluminación interior. Existen soluciones singulares patentadas y estándares comerciales en este sector: DMX, DALI o KNX. En exteriores su implantación es mucho más compleja, no puede cubrir grandes distancias, la instalación de cableado adicional es costosa y complicada de integrar en muchos casos y, finalmente, son más sensibles a la interferencia y a los problemas de inducción de sobretensiones. Debido a estas limitaciones su uso en iluminación exterior es residual (Ozadowicz y Jakub, 2015).
- Los sistemas PLC eliminan la necesidad de incluir cableado adicional para el bus de comunicaciones ya que la información y la energía eléctrica comparten la línea de potencia como canal. Sin embargo, tienen como principal inconveniente que requieren adaptadores en cada equipo conectado a la red eléctrica que permiten enviar y recibir paquetes. Estos son complejos al trabajar sobre voltajes superiores a 100 V. A pesar de la reducción de la estructura del cableado, en sistemas PLC se pueden producir caídas ocasionales por ruido electromagnético. Además, debido a la atenuación de la señal de la portadora, puede haber una alta latencia o fallos en la comunicación (Kaleem, Yoon y Lee, 2016). Ejemplos de soluciones comerciales: inteliLIGHT (Flash Group), Minos System (UMPI), eSMART (ELT) o CIRLAMP (Circuitor)
- Los sistemas RF incluyen módulos hardware específicos de gestión de comunicaciones en cada punto de iluminación que permiten crear una red mallada de nodos que conectan el centro de control y cada uno de los puntos de luz de la instalación (Costa da Fonseca, Palucci-Pantoni y Brandão, 2015). Dependiendo de la frecuencia usada (2.4GHz de ZIGBEE u otras frecuencias como las bandas abiertas

de 433 MHz o 866 MHz en Europa) se pueden obtener diferentes anchos de banda para manejar diferentes cantidades de datos y, de manera inversa, distancias de transmisión (Raza, Kulkarni y Sooriyabandara, 2017). Ejemplos de soluciones comerciales: LightGrid (GE Lighting), CityTouch (Philips), NB-IoT (Huawei) o Owlet (Schreder)

Todos estos casos analizados generan comunicaciones bidireccionales, que optimizan la funcionalidad de los mismos, pero que requieren:

- Módulos de hardware específicos que actúan como nodos de comunicación que adaptan la información a transmitir al formato elegido de señales y protocolos de transmisión (Daely et al., 2017).
- Sistemas informáticos remotos complejos de monitorización y control. Arquitecturas de software que incluyen, al menos, un servidor '*back-end*' y múltiples controladores centralizados en cuadros eléctricos que actúan como concentradores de información (Kovacs et al., 2016) y pueden realizar una transformación adicional a otros canales de comunicaciones suplementarios como GPRS, 4G o 5G. Las comunicaciones por estos canales tienen un gasto asociado al tráfico de datos que aumenta a medida el sistema de telegestión genera más tráfico de datos de información y que se convierte en otro gasto propio del sistema.

Por estos motivos, las tres opciones expuestas implican un aumento significativo tanto en el precio final de cada uno de los equipos de alumbrado como de su instalación (en el caso de necesitar un tendido específico de cables adicional). Por lo tanto, aunque contribuyen a la reducción de la energía gastada en la puesta en servicio de la instalación, su propio coste genera períodos de retorno de la inversión (ROI) de, al menos, 6,5 años reemplazando luminarias alimentadas con la red eléctrica (Z. Perko, Topić y J. Perko, 2017) o de 5 años aplicado a luminarias alimentadas con paneles fotovoltaicos (Kovacs et al., 2016).

La complejidad y el aumento de costes de estas implementaciones en instalaciones reales han conducido a los fabricantes de equipos y controladores de iluminación a desarrollar equipos con capacidad de autorregulación para operar en esta misma línea de regular el flujo luminoso en función de los requisitos específicos de cada instante de manera autónoma. La solución más extendida trabaja sobre la base de períodos de tiempo específicos en los que el nivel de brillo emitido de acuerdo con el tiempo que ha transcurrido desde que se encendió el equipo (en alumbrado público en exteriores, al anochecer). De esta forma, la capacidad de medir períodos de tiempo se ha convertido en un estándar en el mercado de las luminarias LED (Winder, 2017).

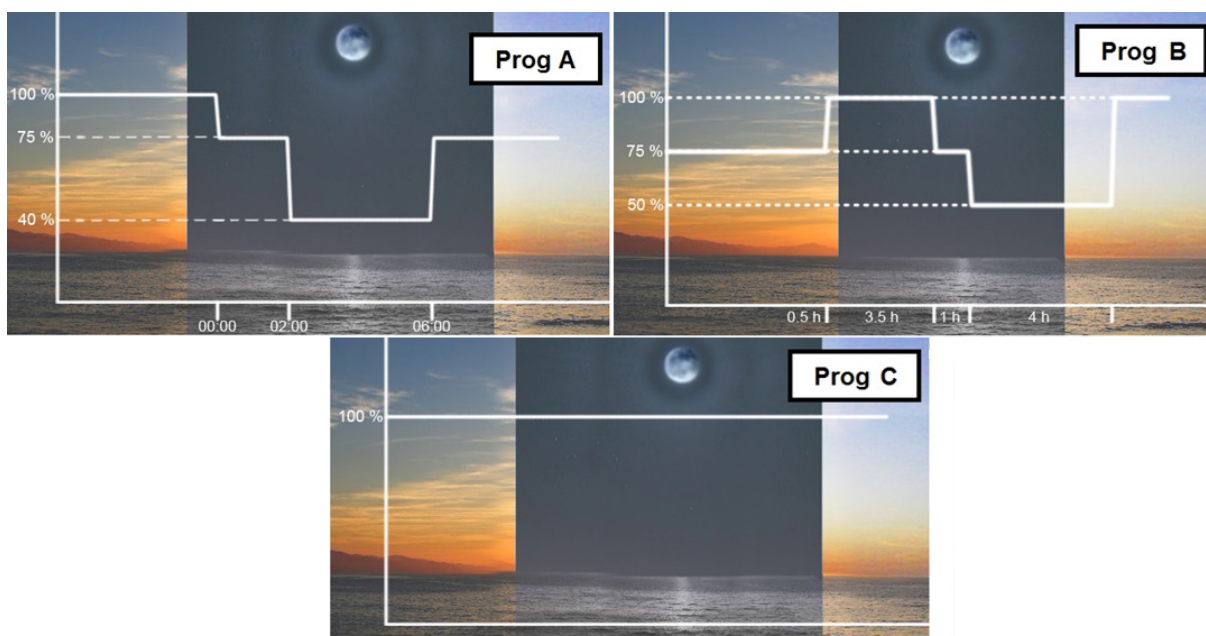
La programación de segmentos temporales en los que trabajar con diferentes intensidades lumínicas encuentra el problema de generar estructuras rígidas que difícilmente ofrecen un funcionamiento optimizado para todas las diferentes duraciones de la noche en cada una de las estaciones del año. Es extremadamente difícil encontrar un horario de trabajo que se adecue a todas las fechas del año o, incluso, a eventos especiales, como festividades, celebraciones singulares o atención a accidentes, en los que se desea la máxima iluminación en la instalación durante toda la noche. En este trabajo se plantea una solución que supone una alternativa de implementación sin la complejidad ni el coste de los sistemas de regulación punto a punto pero que permite configurar en campo, tantas veces como sea necesario, diferentes programas de regulación en una instalación de iluminación.

3. Metodología

Se propone un mecanismo de comunicación sin necesidad de hardware específico para una línea de luminarias que permite configurar el uso de un programa específico de regulación de intensidad de luz con diversos segmentos temporales entre diferentes opciones

pregrabadas en las luminarias. Así, la funcionalidad y el ahorro energético de esta instalación se pueden ajustar para diferentes situaciones en campo que permite una mejora de prestación de servicio y flexibilidad en comparación con un sistema convencional no configurable o reprogramable. La Figura 1 muestra diferentes rutinas de ajuste temporizado de funcionamiento que cumplen con los requisitos específicos de diferentes estaciones del año o las necesidades especiales que pueden requerir diferentes modos de trabajo adaptativos, entre otros, que las luminarias trabajen al máximo de su potencia nominal a lo largo de toda la noche.

Figura 1. Diagramas de programas de funcionamiento ajustados para diferentes épocas del año o diferentes necesidades pueden requerir eventos singulares o especiales. Eje ordenadas: nivel de brillo; eje de abcisas: línea de tiempo



La infraestructura mínima básica que podemos encontrar en todas las instalaciones de alumbrado público, tal y como se muestra en la Figura 2, es la capacidad de conmutación (apagado / encendido) a través de interruptores o contactores alojados en los cuadros eléctricos y las líneas de cables usadas para la transmisión de energía a los diferentes puntos de luz conectados.

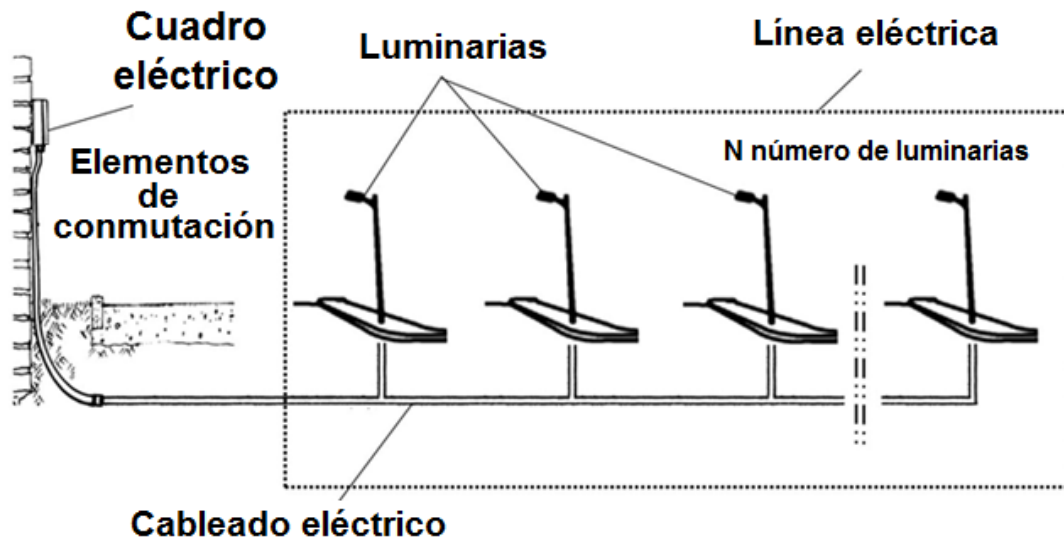
Hoy en día, casi cualquier proceso de renovación o ejecución de creaciones de una nueva instalación de alumbrado público se proyecta utilizando luminarias LED. Los requisitos básicos exigidos a los equipos de alumbrado de los concursos públicos que se generan para la adquisición/desarrollo de estos proyectos incluyen la capacidad de contar tiempo, regular el brillo (modificando los parámetros eléctricos internos de operación) e incluir cierta capacidad de memoria digital para el almacenamiento de datos.

La combinación de estos requisitos hace posible utilizar la capacidad intrínseca de contar tramos de tiempo de las luminarias no solo para establecer diferentes periodos de trabajo con diferentes niveles de brillo, sino también para poder interpretar pequeños ciclos de tiempo de ancho controlado como paquetes de información que se transmiten a través de la línea eléctrica.

Realizar un ciclo de encendido y apagado en toda una línea de luminarias durante un espacio de tiempo corto, pero con un periodo controlado y preciso, permite enviar información a estos dispositivos dependientes de la línea eléctrica siempre que el emisor (responsable del control) y los receptores (las luminarias) tengan un criterio común

preestablecido. Este criterio relaciona unívocamente la duración de un pulso de encendido con un dato específico que permite seleccionar una determinada secuencia de iluminación. Una vez programado, esta será la secuencia que utilizaran los equipos a partir de la programación en todos sus ciclos de encendido hasta que se cambie por otro mediante este mismo sistema, entre un conjunto previamente incorporado en las luminarias que se almacenan en una memoria no volátil del sistema de control electrónico del equipo, y que no se modifica independientemente del número y tipo de ciclos de alimentación o de permanecer largos periodos de tiempo sin energía.

Figura 2. Diagrama básico para un conjunto de luminarias instaladas.



Este es un sistema de comunicaciones con la limitación inicial de tener un carácter unidireccional (solo permite enviar información desde el maestro –cuadro eléctrico– hasta las esclavos –luminarias–) pero con la ventaja de no requerir de ningún hardware adicional en la instalación eléctrica legal mínima para una línea de alumbrado público. El proceso de conmutación se puede generar manualmente (ejecutado por un operario que accione el interruptor de corte de la línea con la ayuda de un cronómetro para crear pulsos de ancho específico) o mediante una unidad electrónica de control instalada en el cuadro eléctrico con capacidad para actuar sobre los contactores de potencia que cierran o abren las alimentación de las líneas. Estos equipos de control también se pueden gestionar de forma remota integrados en una aplicación o arquitectura de gestión informática ya existente en muchas administraciones públicas.

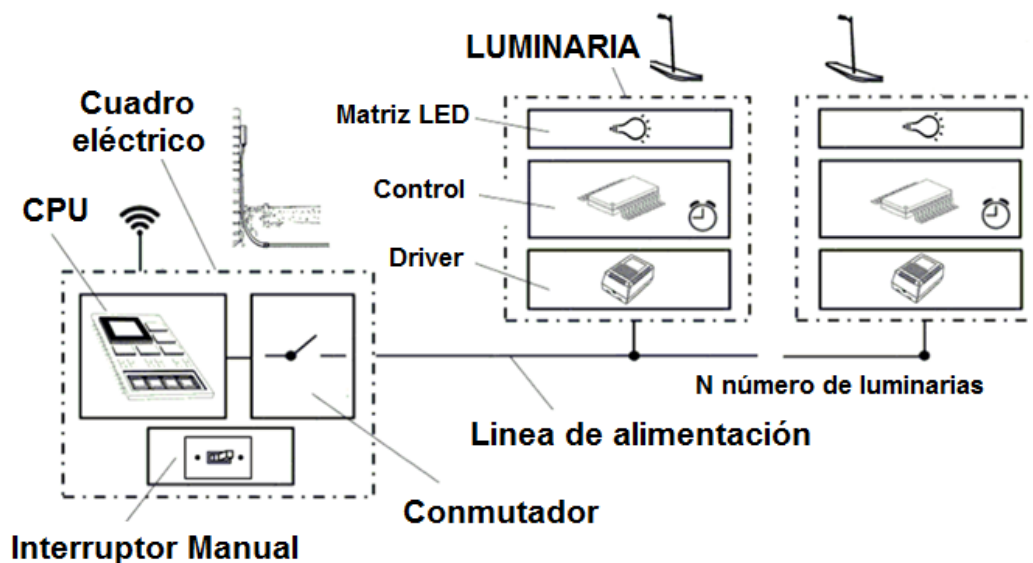
4. Desarrollo

La Figura 3 muestra el esquema de detalle de una instalación de alumbrado donde se cuenta con la funcionalidad necesaria para aplicar la metodología que se propone. Se parte de un cuadro de control eléctrico que tiene los elementos de protección y conmutación (magnetotérmicos, diferenciales y/o contactores) de una o varias líneas de suministro de energía para luminarias. Estos dispositivos permiten encender y apagar las luminarias de forma controlada por un operador humano que activa o desactiva manualmente un interruptor o utiliza un sistema de control remoto (telegestión a nivel de cuadros eléctricos). Cualquiera de estas alternativas se puede usar para encender las luminarias para realizar ciclos de trabajo normales (de la duración completa de una noche) o crear un pulso de encendido específico de programación que traslade información significativa para referenciar un modo específico de trabajo a cada sistema de control electrónico integrados en las luminarias individuales de la red.

Este sistema electrónico se puede construir utilizando cualquier modelo de procesador digital básico, como un microcontrolador, con unas características técnicas exigibles mínimas:

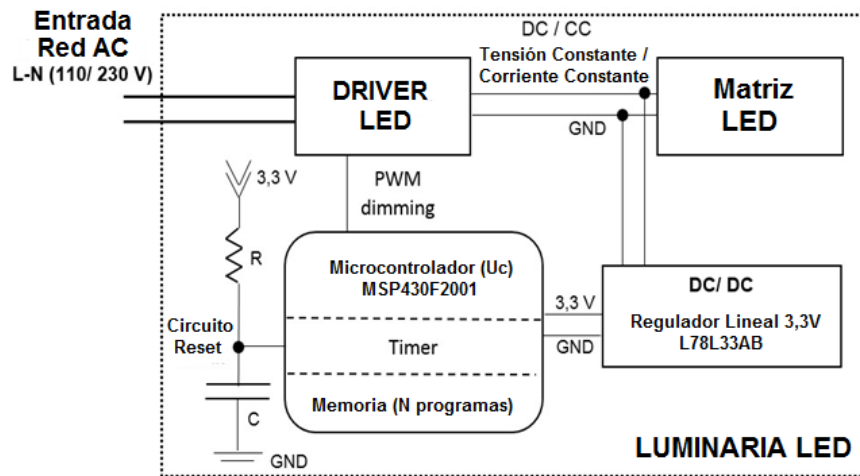
- Ser capaz de medir el tiempo en el rango de unidades de segundos para controlar el tiempo que están siendo alimentadas las luminarias tanto en los procesos de programación como en los de control de la duración de los tramos de los modo normales de funcionamiento.
- Incluir una memoria no volátil donde almacenar todos los diferentes programas de esquemas de evolución de brillo seleccionables en la instalación y el modo de trabajo programado para ese momento.
- Constituir una canal de salida que permite modificar el brillo de la lámpara a través de su fuente de alimentación o balastro electrónico. Los dos protocolos más estandarizados por los fabricantes por estos equipos de gestión de luminarias son uno de naturaleza digital (con una señal de ancho de pulso variable o PWM) y la otra de naturaleza analógica (0-10V o 1-10V). El primero permite una interconexión directa uc – driver y el segundo se puede generar con un circuito de adaptación que convierta una señal PWM primaria del gestor de comunicaciones en una señal analógica a través de un filtro RC que realiza la función de conversión PWM-analógico y por un amplificador operacional con realimentación por la entrada negativa que permite amplificar el voltaje de salida el procesador a los 10 V requeridos para la comunicación. En el caso de existir, la primera opción reduce la complejidad electrónica del procesador

Figura 3 Diagrama de bloques de los elementos relevantes a instalar para el modelo de configuración propuesto.



A partir de todos estos requisitos y especificaciones hemos desarrollado una forma de implementación de esta unidad de control electrónico en base a un microcontrolador de ultra bajo consumo del fabricante Texas Instruments (modelo MSP430F2001: 512 bytes de memoria y un precio unitario de compra inferior a 0,50€) junto con un regulador de voltaje lineal (L78L33AB) para su alimentación y un circuito RC para generar la señal de 'reset' del UC. Ver en la Figura 4 todos los módulos funcionales mínimos para la implementación y la interconexión que se requiere entre ellos.

Figura 4. Esquema electrónico del sistema de regulación y control diseñado instalado en cada luminaria (arriba) y ejemplo de su implementación (abajo)



La duración del pulso de potencia de una transición de “apagado a encendido” transporta la información que se desea transmitir a todas las luminarias de una misma línea. Este tiempo no puede ser:

A.- Demasiado corto, para que no se confunda con un falso arranque como el que puede generar un magnetotérmico que detecte el pico de arranque que producen la carga de todos los condensadores que integran los drivers de alimentación de los leds para la estabilización de las salidas en DC de baja o muy baja tensión.

B.- Demasiado largo, de modo que el proceso de programación sea haga demasiado lento.

Para evitar el primer caso, establecemos que el pulso mínimo permitido para transmitir información no puede ser inferior a un tramo de 10 segundos. Cualquier tramo por debajo de este tiempo se considerara un tramo no significativo.

Para el segundo caso, la rápida capacidad de actuación de los interruptores eléctricos (que pueden desconectar una línea de alimentación en tan solo milisegundos) y la facilidad de su uso aconsejan que los segmentos de tiempo de programación se configuren lo más cortos posible.

Sin embargo, hay una limitación técnica que limita que podamos acortar todo lo deseable los pulsos de encendido para la programación de las luminarias. Hemos encontrado que cuando

se usan fuentes de alimentación conmutada para alimentar matrices de diodos los condensadores de estabilización de la salida DC o CC de los controladores LED hacen que la eliminación de la tensión DC no sea instantánea con respecto al momento en el que su entrada en AC se interrumpe.

La señal de voltaje de salida que alimenta a los leds y a la electrónica de control disminuye como una curva exponencial que se demora de manera significativa antes de alcanzar un valor inferior al nivel de voltaje que un microprocesador puede detectar el apagado de la energía de entrada (en la mayoría de los casos un voltaje por debajo de $1 V_{DC}$. Por ejemplo, en la tecnología TTL, este valor se marca por debajo de 0,8V) sin necesidad de usar un hardware adicional.

Este tiempo es generalmente alto aunque no es constante para todos los modelos de fuentes; puede variar desde unos pocos segundos hasta periodos de tiempo de más de diez de estas unidades. Las dos principales variables de las que depende este retraso de tiempo son la potencia nominal del controlador y el nivel de carga a la que está funcionando la luminaria en el momento del apagado. Con el fin de establecer unos criterios de máximos y mínimos de estos tiempos de descarga con el que fijar los intervalos de tiempo mínimos adecuados para programar las luminarias, hemos analizado el comportamiento de varios modelos de drivers comerciales (Phillips, Meanwell y Tridonic) con capacidad de atenuación para regular su potencia de trabajo. Se han medidos los tiempos de bajada de la alimentación DC desde el corte de la entrada AC de los equipos seleccionados en tres modos de trabajo diferentes y normales en equipos comerciales: 100%, 75% y 50% de su carga nominal. En la Figura 5 se muestran dos casos experimentales de la dinámica de desconexión de dos drivers LED del fabricante Meanwell para dos potencias base diferentes (150 y 75W). En el caso de la potencia más elevada el tiempo de bajada se sitúa ligeramente por encima de los 15 segundos mientras que en el caso de la potencia menor este tiempo se sitúa en el entorno de los 12,5 segundos. Todos los resultados medidos en los diferentes equipos se representan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tiempo de descarga de la salida DC a niveles por debajo de $0,8 V_{DC}$ de diferentes drivers LED comerciales en condiciones diferentes de trabajo.

Driver (Modelo // Fabricante)	Tiempo apagado 100% Potencia	Tiempo apagado 75% Potencia	Tiempo apagado 50% Potencia
PLN-30-24 // Meanwell	8,9 s	8,4 s	7,8 s
NPF-40-24D // Meanwell	10,2 s	9,8 s	9,2 s
ELG-75-24A // Meanwell	11,9 s	11,4 s	10,9 s
ELG-150-24A // Meanwell	16,6 s	16,1 s	15,8 s
HLG-240-24A // Meanwell	17,8 s	17,2 s	16,8 s
LCA 30W 250-700mA One4All C PRE OTD // Tridonic	8,1 s	7,8 s	7,5 s
LCA 75W 250-700mA One4All C PRE OTD // Tridonic	10,8 s	10,3 s	9,7 s
LCA 160W 350-1050mA One4All C PRE OTD // Tridonic	17,8 s	17,1 s	16,7 s
Xitanium 30W / 0.7A-42V DIM // Philips	7,8 s	7,4 s	7,1 s
Xitanium 75W 0.1-1.05A Prog+ sXt // Philips	10,2 s	9,7 s	9,2 s
Xitanium 150W 0.35-0.7A GL Prog sXt // Philips	14,2 s	13,6 s	13,1 s

Figura 5. Curvas de descarga del driver ELG-150-24A (izquierda) y ELG-75-24A (derecha) del fabricante Meanwell funcionando a su potencia nominal.

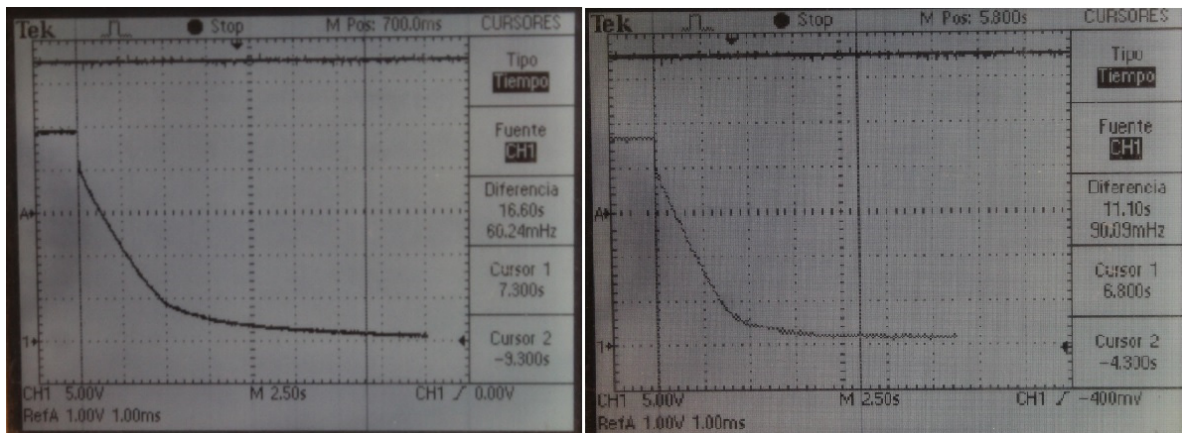
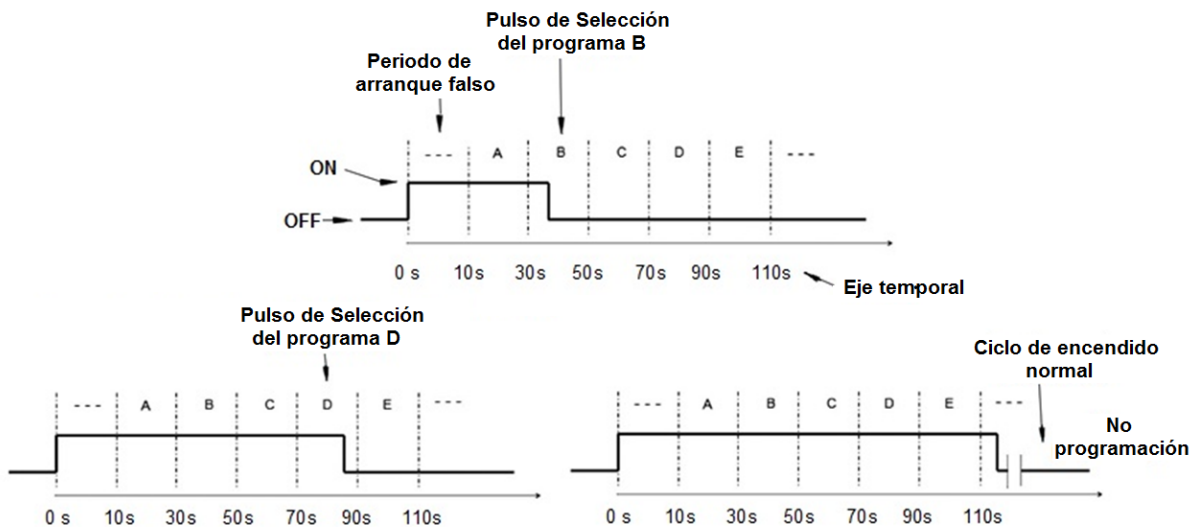


Figura 6. Diagrama de funcionamiento de periodos de conmutación para configurar el programa de regulación para los siguientes ciclos de trabajo



Los resultados obtenidos de todas las fuentes analizadas, calculando la diferencia entre el tiempo mínimo y la descarga máxima medida, establece que el tiempo de duración seguro para detectar diferentes datos que permitan programar estos tipos de luminarias sería de, al menos, 20 segundos.

De acuerdo con este criterio, en el caso de que se desee generar un sistema que pueda registrar y distinguir entre 5 programas diferentes, identificamos cada uno de ellos con las letras de 'A' a 'E' como se muestra en la Figura 6, se deben asignar secciones incrementales de 20 segundos para identificar a cada uno de ellos mientras deja un tramo inicial de 10 segundos para evitar problemas de cambios de programación no deseados en caso de arranques falsos.

- Por lo tanto, si el pulso de encendido para programación oscila entre los 10 y los 30 segundos, el programa 'A' se activará en todas las luminarias alimentadas en él.
- Si el pulso tiene una duración de entre 30 y 50 segundos, el programa 'B' se memorizará.
- Si el pulso dura entre 50 y 70 s. el programa 'C' será el elegido

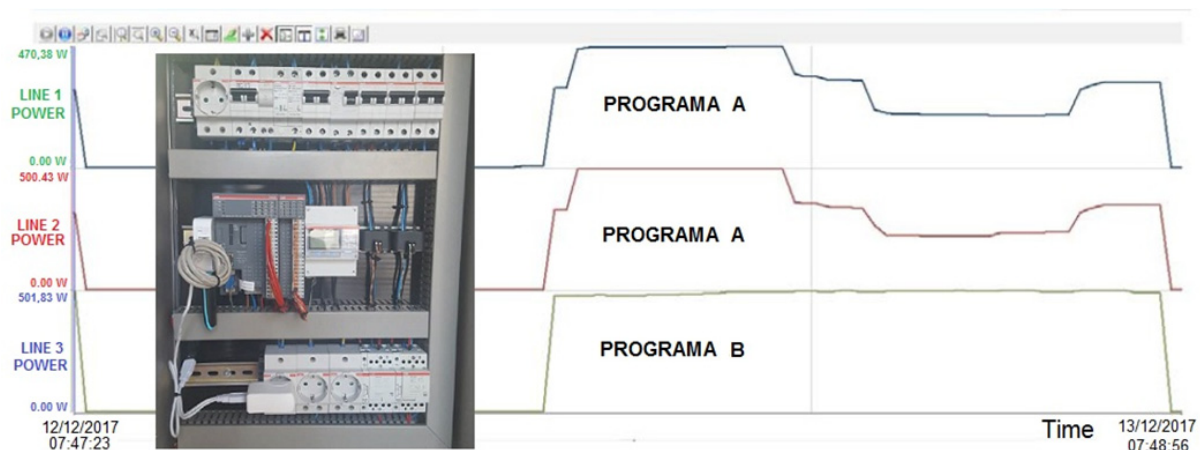
- Esto se repite sucesivamente hasta que el pulso dure más de 110 segundos. En este caso, no se considerará un proceso de programación y se utilizará el mismo modo de trabajo en el siguiente ciclo, ya que se entiende como un ciclo nocturno normal.

Aunque estos pulsos se pueden aplicar en cualquier momento, es aconsejable elegir un instante en el que sean lo menos molestos o extraños posibles para las personas que se encuentren en este entorno. Por ejemplo, en alumbrado público al aire libre se puede programar durante el día para que pase completamente desapercibidos para los peatones y no condicione los tramos normales de funcionamiento que se deben producir durante las noches.

El programa almacenado en las luminarias puede ser reconocido por las personas con un sistema de retroalimentación visual. Este se generará mediante un efecto perceptible en forma de un número específico de destellos o fluctuaciones de brillo en el momento del encendido puede indicar visualmente qué programa de control de iluminación se ha cargado y, por lo tanto, utilizado en ese ciclo. Este efecto visual se ejecutará, en todo caso, en los 10 primeros segundos de encendido de las luminarias y donde cualquier corte de la electricidad no se considerará como significativo

Para verificar el sistema generado se ha implementado una instalación real de pruebas en un cuadro eléctrico de una instalación de alumbrado público con tres líneas de salida. En cada una de estas líneas eléctricas se instalan 4 equipos de alumbrado vial LED de 80W y 5 luminarias de características similares pero con una potencia máxima de 35W. Todos los equipos instalados son idénticos en su propio grupo de potencia. Cada una de las tres líneas tiene su propio contactor para el control de encendido y, así, los procesos de programación y se instala con sus sistemas de protección en el cuadro un medidor de potencia digital del fabricante ABB modelo B23 con 3 fases de medida con precisión Serie 1B, como se muestra en la Figura 7 y que permite registrar la potencia consumida por cada una de las líneas. De este modo se puede visualizar gráficamente cómo evolucionan los tramos de trabajo de brillos diferenciados que ejecutan las luminarias de cada línea de manera independiente (línea 1, 2 y 3)

Figura 7. Distribución del panel de control eléctrico de pruebas y medida de diferentes programas de trabajo.



La instalación de prueba se ha mantenido un mes en funcionamiento, probando varios cambios de programación en cada una de las líneas periódicamente para verificar la estabilidad y la robustez de la solución generada. La Figura 7, igualmente, presenta el registro de consumo de energía de una noche de invierno donde las líneas 1 y 2 tienen un programa con 5 segmentos de trabajo con diferentes requisitos de emisión de luz adaptados a esta estación con un bloque inicial de 30 minutos (@ 75% de potencia), por 4,5 horas al

100%, 2 horas al 75%, 4,5 horas al 50% y el tiempo restante resto hasta el apagado al 75% de la intensidad nominal. La línea 3 usa un programa que mantiene la potencia de las luminarias al valor nominal (100%) durante toda la noche.

5. Conclusiones

Las Administraciones Públicas de todo el mundo están renovando sus instalaciones de alumbrado público para mejorar su rendimiento energético y, en mayor medida, para gestionar un importante ahorro de económico por la reducción del consumo de sus equipos instalados. La adopción de tecnologías energéticamente eficientes como LED es una de las propuestas más comunes, pero controlar adecuadamente estas instalaciones también ayuda a obtener un mayor ahorro. Las técnicas de regulación de brillo más comunes, como principal herramienta para bajar el consumo de la instalación, requieren de sistemas de control telemático punto a punto. Estas arquitecturas ofrecen muchas funcionalidades pero también son complejas y costosas, lo que aumenta significativamente el ROI de la inversión necesaria para implementarlas. En consecuencia, solo la instalación más significativa, con gran relevancia social, se tienden a controlar comúnmente con estos sistemas. En este trabajo presentamos una opción de gestor de instalaciones de alumbrado simplificada que incluye la posibilidad de modificar el comportamiento de la regulación de brillo planificada de una instalación de iluminación entre varias opciones preprogramadas sin instalar un bus de comunicación específico. Esta solución requiere solo de un control electrónico básico con capacidad de contar unidades de tiempos (capacidad que ya se presenta de manera estandarizada en muchos productos de alumbrado existentes). El bajo coste de esta solución permite implementarla con un incremento de inversión por no requerir un hardware de control específico.

Se presenta una propuesta de implementación de la arquitectura propuesta que permites encontrar las limitaciones técnicas que introducen los materiales básicos de la instalación para optimizar su funcionamiento. La principal encontrada son los retardos de desconexión de los drivers que dificultan la detección de los cortes de alimentación y que obliga a que los tramos de pulso para interpretar comunicaciones deban ser largos (mayores de 15 segundos) para discernir sin fallo y de manera homogénea la descarga de todos los modelos de drivers comerciales (de cualquier potencia y estado de carga). Esta propuesta se montó en una instalación de campo y se analizó su funcionalidad y rendimiento con un medidor de potencia que registra las curvas de evolución del gasto de energía, y por tanto, del ahorro logrado junto con la flexibilidad para adaptar el modo de funcionamiento de esta instalación a cualquier requisito puntual.

6. Bibliografía

- Beccali, M., Bonomolo, M., Ciulla, G., Galatioto, A., & Lo Brano, V. (2015). Improvement of Energy Efficiency and Quality of Street Lighting in South Italy as an Action of Sustainable Energy Action Plans, The Case Study of Comiso (RG), *Energy*, 92(3), 394-408.
- Beccali, M., LoBrano, V., Bonomolo, M., Cicero, P., Corvisieri, G.; Caruso, M., & Gamberale, F. A. (2017). Multifunctional Public Lighting Infrastructure, Design and Experimental Test. *Journal of Sustainable development of energy water and environment systems*, 5(4), 608-625.
- Costa da Fonseca, C., Palucci-Pantoni, R., & Brandão, D. (2015). Public street lighting remote operation and supervision system. *Computer Standards & Interfaces*, 38, 25-14.
- Daely, P. T., Bayu, S. G., Kim J. W., Jang, Y., Kim, D. P., & Shin, S. Y. (2017). Wireless LED Streetlight Platform with Weather Monitoring and Color Temperature Control System.

- The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 42(5), 1038-1046.
- De Paz, J. F., Bajo, J., Rodríguez, S., Villarrubia, G., & Corchado, J. M. (2016). Intelligent system for lighting control in smart cities. *Energy*, 372, 241-255.
- Gutierrez-Escolar, A., Castillo-Martinez, A., Gomez-Pulido, J. M., Gutierrez-Martinez, J. M., Stapic, Z., & Medina-Merodio, J. A. (2015) A Study to Improve the Quality of Street Lighting in Spain. *Energies*, 8 (2), 976-994.
- Jagerbrand, A. K. (2016). LED (Light-Emitting Diode) Road Lighting in Practice: An Evaluation of Compliance with Regulations and Improvements for Further Energy Savings. *Energies*, 9(5), 357.
- Kaleem, Z., Yoon, T. M., & Lee, C. (2016). Energy Efficient Outdoor Light Monitoring and Control Architecture Using Embedded System. *IEEE Embedded Systems Letters*, 38(1), 18-21.
- Kovacs, A., Batai, R., Csaji, B. C., Dudas, P., Hay, B., Pedone, G., Revesz, T., & Vancza, J. (2016). Intelligent control for energy-positive street lighting. *Energy*, 114, 40-51.
- Liang, G. Z., & Xu, X. Y. (2017) Residential Area Streetlight Intelligent Monitoring Management System Based on ZigBee and GPRS. *Materials Science, Energy Technology, and Power Engineering*, 1839, UNSP 020213, International Conference on Materials Science, Energy Technology, Power Engineering (MEP) Hangzhou, Chine, Date: Apr 15-16, 2017.
- Mahoor, M., Salmasi, F. R., & Najafabadi, T. A. (2017) A Hierarchical Smart Street Lighting System with Brute-Force Energy Optimization. *IEEE Sensors Journal*, 17(9), 2871-2879.
- Ozadowicz, A., & Jakub G. (2015). The street lighting control system application and case study. Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), International Conference on. IEEE, 2015.
- Ozadowicz, A., & Grela, J. (2017). Energy saving in the street lighting control system-a new approach based on the EN-15232 standard. *Energy Efficiency*, 10(3), 563-576.
- Perko, Z., Topić, D., & Perko, J. (2017) Standardized system for monitoring and control of public lighting networks. Smart Systems and Technologies (SST)- *International Conference 2017*, Accession Number: 17430899.
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855-873. RAZA, Usman; KULKARNI, Parag; SOORIYABANDARA, Mahesh. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, no 2, p. 855-873.
- Sedziwy, A., & Kotulski, L. (2016). Towards Highly Energy-Efficient Roadway Lighting. *Energies*, 9(4), 262.
- Valentová, M., Quicheron, M., & Bertoldi, P. (2015). LED projects and economic test cases in Europe. *International Journal of Green Energy*, 12(8), 843-851.
- Winder, S. (2017). *Power Supplies for LED Driving*. 2nd Edition Elseviere. Oxford, United Kingdom. ISBN: 9780081009253
- Wojnicki, I., Ernst, S., & Kotulski, L. (2016). Economic Impact of Intelligent Dynamic Control in Urban Outdoor Lighting. *Energies*, 9(5), 314.