

**HACIA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LOS SERVICIOS DE ALUMBRADO
PÚBLICO: RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS COMPARATIVOS SOBRE
EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LUMÍNICA APLICADOS A LAS NUEVAS
TECNOLOGÍAS EN ILUMINACIÓN URBANA**

Manuel J. Hermoso Orzáez.
**Ingeniero Municipal Ayuntamiento de Fuengirola y Profesor Area de
Proyectos E.P.S.J (Universidad de Jaén)**

José Ramón de Andrés Díaz.
Profesor-Doctor Area Proyectos (Univesidad de Málaga)

Guillermo Redrado
Vicepresidente de operaciones de ATP Iluminación

Artículo Recibido: 07/07/2015

Artículo Aceptado: 04/09/2015

I Resumen

El empleo de nuevas tecnologías más eficientes energéticamente, aplicadas a la iluminación urbana, se ha comprobado es un tema muy novedoso y de gran trascendencia e interés actualmente. En la mayoría de las ocasiones, se ha abordado, desde un punto de vista profesional o comercial, pero muchas menos veces, desde un punto de vista puramente científico.

La ponencia que presentamos, es el resultado de las investigaciones realizadas en tres estudios, que han sido publicados, en tres revistas científicas y profesionales de gran relevancia. Algunas de ellas con muy alto factor de impacto (Q1) y prestigio profesional, científico y técnico. Se pretende con ello, poner en conocimiento de la comunidad científica, de los profesionales y técnicos, los resultados y conclusiones obtenidos, de una forma absolutamente objetiva.

Nos encontramos actualmente sumergidos en una situación vertiginosa, de cambios constantes, en el campo de la iluminación vial de nuestras ciudades. Los resultados aquí expuestos contribuyen, a aclarar en parte, la difícil tarea de decisión, a la que se enfrentan los técnicos municipales, gestores energéticos y profesionales en general.

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

Los resultados de las investigaciones realizadas, que se pretende exponer con esta ponencia, son el fruto de un riguroso trabajo de evaluación y estudios comparados que pasamos a resumir.

Estudio/Artículo 1

En la última década se han venido realizando, sustituciones de lámparas de descarga de vapor de sodio, por lámparas de halogenuro metálico (HM) con quemador cerámico. Sustitución que venía avalada por las muy interesantes prestaciones lumínicas de estas lámparas y la buena aceptación de las mismas por los técnicos y ciudadanos en general. Nos planteamos comparar sistemas de ahorro y eficiencia energética mediante la instalación de equipos estabilizadores de tensión reductores de flujo en cabecera o bien equipar con balastos electrónicos estas luminarias. Comparando estos equipos de ahorro aplicados a lámparas de HM desde el punto de vista eléctrico, luminotécnico y económico. (Estudio 1).

Nos planteamos en este primer estudio tratar de dar respuesta a las siguientes cuestiones:

¿Cuáles son los sistemas de ahorro y eficiencia energética compatibles o con posibilidad de aplicación real a lámparas de descarga HM con garantías de éxito?.

De entre los sistemas de ahorro y eficiencia energética con posibilidades de aplicación a las lámparas de descarga H.M. ¿Cuál es realmente más eficiente desde el punto de vista energético y lumínico?

¿Existen limitaciones de aplicación en uno u otro sistema?. ¿Qué tanto por ciento realmente de ahorro energético permiten? y ¿podemos obtener en uno u otro caso, reducciones sin límite y sin afectar al funcionamiento de los equipos de encendido?.

Estudio/Artículo 2

Por otro lado y dado el despegue espectacular de la tecnología LED en los últimos años. Nos planteamos la posibilidad de para de luminarias ya instaladas con lámparas de HM, realizar sustituciones punto a punto por esta nueva forma tecnológica. Analizando el cambio, desde el punto de vista eléctrico, luminotécnico y económico. (Estudio 2).

Tratamos de dar respuesta en este segundo estudio a las siguientes cuestiones:

¿Qué porcentaje de ahorro energético seríamos capaces de obtener?

WPSReview International on Sustainable
Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

¿Cómo afecta el cambio a la iluminación de los viales?

¿Es realmente interesante desde un punto de vista económico y financiero emprender las sustituciones?.

¿Estamos en disposición de poder realizar sustituciones masivas de equipos de descarga tradicionales por lámparas LEDs con garantías de éxito?

Estudio/Artículo 3

Por último observamos y analizamos la posibilidad de buscar equipos de ahorro y eficiencia energética que permitieran compatibilizar ambas formas tecnológicas, LED y lámparas de HM. (Estudio 3)

¿Podemos encontrar equipos de ahorro y eficiencia compatibles a las dos formas tecnológicas?

¿Conseguimos reducciones energéticas semejantes a las observadas para lámparas de descarga?

¿Cómo afectan las reducciones de tensión a las prestaciones luminotécnicas de las lámparas LEDs?

¿Es realmente interesante, emprender inversiones en los cuadros híbridos, que alimentan a viales que utilizan las dos formas de iluminación analizadas?

Relación de publicaciones que avalan la ponencia presentada:

Estudio 1/Artículo 1.-

Hermoso, MJ; De Andrés, JR; (2013). "Comparative study of energy- efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps". Energy. 52: 258-264. Available online 7 March 2013 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>)

Estudio 2/Artículo 2.-

Hermoso, MJ; De Andrés JR; (2014) "Análisis comparativo y justificativo para el cambio a leds en instalaciones con lámparas de halogenuro metálico. un paso más hacia la eficiencia energética en iluminación urbana.", Dyna-Bilbao. Marzo- Abril 2014 • Vol. 89 Nº 2. 165-171. (<http://dx.doi.org/10.6036/5803>)

Estudio 3/Artículo 3.-

Hermoso Orzáez MJ, De Andrés Díaz JR. "Análisis y resultados de regular lámparas leds con estabilizadores de tensión-reductores de flujo en cabecera.". Técnica Industrial. Marzo 2014. Vol 2. Nº 305.

WPS RI-SHUR, nº2, 2015, vol.1, ISSN: 2387-1768

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

II Introducción

Desde el Ayuntamiento de Fuengirola, en la línea de los resultados obtenidos en la realización en el año 2009 del POE (Plan de Optimización Energética), en colaboración con la Universidad de Málaga y con la empresa suministradora de los equipos de iluminación ATP se han efectuado diversas experiencias resultado de la puesta en marcha de distintos sistemas de ahorro y eficiencia energética aplicados a la iluminación urbana para lámparas de descarga con halogenuros metálicos (HM) y LED; y que pasamos a exponer a continuación.

En un principio nos planteamos tratar de dar respuesta a algunas de las siguientes cuestiones, mediante los tres estudios que hemos desarrollado:

Dado que nuestro municipio, venía realizando en la última década sustituciones de lámparas de descarga de vapor de sodio, por lámparas de halogenuro metálico (HM) con quemador cerámico, utilizando como soporte las luminarias de la marca ATP. Sustitución que venía avalada por las muy interesantes prestaciones lumínicas de estas lámparas y la buena aceptación de las mismas por los técnicos y ciudadanos en general. Nos planteamos comparar sistemas de ahorro y eficiencia energética mediante la instalación de equipos estabilizadores de tensión reductores de flujo en cabecera o bien equipar con balastos electrónicos estas luminarias. Comparando estos equipos de ahorro aplicados a lámparas de HM desde el punto de vista eléctrico, luminotécnico y económico. (Estudio 1).

Nos planteamos en este primer estudio las siguientes cuestiones:

¿Cuáles son los sistemas de ahorro y eficiencia energética compatibles o con posibilidad de aplicación real a lámparas de descarga HM con garantías de éxito?

De entre los sistemas de ahorro y eficiencia energética con posibilidades de aplicación a las lámparas de descarga H.M. ¿Cuál es realmente más eficiente desde el punto de vista energético y lumínico?

¿Existen limitaciones de aplicación en uno u otro sistema? ¿Qué tanto por ciento realmente de ahorro energético permiten? y ¿podemos obtener en uno u otro caso, reducciones sin límite y sin afectar al funcionamiento de los equipos de encendido?.

Por otro lado y dado el despegue espectacular de la tecnología LED en los últimos años. Nos planteamos la posibilidad de para el tipo de luminarias ATP ya instaladas con lámparas de HM, realizar sustituciones punto a punto por esta nueva forma

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

tecnológica. Analizando el cambio, desde el punto de vista eléctrico, luminotécnico y económico. (Estudio 2).

Tratamos de dar respuesta en este segundo estudio a las siguientes cuestiones:

¿Qué porcentaje de ahorro energético seríamos capaces de obtener?

¿Cómo afecta el cambio a la iluminación de los viales?

¿Es realmente interesante desde un punto de vista económico y financiero emprender las sustituciones?

¿Estamos en disposición de poder realizar sustituciones masivas de equipos de descarga tradicionales por lámparas LEDs con garantías de éxito?

Por último observamos y analizamos la posibilidad de buscar equipos de ahorro y eficiencia energética que permitieran compatibilizar ambas formas tecnológicas, LED y lámparas de HM. (Estudio 3)

¿Podemos encontrar equipos de ahorro y eficiencia compatibles a las dos formas tecnológicas?

¿Conseguimos reducciones energéticas semejantes a las observadas para lámparas de descarga?

¿Cómo afectan las reducciones de tensión a las prestaciones luminotécnicas de las lámparas LEDs?

¿Es realmente interesante, emprender inversiones en los cuadros híbridos, que alimentan a viales que utilizan las dos formas de iluminación analizadas?

Al hilo de lo antes señalado, indicar que actualmente y fruto de las remodelaciones integrales de los viales, se viene dotando a los cuadros, aparte de los equipos de regulación, y protección nuevos, de sistema de telegestión para el control, así como de equipos de ahorro y eficiencia o bien en cabecera o de control y regulación punto a punto.

Actualmente Fuengirola cuenta con 12 cuadros telegestionados de un total de 164 lo que supone un 7,3 %.

Según el Plan de Optimización Energética POE elaborado en 2009, el 86 % de las lámparas del municipio son de nueva tecnología VSAP ó HM, frente a un escaso 8 % de tecnología menos eficiente de mercurio (Ver Fig. 0). En general su calificación según POE es buena.

Actualmente el número de puntos de luz de nueva tecnología Leds ascienda a unos 386 puntos sobre 10.740 puntos de luz, lo que implica 3,6 %.

WPS RI-SHUR, nº2, 2015, vol.1, ISSN: 2387-1768

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)



Fig. 0: Tipo de lámpara según POE en Fuengirola

III Estudios comparativos. Metodología empleada y equipos evaluados

Para tratar de dar respuesta las cuestiones formuladas, no propusimos la realización de estos tres estudios comparativos (publicados en tres revistas de reconocido prestigio a nivel científico, técnico y profesional) utilizando siempre una metodología semejante y que con los equipos de medida y contraste que pasamos a explicar a continuación.

.- Toma de datos eléctrico recogidos a través de los equipos de Telegestión de AFEISA (TELEASTRO 1.6) instalados en los cuadros de cabecera analizados. Estos equipos recogen a intervalos de 15 minutos datos referentes a la tensión, intensidad, potencia Activa, Potencia Reactiva, Energía Activa y Reactiva.

.- Estos datos eléctricos, fueron contrastados con equipos portátiles analizadores de red AR6 de CIRCUITOR para verificar los resultados obtenidos.

.- Realización de mediciones luminotécnicas periódicas, a intervalos semanales, de los parámetros lumínicos de Iluminancia y uniformidad, con equipo luxómetro tipo GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B del Área de Proyectos de Ingeniería de la E.T.S de Ingenieros de la Universidad de Málaga, calibrado y verificado. Se contrastaron las mediciones con otros dos luxómetros. Uno móvil LX-GPS para medida de iluminancia mediante vehículo y GPS marca AFEI SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN S.A propiedad del Ayuntamiento de Fuengirola y un segundo fijo Luxómetro KOBAN

WPSReview International on Sustainable
Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

modelo Digital KL-1330 de los Servicios Técnicos de Mantenimiento del Ayuntamiento de Fuengirola, calibrado y verificado.

- .- Procesamiento de todos los datos recogidos, para su análisis evaluación y posterior discusión.
- .- Análisis económico y financiero de la inversión en los equipos de ahorro y eficiencia instalados y analizados.
- .- Una vez procesados y comparados los datos eléctricos, lumínicos, económicos y de energía, se procedió a su valoración, contraste y discusión para la obtención de las conclusiones y recomendaciones determinadas en este compendio.

Pasamos a describir a continuación los equipos analizados en los tres estudios:

ESTUDIO 1. ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA APLICADOS A LAMPARAS DE DESCARGA DE HALOGENUROS METÁLICOS CON TECNOLOGÍA CERÁMICA. (COMPARATIVE STUDY OF ENERGY-EFFICIENCY AND CONSERVATION SYSTEMS FOR CERAMIC SAVING SYSTEMS FOR CERAMIC METAL-HALIDE DISCHARGE LAMPS).

Para el estudio se seleccionaron dos viales de Fuengirola (Málaga) de características y disposición similar, compuestas de farolas de 7 m de altura con doble luminaria marca ATP modelo Siglo y lámpara de descarga con halogenuros metálicos (Tabla 1 y 2).

| TIPO | POTENCIA (W) | TEMPERATURA DE COLOR (°K) | FLUJO (Lm) | EFICACIA LUMINOSA (Lm/W) |
|------------------------------------|--------------|---------------------------|------------|--------------------------|
| Master City WHITE CDO-TT/ 828 E40 | 150 | 2800 | 13.500 | 110 |
| Master City WHITE CDO- TT/8 28 E40 | 100 | 2800 | 10.700 | 109 |

Tabla 1. Tipo de lámpara HM.

| | SISTEMA REGULACIÓN | POTENCIA TOTAL | LUMINARIAS REGULADAS | POTENCIA LÁMPARA |
|-----------|--------------------------------|----------------|----------------------|------------------------|
| C.CONDESA | BALASTO ELECTRONICO DOB. NIVEL | 3.600 | 24 | 150 |
| MALAGA | ESTABILIZ-REGULADOR CABECERA | 12.600 | 99 | 54 (150W) - 45 (100 W) |

WPSReview International on Sustainable
Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

Tabla 2. Balance de potencias por cuadro y sistema de regulación empleado

ESTUDIO 2. ANALISIS COMPARATIVO Y JUSTIFICATIVO PARA EL CAMBIO A LEDS EN INSTALACIONES CON LAMPARAS DE HALOGENURO METÁLICO. UN PASO MÁS HACIA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ILUMINACIÓN URBANA. (COMPARATIVE AND SUPPORTING CHANGE TO LEDS ANALYSIS IN SYSTEMS WITH METAL HALIDE LAMPS. ANOTHER STEP TOWARDS ENERGY EFFICIENCY IN URBAN LIGHTING)

Para el estudio se seleccionó un vial residencial, en la localidad de Fuengirola (Málaga), con un ancho total de 12 m, (calzada de 6 m, y acerados de 3 m). Se instalaron 45 farolas tipo Villa (Marca ATP) de 3,5 m de altura, equipadas con lámparas de HM de 150 W, (fig.1). Posteriormente se sustituyeron por otras 45 de 51 W equipadas con LEDs, marca CREE fabricados por ETI S.A, (fig.2) (Tabla.3)



Fig.1. Características de la Luminaria ATP mod Villa lámpara HM -150 W. (Fuente Catalogo ATP)



Fig. 2. Características de la Luminaria ATP mod Villa y la lámpara LED 51 W. (Fuente Catalogo ATP)

| Tipo lámpara | Marca | Potencia (W) | T° Color (°K) | Flujo Luminoso (Lm) | Eficacia luminosa (Lm/W) | Vida Util (h) |
|--------------|-------|--------------|---------------|---------------------|--------------------------|---------------|
|--------------|-------|--------------|---------------|---------------------|--------------------------|---------------|

WPSReview International on Sustainable
Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

| | | | | | | |
|---|---------|-----|-------|--------|----|--------|
| <i>HM-MASTER CITY CDO- TT/828</i> | PHILIPS | 150 | 2.800 | 13.500 | 90 | 15.000 |
| <i>ETILED</i> | ETI S.A | 51 | 4.000 | 4.059 | 80 | 50.000 |

Tabla 3. Características de las lámparas sobre luminaria ATP tipo VILLA a comparar con la sustitución
(Fuente Catálogos comerciales)

ESTUDIO 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE REGULAR LÁMPARAS LEDS CON ESTABILIZADORES-REDUCTORES DE FLUJO EN CABECERA. (ANALYSIS AND RESULTS OF CONTROLLING LEDS LAMPS WITH LIGHTING FLOW DIMMER-STABILISERS)

Para el estudio se seleccionó un vial tipo residencial, situado en el centro urbano de la localidad de Fuengirola (Málaga). Concretamente, en la calle Héroes Dos de Mayo, con un ancho total de 8 m, formado por calzada de 3 m, y dos acerados de 2,5 m .

Se instalaron nueve farolas de 3,5 m de altura, de las mismas características y prestaciones, con una disposición al tresbolillo cada 15 m de interdistancia (distancia longitudinal entre puntos de luz consecutivos, a un lado y otro del acerado del vial).

Las nueve luminarias, objeto del presente estudio eran de la marca ATP modelo Villa y vienen equipadas con lámpara LED, de la marca ETILED, con 51 W de potencia y diodos LED fabricados por CREE.(Tabla 4).

| <i>Tipo lámpara LED</i> | <i>Marca Lampara</i> | <i>Marca LED</i> | <i>Potencia (W)</i> | <i>T° Color (°K)</i> | <i>Flujo Luminoso (Lm)</i> | <i>Eficacia lumiosa (Lm/W)</i> | <i>Vida Util (h)</i> |
|-----------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|--|--------------------------|
| <i>ETILED</i> | ETI.S.A | CREE | 51 | 4.000 | 4.059 | 80 | 50.000 |

Tabla 4. Características de las fuentes de luz. Fuente: Catálogo del fabricante ETI S.A

El sistema de regulación y ahorro, objeto del presente estudio consta de:

.- Un Estabilizador de tensión -reductor de flujo luminoso, situado en la cabecera del cuadro. Modelo ILUEST (KIT NET + 20 - 4 LCD) fabricado por SALICRU.

.- Controlador universal para módulo LED, marca DIMILED, instalados en cada una de las luminarias.

IV Resultados

Exponemos a continuación un resumen de los resultados obtenidos en cada uno de los tres estudios objetos de este compendio de publicaciones a saber:

RESULTADOS ESTUDIO 1. ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA APLICADOS A LAMPARAS DE DESCARGA DE HALOGENUROS METÁLICOS CON TECNOLOGÍA CERÁMICA

BALANCE ELÉCTRICO

- Balastos electrónicos regulables - Camino de la Condesa

En las 24 luminarias de 150 W, reguladas con balasto electrónico de doble nivel, se registró una reducción media de la potencia activa del 40% (figura 3), comprobando que no existía consumo de reactiva.

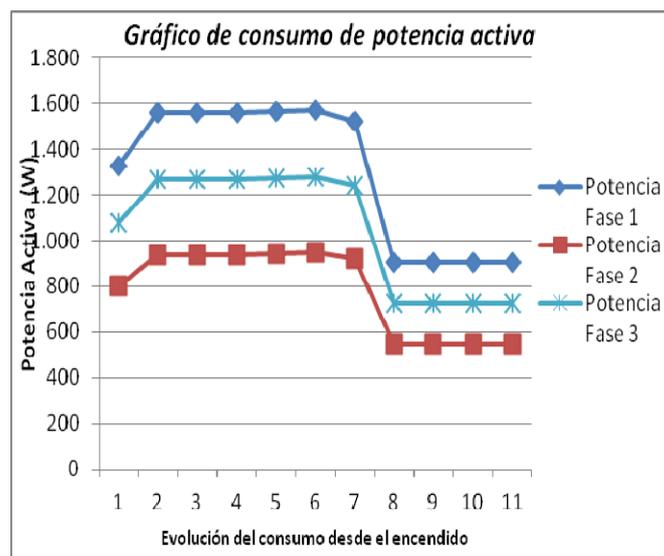


Fig. 3. Gráfico de consumo de potencia activa

- Estabilizador de tensión - Calle Málaga

Cuando actuó el estabilizador de tensión se obtuvo una reducción media anual del 20 % de potencia activa (figura 4). Este ajuste venía condicionado por la caída de tensión máxima admisible reducida, limitada a la tensión mínima, para evitar que se produjeran problemas de encendido.

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

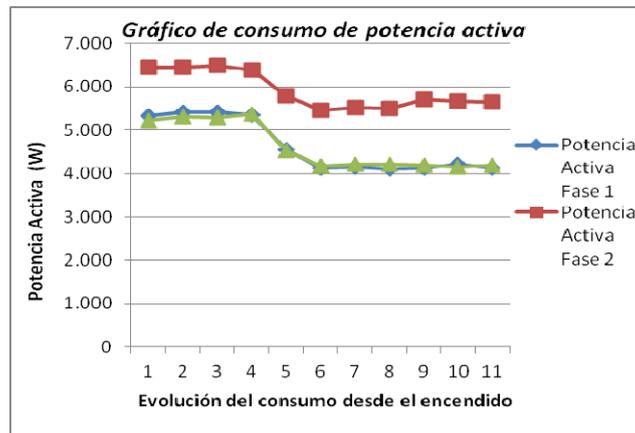


Fig. 4. Gráfico de consumo de potencia activa

BALANCE ENERGÉTICO.

En la Tabla 6 y 7 se muestra resumen del balance energético medio, a 12 meses, entre sistemas de regulación en base a los datos obtenidos de energía activa (Kwh) y reactiva (KVAh). Tomando los precios comerciales del estabilizador de tensión y del balasto electrónico de doble nivel se calculó el coste de inversión inicial por W, así como el retorno de la inversión “pay-back”. Precio energía eléctrica estimado de 0,140069 Euros /KWh.

| DATOS MEDIOS TOMADOS A INTERVALOS DE 15 | ANTES | DESPUÉS | |
|--|---|---------|----------|
| Energía Activa Media (KWh) | 2,7 | 1,5 | 44 % |
| Energía Reactiva Media (KVarh) | 0,9 | 0,9 | 0 % |
| Coste medio en Euros cada 15 min | 0,37818 | 0,21178 | |
| Ahorro medio en Euros cada 15 min | | | 0,166402 |
| Inversión Total | 3600 Euro (24 Balastos * 150 Euros/Balasto) | | |
| Potencia Total | 3600 W (24 luminarias de 150 W) | | |
| Inversión por W instalado | 1 Euro/W | | |
| Inversión por punto luz instalado | 150 Euro/punto de luz | | |
| Retorno de la inversión por W | 90,14 min | | |
| Retorno de la inversión por punto de luz | 13.521 min (225 horas) | | |
| Retorno de la inversión estimada en años | 6 años | | |

Tabla 6 Balance energético y plazo de recuperación de la inversión para sistema de ahorro con Balastos electrónicos regulables-Calle Camino de la Condesa

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

| DATOS MEDIOS TOMADOS A INTERVALOS DE 15 MINUTOS | ANTES | DESPUÉS | REDUCCIÓN |
|---|--|---------|-----------|
| | DE | DE | |
| Energía Activa Media (KWh) | 4,3 | 3,5 | 18,6 % |
| Energía Reactiva Media (KVarh) | 1,55 | 0,95 | 38,71% |
| Coste medio en Euros cada 15 min | 0,60223 | 0,49018 | |
| Ahorro medio en Euros cada 15 min | | | 0,11205 |
| Inversión Total | 4500 Euro | | |
| Potencia Total | 12600 W (45 luminarias de 100 W y 54 de 150 W) | | |
| Inversión por W instalado | 0,35714 Euro/W | | |
| Inversión por punto luz instalado | 45 Euro/punto de luz | | |
| Retorno de la inversión por W | 47,62 min | | |
| Retorno de la inversión por punto de luz | 4.762 min (79,36 horas) | | |
| Retorno de la inversión estimada en años | 3 años | | |

Tabla 7. Balance energético y plazo de recuperación de la inversión para sistema de ahorro con Estabilizador-regulador de flujo en cabecera

BALANCE LUMINOTÉCNICO

Conforme a los resultados de las mediciones a pie de campo, se recoge en la Tabla 8

| CALLE MÁLAGA | SIN REDUCCIÓN | CON REDUCCIÓN | % VARIACIÓN |
|------------------------------------|---------------|---------------|-------------|
| Iluminancia media (lux). Em | 21,4 | 15,25 | 21,63 |
| Uniformidad media Um | 0,78 | 0,74 | 0,05 |
| Uniformidad extrema Ug | 0,65 | 0,60 | 0,07 |
| CALLE CAMINO DE LA CONDESA | SIN REDUCCIÓN | CON REDUCCIÓN | % VARIACIÓN |
| Iluminancia media (lux). Em | 38,8 | 19,61 | 47,31 |
| Uniformidad media Um | 0,56 | 0,55 | 0,01 |
| Uniformidad extrema Ug | 0,38 | 0,37 | 0,02 |

Tabla 8. Balance luminotécnico comparativo realizado con luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B1330

De los balances luminotécnicos, se desprende, que las reducciones de iluminancia expresadas en tanto por ciento de variación, son aproximadamente el doble (47%) en el caso de reducciones con sistema de regulación con balastos electrónicos, que las reducciones con estabilizadores de tensión (21%), coincidiendo con los porcentajes de reducción y ahorro de energía activa, respectivamente¹³.

¹³ Nota: Indicar que las diferencias de iluminancia, se debe a que las luminarias que llevan el balasto electrónico, utilizan una óptica mejorada con un bloque integral, que aumenta significativamente la

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

Otro elemento importante a evaluar, es si se produce alguna pérdida en la calidad de la luz producida. En este caso, la temperatura de color de las lámparas, usando ambos sistemas, prácticamente no evidencia diferencia importantes. En ambos casos en el momento de la reducción, la temperatura de color, pasa a ser más fría (fig. 5 y 6), y se puede observar una tendencia hacia una “luz verdosa”. Además de lo anterior, no afectan de forma apreciable a la uniformidad media y extrema (Tabla 8).

CAMINO DE LA CONDESA (Balasto electrónico de doble nivel)



Fig. 5. Comparación de percepción de color con balance blancos

luminosidad. Mientras que las luminarias reguladas con el Estabilizador de cabecera, llevan el clásico difusor de lamas, mucho mas ineficiente lumínicamente. No obstante los resultados obtenidos en cuando a tanto por ciento (%) de reducción son consecuentes independientemente de la óptica empleada.

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

CALLE MÁLAGA (Estabilizador de tensión en cabecera)



Fig. 6. Comparación de percepción de color con balance de blancos

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO DE LAS INVERSIONES

.- Sistema de regulación con balastos electrónicos de doble nivel

Desde el punto de vista de la rentabilidad financiera de la inversión, para 8 horas de funcionamiento medio diario, obtenemos una tasa de rentabilidad de la inversión a 5 años (TIR) del -8% .Esta tasa de rentabilidad, tan baja, por debajo del coste del capital o tipo de interés financiero, ($TIR < i$) ($-8\% < 5\%$) pone en cuestión y genera importantes dudas sobre la rentabilidad de la inversión desde el punto de vista financiero. (Ver Tabla 9)

El balance comparativo de los indicadores, para 8,7 y 6 horas de funcionamiento diario del equipo de ahorro se recoge en la tabla 10 y se verifica que a menor número de horas de funcionamiento los resultados son más desfavorables.

| Horas de funcionamiento | VAN | VAN | Pay-Back (simple)-Años | Pay-Back | TIR | IBC |
|-------------------------|-----------|------------|------------------------|-------------------|-----------|-----------|
| | (5años) | (9 años) | | (financiado)-Años | (5años) | (5años) |
| 8 | - 4187,83 | 1210,5 | 6,48 | 9 | -8% | 0,67 |
| 7 | - 5237,29 | -512,44 | 7,41 | 10 | -12% | 0,58 |
| 6 | - 6289,10 | -2239,21 | 8,64 | 12 | -16% | 0,5 |

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

Tabla 9 .Análisis de la inversión con balastos electrónicos regulables para 8,7 y 6 horas de funcionamiento

.- Sistema de regulación con estabilizador -reductor de flujo.

Suponiendo 8 horas de funcionamiento diario del equipo y considerando un tipo de interés o coste del capital del (i) del 5%, nos lleva a obtener un VAN positivo, a partir del tercer año. El periodo de retorno de la inversión en este caso se ha calculado entorno a los 3,44 años. El resultado obtenido para la TIR a 5 años, es del 14 %, un valor muy superior al coste del capital i, [(TIR=14%) > (i =5)], lo que sin duda apoya la rentabilidad financiera de la inversión (ver Tabla 10)

El balance comparativo de los indicadores, para 8,7 y 6 horas de funcionamiento diario del equipo de ahorro se recoge en la tabla 12 y se verifica que a menor número de horas de funcionamiento, baja la rentabilidad de la inversión alargándose el periodo de retorno de la misma

| Horas de funcionamiento | VAN (5 años) | VAN (6 años) | Pay-Back (simple)- Años | Pay-Back (financiado)- Años | TIR (5 años) | IBC (5 años) |
|-------------------------|----------------|----------------|-------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|
| 8 | 1162 | 2139 | 3,44 | 4 | 14% | 1,26 |
| 7 | 457 | 1311 | 3,93 | 5 | 9% | 1.10 |
| 6 | -250 | 482 | 4,58 | 6 | 3% | 0,94 |

Tabla 10. Análisis de la inversión con Estabilizador de Tensión en cabecera para 8,6 7 horas de funcionamiento

RESULTADOS ESTUDIO 2. ANALISIS COMPARATIVO Y JUSTIFICATIVO PARA EL CAMBIO A LEDS EN INSTALACIONES CON LAMPARAS DE HALOGENURO METÁLICO. UN PASO MÁS HACIA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ILUMINACIÓN URBANA.

BALANCE ELÉCTRICO

Los resultados comparativos al sustituir lamparas de HM de 150 w por LEDs de 51 W. (Ver tabla 11)

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

| PARAMETROS 45 LAMPARAS HM 150 W | | | | | | PARAMETROS 45 LAMPARAS LEDS 51 W | | | | |
|-------------------------------------|------------|---------|----------|-----------------------|--------|-------------------------------------|---------|----------|----------------|--------|
| (Mediciones en cabecera del cuadro) | | | | | | (Mediciones en cabecera del cuadro) | | | | |
| FASES | Intensidad | Tensión | Potencia | Potencia | Factor | Intensidad | Tensión | Potencia | Potencia | Factor |
| | | | Activa | Reactiva Inductiva | | | | | de Potencia | |
| | | | (Kw) | (Kvar L) | | | | (Kw) | (Kvar L) | |

| FASES | % de reducción | |
|-------|----------------|-----------------------------|
| | Potencia Act | Potencia React Inductiva |
| | (Kw) | (Kvar L) |
| | L1 | 61,21% |
| L2 | 64,70% | 100,00% |
| L3 | 61,01% | 100,00% |

Tabla 11. Resultados de las mediciones eléctricas y % de reducción.

Como podemos ver en la tabla 11, las reducciones de potencia obtenidas son superiores al 60%, un valor que, como veremos más adelante, es muy elevado y por tanto va a permitir una recuperación de la inversión en poco tiempo de la nueva instalación.

BALANCE LUMINOTÉCNICO.

Los resultados comparativos al realizar las mediciones antes y después de la sustitución se contrastan en la tabla 12

| BALANCE LUMINOTÉCNICO CALLE SAN PABLO. Método de los Nueve puntos conforme REAL DECRETO 1890/2008, de 14 de noviembre ITC-EA-07 | | | | | |
|--|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|
| | LAMPARA DE HM 150 W | | LAMPARA LEDs 51 W | | VARIACIÓN REAL% |
| | CALCULOS TEORICOS | MEDICIÓN REAL IN SITU | CALCULOS TEORICOS | MEDICIÓN REAL IN SITU | |
| Iluminancia media (lux) -Em | 12,2 | 12,18 | 10,6 | 11,12 | +8,70% (+0.1,06) |
| Uniformidad media- Um | 0,31 | 0,48 | 0,13 | 0,35 | +27,08 % (+0.13) |
| Uniformidad extrema- Ug | 0,11 | 0,28 | 0,05 | 0,15 | +46.4% (+0.13) |

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

Tabla 15. Balance luminotécnico realizado con luxómetro GOSSEN.

En las figuras 7 y 8. se realiza una evaluación de la temperatura de color, mediante fotografía en la que se ha forzado el balance de blancos. Se observa que las temperaturas de color son distintas con las lámparas de HM de 150 W, blanco cálido, frente al color blanco frío de los LEDs. Esto puede explicarse debido a que en general, los LEDs fríos tienen un mayor rendimiento lm/W que los LEDs cálidos. Los residentes en la zona en la que se ha producido la sustitución no han manifestado (después de más de un año) ninguna incomodidad por el cambio de temperatura de color, por lo que lo admitimos como válido.

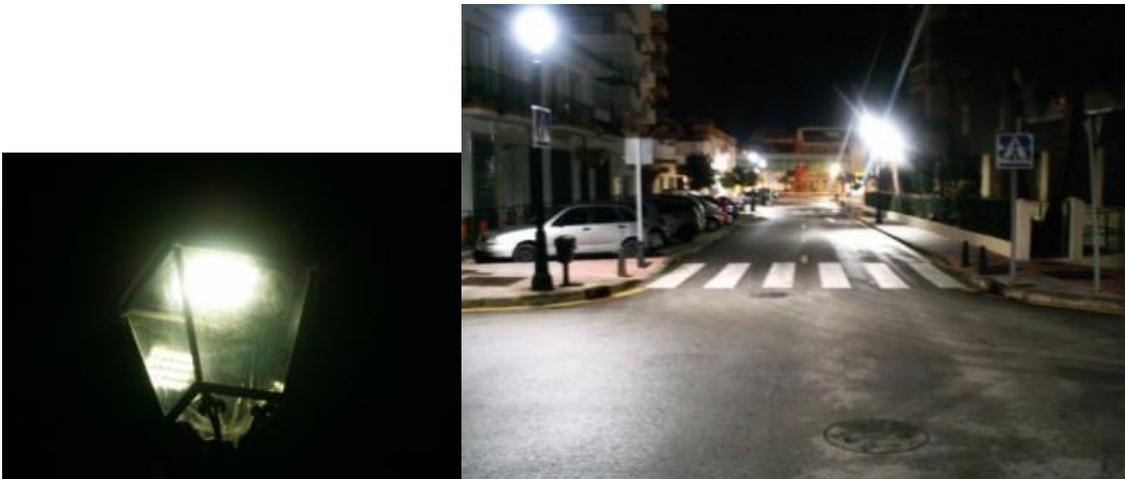


Fig. 7. Fotografía del vial y detalle de lámpara LED de 51 W



WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

Fig.8. Fotografía del vial y detalle de lámpara de HM de 150 W .

BALANCE ENERGETICO COMPARATIVO Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVERSIÓN. ESTUDIO DE AMORTIZACIONES Y RENTABILIDAD

Para el análisis del balance energético y económico, así como para la justificación de la inversión consideraremos que la sustitución de las 45 lámparas de HM por LED's suponen unos costes de inversión de 13.500 Euros (45 luminarias x 300 Euros / luminaria = 13.500 Euros)¹⁴. La tabla 16 muestra el análisis de la rentabilidad económica para 12 horas de funcionamiento

| PARA EL CAMBIO DE 45 LAMPARAS DE HM DE 150 W A LEDS DE 51 W | | | | | | |
|---|--------------------------|----------|----------|----------|------------|-----------------|
| COSTE DE LA INVERSIÓN | 13.500 € | AÑOS | | | | |
| COSTE DEL CAPITAL (i) | 5% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Cuasi Rentas Anuales (Q) | 3.904,05 | 4.021,18 | 4.141,90 | 4.266,07 | 4.394,06 |
| CALCULAMOS EL VAN para | Años | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Indice actualizado | $(1+i)^n$ | 1,05 | 1,1 | 1,16 | 1,22 | 1,28 |
| Cuasirentas Anuales (Q) afectadas por (i) | $Q/(1+i)^n$ | 3.718 | 3.647 | 3.578 | 3.510 | 3.443 |
| Sumatorio Quasirentas Anuales | $\sum Q/(1+i)^n$ | -9.782 | -6.135 | -2.557 | 953 | 4.395,97 |
| VAN a 5 años | 4.395,97 | | | | | |
| Plazo de Recuperación | 3,67 | | | | | |
| Tasa Interna de Rentabilidad (T.I.R) | 15,86% | | | | | |
| Indice Beneficio Coste (IBC) | 1,33 | | | | | |

Tabla 16. Análisis de la rentabilidad de la Inversión y amortización afectada por el coste del dinero (para un tipo de interés del 5%).

Vemos que la rentabilidad de la inversión es clara. Se obtiene un Pay-Back simple a 3'67, un Tasa Interna de Rentabilidad a 5 años del 15'86% y un Índice Beneficio Coste

¹⁴ La justificación del desglose descompuesto para la sustitución de equipos sería:

219 Material equipo LED 51 W+ 036 € Mano de obra oficial peón electricista 1 h+45 € Camión grúa con canasta 1 h =Total 300 €/luminaria

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

a 5 años de 1'33. Se ha tomado como referencia el precio de compra del kW.h por el Ayuntamiento a la empresa comercializadora. En las conclusiones presentaremos los resultados comparativos para simulaciones a 12, 10 y 8 horas de funcionamiento conforme a la tabla 17.

| Horas de funcionamiento | VAN | Pay-Back (simple)-Años | Pay-Back (financiado)-Años | TIR (5 años) | IBC (5 años) |
|-------------------------|------------------|------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Sistema de ahorro | (5 años) | | | | |
| 12 | 4.395,97 | 3,67 | 4 | 15,86% | 1,33 |
| 10 | 1.414,30 | 4,5 | 5 | 9% | 1.10 |
| 8 | -1.537,66 | > 5 | 6 | 1% | 0,89 |

Tabla 17. Estudio de rentabilidad de la inversión para cambio a LED

RESULTADOS ESTUDIO 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE REGULAR LÁMPARAS LEDS CON ESTABILIZADORES-REDUCTORES DE FLUJO EN CABECERA.

BALANCE ELÉCTRICO

Con el equipo analizador de red AR6, se realizaron, mediciones con y sin reducción de tensión de los parámetros eléctricos por fase (tensión, intensidad, potencia activa, reactiva capacitiva e inductiva, factor de potencia y armónicos de orden impar). Se compararon los valores obtenidos con y sin reducción de tensión. Las mediciones se realizaron para el circuito de LEDs, considerando cada fase del circuito cargada con tres de las nueve lámparas LEDs de 51 W.

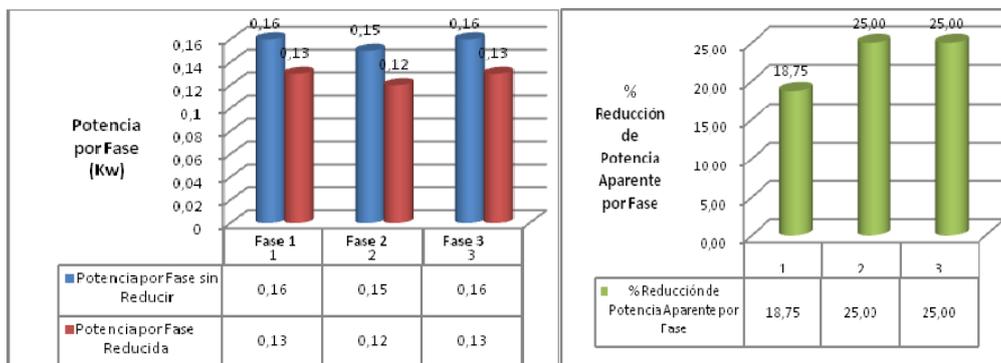


Fig.9. Potencia activa por fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

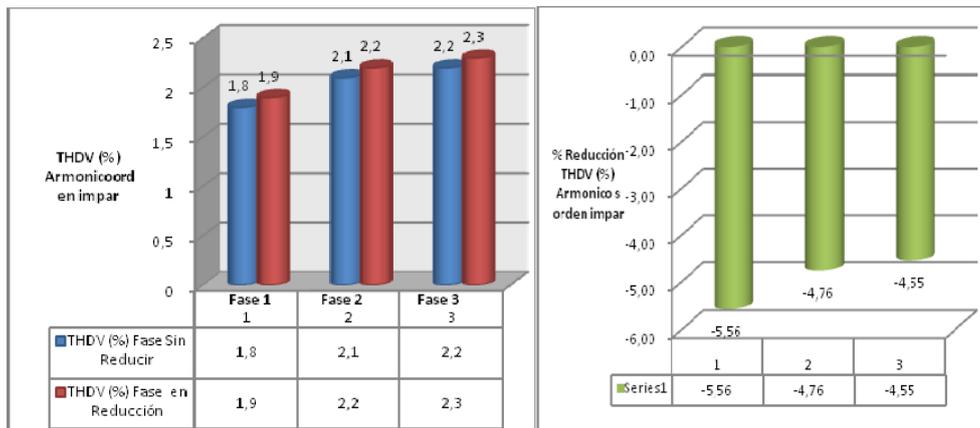


Fig.10. Análisis de Armónicos % THD de orden impar por fase, medidos con el analizador AR6 con y sin reducción.

Destacar por un lado que al entrar el estabilizador conseguimos una reducción de la potencia en torno al 20 % (fig.9), con un incremento de los armónicos conforme del 4,5 % (fig.10), y una distorsión de la forma de onda de la intensidad conforme (fig.11)

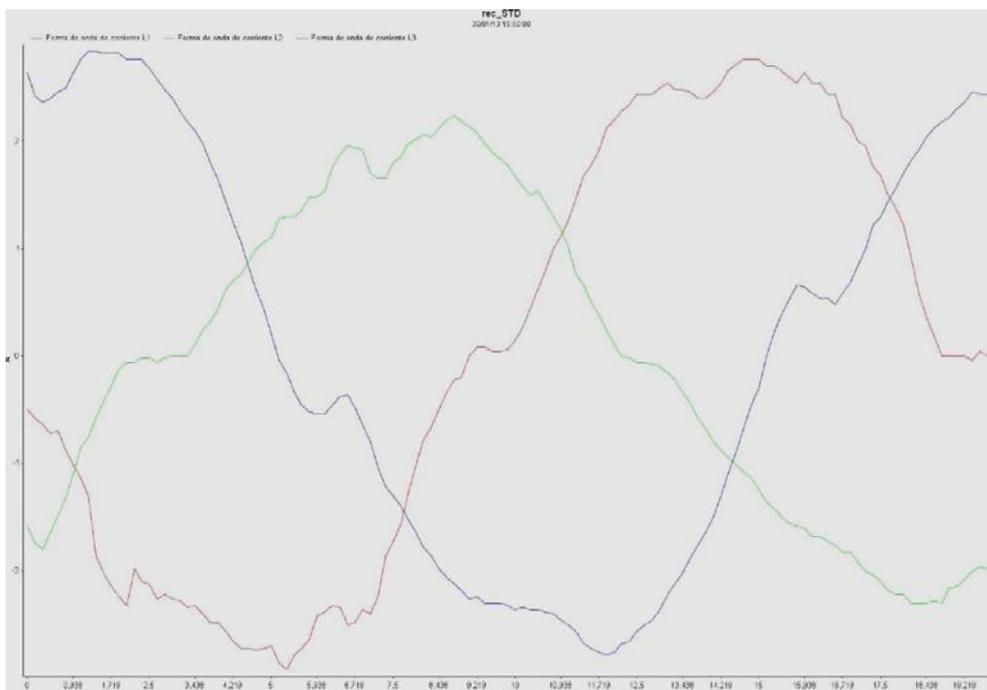


Figura 11. Forma de onda de la Intensidad (contaminada por los armónicos impares)

BALANCE LUMINOTÉCNICO

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

Observar como al entrar el estabilizador de tensión, reduciendo la tensión y la potencia en un 20 %, se observa una bajada en los niveles de iluminancia media en el mismo porcentaje. Aspecto que queda verificado al contrastar las mediciones con los dos luxómetros y resultados prácticamente iguales. Tablas 18 y Figura 12.

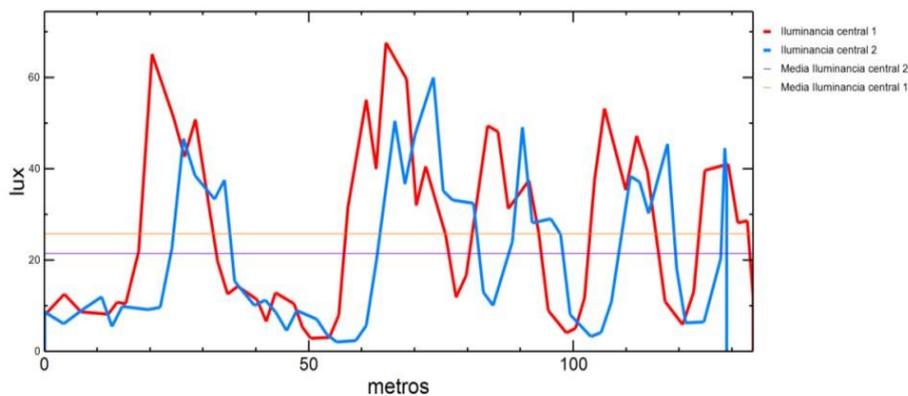


Fig.112 Representación gráfica de iluminancias antes y después de estabilizar la tensión. Color rojo representa las iluminancias medidas sin reducción de tensión y en azul las iluminancias medidas con tensión reducida..

| BALANCE LUMINOTECNICO | | | | | |
|--------------------------|-----------|-------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| CALLE HEROES DOS DE MAYO | | | | | |
| | | | MEDICIÓN REAL SIN REDUCCIÓN | MEDICIÓN REAL CON REDUCCIÓN | % VARIACIÓN |
| Iluminancia media (lux) | Em | 15,3 | 19,26 | 15,12 | 21,5 |
| Uniformidad media | Um | 0,4 | 0,37 | 0,35 | 5,5 |
| Uniformidad extrema | Ug | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 4,5 |

Tabla 21 .Balance luminotécnico comparativo realizado con luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B.

V Conclusiones y discusión

A tenor de los datos obtenidos en estos tres estudios y para el tipo de equipos probados, podemos concluir que:

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

A día de hoy, comienza ya a ser interesante desde el punto de vista eléctrico, energético, luminotécnico, y económico-financiero la implantación progresiva en nuestras ciudades de la iluminación vial utilizando como base la tecnología el LED.

Se observan muy buenos rendimientos luminotécnicos, casi nulo consumo de energía reactiva, aunque con un ligero aumento de la contaminación por armónicos y rentabilidades económico-financieras que empiezan a ser interesantes, y proporcionales al aumento de horas de funcionamiento de los equipos. (Ver tabla 17)

No obstante, pensamos que no es recomendable aún, la sustitución masiva de las actuales lámparas de descarga HM, que utilizan tecnología cerámica y que tuvieron una gran acogida en la última década con una fuerte implantación en nuestras ciudades, por tecnología LED. Básicamente porque se espera aún y muy probablemente a corto y/o medio plazo, una mejora de sus prestaciones tecnológicas, luminotécnicas y económicas. Debiendo ser prudentes, pues aún no se tienen datos concretos de la durabilidad real de estos equipos. Debiendo prestar especial atención al incremento de la contaminación armónica provocada por estos equipos debido fundamentalmente a la base electrónica con la que están fabricados, aspecto a tener en cuenta en un escenario futuro de utilización masiva de estos equipos.

En el caso de instalaciones con lámparas HM, que utilizan tecnología cerámica resulta muy interesante, desde el punto de vista inversor, económico y financiero, la aplicación de equipos de ahorro en cabecera con estabilizadores de tensión-reductores de flujo. Al menos por ahora, en espera de que los balastos electrónicos como equipos de altísimo potencial de ahorro energético, (como ha quedado comprobado en este estudio), mejoren su precio, prestaciones y fiabilidad, al menos para los equipos probados en este estudio.

Se desprende del presente estudio 1, que aunque los balastos electrónicos probados, de primera marca y calidad, instalados punto a punto, pueden alcanzar niveles de ahorro y eficiencia energética muy superiores a los estabilizadores de tensión. Son equipos, todavía caros, muy delicados, y que presentan una alta sensibilidad a la temperatura y a las sobretensiones, aspecto que queda abierto como mejora tecnológica al menos para las luminarias y equipos probados.

Por otro lado el principal inconveniente de los equipos estabilizadores de tensión analizados, está en la limitación en la reducción de tensiones en cabecera, debido a las caídas de tensión de final de línea en los circuitos. Este fenómeno puede llegar a provocar el apagado de las lámparas de HM, si se reduce la tensión, por debajo de los

WPSReview International on Sustainable Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

208 ± 5 V. Aspecto éste fundamental y que viene a limitar los tantos por ciento de reducción en los consumos y por supuesto el ahorro. (Estudio 1).

Es muy destacable, la alta rentabilidad financiera y económica de estos equipos, que aumenta proporcionalmente al aumentar las horas de funcionamiento medio del alumbrado (ver tabla 10)

Como conclusión final obtenida en el tercer estudio y artículo del presente compendio, se ha podido comprobar que es posible regular el flujo luminoso de las lámparas LED con equipos estabilizadores de tensión en cabecera. Con un pequeño driver instalado en la luminaria, las lámparas LEDs, son capaces de detectar las caídas de tensión, a las que se las somete desde la cabecera de los cuadros y actuar reduciendo el flujo luminoso. Consiguiendo reducciones de potencia y depreciaciones lumínicas, en el mismo tanto por ciento. Consiguiendo ahorros semejantes, sin limitaciones de apagado y con control nulo de fallos. (Estudio 3).

VI Bibliografía

AAE. Agencia Andaluza de la Energía. (2011). "Guía de ahorro y eficiencia energética en municipios"; Sevilla SE-232-2011. www.agenciaandaluzadelaenergia.es

.- Alex H, W. Lee. (2000). "Verification of electrical energy savings for lighting retrofit using short- and long-term monitoring". Energy Conversion & Management. 41:1999-2008.

.- Atkinson B. A, McMahon J. E., Nadel M. (1993). "A review of U.S. and Canadian lighting programs for the residential, commercial, and industrial sectors". Energy 18:145-158, (doi: 10.1016/0360-5442(93)90098-X)

.- CIE. Publicación N ° 81. (1989). "Mesópica fotometría: historia, problemas y soluciones prácticas".

.- CIE Report 194:2011. "On site Measurement of the photometric properties of the road and tunnel lighting". ISBN 978 3 90196 92 3

.- CIE Report 115:1995. "Recommendations to illuminate roads for motorized vehicles and pedestrian transit"

WPSReview International on Sustainable
Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

.- CIE 177:2007 "Rendimiento de colores de la luz blanca de LED" . ISBN 978 3 901 906 57 2

.- Di Stefano J,(2000).“Energy efficiency and the environment: the low-consumption lighting potential to save energy and reduce carbon dioxide emissions at the University of Melbourne, Australia,”. Energy. 25: 823-839

.- Doulos L. , Tsangrassoulis A., Topalis F, (2008). “Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts”.Energy and Buildings. 40:36-50.

.- Gil-de-Castro A, Moreno Muñoz A, Larsson A, et al. 2012. “LED Street lighting: A power quality comparison among street light technologies”. Lighting Research and Technology, 2012.Vol.0. p.1-19. 1 (doi: 10.1177/1477153512450866).

.- Hermoso Orzáez MJ, de Andrés Díaz JR, (2013). "Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps". Energy. 52: 258-264. Available online 7 March 2013 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>)

.- Inspect Report TRIDONIC. Customer Huxley S.L RMA 400168818. Report day 27-02-12

.- Khan N, Abas N. (2011). “Comparative study of energy saving light sources”. Renewable and Sustainable Energy reviews.15:.296 -309

.- Kostic M, Djokic L.(2009).”Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting”. Energy. 34: 1565-1572. (doi: 10.1016/j.energy.2009.06.056)

.- Li D. H.W.,. Cheung K.L, Wong S.L., Lam T. N.T (2010).” An analysis of energy-efficient light fittings and lighting controls”. Applied Energy. 87:558–567.

.- Mahlia T.M.I., Razak H. Abdul,. Nursahida M.A. (2011). “Life cycle cost analysis and payback period of lighting retrofit at the Universityof Malaya”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 15 : 1125 – 1132.

.- Mahlia T.M.I. ,. Said M.F.M,. Masjuki H.H, Tamjis M.R. (2005). “Cost-benefit analysis and emission reduction of lighting retrofits in residential sector” Energy and Building.37

WPSReview International on Sustainable
Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

:573-678

.- Mahapatra S. Chanakya H.N, Dasappa S., (2009). "Evaluation of various energy devices for domestic lighting in India: Technology, economics and CO2 emissions" *Energy for Sustainable Development*, 13: 271-279, ISSN 0973-0826, (doi:10.1016/j.esd.2009.10.005)

.- Martinot E, Borg N.(1999) "Efficient lighting programs of experience and lessons from eight countries" *Energy Policy*. 26: 1071-1081.

.- Mills E, Piette M. A.(1993). "Advanced energy-efficient lighting systems: progress and potential". *Energy*. 18: 75-97. (doi: 10.1016/0360-5442(93)90092-R)

.- Papagiannis G, Dagoumas A, Lettas N, Dokopoulos P. (2008). "Economic and environmental impacts from the implementation of an intelligent demand side management system at the European level". *Energy Policy*. 36: 163-180

.- Pousset N, Rougié B, Razet. A. (2010). "Impact of current supply on LED colour ". *Lighting Research and Technology*. 42: 371-383. (doi: 10.1177/14771535103733159)

.- Radulovic D, Skok S, Kirincic V. (2011). "Energy efficiency public lighting management in the cities". *Energy*. 36: 1908 -1915.(doi: 10.1016/j.energy.2010.10.016)

.- Rea M S, Bullough JD, Freyssinier JP et al. (2004) "A proposed unified photometry system.". *Lighting Research and Technology*. 36: 85-111.

.- Rea M.S. (2010). "The future of LED lighting: Greater benefit or just lower cost". *Lighting Research and Technology*.42:370. (doi:10.1177/1477153510390978)

.- Reusel KV. (2008). "A look ahead at energy-efficient electricity applications in a modern world." <www.ect2008.com> ECT conference. Bergen, Norway.

.- Russell L.P.(1998.) "A simple cost estimation technique for improving the appearance and security of outdoor lighting installations" *Building and Environment*. 33: 79-95.

.- Ryckaert W.R, SmetK. A.G., Roelandtsl .A.A., Van Gils M., Hanselaer P., (2012).Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation, *Energy and Buildings*, 49: 429-436, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2012.02.042.

WPSReview International on Sustainable
Housing and Urban Renewal (RI-SHUR)

- .- Saunders H. D, Tsao J.Y. (2012). "Rebound effects for lighting". Energy Policy. 49:477-478. (doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.050).
- .- Smet K.A.G., Ryckaert W.R., Pointer M.R., Deconinck G., Hanselaer P., (2012). "A memory colour quality metric for white light sources", Energy and Buildings, 49: 216-225, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2012.02.00
- .- Svilainis L., (2008) ."LED directivity measurement in situ", Measurement, 41:647-654, ISSN 0263-2241, (doi:10.1016/j.measurement.2007.09.003)
- .- Villanueva I, Lázaro I, Anzures J. (2012). "Reliability analysis of LED-based electronic devices". Procedia Engineering. 35: 260–269. (doi 10.1016/j.proeng.2012.04.189)
- .- Wen-Shing S, Chih-Hsuan T, Yi-Han H,(2011). "Simulating the Illuminance and Efficiency of the LEDs Used in General Household Lighting", Physics Procedia, 19: 244-248, ISSN 1875-3892, (doi: 10.1016/j.phpro.2011.06.156).
- .- Zalewski S.(2012) ."A proposed method for the calculation of light emitting diode road lighting". Lighting Research and Technology, 44: 186-196. (doi: 10.1177/1477153511423881)