

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

DEPARTAMENTO DE EXPRESIÓN GRÁFICA DISEÑO Y PROYECTOS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

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

TOWARDS EFFICIENT MANAGEMENT FO PUBLIC LIGHTING
SERVICES: RESULTS OF COMPARATIVE STUDIES ON ENERGY
AND LIGHTING EFFICIENCY APPLIED TO URBAN LIGHTING
NEW TECHNOLOGIES

TESIS DOCTORAL

Doctorando: Manuel Jesús Hermoso Orzáez

DIRECTOR

Dr. D. José Ramón de Andrés Díaz

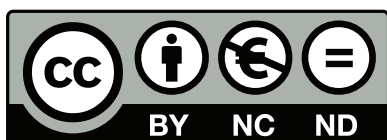
Málaga, Marzo de 2014



**Publicaciones y
Divulgación Científica**

AUTOR: Manuel Jesús Hermoso Orzáez

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:

Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):

[Http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es)

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer
obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de
Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

JOSÉ RAMON DE ANDRÉS DÍAZ, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Málaga, en el Área de Proyectos de Ingeniería, actuando en calidad de Director de la Tesis, HACE CONSTAR:

Que el trabajo presentado por D. Manuel Jesús Hermoso Orzáez, profesor asociado a tiempo parcial de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén en el Área de Ingeniería Gráfica Diseño y Proyectos e Ingeniero Municipal del Ayuntamiento de Fuengirola, realizado como compendio de publicaciones no utilizadas en tesis alguna anterior, con el título **“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”**, se ha desarrollado bajo mi dirección durante los años 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013 y reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor.

Y para que así conste a los efectos oportunos, expedimos y firmamos el presente documento en Málaga, a 24 de Marzo de dos mil catorce.

José Ramón De Andrés Díaz

A mis tres soles Virginia, Macarena y Virginia, verdadera luz de mi vida, por vuestro cariño, apoyo, comprensión y..... sobre todo por el tiempo robado.

“Llevamos luz dentro de nosotros, en el cuerpo, en el corazón y en la mente. Sobre todo, la luz de la mente nos permite comprender los procesos de la naturaleza y penetrar en lo íntimo de las personas, hasta en el misterio luminoso de Dios.”

Leonardo Boff

TESIS DOCTORAL POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES:

“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”.

Programa de doctorado : INGENIERÍA Y GESTIÓN DE PROYECTOS. 35.06
Departamento Responsable: EXPRESIÓN GRÁFICA, DISEÑO Y PROYECTOS

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



Áreas de Conocimiento: 330604 550624 530907

Director de Tesis Doctoral: José Ramón de Andrés Díaz.

Doctorando: Manuel Jesús Hermoso Orzáez. mhorzaez@ujaen.es

Málaga, España marzo de 2014

1. SUMARIO

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

SUMARIO

| | |
|---|------------|
| 1. SUMARIO..... | 9 |
| 2. AGRADECIMIENTOS..... | 11 |
| 3. INDICES..... | 16 |
| 4. TESIS COMO COMPENDIO DE PUBLICACIONES..... | 28 |
| 4.1. INTRODUCCIÓN..... | 34 |
| 4.2. OBJETIVOS..... | 56 |
| 4.3. METODOLOGÍA..... | 65 |
| 4.4. RESUMEN GLOBAL DE LOS RESULTADOS..... | 80 |
| 4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS..... | 111 |
| 4.6. CONCLUSIONES FINALES..... | 125 |
| 4.7. RECOMENDACIONES..... | 133 |
| 4.8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... | 138 |
| 4.9. BIBLIOGRAFÍA..... | 142 |
| 4.10. COMPENDIO DE PUBLICACIONES Y CERTIFICADOS..... | 148 |
| 4.11. AYUDAS PUBLICAS DE LA U.M.A REDACCIÓN TESIS..... | 153 |

2. AGRADECIMIENTOS

2. AGRADECIMIENTOS

Quisiera antes de nada agradecer sinceramente, el trabajo y apoyo de todas las personas, que directa o indirectamente, han contribuido de una u otra forma, al desarrollo de todo el proceso de investigación aquí expuesto; desde su génesis, trabajos de campo, evaluación de datos, valoraciones, interpretaciones, discusiones, conclusiones, traducciones, etc...., hasta llegar a la redacción documental definitiva y publicaciones en forma de artículos; culminada finalmente con el compendio, que conforma la presente tesis doctoral; sin cuya participación y concurso, hubiera sido totalmente imposible la finalización de la misma. Me resultaría muy difícil, acordarme de todos y enumerar una a una, a todas las personas que me han prestado su ayuda y colaboración, durante estos cinco intensos años, así como las contribuciones especiales, prestadas durante el desarrollo y elaboración del presente trabajo. Aun así, y a sabiendas de no ser del todo justo, con todos los que me han apoyado; me gustaría hacer una mención especial al grupo de colaboradores, más cercanos, que forma especial y directa, han contribuido y ayudado a impulsar las investigaciones y conclusiones aquí formuladas.

En primer lugar, y como no podía ser de otra manera, mi más absoluto y sincero agradecimiento a mi Director de Tesis, D. José Ramón de Andrés Díaz. No solo por sus valiosísimas orientaciones científicas y ayudas técnicas de investigación, sino y especialmente por su paciencia y comprensión. Él me sirvió de apoyo, en los momentos más difíciles y duros, vividos en este trance, y su ayuda, fue fundamental, para superar los sinsabores y las ingratas situaciones por las que se ha de pasar, dentro de este apasionante pero muchas veces incomprendido mundo de la investigación. Sin su contribución, hubiera sido absolutamente imposible la finalización de este trabajo. Agradecer su incomparable capacidad para orientar, analizar, sintetizar e impulsar con espíritu investigador, este trabajo; sacándome del estancamiento y frustración al que muchas veces conduce la investigación científica. Sólo él y el cariño familiar fueron capaces de insuflarme, el necesario impulso para poder sacar hacia delante, esta tarea. Gracias a mi Director de tesis, todo el trabajo realizado ha dado su fruto, en la consecución de las publicaciones científicas aquí expuestas, contribuyendo a la consecución del objetivo final marcado, con la redacción de la presente tesis doctoral.

En segundo lugar debo agradecer al Ayuntamiento de Fuengirola en general y en particular a la Alcaldesa de Fuengirola, D^o Esperanza Oña Sevilla, su inestimable ayuda y facilidades otorgadas, al permitir poner en mi mano, los equipos y medios necesarios, para la realización de las pruebas, ensayos y trabajos de campo, aquí evaluados; permitiéndome el uso y la disposición de los mismos y en particular la apuesta personal por el empleo de la tecnología de vanguardia aquí evaluada, sin cuya prestación y espíritu innovador, hubiera sido imposible estudio de investigación alguno.

Y en tercer lugar, debo en justicia, agradecer particularmente, la ayuda prestada y el apoyo recibido, además del cariño personal, D. Rafael Martín Vega, Encargado Responsable del Servicio de Mantenimiento de Alumbrado Viario del Ayuntamiento de Fuengirola. No podré jamás olvidar las noches de insomnio y frío que pasé junto a Rafa, durante los trabajos de campo; y nuestra excitación al ir cosechando los resultados, al calor de nuestras diferentes percepciones de los resultados y nuestras enriquecedoras discusiones técnicas de madrugada. Su contribución en la preparación de los equipos y su ayuda en las mediciones de campo, hubieran hecho absolutamente imposible el trabajo aquí expuesto. Agradecer tu absolutamente imprescindible y desinteresada ayuda. Tus conocimientos técnicos y prácticos han sido fundamentales, para la ejecución de los trabajos de campo y tu impulso, cariño y aliento en la faceta humana, algo que jamás seré capaz de devolverte. Aunque la amistad tiene estas cosas.

Tampoco quiero olvidarme de la ayuda técnica prestada por el Departamento de Expresión Gráfica Diseño y Proyectos de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Málaga, sin cuyos equipos de medida, hubiera sido imposible la realización de las mediciones de campo realizadas.

Agradecer también a todo el Departamento de Ingeniería Gráfica Diseño y Proyectos de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, destacando el apoyo, y la ayuda prestada tanto por el Director de dicho Departamento, D. Francisco Javier Gallego Álvarez y como por D. Julio Terrados Cepeda del Área de Proyectos, cuya contribución, fue fundamental para mi acercamiento al mundo de la Docencia y la Investigación, así como agradecer el aliento prestado por todo el Departamento, durante todo este periodo investigador.

Y por último, aunque no menos importante que los anteriores, debo agradecer a mis familiares y amigos, por su apoyo y ánimo constante. Y por supuesto que en este apartado mención especial merecen mis padres Manolo y Teresa, Peritos Industriales, en esto algo tendrá seguro que ver la genética, y docentes ambos, Profesor Titular de Universidad y Catedrática de Instituto del Área de Dibujo Técnico respectivamente. Ellos, ya desde edad temprana, me infundieron su impulso académico, durante todo mi proceso educacional y formativo, y sirvieron de ejemplo y estímulo para orientarme en mi actividad docente e interés por satisfacer mis inquietudes científico-técnicas. Sin ellos su inteligencia, ejemplo y espíritu de superación, modelos de honestidad en el trabajo y referencia base de mi proyecto vital, hubiera sido imposible la culminación de este honorable y más alto rango académico al que aspiro.

Y por supuesto, a Virginia mi mujer, sufridora de mis desvelos, padecedora de mis ausencias y sin cuya contribución en la parte personal y familiar hubiera sido imposible la culminación de este proyecto. Muchas gracias por el tiempo que nos perdimos y que jamás podré devolverte con el cariño y el amor con el que tú, me lo diste. Me queda el consuelo de saberte acompañada por Virginia y Macarena, que vieron la luz al comenzar este trabajo, se criaron con tu cariño, atención y mis ausencias, y que ya van camino de sus tres esplendorosos años. Gracias a las tres.

En definitiva, mi más sincero agradecimiento a todos los que han contribuido, para que esta Tesis Doctoral que ahora se presenta como compendio llegue a su punto y seguido; pues el espíritu investigador, es incesante e incansable y te invita a seguir siempre hacia adelante, cada vez con más pasión y perseverancia en la búsqueda del conocimiento puesto al servicio de la ciencia.

Manuel Jesús Hermoso Orzáez
Universidad de Málaga
Marzo de 2014

3. INDICES

3.1. INDICE GENERAL

3.1. INDICE GENERAL

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

| | |
|---|-----|
| 1. SUMARIO..... | 9 |
| 2. AGRADECIMIENTOS..... | 12 |
| 3. INDICES..... | 16 |
| 3.1.Indice General..... | 18 |
| 3.2 Indice de Tablas | 21 |
| 3.3 Indice de Figuras..... | 25 |
| 4. TESIS COMO COMPENDIO DE PUBLICACIONES..... | 28 |
| 4.1. INTRODUCCIÓN..... | 36 |
| 4.1.1. Motivación. | 36 |
| 4.1.2. Planteamiento y determinación del problema a investigar..... | 37 |
| 4.1.3. Documentación y fuentes de Información..... | 40 |
| 4.1.4. Estado Actual de la Investigación..... | 51 |
| 4.2. OBJETIVOS..... | 56 |
| 4.3. METODOLOGÍA..... | 65 |
| 4.4. RESUMEN GLOBAL DE LOS RESULTADOS | 80 |
| 4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS | 111 |
| 4.6. CONCLUSIONES FINALES..... | 125 |
| 4.7. RECOMENDACIONES..... | 133 |
| 4.8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 138 |
| 4.9. BIBLIOGRAFÍA..... | 142 |
| 4.10. COMPENDIO DE PUBLICACIONES Y CERTIFICADOS..... | 148 |
| 4.11. ANEXO: AYUDAS PUBLICAS DE LA U.M.A PARA LA TESIS..... | 153 |

3.2 INDICE DE TABLAS

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

3.2 INDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Tipo de lámpara. (artículo 1)
- Tabla 2. Balance de potencias por cuadro y sistema de regulación. (artículo 1)
- Tabla 3. Cálculos luminotécnicos de las calles de estudio. (artículo 1)
- Tabla 4. Características de las lámparas a comparar) (artículo 2).
- Tabla 5. Características de las fuentes de luz. (artículo 3).
- Tabla 6: Características teóricas y medidas eléctricas de las fuentes de luz utilizadas. Fuente: Elaboración propia. (artículo 4).
- Tabla 7. Matriz de medición con distancia en metros y medidas en lux para la *Lámpara HM de PHILIPS 150 W*- Fuente: Elaboración propia. (artículo 4).
- Tabla 8 . Tabla de Iluminancias y Uniformidades obtenidas por el método CIE) y nuevo método propuesto. Fuente: Elaboración propia.(artículo 4).
- Tabla 9 Balance energético y plazo de recuperación de la inversión para sistema de ahorro con Balastos electrónicos regulables-Calle Camino de la Condesa. (artículo 1)
- Tabla 10. Balance energético y plazo de recuperación de la inversión para sistema de ahorro con Estabilizador-regulador de flujo en cabecera. (artículo 1)
- Tabla 11. Balance luminotécnico comparativo realizado con luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B1330. (artículo 1)
- Tabla 12. Análisis de la inversión con balastos electrónicos regulables (8 horas de funcionamiento). (artículo 1)
- Tabla 13. Análisis de la inversión con balastos electrónicos regulables para 8,7 y 6 horas de funcionamiento. (artículo 1)
- Tabla 14. Análisis de la inversión con Estabilizador de tensión- Regulador de flujo en cabecera (8 horas de funcionamiento). (artículo 1)
- Tabla 15. Análisis de la inversión con Estabilizador de Tensión en cabecera para 8,7 y 6 horas de funcionamiento. (artículo 1)
- Tabla 16. Resultados de las mediciones eléctricas y % de reducción.. (artículo 2).
- Tabla 17. Resultados obtenidos con el analizador de red AR6. (artículo 2).
- Tabla 18. Balance luminotécnico realizado con luxómetro GOSSEN. (artículo 2).
- Tabla 19. Balance energético y económico comparativo a 5 años. (artículo 2).
- Tabla 20. Análisis de la rentabilidad de la Inversión y Amortización afectada por el coste del dinero (para un tipo de interés del 5%). Fuente: elaboración propia. (artículo 2).

Tabla 21. Estudio de rentabilidad de la inversión para cambio a LED para 12, 10 y 8 horas de funcionamiento. (artículo 2)

Tabla 22. Resultados mediciones tomadas con TELEASTRO y % de reducción. (artículo 3).

Tabla 23 .Balance luminotécnico antes y después de reducir la tensión con el Estabilizador. Mediciones realizadas con luxómetro móvil LX-GPS. Fuente Elaboración propia. (artículo 3).

Tabla 24 .Balance luminotécnico comparativo realizado con luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B.. (artículo 3)

Tabla 25. Serie de armónicos (%) de tensión por fase L1-L2-L3 de % THD orden impar (artículo 2).

Tabla 26. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la Lámpara LED 45 W-Marca SSIE (Elaboración propia). (artículo 4)

Tabla 27. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta para la Lámpara LED 45 W-Marca SSIE. (artículo 4)

Tabla. 28. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la Lámpara LED 56 W-Marca DLED (Elaboración propia).(artículo 4)

Tabla 29. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 56 W-Marca DLED. (artículo 4)

Tabla 30. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la Lámpara LED 45 W-Marca REXDOS 270 (Elaboración propia) . (artículo 4)

Tabla 31. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 45 W-Marca REXDOS 270. (artículo 4)

Tabla 32. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la lámpara LED 50 W-Marca REXDOS 360. (Elaboración propia). (artículo 4)

Tabla 33. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 50 W-Marca REXDOS 360 (artículo 4)

Tabla 34. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la lámpara LED 51 W-Marca ETILED. (Elaboración propia) (artículo 4)

Tabla 35. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 51 W-Marca ETILED. (artículo 4)

Tabla 36. Resultados comparativos de evaluación de la uniformidad según el método definido. (artículo 4)

3.3 INDICE DE FIGURAS

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

3.3 INDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Características de la Luminaria ATP mod Villa lámpara HM -150 W. (artículo 2)
- Figura 2. Características de la Luminaria ATP mod Villa y la lámpara LED 51 W (artículo 2)
- Fig.3.Esquema del tipo de vial y dimensiones de la Cuadrícula utilizada. Fuente: elaboración propia. (artículo 4)
- Fig.4. Representación 3D Iluminancias (lux) – Lámpara HM 150 W-Marca PHILIPS. Elaboración propia. (artículo 4)
- Figura 5. Gráfico de consumo de potencia activa. (artículo 1)
- Figura 6. Gráfico de consumo de potencia activa. (artículo 1).
- Figura 7 .Gráfico de consumo de potencia reactiva. (artículo 1).
- Figura. 8.Comparación de percepción de color con balance blancos (artículo 1).
- Figura. 9. Comparación de percepción de color con balance blancos. (artículo 1).
- Figura.10. Fotografía del vial y detalle de lámpara LED de 51 W . (artículo 2)
- Figura.11. Fotografía del vial y detalle de lámpara de HM de 150 W . (artículo 2)
- Fig.12.Tensiones de fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción. (artículo 3)
- Fig.13.Intensidad de fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.(art.3)
- Fig.14.Factor de potencia por fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción (art. 3).
- Fig.15.Potencia activa por fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción. (artículo 3)
- Fig.16.Potencia Aparente por fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción. (art. 3)
- Fig.17.Potencia Reactiva Capacitiva por fase, medidas con el analizador AR6 con y sin reducción. (artículo 3).
- Fig.18. Armónicos % THD de orden impar medidas con el analizador AR6 con y sin reducción. (artículo 3)
- Figura 19. Forma de onda de la Intensidad (*contaminada por los armónicos impares*)
- Fig.20. 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. Luxómetro móvil LX-GPS
- Fig.21 .Fotografía del vial antes y después de reducir la tensión en cabecera del cuadro. Aparentemente no se observan diferencias en los niveles de iluminación ni en el color. (art.2)
- Fig.22. Representación de Iluminancias) y Foto de zona iluminada. Lámpara LED 45 W-Marca SSIE. (Fuente: Elaboración propia.). (artículo 4).

Fig.23. Representación 3D Iluminancias (lux) – Lámpara LED 56 W-Marca DLED. Foto de luminaria DLED..(Fuente: Elaboración propia). (artículo 4)

Fig.24. Representación 3D Iluminancias (lux) – Lámpara LED 45 W-Marca REXDOS 270. Elaboración propia. (artículo 4)

Fig.25. Representación 3D Iluminancias (lux) – Lámpara LED 50 W-Marca REXDOS 360. Elaboración propia.(artículo 4)

Fig.26. Representación 3D Iluminancias (lux) - Lámpara LED 51 W-Marca ETILED, (Fuente: Elaboración propia). (artículo 4)

Fig.27. Gráfica que representa los armónicos de corriente (parte superior) y de tensión (parte inferior) por fase desde el orden 2 al 15. (artículo 2)

Fig.28. Representación de la recta de regresión del Coeficiente de variación (%) (U_s) (Metodología propuesta) frente a la Uniformidad Media (U_m) (según CIE). (artículo 4)

4 TESIS COMO COMPENDIO DE PUBLICACIONES

4. TESIS COMO COMPENDIO DE PUBLICACIONES

La presente tesis, se presenta como compendio de publicaciones con el Informe Favorable de su Director, el profesor y Dr. D. José Ramón de Andrés Díaz. Las razones que nos han llevado, a elegir este formato de tesis se pueden resumir, en las siguientes:

- 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.
- El tema seleccionado y la elaboración compendiada de los artículos que aquí se exponen, permite poner en conocimiento de la comunidad científica, y por ende a los profesionales y técnicos, los resultados y conclusiones obtenidos, de una forma absolutamente objetiva. Además se lleva a cabo, sin necesidad de concluir por completo la tesis y exponiéndolos con claridad, antes de que éstos pierdan originalidad y para que puedan servir, como herramienta de selección tecnológica. Las investigaciones realizadas, que pasamos a exponer a continuación, son el fruto de un riguroso trabajo de evaluación y estudios comparados.
- 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.
- Ratificar que los trabajos que han servido de base y sustentación de esta tesis por compendio, han sido publicados, en revistas científicas y profesionales de gran relevancia. Algunas de ellas con muy alto factor de impacto y prestigio profesional, científico y técnico. Todos los artículos de este compendio, han superado las estrictas revisiones ciegas por pares, realizadas por expertos profesionales, en las áreas de conocimiento abordadas.

- Por último señalar que los artículos compendiados en esta tesis, han sido firmados exclusivamente, por el autor doctorando y su Director. Al margen de esto hay que indicar, que los trabajos han involucrado a más personas y colaboradores que, de una u otra forma, han contribuido, a la consecución de los mismos, especialmente en lo que respecta a las mediciones de campo. Se considera que esta publicaciones, son suficientes para avalar la calidad, originalidad e interés de la tesis compendiada.

Este trabajo de Tesis, se presenta como un compendio de cuatro publicaciones, resultado de los estudios experimentales sobre eficiencia energética y lumínica, aplicados a fuentes de luz que se utilizan en las nuevas tecnologías de iluminación urbana a saber: Tecnología Cerámica aplicada a lámparas de descarga con halogenuros metálicos (HM) y LEDs (light-emiting diode)

Para ello se realizaron cuatro estudios y se analizaron los resultados obtenidos, que dieron origen a los cuatro artículos publicados posteriormente a la presentación del proyecto de Tesis con fecha 04-03-2009 y que enumeramos a continuación:

-. “COMPARATIVE STUDY OF ENERGY-EFFICIENCY AND CONSERVATION SYSTEMS FOR CERAMIC METAL-HALIDE DISCHARGE LAMPS”. Hermoso Orzáez MJ, De Andrés Díaz JR , Energy. Vol.52. Nº 1 (2013) pag. 258-264. *Available on line 7 March 2013.* (<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>)

| |
|--|
| Título Revista : ENERGY |
| Issn: 0360-5442 |
| Factor de impacto: 3,651 |
| Factor de impacto (5 años): 4,107 |
| Quartil en su categoria: Q1 – Ranking 14 de 81 |
| Clasificación CIRC (Clasificación Integrada de Revistas Científicas): EX |
| Puntuación ANECA: 1 punto (Primer tercio de su especialidad SCI- 2012 JCR Sciencece Edition) |

- 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. *“Comparative and supporting change to leds analysis in systems with metal halide lamps. Another step towards energy efficiency in urban lighting.”* Hermoso Orzáez MJ, De Andrés Díaz JR, Dyna-Bilbao. Marzo- Abril 2014 • Vol. 89 N° 2. Pag. 165-171. (<http://dx.doi.org/10.6036/5803>)

| |
|--|
| Titulo Revista : DYNA-BILBAO |
| Issn: 0012-7361 |
| Factor de impacto: 0,237 |
| Factor de impacto (5 años): 0,160 |
| Quartil en su categoria: Q4 – Ranking 81 de 90 |
| Clasificación CIRC (Clasificación Integrada de Revistas Científicas): A |
| Puntuación ANECA: 0,5 punto (Tercer tercio de su especialidad SCI- 2012 JCR Science Edition) |

- ANÁLISIS Y RESULTADOS DE REGULAR LAMPARAS LEDS CON ESTABILIZADORES DE TENSIÓN-REDUCTORES DE FLUJO EN CABECERA. Hermoso Orzáez MJ, De Andrés Díaz JR. *“Analysis and results control leds lamps with lighting flow dimmer-stabilisers”*. Técnica Industrial. Marzo 2014. N° 305. Vol 2. N° 1 y Pendiente de asignar página y Doi. Se adjunta Certificado de publicación del director de la Editorial.

| |
|---|
| Titulo Revista : TECNICA INDUSTRIAL |
| Issn: 0040-1838 |
| Revista Técnica y Profesional de la FUNDACIÓN TECNICA INDUSTRIAL |
| Factor de impacto: 0 |
| Clasificación CIRC (Clasificación Integrada de Revistas Científicas): C |
| Puntuación ANECA: 0,0 punto (Revista no incluida en el SCI- 2012 JCR Science Edition) |

- "STATISTICAL METHODOLOGY PROPOSAL FOR EVALUATING UNIFORMITY: APPLICATION TO LED LUMINAIRES". Hermoso Orzáez MJ, De Andrés Díaz JR , *Light & Engineering. (SVETOTEKHNKA). Junio 2014 • Vol. 22. Nº 2. Pendiente de asignar página y Doi.* Se adjunta Certificado de aceptación para su publicación expedido y firmado por el director de la Editorial y comunicación en página 91 del Vol 21. Nº 4 notificando su publicación en el próximo número Vol 22.

| |
|--|
| Título Revista : LIGHT & ENGINEERING. |
| Issn: 0236-2945 |
| Factor de impacto: 0.098 |
| Factor de impacto (5 años): - |
| Quartil en su categoría: Q4 – Ranking 238 de 243 |
| Clasificación CIRC (Clasificación Integrada de Revistas Científicas): A |
| Puntuación ANECA: 0,5 punto (Tercer tercio de su especialidad SCI- 2012 JCR Science Edition) |

La suma de las puntuaciones obtenidas en las cuatro publicaciones, conforme al documento Principios y Orientaciones para la aplicación de los Criterios de Evaluación de la ANECA, sería de 2 puntos superando en 1 punto la puntuación mínima, necesaria para la presentación de la Tesis como compendio de publicaciones conforme a los puntos 3 y 4 del artículo 20, del Título 4, del Reglamento de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Málaga.

Manuel Jesús Hermoso Orzáez
Universidad de Málaga
Marzo de 2014

4.1. INTRODUCCIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

En esta parte introductoria, se pretende poner en consideración y argumentar los motivos que nos han llevado a trabajar, en la línea de investigación elegida. El trabajo, que hoy se presenta como tesis, se ha desarrollado en forma de compendio de publicaciones de artículos científico-técnicos, y con él se pretende optar al título y acceder a la mención académica de Doctor por la Universidad de Málaga. En esta primera parte introductoria, delimitaremos el objeto de los trabajos de investigación desarrollados, así como la metodología empleada.

4.1.1. MOTIVACIÓN

A nadie se le escapa, las profundas transformaciones, que en el campo de las nuevas aplicaciones tecnológicas en iluminación urbana, se vienen produciendo en los últimos años. Esta situación de constantes cambios y la aparición de las nuevas aplicaciones lumínicas, han generado una desorbitada expansión comercial y técnica.

El dilema fundamental, se plantea en tratar de solventar y dar repuesta a la siguiente cuestión formulada: ¿Es preferible mantener la antigua forma de iluminar ciudades, apostando por equipos de ahorro adaptados a las lámparas convencionales y tradicionales de descarga, en particular con tecnología HM?; o bien, ¿resulta preferible romper radicalmente con la antigua forma tecnológica y apostar definitivamente por las nuevas aplicaciones lumínicas, que utilizan como base tecnológica el ‘diodo emisor de luz’, LED?. Considerando que todo apunta a que éstas últimas, parecen estar llamadas a ser el futuro de la iluminación urbana a corto y medio plazo.

Toda esta situación, se plantea en medio de una situación convulsa a nivel económico, conviviendo con políticas de austeridad y desinversión. Esto obliga a ser muy precisos en la selección tecnológica, debido a las consecuencias, fundamentalmente económicas, que pudiera ocasionar, una desafortunada elección. En juego está, el futuro de la iluminación de nuestras ciudades y los resultados asociados a la eficiencia energética y el ahorro económico que le vienen aparajados.

Esta difícil tesitura, en la doble vertiente de técnico municipal e investigador, fue la motivación fundamental, que puso en marcha la necesidad de profundizar, en los estudios aquí desarrollados. Movidos por la inquietud de analizar, discutir y profundizar en las cuestiones aquí planteadas, se han utilizado argumentos objetivos y una metodología científica aplicada.

Para evaluar esta situación y poder poner un poco de luz y orden dentro de este controvertido rompecabezas, se aprovecharon unas instalaciones reales existentes, en funcionamiento, tecnológicamente modernas y con equipos de medida que ofrecían suficientes garantías, para poder realizar una buena recogida de datos y una mejor posterior evaluación y tratamiento de los mismos.

4.1.2. PLANTEAMIENTO Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA A INVESTIGAR

Hasta hace poco tiempo, se pensaba que la tecnología más eficiente, en cuanto a al rendimiento lumínico, era la ofrecida por las lámparas de descarga. Tanto en sus versiones de vapor de sodio como de halogenuros metálicos con quemador cerámico.

Estas últimas, tuvieron una muy fuerte implantación en nuestras ciudades, en la última década, desde principios de los años 90 del pasado siglo, hasta la primera década del presente. La razón de su extraordinario desarrollo, venía avalado por sus excelentes prestaciones luminotécnicas, en cuanto a flujo luminoso, eficacia lumínica, reproducción cromática y T° de color. Añadiendo a todo esto, su contrastada durabilidad y buena aceptación, tanto por los profesionales, como por los técnicos y ciudadanos en general. No obstante su principal debilidad, es aparte de su precio, su elevado consumo energético. Para ello se propone en el primer estudio, el análisis y estudio de los posibles equipos de ahorro aplicados a las mismas

En un primer momento, se realizó un estudio comparativo para evaluar los dos principales sistemas, que actualmente son capaces de mejorar la eficiencia energética de estas lámparas. Por un lado, los balastos electrónicos regulables, y por otro, los equipos estabilizadores de tensión y reductores de flujo en cabecera.

Para ello se realizó un estudio anual, observando y tomando medidas a diario, mediante equipos de telegestión, instalados en la cabecera de los cuadros de maniobra y control.

Se contrastaron los resultados con mediciones in situ periódicas, realizadas con equipos móviles autónomos, y con analizadores de red y luxómetros portátiles. De esta forma se obtuvieron los resultados reales de ahorro energético y se pudieron comparar las prestaciones eléctricas y económicas, así como su impacto sobre los rendimientos lumínicos, en las lámparas HM analizadas. (Artículo 1)

Durante el desarrollo del primer estudio, fuimos conscientes del importantísimo desarrollo tecnológico, y crecimiento espectacular que la iluminación LED va alcanzando día a día. No cabe duda de que esta nueva e incipiente tecnología, está llamada a ser el futuro de la iluminación vial en nuestras ciudades.

Esta realidad, nos puso en el camino, de realizar una nueva experiencia comparativa, en otro vial de la ciudad de Fuengirola. Aprovechando una metodología similar, con equipos de medida y telegestión semejantes a los del primer estudio. Decidimos, centrar el segundo estudio en la evaluación y análisis de los resultados obtenidos al efectuar la sustitución punto a punto, de lámparas de descarga (HM), por luminarias LEDs. Se observaron, analizaron, compararon y discutieron nuevamente los resultados de la sustitución, desde el punto de vista energético, eléctrico, económico y lumínico. (Artículo 2)

Posteriormente, y en el marco de los resultados obtenidos en los dos primeros experimentos, realizados y que dieron su fruto en forma de los dos primeros artículos, se decidió dar un paso más. En esta línea y utilizando una metodología y equipos de medida similares, se planteó evaluar los resultados, de utilizar estabilizadores de tensión en cabecera, con las lámparas LEDs. Mediante la reducción de tensiones en cabecera, se observó su compatibilidad y comportamiento desde el punto de vista eléctrico y luminotécnico. Acorde con los resultados del primer estudio, donde habíamos comprobado, con gran éxito, la fiabilidad de los equipos de estabilización y reducción de flujo para lámpara de HM. Nos propusimos, evaluar la aplicación de este sistema de eficiencia y ahorro energético a los LEDs.

Habiendo verificado ya en el primer estudio realizado, sus interesantes prestaciones en lámparas de HM, a pesar de sus limitaciones. Decidimos aplicarlo esta vez, a las nuevas lámparas LEDs para observar, analizar, evaluar y medir los resultados tanto energéticos, como eléctricos y lumínicos. (Artículo 3).

Por último, en el cuarto estudio, decidimos centrarnos en los aspectos relacionados con la calidad lumínica asociada a las nuevas aplicaciones LEDs. Para ello realizamos un estudio comparativo entre lámparas de descarga HM y distintos tipos de fuentes de luz, LEDs adaptadas a la misma luminaria. Contrastamos las diferencias en cuanto a iluminancia y uniformidad extrema y media. Observando que esta última, tal y como está definida actualmente, quizás deba ser objeto de un nuevo planteamiento o redefinición. Debido al carácter multidireccional que presentan estas nuevas fuentes de luz y observando las representaciones gráficas en tres dimensiones de las iluminancias medidas, advertimos la necesidad de plantear un nuevo concepto lumínico asociado a la uniformidad media, más preciso que el anterior y que definimos como uniformidad estadística. (Artículo 4).

De esta forma queda demostrada la unidad temática y su coherencia en el desarrollo temporal de las cuatro experiencias ejecutadas y que dieron lugar a la publicación de los cuatro artículos, antes indicados y que conforman esta tesis como compendio.

Estos cuatro estudios, fruto de las observaciones y del análisis pormenorizado de los datos recogidos en los mismos, presentan resultados prácticos evidentes y conclusiones que se pasarán posteriormente a concretar. La discusión de los resultados formulados en este trabajo, será una contribución útil y práctica para futuros investigadores y científicos. En cualquier caso, las conclusiones aquí expuestas, servirán de ayuda al técnico municipal y/o al gestor energético en la toma de decisiones, para poder afrontar cambios y/o mejoras en la iluminación urbana.

4.1.3. DOCUMENTACIÓN Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Las fuentes de documentación e información utilizadas para la confección de nuestro trabajo de investigación han sido muy variadas. Para exponerlas emplearemos la siguiente clasificación propuesta por la UNESCO:

A) FUENTES FORMALES. Podemos distinguir entre las publicadas en revistas incluidas en bases de datos de carácter científico (incluidas en el JCR) y las publicadas por entes o entidades de reconocido prestigio en el mundo de la iluminación a nivel nacional e internacional. Es decir, las que tienen un carácter más divulgativo, profesional o reglamentístico y que por consiguiente, están a libre disposición del público en general.

A.1) PUBLICADAS EN REVISTAS CIENTÍFICAS: Iniciamos nuestro acopio de información planteando una búsqueda entorno a los conceptos:

- Alumbrado público
- Iluminación urbana
- LEDs
- Eficiencia energética.
- Sistemas de ahorro y eficiencia
- Iluminación vial.
- Estabilizadores de tensión-reductores de flujo.
- Ahorro energético en iluminación
- Lámparas de descarga
- Lámparas de halogenuro metálicos (HM).
- Balastos electrónicos
- Balastos electromagnéticos.
- Control punto a punto
- Telegestión.
- Iluminancia.
- Uniformidad.
- Etc.....

La búsqueda se realizó tanto en español, como en inglés, destacando, entre otros, los siguientes términos:

- Public lighting.
- Energy efficiency lighting flow dimmer-stabilisers.
- Street lighting.
- LEDS.
- Energy efficiency
- Metal halide lamps
- Dimmable electronic ballast.
- Discharge lamps.
- Lighting flow dimmer-stabilizers.
- Illuminance.
- Uniformity.
- Etc....

La búsqueda se realizó, entre otras, en las siguientes bases de datos, a través del acceso telemático a los servidores de las bibliotecas virtuales de las Universidades de Málaga y Jaén a saber :

- **Science Citation Index Expanded** (Thomson Reuters) da acceso a información bibliográfica, resumen, autor y citas de las 5900 revistas más importantes del mundo técnico-científico, cubriendo unas 150 disciplinas o especialidades
- **Scopus** (Elsevier) es la mayor base de datos de metadatos y referencias de literatura revisada por expertos (Peer-reviewd). Su página web posee herramientas inteligentes para rastrear, analizar y visualizar la investigación.

- **Pascal** (CNRS) Base de datos bibliográfica producida por INIST (Institut de l'Information Scientifique et Technique) del CNRS Francés (Centre National de la Recherche Scientifique). Contiene más de 8 millones de referencias de artículos de revistas sobre ciencia, tecnología y medicina
- **Recyt** (Fundación Española de Ciencia y Tecnología - FECYT) es un conjunto de servicios destinados a la comunidad científica que tiene por objeto apoyar la profesionalización e internacionalización de las publicaciones científicas españolas.
- **Ulrich's International Periodicals Directory** (Elsevier) Desde 1932 es la fuente de información global para publicaciones periódicas. Brinda información detallada, amplia y fidedigna sobre publicaciones periódicas de todo el mundo.
- **Technology Research Database** (ProQuest) Incluye las 3 bases de datos siguientes: CSA Materials Research with METADEX, CSA High Technology Research with Aerospace, and the CSA Engineering Research. Contiene 4.000 publicaciones, actas de congreso, informes técnicos, patentes, ..
- **Latindex**:: Sistema regional de información en línea para revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
- **Georef** (American Geological Institute) Desde 1966 es la fuente de información más importante en el mundo de las geociencias. Contiene 2,8 millones de referencias en forma de artículos, mapas, conferencias, .
- **Fuente Academica Premier** (Ebsco Publishing). Base de datos agregadora de contenidos, fuente de referencia líder para bibliotecas electrónicas universitarias o públicas. Accesible en el 90% de las bibliotecas públicas y universidades de EE.UU. y Canadá. Con excelente distribución en Europa del Este y Asia-Pacífico.

- **Dialnet:** Portal de difusión de la producción científica hispana que contiene 3.400 revistas científicas.

- **ICYT:** Base de Datos bibliográfica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) que recoge y analiza más de 600 publicaciones periódicas españolas, dentro de los campos de la Ciencia y la Tecnología desde 1979.

- **Sumaris:** Base de datos de sumarios de revistas y publicaciones científicas del Consorci de Biblioteques Universitaries de Catalunya.

- **Inspec** (The Institution of Engineering and Technology): Incluye información de revistas tradicionales e innovadoras en los campos de la física, Ingeniería eléctrica y electrónica, Comunicaciones, TICs, Ingeniería de fabricación, mecanizado y control.

Además se realizó un rastreo sobre las principales bases de datos y ediciones científicas en español que pasamos a resumir.

- TESEO. Base de datos del Ministerio de Educación y Cultura donde se encuentran todas las tesis doctorales leídas en España.
- EBSCO
- Bases de Datos del Consejo de Universidades.
- BNE (Bibliografía Nacional Española, recoge referencias de los libros depositados en la Biblioteca Nacional. De temática multidisciplinar).
- CICA (Business elite).
- CINDOC, Catálogo de revistas.
- CIRBIC-Libro. Catálogo colectivo de libros del CSIC.
- CIRBIC-Revistas. Catálogo colectivo de revistas del CSIC.

- ICYT. Base de datos del Instituto de Información y Documentación en Ciencia y Tecnología del CSIC.
- ISBN. Información bibliográfica de libros editados en España.
- REBIUN. Catálogo colectivo de libros y revistas de bibliotecas universitarias.
- Etc.

De las búsquedas planteadas, seleccionamos algunas revistas científicas de ámbito internacional donde se abordaban los temas de nuestro interés, entre las que podemos enumerar las siguientes:

- *Energy.*
- *Energy Policy.*
- *Dyna-Bilbao.*
- *Building and Environment.*
- *Applied Energy*
- *Lighting Research and Technology.*
- *Energy Conversion & Management.*
- *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*
- *Energy for Sustainable Development*
- *Physics Procedia*
- *Procedia Engineering*
- *Light & Engineering.*

- *Técnica Industrial.*
- Expert System with Applications, etc...

A.2) PUBLICADAS POR ENTIDADES NACIONALES E INTERNACIONALES DE RECONOCIDO PRESTIGIO EN EL MUNDO DE LA ILUMINACIÓN:

También se han realizado búsquedas en Internet, con las palabras clave antes mencionadas, y se han consultado entre otras, las páginas Webs de las siguientes entidades y asociaciones del mundo, ligadas a la iluminación:

- AAE. Agencia Andaluza de la Energía. [.www.agenciaandaluzadelaenergia.es](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es).
- CIE - International Commission on Illumination. www.cie.co.at
- CEI. Comité Español de Iluminación . www.ceisp.com
- IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. www.idae.es
- Asociación Americana de Fabricantes y Distribuidores de Alumbrado. www.americanlightingassoc.com.
- LUX EUROPA www.luxeuropa.eu
- National Lighting Bureau. www.nlb.org
- AIDI - Associazione Italiana di Illuminazione www.aidiluce.it
- AFE - Association Francaise de L'eclairage. www.afeclairage.com.fr
- CIBSE - Lighting Division the Chartered Institution of Building Services Engineers. www.cibse.org/cieuk
- FGL - Fördergemeinschaft Gutes Licht. www.licht.de
- IESNA - Illuminating Engineering Society of North america. www.iesna.org
- ILE - Institution of Lighting Engineers. www.ile.org.uk

B) OTRAS PUBLICACIONES, INFORMES, REGLAMENTOS, DIRECTIVAS, NORMATIVAS Y FUENTES DE INFORMACIÓN:

- Guía de Ahorro y Eficiencia Energética de la Junta de Andalucía. Agencia Andaluza de la energía. Sevilla SE-232-2011.
www.agenciaandaluzadelaenergia.es.
- Normas e informe CIE traducidos por el Comité Español de Iluminación (Destacamos algunas):
 - o CIE Report 194:2011. "On site Measurement of the photometric properties of the road and tunnel lighting". ISBN 978 3 90196 92 3
 - o CIE Report 115:1995. "Recommendations to illuminate roads for motorized vehicles and pedestrian transit"
 - o CIE 177:2007 "Rendimiento de colores de la luz blanca de LED" ISBN 978 3 901 906 57 2
- CEN EN Public Lighting 2003.
- Centro de recursos y de referencias para conseguir información en el mundo de la iluminación. www.lightforum.com.
- Web donde encontramos recursos, información, legislación y experiencias sobre la contaminación lumínica. www.darksky.org/ida/index.html.
- Revista digital del Lighting Research Center. www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/newsletters.asp

Para este estudio se ha tenido en cuenta tanto la Normativa española como la europea en lo referente a las luminarias de alumbrado exterior, y en concreto aquellas que incorporan tecnología LED, sometidas a la siguiente Legislación:

- Directiva de Baja Tensión- 2006/95/CEE. Relativa a la aproximación de las Legislaciones de los estados miembros sobre el material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión.

- Directiva de Compatibilidad Electromagnética- 2004/108/CEE. Relativa a la aproximación de las Legislaciones de los estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética y por la que se deroga la directiva 89/336/CE.

- Directiva ROHS 2011/65/UE. Relativa a las restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos

- Directiva de Eco-diseño 2009/125/CE. Por la que se instaura un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.

- Reglamento N° 1194/2012 de la por el que se aplica la Directiva de Eco-diseño 2009/125/CE a las lámparas direccionales, lámparas LED y sus equipos

- Real Decreto 154/1995, por el que se modifica el Real Decreto 7/1988, de 8 de enero, sobre exigencias de seguridad del material eléctrico destinado a ser utilizado en determinados límites de tensión y su Guía de Interpretación.

- Real Decreto 1890/2008, que aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07 y su Guía de Interpretación

- Real Decreto 842/2002 por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y sus instrucciones Técnicas Complementarias ITC-BT-01 a ITC-BT-51.

- Reglamento CE n° 245/2009, de la Comisión de 18 de marzo por el que se aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo relativo a los requisitos de diseño ecológico, para lámparas, balastos y luminarias.

- Reglamento 874/2012 DE LA COMISIÓN de 12 de julio de 2012 por el que se complementa la Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al etiquetado energético de las lámparas eléctricas y las luminarias

- Borrador CIE TC 4-48. "The effect of spectral power distribution on lighting for urban and pedestrian areas". En fase de elaboración y redacción.
- Reglamento 874/2012 DE LA COMISIÓN de 12 de julio de 2012 por el que se complementa la Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al etiquetado energético de las lámparas eléctricas y las luminarias

Además en este estudio se ha tenido en cuenta la normativa UNE de aplicación y referencia a saber:

Requisitos de Seguridad:

- UNE EN 60598-1 Luminarias. Requisitos generales y ensayos
- UNE EN 60598-2-3 Luminarias. Requisitos particulares. Luminarias de alumbrado público

Compatibilidad Electromagnética:

- UNE-EN 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética (CEM).Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada) 16 A por fase.
- UNE-EN 61547.Equipos para alumbrado de uso general Requisitos de inmunidad CEM.

Componentes de las luminarias:

- UNE-EN 62031.Módulos LED para alumbrado general. Requisitos de seguridad.

- UNE-EN 61347-2-13. Dispositivos de control de lámpara Parte 2-13: Requisitos particulares para dispositivos de control electrónico alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LED.
- UNE-EN 62384. Dispositivos de control electrónico alimentados en corriente continua o corriente alterna para módulos LED. Requisitos de funcionamiento

C) OTRAS FUENTES, OBTENIDAS DE LAS PONENCIAS PRESENTADAS EN LOS SIMPOSIUM NACIONALES DE ALUMBRADO ORGANIZADOS POR EL COMITÉ ESPAÑOL DE ILUMINACIÓN (CEI) Y PONENCIA RESUMEN RELACIONADA CON ESTA TESIS :

Bajo esta rúbrica queremos resaltar algunas otras fuentes y hacer referencia a la información obtenida a partir de asistencia a foros, cursos o simposium. Así como la información rescatada de las ponencias presentadas en los últimos Simposium Nacionales de Alumbrado organizados por el Comité Español de iluminación (CEI)

Asistencia e información transferida de los siguientes Simposium:

- XXXIX. Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Mataró 2013
- XXXVIII Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Toledo 2012
- XXXVII Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Santander 2011
- XXXVI Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Cáceres 2010
- XXXV Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Pontevedra 2009
- XXXIV Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Las Palmas de Gran Canaria 2008.
- XXXIII Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Zamora 2007
- XXXII Simposium Nacional de Alumbrado del CEI. Fuengirola 2006

Destacar que un resumen de los resultados de los estudios, objeto de la presente tesis compendiada, será presentada próximamente en el XL Symposium de Alumbrado, que se celebrará en Málaga del 28 al 31 de Mayo del 2014. (Se adjunta Certificado)

- **Autor o autores:** Manuel Hermoso, Guillermo Redrado, Jose Ramon de Andrés

- **Título de la Ponencia:** (35) Fuengirola: LED O DESCARGA, CONFIRMANDO LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

- **Ámbito:** REALIZACIONES

- **Empresa:** Ayuntamiento de Fuengirola. Alumbrado Técnico Público S.A. (ATP Iluminación) y Universidad de Málaga

4.1.4. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

En la actualidad, el Alumbrado Público supone el 2,3% en el consumo eléctrico mundial [Reusel KV.,2008], y en el ámbito municipal la iluminación vial y residencial, supone hasta el 80% de la energía eléctrica consumida y hasta el 60% de su factura energética. [H. D.Saunders, J..Y.Tsao,2012]

Diferentes estudios en base a los resultados de los programas de Eficiencia energética y Ahorro, llevados al efecto en Canadá y Estados Unidos, vaticinaron ya , a principios de la década de los noventa, del siglo pasado, que sería posible a medio plazo, obtener ahorros del 57 % en la iluminación residencial.

Se verificó ya en esos estudios, que mediante la implementación de medidas de ahorro y la inversión en equipos de eficiencia energética, en iluminación vial, estos porcentajes podrían alcanzar un ahorro entre el 70 y el 80 % [B. A. Atkinson, J. E. McMahan, M. NadeL. 1993]

Existen un amplio espectro de tecnologías, prácticas de diseño y estrategias de control, que puestas al servicio de la iluminación vial, son capaces de mejorar la eficiencia energética. Esta eficiencia se puede conseguir, equipando las luminarias con balastos electrónicos, accesorios, sistemas de control de estabilización de tensión y reductores de flujo, que son capaces de obtener un ahorro energético estimado entre un 50 y un 80 % del consumo de energía asociado directamente a la iluminación vial en los países desarrollados. [E. Mills M. A. Piette.,1993].

Interesante sin duda, fue el estudio realizado por Julian Di Stefano [1999], donde en la línea de los autores anteriores y conforme a los estudios de iluminación efectuados en la Universidad de Melbourne, ya estableció la posibilidad de obtener ahorros desde un 13,9 % hasta un 64,9 %, mediante la instalación de equipos de ahorro y eficiencia energética. Aunque en términos generales, los mayores o menores resultados estaban claramente relacionados con el precio de la energía y las horas de funcionamiento de los equipos analizados.

En esta línea los estudios de Alex H.W Lee [2000], ya expusieron en los albores del nuevo siglo, que mediante la realización de auditorías energéticas previas, la instalación de equipos de telegestión y control y el uso de estabilizadores-reductores de tensión son posibles, ahorros cercanos al 30 %, para las lámparas de descarga de vapor de sodio.

Tal y como se recoge en el estudio “*Guía de ahorro y eficiencia energética en municipios*” realizado por la Agencia Andaluza de la Energía [Agencia Andaluza de la Energía; 2011], dependiendo de los casos y la tecnología de iluminación, las posibilidades de ahorro en Alumbrado Público son muy elevadas, permitiendo reducir el consumo eléctrico entre el 20% y 50% con amortizaciones de menos de 3 años.

La consideración anterior es acorde y va en la línea de los resultados obtenidos en los estudios realizados tiempo atrás, por autores como Martinot E y Borg N, [1999], donde vaticinaron ya resultados similares en base a la evaluación de los mismos en la aplicación de los programas de eficiencia energética en iluminación urbana y residencial realizados en 10 países con distintos grados de industrialización y desarrollo,.

La aplicación en iluminación vial de sistemas de telegestión y control, como herramienta básica para la obtención, procesamiento y evaluación de los datos de ahorro registrados telemáticamente [Papagiannis G, Dagoumas A, Lettas N, Dokopoulos P. , 2008], ha dado lugar, lo que se da en llamar, sistemas de gestión inteligentes, capaces de medir y procesar los resultados de ahorro y eficiencia energética en tiempo real.

Sería interesante destacar, especialmente en la parte metodológica, los estudios de rentabilidad de Costes y Beneficios, así como el análisis de los periodos de retorno de la inversión (Pay-back), realizados por T.M. Mahlia, et all, [2005] y [2011], para el estudio de los sistemas de ahorro y eficiencia energética aplicados a la iluminación vial residencial en la Universidad de Malaya.

Muy interesantes son sin duda las recomendaciones que los autores Kostic M, y Djokic L. [2009] sugieren para conseguir ahorros energéticos, usando distintas tecnologías, sin que estos ahorros repercutan en la calidad lumínica, ni en la seguridad vial en términos generales. Son especialmente relevantes los estudios sobre amortización, análisis de inversiones y costes, formulados por estos autores en relación a los sistemas de ahorro y eficiencia, en base a sustituciones de balastos electromagnéticos por electrónicos, en función de las horas de utilización.

En esta misma línea autores como Radulovic D, Skok S y Kirincic V. [2011] exponen el rápido aumento de la población urbana, así como la cuestión energética como base para fomentar el desarrollo sostenible de nuestras ciudades. La gestión de la eficiencia energética, el análisis de las inversiones, los estudios de rentabilidad, la viabilidad financiera y la eficiencia energética aplicada a la iluminación urbana se ha convertido en una cuestión prioritaria para los gobiernos locales.

Es muy destacable, el análisis de la gestión energética del alumbrado público, realizado por estos autores en la ciudad croata de Rijeka, a fin de determinar los equipos de ahorro y eficiencia que mejor comportamiento demuestran, en función del tipo de lámparas y la tecnología de iluminación aplicada. Todo esto, sin perder de vista otros aspectos medioambientales, muy interesantes que no serán objeto del presente compendio, como son el impacto de las emisiones de dióxido de Carbono (CO₂).

Para las lámparas de descarga con halogenuros metálicos y quemador cerámico, se están proponiendo sistemas que permiten la mejora de su eficiencia y, por tanto, la rápida amortización de las instalaciones actuales. Existen pocos trabajos de comparación de ahorro de instalaciones reales de lámparas de descarga. Por ello, en este estudio se van a comparar los resultados reales obtenidos para los sistemas de ahorro siguiendo la metodología y el proceso de análisis formulado en estudios similares [Radulovic D, Skok S, Kirincic V. 2011] y [Kostic M, Djokic, L. 2009.]

Destacables son los estudios realizados sobre análisis de gastos, consumos eléctricos y su impacto en los niveles de iluminación, al utilizar balastos electrónicos como equipos de ahorro, control y reducción punto a punto, en cada luminaria. [Li D.H.W., Cheung K.L., Wong S.L., Lam T.N.T. Lam 2010]

Muy interesantes fueron los estudios sobre cuantificación de ahorros energéticos y regulación de niveles de iluminación realizados por L. Doulos, A. Tsangrassoulis, y F Topalis, [2008] mediante la utilización de balastos electrónicos regulables punto a punto.

El futuro de la iluminación urbana, parece estar situada en los LEDs. Sin embargo, esta tecnología va evolucionando de manera muy rápida y no está aparentemente lo suficientemente contrastada y probada. Por esto, las lámparas de descarga están destinadas a convivir con las nuevas tecnologías LEDs a corto y medio plazo. [Gil-de-Castro,2012]

La iluminación urbana con LEDs es ya una realidad que poco a poco tiende a imponerse en nuestras ciudades, sin embargo, la mayoría de los estudios, se centran sólo en la parte de evaluación económica asociada a la rentabilidad de la inversión, financiación y amortizaciones. Es también necesario realizar simultáneamente un exhaustivo estudio lumínico del impacto, que puede suponer el cambio, en cuanto a los aspectos luminotécnicos [Rea M.S, 2010.].

Aunque aún no parece recomendable realizar sustituciones masivas, debido a su elevado coste, la tendencia de los precios a la baja y la mejora en su eficiencia en los últimos años, permite pensar, que a corto o medio plazo, puedan ser totalmente competitivas en términos de rentabilidad económica y prestaciones

Una de las grandes ventajas de los LEDs, además de su eficiencia y vida útil, es la direccionalidad [SvilainisL. 2008]. Las fuentes de luz tradicionales, que emiten en muchas direcciones, necesitan utilizar reflectores, difusores, lamas, etc. para su correcta orientación. En definitiva elementos auxiliares que siempre disminuyen el rendimiento del punto de luz, aprovechando solo parcialmente el flujo de la fuente de luz.

En cambio los LEDs, al ser direccionales, tienen la ventaja de que todo su flujo de luz se emite, sin apenas pérdidas, llegando al elemento que se quiere iluminar. [Zalewski S. 2012]

Los LEDs, parecen haber alcanzado ya, un grado de madurez suficiente, como así se pone de manifiesto en los estudios comparativos entre éstos y las lámparas de descarga tradicionales, (con equipos de ahorro punto a punto, a base de balastos electrónicos). Desde un punto de vista lumínico, se ha comprobado que los LEDs son capaces de desarrollar prestaciones luminotécnicas semejantes a las lámparas de descarga. Siendo ratificado este aspecto por diversos estudios, que calculan ahorros que pueden llegar al 60 % comparativamente. Se señala como aspecto negativo asociado a los LEDs, su elevado coste unitario y la mayor contaminación por armónicos medida. Estas debilidades deberán mejorarse, de cara al futuro, con el esperado desarrollo tecnológico de estos equipos. Puntos fuertes de esta tecnologías son su mayor eficiencia energética, robustez, durabilidad y control de flujo luminoso. [Gil-de-Castro,2012]

Las posibilidades de ahorro, sustituyendo las lámparas de descarga tradicionales, por luminarias de tecnología LED con prestaciones lumínicas semejantes, son elevadísimas, permitiendo reducir el consumo eléctrico entre el 20 y 50% como se demuestra en los estudios de simulación y eficiencia energética para similares niveles de iluminancia en los hogares, realizados por S. Wen-Shing, T Chih-Hsuan y H. Yi-Han, [2011].

La iluminación urbana con tecnología LED se enfrenta también a un problema añadido y es la falta de estudios relevantes que permitan predecir la durabilidad real de estos equipos. La mayoría de los estudios se basan en modelos matemáticos o estadísticos que permiten aproximar su durabilidad a la supuesta vida útil real de los LEDs. [Villanueva I, Lázaro I, Anzures J, 2012].

Además con la iluminación a base de LEDs hemos observado, que la alta direccionalidad de las fuentes y las diferencias de iluminancia medida, precisan de una redefinición del concepto clásico de la uniformidad media. Esto justifica la necesidad de establecer nuevas metodologías de cálculo más rigurosas.

Actualmente para los cálculos en iluminación urbana se están planteando nuevas metodologías que utilizan parámetros clásicos para el diseño de alumbrado público (es decir, iluminancia media, interdistancia de luminarias, y altura de montaje) valorando muestras de datos, optimizados con un algoritmo evolutivo multiobjetivo. Los criterios de optimización aplicados, permiten calcular la máxima eficiencia energética y la uniformidad global de forma más precisa. Las relaciones establecidas permiten establecer un método simple y elegante para el diseño de cualquier tipo de instalación de alumbrado público, sin la necesidad de utilizar un software complejo, costoso y / o no fácilmente disponible para el usuario. Algo muy interesante para el técnico municipal, que en ocasiones necesita realizar un cálculo luminotécnico sencillo, rápido y práctico. [O. Rabaza, A. Peña-García, F. Pérez-Ocón, Gómez-Lorente, D, 2013]

En esta línea se muestran nuevos métodos para calcular el diseño de la iluminación de carreteras, basados en un algoritmo evolutivo multi-objetivo, con la ventaja adicional de mejorar la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.. [Gómez-Lorente, D; Rabaza, O; Espin Estrella, A; Peña-García, A; ,2014]

En esta línea se propone una nueva metodología planteada en el artículo 4 y que nos permitirá definir un nuevo concepto luminotécnico, asociado a la uniformidad media y al que llamaremos uniformidad estadística.

4.2. OBJETIVOS

4.2. OBJETIVOS

Los artículos recogidos en el presente compendio, son el resultado de los cuatro estudios realizados en la ciudad de Fuengirola, durante los últimos cinco años (2009-13). Su principal objetivo se enmarca en la búsqueda de la eficiencia energética, sin pérdida de calidad lumínica en los equipos analizados. Todo esto se ha llevado a cabo, siguiendo la línea marcada por las recomendaciones establecidos en el Plan de Optimización Energética (POE) de Fuengirola, que ese ejecutó en el año 2009, tras conocerse la situación real de las instalaciones y equipos de alumbrado vial y residencial en nuestra ciudad. Desde los Servicios Técnicos de Mantenimiento y Alumbrado Público del Ayuntamiento de Fuengirola, se propuso como objetivo, el probar, medir y evaluar los distintos equipos de innovación tecnológica, ahorro y eficiencia energética, que tuvieran posibilidades reales de aplicación con éxito, en nuestro sistemas de iluminación urbana. El primer paso consistió en seleccionar aquellos cuadros, a controlar, para instalar equipos de telegestión, en función del tipo de luminarias y los equipos de eficiencia energética que pretendíamos probar. Una vez seleccionados los cuadros a evaluar y los equipos a probar, se comenzó con la etapa de procesamiento de datos, evaluación y posterior análisis de los resultados. Durante todo este proceso, se han ido contrastando los resultados, con equipos de gran precisión, analizadores de red y luxómetros manuales y móviles. Así mismo, se han estudiado no sólo la eficiencia energética, sino también la eficacia lumínica de la tecnología probada. Siempre con el objetivo puesto en el ahorro económico, la eficiencia energética, la calidad lumínica y en el cumplimiento con la reglamentación actualmente vigente, (*Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior y sus Instrucciones Técnicas Complementarias EA-01 A EA-07.*)

En esta línea de trabajo, se han efectuado los cuatro estudios de investigación, recogidos en este compendio, realizados en tres zonas del casco urbano en la ciudad de Fuengirola. El principal objetivo, la búsqueda de fuentes y de sistemas de iluminación eficientes energéticamente y de calidad. Mediante la observación y la evaluación de los datos eléctricos, energéticos, y luminotécnicos, se ha analizado y evaluado la eficiencia de los sistemas de ahorro aplicados a las nuevas tecnologías de iluminación vial allí instaladas.

Las instalaciones estudiadas están constituidas por lámparas de descarga construidas con halogenuros metálicos y quemador cerámico y por las nuevas lámparas que utilizan tecnología LED.

Una vez seleccionado el tema principal objeto del estudio, resulta necesario acotarlo y determinar las cuestiones clave en las que vamos a centrar el trabajo, para cada uno de los estudios. Con la mirada puesta en la búsqueda del objetivo principal de esta tesis, antes expuesto, se pretende dar respuesta a una serie de preguntas fundamentales, que se formulan a continuación, a saber:

1. En cuanto a los equipos de ahorro y eficiencia energética aplicados a lámparas de descarga de halogenuros metálicos y quemador cerámico:
 - ¿Cuáles son los sistemas de ahorro y eficiencia energética compatibles o con posibilidad de aplicación real a estas lámparas de descarga 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?. ¿Y desde el punto de vista del ahorro energético y su rentabilidad económica?
 - ¿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?.

2. En cuanto a la posibilidad de acometer el salto tecnológico y sustituir las lámparas de descarga por nuevos equipos de iluminación con tecnología LED.
 - ¿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?. Y en cuanto a las prestaciones luminotécnicas ¿pueden verse devaluadas?.
 - La tecnología LEDs utiliza fuentes de alimentación de carácter electrónico, ¿Pero qué pasa con la contaminación armónica asociada estos equipos?
 - ¿Estamos en disposición de poder realizar sustituciones masivas de equipos de descarga tradicionales por lámparas LEDs con garantías de éxito?
3. Una vez elegido el estabilizador de tensión como mejor o más fiable sistema de ahorro y eficiencia energética para lámparas HM. Teniendo en cuenta las limitaciones que estos equipos presentan, y que se expondrán más adelante y en tanto en cuanto empieza a implantarse de manera progresiva la tecnología LED, en nuestra ciudades. Nos planteamos las siguientes cuestiones:
- ¿Son compatibles estos equipos de ahorro a base de estabilizadores de tensión reductores situados en la cabecera de los cuadros con los LEDs?
 - ¿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, utilizar estos equipos de ahorro en los cuadros híbridos, que alimentan a viales que utilizan las dos forma de iluminación analizadas?
 - ¿Qué debilidades o desventajas presenta la utilización de esta nueva tecnología LED? ¿Puede la mayor contaminación por armónicos, convertirse en su principal inconveniente de cara al futuro para esta tecnología?

4. Por último, una vez decididos a dar el salto tecnológico y en la línea de ir sustituyendo paulatinamente las lámparas de descarga por nuevos equipos de iluminación con tecnología LED. Nos preguntamos:

- ¿El cambio a LEDs puede suponer una devaluación de las prestaciones luminotécnicas evaluadas?
- ¿Conseguimos con la reducción de potencia por punto de luz reducciones en cuanto a los niveles de iluminación medidos en términos de iluminancia y uniformidad?
- ¿Es la direccionalidad asociada a las luminarias con múltiples fuentes de luz a base de LEDs, realmente una ventaja para estas fuentes de luz?
- En relación con la cuestión anterior ¿Es realmente equiparable el concepto de uniformidad media asociado a las lámparas de descarga en general a las que utilizan fuentes de luz con LEDs? ¿Sería necesario replantearnos o redefinir el concepto de uniformidad media, tal cual lo conocemos, por uno más riguroso para los LEDs, debido precisamente a su carácter multidireccional?

La intención al plantear, las cuestiones antes indicadas era tratar de definir los objetivos principales y secundarios siguientes:

1. Estudiar, analizar y comparar los equipos de ahorro y eficiencia, que pueden ser compatibles, con las lámparas de descarga de halogenuro metálico que utilizan quemadores cerámicos.

- o Verificar y contrastar, los niveles de ahorro energético y económico que realmente se pueden conseguir, con la aplicación de uno u otro sistema de ahorro.

- Comprobar, medir, evaluar y analizar la posible pérdida de prestaciones lumínicas en la utilización de uno u otro sistema.
- Estudiar, calcular y valorar, en términos económicos y de rentabilidad económica y financiera, los resultados del estudio comparativo, que permita la selección de uno u otro sistema.
- Detectar, exponer y discutir las ventajas e inconvenientes de los dos sistemas de ahorro y eficiencia probados, indicando las virtudes y las limitaciones de ambos.

2. Estudiar, analizar y comparar, las posibilidades reales, con garantías de éxito, que supone la sustitución de lámparas de descarga de halogenuro metálico que utilizan quemadores cerámicos por las nuevas lámparas que utilizan tecnología LED, en las mismas condiciones, en la misma luminaria y situación vial.

- Indicar, verificar y contrastar las posibilidades de ahorro energético y económico que realmente se pueden conseguir al sustituir unas lámparas por otras, para el mismo tipo de luminaria.
- Comprobar las posibles variaciones, en las prestaciones y calidad lumínica, en la sustitución de una forma por otra forma de iluminar en las mismas condiciones.
- Determinar, estudiar y valorar en términos económicos y de rentabilidad financiera los resultados del estudio comparativo que permita la elección de uno u otro sistemas de iluminación.
- Detectar exponer y discutir las ventajas e inconvenientes de las dos formas de iluminar, indicando sus fortalezas y debilidades.

3. Estudiar, evaluar y analizar las posibilidades reales con garantías de éxito que supone la aplicación de los estabilizador de tensión y reductores de flujo instalados en la cabecera de los cuadros de alumbrado y su uso compatible tanto para las lámparas de descarga de halogenuro metálico que utilizan quemadores cerámicos como para las nuevas fuentes de luz que utilizan tecnología LED.

- Verificar y contrastar las posibilidades de ahorro energético que realmente se pueden conseguir con la aplicación de este sistema de ahorro a las lámparas que utilizan tecnología LED.
- Comprobar, medir y evaluar las variaciones en las prestaciones lumínicas en la utilización de este sistema de ahorro aplicado a LEDs.
- Estudiar las limitaciones observadas de la evaluación de los parámetros eléctricos y la contaminación por armónicos detectada al aplicar este a los LED.
- Detectar, exponer y discutir las ventajas e inconvenientes de este sistema de ahorro y eficiencia aplicado a LED

4. Estudiar, comparar y evaluar desde un punto de vista luminotécnico (análisis de la iluminancia media, uniformidad media y extrema), la sustitución para un mismo tipo de luminaria, de lámparas de descarga de HM, por LEDs de distinta tipología y fabricantes.

- Definir una malla de puntos adaptada al vial que se pretende iluminar, midiendo iluminancias para cada una de las fuentes de luz analizadas en cada uno de los puntos de la nube y representar gráficamente los resultados en tres dimensiones.

- Calcular la iluminancia media, la uniformidad media y extrema para cada una de las fuentes analizadas.
- Estudiar y analizar de forma comparativa, los resultados obtenidos.
- Definir un nuevo concepto de uniformidad más riguroso, resultado de las observaciones realizadas y que llamaremos uniformidad estadística.

En base a la búsqueda de los objetivos principales y secundarios expuestos, se realizaron los cuatro estudios, que vieron la luz en forma de los cuatro artículos compendiados en esta tesis, a saber:

1. Estudio comparativo, para la evaluación y selección del sistema más eficiente energética y lumínicamente aplicado a lámparas HM con quemador cerámico. Se compararon básicamente estabilizadores de tensión-reductores de flujo en cabecera, con balastos electrónicos instalados punto a punto en cada luminaria. Este estudio se ha llevado a cabo en las calles Málaga y Camino de la Condesa, viales perteneciente al T.M de Fuengirola (Málaga).
2. Estudio comparativo y análisis justificativo para el cambio y sustitución, de lámparas HM, por la nueva tecnología emergente LED. Haciendo sustituciones punto a punto comprobando los resultados antes y después del cambio en las calles Santa Ana, Santa Rosa, Santa Lucía y San Pablo en Los Boliches, viales perteneciente al T.M de Fuengirola (Málaga).
3. Estudio y evaluación de los resultados eléctricos, y luminotécnicos, en lámparas que utilizan tecnología LED, mediante la instalación de equipos estabilizadores de tensión en la cabecera del cuadro. Siendo estos equipos compatibles con las lámparas de descarga existentes en otros circuitos del cuadro .

4. Propuesta de una metodología estadística para la evaluación de la uniformidad media. Aplicación a luminarias con LEDs. Considerando que la uniformidad, asociada a la direccionalidad y óptica de las luminarias LEDs, sigue siendo un problema que los fabricantes de esta tecnología siguen investigando y tratando de mejorar. Se plantea en este artículo una metodología estadística que permita estudiar la uniformidad desarrollada por las luminarias en general y las que utilizan LEDs en particular. De esta forma podemos comparar prestaciones lumínicas medidas en términos de iluminancia y uniformidad en luminarias LED con distinta tecnología y comparar éstas a su vez con las tradicionales lámparas de descarga. Esta experiencia se realizó en la calle San Pablo en Los Boliches, vial perteneciente al T.M de Fuengirola (Málaga).

Estos cuatro estudios comparativos, se han ejecutado con un doble objetivo. Por un lado evaluar la eficiencia energética, y analizar las prestaciones lumínicas de los equipos de ahorro con posibilidades de aplicación a las lámparas de descarga de HM. O en su caso, apostar, como alternativa, por el cambio tecnológico avanzado que supone la sustitución de los equipos anteriores por LEDs desde un punto de vista energético, eléctrico y luminotécnico. Una vez evaluados, procesados y discutidos los resultados de los cuatro estudios, estos vieron la luz en forma de cuatro artículos, publicados por cuatro revistas científicas de reconocido prestigio.

4.3. METODOLOGÍA

4.3. METODOLOGÍA.

El trabajo partió de un análisis bibliográfico y documental exhaustivo. Inicialmente planteamos una búsqueda en diversas bases de datos con las que seleccionamos artículos, obras y trabajos relativos a los temas objeto de nuestro interés. Con todo ello se elabora un estado del arte inicial.

A continuación explicaremos el procedimiento general empleado en los artículos y que, con algunas diferencias entre unos y otros estudios, pues los tres primeros van más dirigidos a la evaluación de los aspectos de ahorro energético y el último más a los luminotécnicos, consistió en la aplicación del siguiente proceso metodológico:

1. 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.
2. Estos datos eléctricos, fueron contrastados con equipos portátiles analizadores de red AR6 de CIRCUITOR para verificar los resultados obtenidos.
3. Realización de mediciones luminotécnicas periódicas, 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 Luxómetro KOBAN modelo Digital KL-1330 de los Servicios Técnicos de Mantenimiento del Ayuntamiento de Fuengirola, calibrado y verificado.
4. Procesamiento de todos los datos recogidos, para su análisis evaluación y posterior discusión.
5. Análisis económico y financiero de la inversión en los equipos de ahorro y eficiencia instalados y analizados.

6. 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 cada uno de los artículos relacionados, en este compendio.

A continuación explicaremos la metodología específica y los equipos empleados en cada uno de los experimentos

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

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 marca Philips modelo Master City (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.

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

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

Los sistemas de regulación y ahorro, objeto del presente estudio fueron:

1. Estabilizador de tensión-reductor de flujo luminoso.

Estabilizador-regulador marca SALICRU, modelo ILUEST (KIT NET + 20 - 4 LCD), situado en la cabecera de la línea de alumbrado, en el cuadro de mando. Aunque el equipo permite reducir más la tensión, se fijó la tensión reducida a 208 V \pm 5V, ya que por debajo de esta tensión se observó se producían problemas de encendido de algunos puntos de luz situados a final de línea por tensión insuficiente. Esto condicionó el límite máximo regulable para el estabilizador a una reducción entorno al 20 %.

2. Balastos electrónicos de doble nivel.

Se sustituyeron las reactancias electromagnéticas por balastos electrónicos marca TRIDONIC (PCIS 150 outdoor DIM B011) de doble nivel regulables mediante hilo de mando, que en esta instalación se ha telegestionado desde el cuadro de mando.

Para controlar la evolución de los niveles de luz, previamente se realizaron estudios teóricos lumínicos de los dos viales usando programa de Calculo Luminotécnico SIBA, elaborado para ATP por el Laboratorio de Luminotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

| | E_{max} Lux | E_{med} Lux | E_{min} lux | U_{med} % | U_{ext} % |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Calle Málaga | 27.5 | 22.8 | 17.8 | 87 | 65 |
| Calle de la Condesa | 57.0 | 38.8 | 21.8 | 56 | 38 |

Tabla 3. Cálculos luminotécnicos previos teóricos de las calles de estudio

Durante un año, se realizó un registro diario (intervalos de 15 minutos) de datos eléctricos (energía, potencia, tensión, intensidad y factor de potencia), así como seguimiento y control de fallos de la instalación. Se efectuó un análisis de los dos sistemas de regulación descritos, antes y después de la entrada en reducción de las instalaciones, para evaluar las minoraciones en el consumo.

Para comprobar los niveles de reducción de la iluminación y el mantenimiento de la uniformidad, se realizaron mediciones lumínicas mensuales, in situ. El método seleccionado para las mediciones luminotécnicas, ha sido el método simplificado de medida de la iluminancia media descrito en la *R.D. 1890/2008*, ITC-EA-07 Se contrastaron la influencia de los sistemas de regulación y control comparados, en la reducción de los niveles lumínicos, expresados en términos de iluminancia y uniformidad.

Se compararon los resultados teóricos, con los reales y la percepción visual de la reproducción cromática

Se emplearon dos luxómetros:

1. Luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B del Área de Proyectos de Ingeniería de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Málaga, calibrado y verificado.
2. Luxómetro KOBAN modelo Digital KL-1330 de los Servicios Técnicos de Mantenimiento del Ayuntamiento de Fuengirola, calibrado y verificado.

Por último se procedió a la evaluación del estudio económico y de rentabilidad de la inversión asociada a los dos sistemas de ahorro valorados. El análisis se realizó en base a los resultados de los indicadores de rentabilidad económica y financiera obtenidos, en función de las horas de funcionamiento de los equipos y la inversión planteada.

- **METODOLOGÍA Artículo 2. ANALISIS 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.** (*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 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 fuentes de luz tipo LEDs, marca CREE fabricados por ETI S.A, (fig.2) (Tabla.4)



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 lumínica (Lm/W) | Vida Util (h) |
|---------------------------|---------|--------------|---------------|---------------------|--------------------------|---------------|
| HM-MASTER CITY CDO-TT/828 | PHILIPS | 150 | 2.800 | 13.500 | 90 | 15.000 |
| ETILED | ETI S.A | 51 | 4.000 | 4.059 | 80 | 50.000 |

Tabla 4. Características de las lámparas a comparar (Fuente Catálogos comerciales PHILIPS y ETI)

Al igual que en el estudio del artículo 1, se realizó estudio lumínico teórico para lámparas HM y LED.

Siguiendo las recomendaciones de estudios similares [Radulovic D, Skok S, Kirincic V. 2011] [Kostic M, Djokic, L. 2009.] y [Gil-de-Castro,2012], la metodología consistió en:

1. Recopilar datos de los parámetros eléctricos registrados diariamente, durante un año, con el equipo de medida TELEASTRO fabricado por AFEISA, instalado en cabecera, contrastando los resultados con el analizador de red AR6 de CIRCUITOR .
2. Realizar mediciones luminotécnicas contrastadas con dos luxómetros, uno marca GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B del Área de Proyectos de Ingeniería de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Málaga y un segundo Luxómetro KOBAN modelo Digital KL-1330 de los Servicios Técnicos de Mantenimiento del Ayuntamiento de Fuengirola, calibrado y verificado.
3. Estos datos nos sirvieron para estudiar en su conjunto, contrastar resultados y realizar un análisis comparativo, a nivel eléctrico, energético y lumínico, de las 45 luminarias, antes y después de de la sustitución de las lámparas de descarga HM por las lámparas LEDs. De esta forma pudimos evaluar las minoraciones en el consumo y contrastar, comparativamente, los resultados al realizar la sustitución.
4. Por último se procedió a la evaluación y estudio económico justificativo para la ejecución del proyecto de inversión planteado, aplicando técnicas de análisis económico y financiero. Se analizó, en base a los resultados de los indicadores de rentabilidad económico-financiera y en función a las horas de funcionamiento de los equipos, la inversión planteada con la sustitución propuesta.

➤ **METODOLOGÍA Artículo 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 5)

| Tipo lámpara LED | Marca Lámpara | Marca LED | Potencia (W) | Tº Color (ºK) | Flujo Luminoso (Lm) | Eficacia luminosa(Lm/W) | Vida Util (h) |
|------------------|---------------|-----------|--------------|---------------|---------------------|-------------------------|---------------|
| ETILED | ETIS.A | CREE | 51 | 4.000 | 4.059 | 80 | 50.000 |

Tabla 5. Características de las fuentes de luz. Fuente: Catálogo del fabricante ETI S.A

Previamente se realizó el estudio lumínico teórico, a potencia completa, sin reducir, para LED.

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

1. Un Estabilizador de tensión -reductor de flujo luminoso, situado en la cabecera del cuadro. Modelo ILUEST (KIT NET + 20 - 4 LCD) fabricado por SALICRU.
2. Controlador universal para módulo LED, marca DIMILED, instalados en cada una de las luminarias.

Los datos eléctricos, se recogieron con el equipo TELEASTRO de AFEISA.

Estos datos fueron contrastados mediante la realización de mediciones in situ, a la salida de las tres fases y neutro del circuito de las nueve lámparas LEDs, (repartidas tres por fase), con un equipo analizador de red tipo AR6 de la marca CIRCUITOR.

El estabilizador-reductor de flujo en cabecera, se instaló en un cuadro sito en calle Málaga, con 4 circuitos de salida. Tres de estos circuitos están conectados a líneas con lámparas de descarga, que no serán objeto de estudio, y un cuarto circuito, alimenta exclusivamente las 9 luminarias LEDs.

El estudio se realizó de forma aislada recogiendo los resultados con el equipo de medida telegestionado, de la marca AFEISA, y contrastándolos con el analizador de red AR6 de la marca CIRCUITOR.

De esta forma pudimos tomar medidas eléctricas (tensión, intensidad, potencia activa y reactiva, así como el análisis de armónicos) antes y después de estabilizar la tensión de salida en el circuito de LEDs.

Previamente se procedió, al ajuste manual del equipo de ahorro (estabilizador-reductor), en función de las caídas de tensión, por circuito. Se fijó la tensión reducida, en $208\text{ V} \pm 5\text{V}$ con una reducción entorno al 20 %, limitada conforme habíamos calculado en el primer estudio y condicionada por el límite de tensión mínima de encendido para lámparas de HM, en este cuadro híbrido. [Hermoso MJ, de Andrés JR, 2013]

El proceso o metodología seguido en este estudio consistió en:

1. Aislar el circuito que alimenta exclusivamente a las nueve luminarias LED. Tres luminarias LED por fase del circuito independiente analizado.
2. Medir los parámetros eléctricos de los circuitos LEDs de forma aislada, con el equipo de medida y telegestión TELEASTRO, instalado en cabecera, en el cuadro de maniobra. Contrastando los resultados de las medidas con el analizador de red tipo AR6, instalado provisionalmente en el mismo a la salida del circuito que alimenta las lámparas LEDs.

3. Realizar mediciones luminotécnicas con dos luxómetros, uno fijo tipo GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B del Área de Proyectos de Ingeniería de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Málaga, calibrado y verificado, contrastando las mediciones con otro luxómetro móvil LX-GPS para medida de iluminancia mediante vehículo y GPS marca AFEI SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN S.A propiedad del Ayuntamiento de Fuengirola.
 4. Finalmente se llevó a cabo un análisis comparativo, antes y después de entrar en funcionamiento el sistema de ahorro y de reducción de tensión. De esta forma se evaluaron las minoraciones en el consumo y contrastaron, la influencia del sistema de regulación y control, en la reducción de los niveles lumínicos, expresados en términos de iluminancia y uniformidad, estudiando y comparando los resultados teóricos, con los prácticos
- **METODOLOGÍA Artículo 4. STATISTICAL METHODOLOGY PROPOSAL FOR EVALUATING UNIFORMITY: APPLICATION TO LED LUMINAIRES.**
(PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD. APLICACIÓN A LUMINARIAS CON LEDS).

Para el estudio se seleccionó una luminaria tipo VILLA de la marca ATP (*marca comercial: Alumbrado Técnico Público S.A*) instalada en un vial de Fuengirola (Málaga). La luminaria a medir se sitúa a 3,5 m de altura sobre el pavimento de asfalto en calzada y terrazo en acera, en la que inicialmente se ha instalado una lámpara de descarga de halogenuros metálicos (HM) de 150 W marca PHILIPS. El vial donde se realizó el estudio se corresponde con una calzada de doble sentido de 6 m de ancho y dos aceras de 3 m de ancho sin aparcamiento lateral.(Fig 3)

Se va a comparar la lámpara de descarga HM con cinco aplicaciones de tecnología LED, aportadas por cuatro fabricantes, que aplican este nuevo sistema de iluminación LED adaptado al mismo tipo de luminaria tipo VILLA.

| Fuente luminosa | Características | | | | Medidas eléctricas | | | |
|-----------------------|-----------------|------------|-----------------|---------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| | Pot (W) | Flujo (Lm) | Eficacia (Lm/W) | Tª Color (°K) | Pot (W) | React. Induc. (VarL) | React. Capac. (VarC) | Factor Potenc. |
| Mater City CDO TT/828 | 150 | 13.500 | 90 l | 2800 | 170 | 10 | 0 | 0,95 |
| SSIE | 45 | 3.500 | 80 | 5.500 | 40 | 0 | 0 | -0,99 |
| ETILED | 51 | 4.059 | 80 | 4.000 | 50 | 0 | 20 | -0,92 |
| DLED | 56 | 3.958 | 83 | 4.000 | 60 | 0 | 10 | -0,99 |
| REXDOS 270 | 45 | 3.800 | 80 | 4.000 | 40 | 0 | 0 | -0,98 |
| REXDOS 360 | 50 | 4.000 | 80 | 4.000 | 50 | 0 | 0 | -0,99 |

Tabla 6: Características teóricas y medidas eléctricas de las fuentes de luz utilizadas. Fuente: Elaboración propia

Para las mediciones de iluminancias y parámetros eléctricos, se emplearon dos luxómetros de medida y un equipo analizador de red, a saber:

1. Luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B del Área de Proyectos de Ingeniería de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Málaga, calibrado y verificado.
2. Luxómetro KOBAN modelo Digital KL-1330 de los Servicios Técnicos de Mantenimiento del Ayuntamiento de Fuengirola, calibrado y verificado.
3. Analizador de red tipo AR6 de la marca CIRCUITOR propiedad de los Servicios Técnicos de Mantenimiento del Ayuntamiento de Fuengirola, calibrado y verificado.

Para realizar el estudio se seleccionaron 6 farolas, montadas con igual luminaria tipo VILLA, conforme a la descripción del punto anterior. En una de ellas se usó una lámpara de descarga HM, con 2 años de uso y aproximadamente unas 6.000 horas de funcionamiento y en las otras 5 se instalaron las fuentes de luz con tecnología LED indicadas anteriormente.

Las mediciones de parámetros eléctricos tomadas con el analizador de red AR6 sirvieron para verificar la potencia de las lámparas y su ajuste a las especificaciones del fabricante, como se puede ver en la *tabla 6*

METODOLOGÍA:

Explicaremos la metodología propuesta, utilizando las mediciones realizadas con los luxómetros, para la luminaria equipada con la lámpara de HM de 150 W.

Para la realización de mediciones, se dibujaron en el pavimento (acerado y calzada), de 87 puntos situados en una matriz de 8 x 11 (8 filas y 11 columnas), en cuyo centro marcado con la coordenada origen (0,0) si situó el eje de la farola a medir (fila 5, columna 6). El bordillo del vial corresponde con la fila 5, situándose la calzada (6 m de ancho) entre la fila 1 a la 4 y el acerado entre la fila 5 a la 8 (3 m) y (Fig. 3)

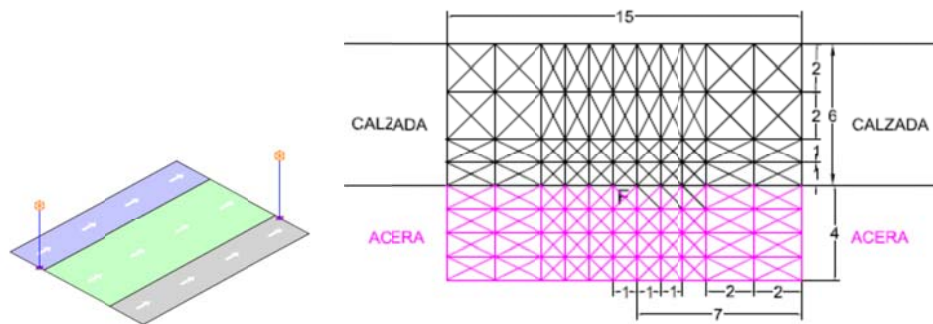


Fig.3. Esquema del tipo de vial y dimensiones de la Cuadrícula utilizada. Fuente: elaboración propia.

Se obtuvieron los valores medios de dichas medidas en lux para punto localizado de la malla con los dos luxómetros a modo de medición de contraste.

En cada punto de la matriz, (Tabla 7), que se corresponde con un punto de la cuadrícula de la figura 3, mediremos iluminancias en lux a nivel del pavimento. Posteriormente representaremos la superficie que define la muestra de iluminancias obtenidas en cada punto de la matriz (fig. 4).

| COLUMNA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|------|-----|-------|
| DISTANCIAS (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | | Filas |
| 6 | 2,97 | 3,96 | 5,03 | 7,79 | 6,90 | 6,80 | 6,74 | 6,24 | 5,63 | 4,66 | 3,17 | 6,0 | 1 |
| 4 | 4,93 | 4,79 | 7,45 | 7,76 | 7,17 | 6,72 | 7,57 | 7,06 | 6,95 | 4,05 | 5,30 | 4,0 | 2 |
| 2 | 7,56 | 9,19 | 7,09 | 8,87 | 14,88 | 16,14 | 12,88 | 9,00 | 6,19 | 8,59 | 6,66 | 2,0 | 3 |
| 1 | 7,60 | 12,01 | 12,86 | 13,41 | 11,36 | 11,04 | 10,61 | 12,23 | 11,66 | 10,01 | 7,60 | 1,0 | 4 |
| 0 | 8,00 | 9,65 | 14,60 | 14,78 | 16,64 | HM 150 W | 15,34 | 16,73 | 12,39 | 11,65 | 7,52 | 0,0 | 5 |
| 1 | 5,57 | 10,03 | 7,89 | 14,79 | 12,78 | 14,88 | 13,93 | 12,51 | 8,00 | 9,17 | 4,79 | 1,0 | 6 |
| 2 | 4,56 | 7,59 | 8,73 | 8,50 | 18,68 | 19,56 | 17,22 | 9,62 | 7,07 | 8,59 | 4,02 | 2,0 | 7 |
| 3 | 2,59 | 9,19 | 6,75 | 11,36 | 11,32 | 12,47 | 10,93 | 9,21 | 7,05 | 8,09 | 3,52 | 3,0 | 8 |

Tabla 7. Matriz de medición con distancia en metros y medidas en lux para la Lámpara HM de PHILIPS 150 W- Fuente: Elaboración propia.

El análisis gráfico y el posterior estudio estadístico de las iluminancias medidas, nos permitirá definir un nuevo concepto luminotécnico, que denominaremos a partir de ahora como uniformidad estadística (en adelante U_s) desarrollada por cada una de las fuentes de luz, con el nuevo método propuesto. Compararemos los resultados de uniformidad estadística (U_s) propuesta con esta nueva metodología, con los obtenidos para la uniformidad media (U_m) calculada por el método tradicional conforme recomendaciones de la CIE. A saber (1) y (2):

$$U_m = \frac{L_{\min}}{L_{\text{med}}} \quad (1) \text{ (Definición Uniformidad media } (U_m) \text{ teórica según CIE)}$$

Donde :

U_m = Uniformidad media

L_{\min} = Iluminancia mínima (lux)

L_{med} = Iluminancia media (lux)

$$U_s = \frac{\text{Desv típica } (\sigma)}{L_{\text{med}}} = \text{Coef variación } (\%) \quad (2) \text{ (Definición Uniformidad estadística } (U_s) \text{ propuesta en este estudio)}$$

Donde :

U_s = Uniformidad estadística

Desv típica (σ)= Desviación típica muestral.

L_{med} = Iluminancia media (lux)

Coefficiente de variación estadística expresado en %

De esta forma podremos calcular de forma más precisa la uniformidad estadística (U_s) de la iluminación como el coeficiente de variación de la muestra, expresado en %, y definido éste, como cociente entre la desviación típica o estándar de las iluminancias medidas, y la iluminancia media.

La desviación típica o estándar de la muestra (σ) como medida de la mayor o menor dispersión de los valores de iluminancia respecto a la iluminancia media; nos permitirá definir de forma muy precisa la uniformidad de la iluminación. Esta nueva definición de la uniformidad estadística permite resolver el problema de la emisión multidireccional de las luminarias LEDs, presentando un nuevo método de cálculo de la uniformidad más riguroso.

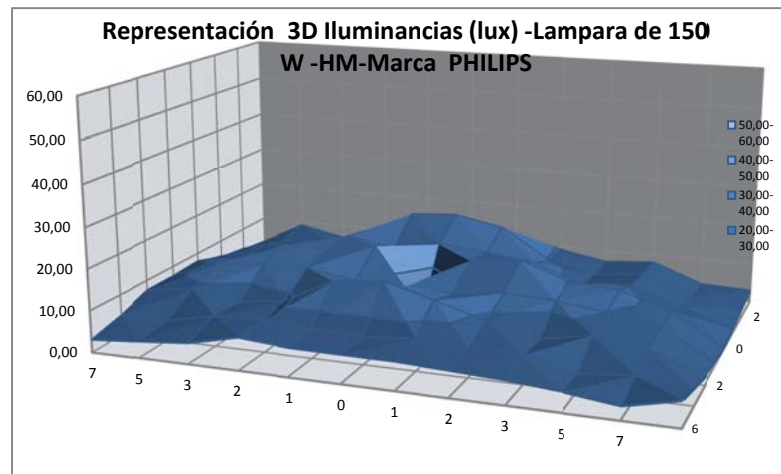


Fig.4. Representación 3D Iluminancias (lux) –
Lampara HM 150 W-Marca PHILIPS. Elaboración propia.

Como se indicó en la fórmula anterior, la medida de la dispersión de las iluminancias se calculará estadísticamente como la desviación típica de la muestra, relacionada con su iluminancia media, quedando definida estadísticamente, como el coeficiente de variación expresado en %.

De esta forma, cuanto menor sea dicha desviación típica respecto a la iluminancia media, mejor será la uniformidad estadística (U_s) de las iluminancias. También se ha calculado la uniformidad media (U_m) y extrema (U_g) de acuerdo con la definición CIE (Tabla 8).

| | <i>Metodología CIE</i> | | | | | <i>Nueva Metodología</i> | | | |
|----------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|---------------|---------------|--------------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{med} | Vari σ^2 | Desv σ | Coef | U_s |
| <i>Acera</i> | 2,59 | 19,56 | 0,25 | 0,13 | 10,42 | | | | |
| <i>Calzada</i> | 2,97 | 16,14 | 0,37 | 0,18 | 8,12 | | | | |
| Total | 2,59 | 19,56 | 0,28 | 0,13 | 9,27 | 14,89 | 3,85 | 0,4164 | 41,64 |

Tabla 8 . Tabla de Iluminancias y Uniformidades obtenidas por el método CIE) y nuevo método propuesto. Fuente: Elaboración propia

4.4. RESUMEN GLOBAL DE LOS RESULTADOS

4.4 RESUMEN GLOBAL DE LOS 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 :

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

4.4.1.1.RESULTADOS ELÉCTRICOS COMPARATIVOS:

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 5), comprobando que no existía consumo de reactiva.

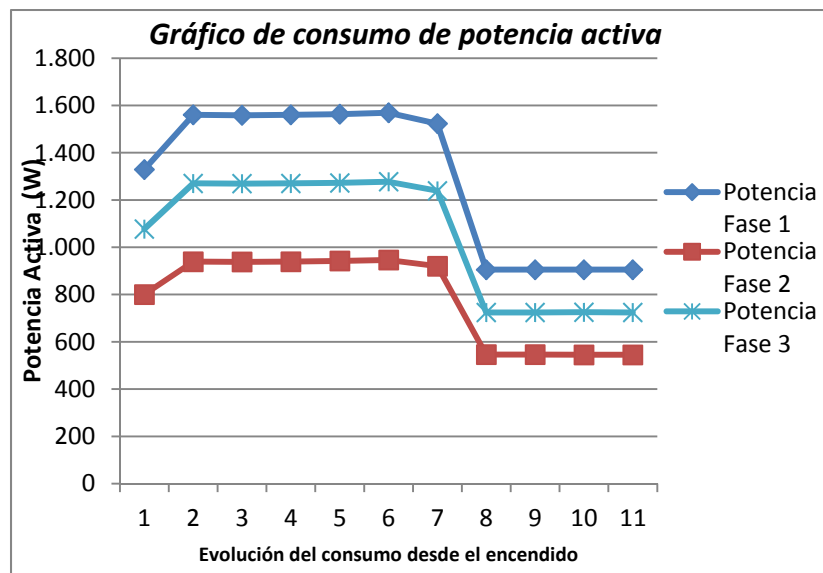


Fig. 5. Gráfico de consumo de potencia activa (Fuente: elaboración propia con datos resumen obtenidos con el Teleastro de AFEISA)

Estabilizador de tensión - Calle Málaga

Cuando actuó el estabilizador de tensión se obtuvo una reducción media anual del 20 % de potencia activa (figura 6) y del 40 % en la potencia reactiva (figura 7). Como ya se ha comentado, 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.

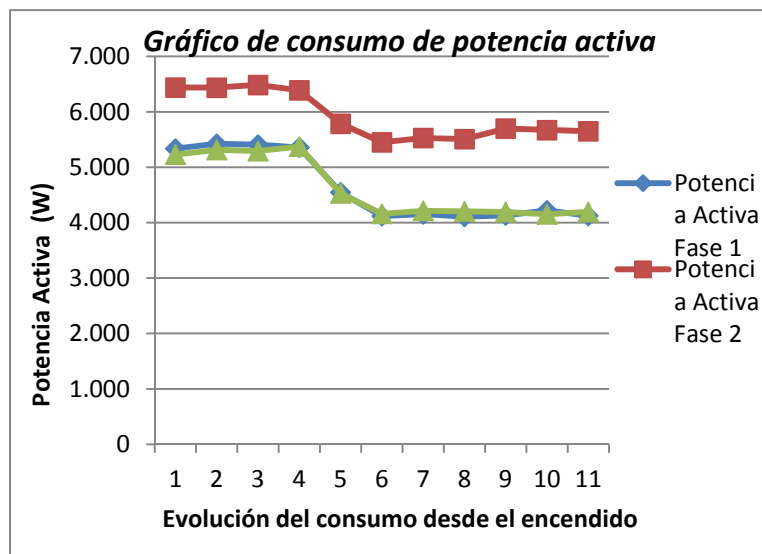


Fig. 6. Gráfico de consumo de potencia activa. (Fuente: elaboración propia con datos resumen obtenidos con el Teleastro de AFEISA)

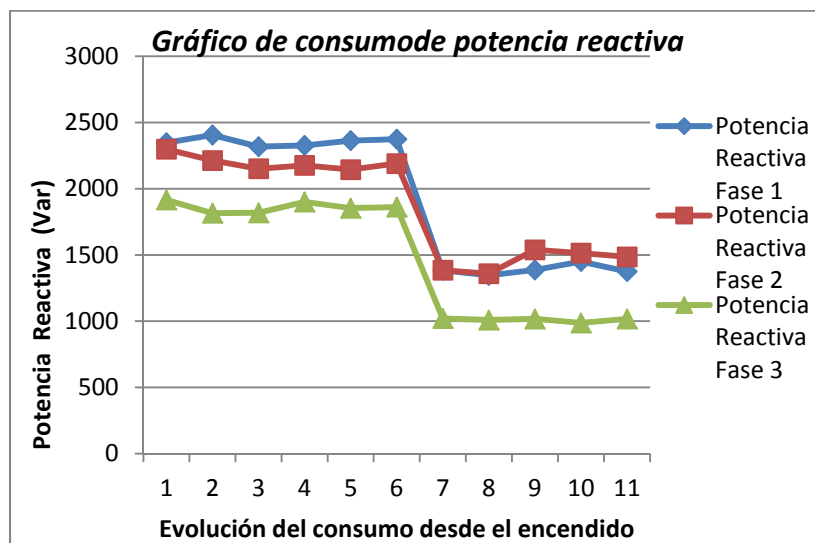


Fig.7. Gráfico de consumo de potencia reactiva. (Fuente: elaboración propia con datos resumen obtenidos con el Teleastro de AFEISA)

4.4.1.2. RESULTADOS Y BALANCE ENERGÉTICO.

En la Tabla 9 y 10 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 conforme a la tarifa contratada para el cuadro analizado de 0,140069 Euros /KWh.

| DATOS MEDIOS TOMADOS A INTERVALOS DE 15 MINUTOS | ANTES DE REDUCIR | DESPUÉS DE REDUCIR | REDUCCIÓN |
|---|--|--------------------|-----------|
| 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 9 Balance energético y plazo de recuperación de la inversión para sistema de ahorro con Balastos electrónicos regulables-Calle Camino de la Condesa

| DATOS MEDIOS TOMADOS A INTERVALOS DE 15 MINUTOS | ANTES DE REDUCIR | DESPUÉS DE REDUCIR | REDUCCIÓN |
|---|--|--------------------|-----------|
| 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 10. Balance energético y plazo de recuperación de la inversión para sistema de ahorro con Estabilizador-regulador de flujo en cabecera

Observar que los porcentajes de ahorro energético son el doble en el caso de regulación con balastos electrónicos (44%) que con estabilizadores (18%), siendo el plazo de recuperación de la inversión estimada inicialmente en base a los ahorros obtenidos, del doble y por encima de los 5 años. Estos resultados obtenidos del balance energético, son consecuentes con las reducciones de potencia obtenidas y con estudios similares. [Kostic M, Djokic, L. 2009.]

4.4.1.3. BALANCE LUMINOTÉCNICO.

El balance luminotécnico medio, conforme a los resultados de las mediciones a pie de campo, se recoge en la *Tabla 11*.

| 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 11. 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, respectivamente.¹

¹ 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 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.

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. 8 y 9), 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 11).

CAMINO DE LA CONDESA (Balasto electrónico de doble nivel)



Fig. 8. Comparación de percepción de color con balance blancos

CALLE MÁLAGA (Estabilizador de tensión en cabecera)



Fig. 9. Comparación de percepción de color con balance blancos

4.4.1.4. 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 12*)

| BALASTOS ELECTRONICOS DOBLE NIVEL-CAMINO DE LA CONDESA (8 horas de funcionamiento diario) | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|----------------------|--------|-------|---------|------------|------------|----------|---------|----------|-------|
| ahorro cada 15 minutos | 0,16640 | | | | | | | | | | |
| ahorro anual | 1.943 | | | | | | | | | | |
| Coste Inversión | 12.600 | | | | | | | | | | |
| | | | AÑOS | | | | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Ahorro energético | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 |
| Total Ingresos | 1.943 | | | | | | | | | | |
| | | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 |
| | | CUASI RENTAS ANUALES | | | | | | | | | |
| CALCULAMOS EL VAN para un interés del 5 % | Años | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Indice actualizado | $(1+i)^n$ | 1,05 | 1,10 | 1,16 | 1,22 | 1,28 | 1,34 | 1,41 | 1,48 | 1,55 | |
| Cuasirentas | $Q/(1+i)^n$ | 1.850 | 1.762 | 1.678 | 1.599 | 1.522 | 1.450 | 1.381 | 1.315 | 1.252 | |
| Sumatorio | $\sum Q/(1+i)^n$ | -10.750 | -8.987 | 7.309 | - 5.710 | - 4.187,83 | - 2.737,93 | 1.357,08 | - 41,98 | 1.210,50 | |
| VAN a 5 años | -4187,83 | | | | | | | | | | |
| VAN a 9 años | 1210,50 | | | | | | | | | | |
| Plazo de Recuperación | 9 | | | | | | | | | | |
| Plazo de Recuperación simple | 6,48 | | | | | | | | | | |
| Tasa interna de retorno TIR (6 AÑOS) | -8 % | | | | | | | | | | |
| Indice Beneficio Coste | 0,67 | | | | | | | | | | |

Tabla 12. Análisis de la inversión con balastos electrónicos regulables (8 horas de funcionamiento)

El balance comparativo de los indicadores, para 8,7 y 6 horas de funcionamiento diario del equipo de ahorro se recoge en la tabla 13 y se verifica que a menor número de horas de funcionamiento los resultados son más desfavorables.

| Horas de funcionamiento Sistema de ahorro | VAN (5 años) | VAN (9 años) | Pay-Back (simple)-Años | Pay-Back (financiado)-Años | TIR (5 años) | IBC (5 años) |
|---|--------------|--------------|------------------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 8 | - 4187,83 | 1210,50 | 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 % | 0,50 |

Tabla 13. 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 14*)

| ESTABILIZADOR –REDUCTOR EN CUADRO CALLE MÁLAGA | | | | | | | | |
|--|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| ahorro cada 15 minutos | 0,1120552 | | | | | | | |
| Ahorro anual | 1308,804736 | AÑOS | | | | | | |
| Coste Inversión | 4.500 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ahorro energético | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | |
| Total Ingresos | 1.309 | | | | | | | |
| CUASI RENTAS ANUALES | | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | | |
| CALCULAMOS EL VAN para un interés del 5 % | Años | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Indice actualizado | (1+i) ⁿ | 1,05 | 1,10 | 1,16 | 1,22 | 1,28 | 1,34 | |
| Cuasirentas | Q/(1+i) ⁿ | 1246 | 1186 | 1130 | 1076 | 1025 | 976 | |
| Sumatorio | ∑ Q/(1+i) ⁿ | - 3254 | -2068 | -938 | 138 | 1162 | 2139 | |
| VAN a 5 años | 1162 | | | | | | | |
| VAN a 6 años | 2139 | | | | | | | |
| Plazo de Recuperación | 4 | | | | | | | |
| Plazo de Recuperación simple | 3,44 | | | | | | | |
| Tasa Interna de Retntabilidad | 14 % | | | | | | | |
| Indice Beneficio Coste | 1,26 | | | | | | | |

Tabla 14. Análisis de la inversión con Estabilizador de tensión- Regulador de flujo en cabecera

El balance comparativo de los indicadores, para 8,7 y 6 horas de funcionamiento diario del equipo de ahorro se recoge en la tabla 15 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 Sistema de ahorro | 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 15. Análisis de la inversión con Estabilizador de Tensión en cabecera para 8,6 7 horas de funcionamiento

Los resultados comparativos, desde el punto de vista económico y financiero, entre los sistemas de ahorro evaluados, nos hace inclinarnos claramente del lado de la inversión en equipos estabilizador-regulador de flujo. En las tablas 13 y 15, se observa que los indicadores tanto económicos como financieros evaluados, ponen en situación de ventaja competitiva a los estabilizadores de tensión, frente a los balastos electrónicos, tanto desde el punto de vista de la inversión por Watio, del retorno de la inversión y de la rentabilidad financiera de la misma, al menos para los equipos comparados y con los precios actuales de la energía eléctrica.

No obstante para un número de horas inferior a 7, los Estabilizadores de tensión muestran una rentabilidad de la inversión por debajo de los costes de financiación, con un retorno de la inversión superior a los 5 años, lo que pondría en cuestión la inversión por debajo de estas 7 horas de funcionamiento, salvo que los costes de capital de la inversión bajaran por debajo del 5% establecido como hipótesis de partida inicialmente.

4.4.1.5. CONTROL DE FIABILIDAD DEL SISTEMA EN CONDICIONES DE USO REAL

Señalar por último, y como muy significativo, que durante este estudio anual (entre Diciembre de 2010 y Diciembre de 2011) se han producido 8 fallos en los equipos de balasto electrónico instalados en el Camino de la Condesa. Estos equipos han sido analizados en el laboratorio, para tratar de aclarar el origen de los fallos en los mismos, pues sobre el total de 24 equipos instalados supone más de un 30 % de fallos en menos de un año. Los primeros resultados de laboratorio parecen evidenciar problemas de sensibilidad a alta temperatura de los equipos, por su situación en la luminaria próxima a la lámpara. Actualmente la cifra de fallos de estos equipos se ha elevado al 80 %, lo que supone una casi renovación total de los mismos en menos de 4 años.

En el estabilizador de tensión de Calle Málaga no se ha registrado fallo alguno en su comportamiento. En cuanto a las lámparas se han producido 2 sustituciones en calle Málaga y ninguna en Camino de la Condesa, lo que supone un escaso 1% y 0% de fallos en lámparas respectivamente.

4.4.2.RESULTADOS Artículo 2. ANALISIS 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. (COMPARATIVE AND SUPPORTING CHANGE TO LEDS ANALYSIS IN SYSTEMS WITH METAL HALIDE LAMPS. ANOTHER STEP TOWARDS ENERGY EFFICIENCY IN URBAN LIGHTING).

4.4.2.1.BALANCE Y RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

-. Resultados medios obtenidos con equipo TELEASTRO.

Los resultados medios comparativos registrados con el TELEASTRO durante los 12 meses del estudio, se recogen en la tabla 16.

| PARAMETROS 45 LAMPARAS HM 150 W | | | | | | PARAMETROS 45 LAMPARAS LEDS 51 W | | | | |
|-------------------------------------|----------------|-------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------|
| (Mediciones en cabecera del cuadro) | | | | | | (Mediciones en cabecera del cuadro) | | | | |
| FASES | Intensidad (A) | Tensión (V) | Potencia Activa (Kw) | Potencia Reactiva Inductiva (Kvar L) | Factor de Potencia | Intensidad (A) | Tensión (V) | Potencia Activa (Kw) | Potencia Reactiva Inductiva (Kvar L) | Factor de Potencia |
| L1 | 9,7 | 235 | 2,140 | 0,687 | 0,92 | 3,5 | 236 | 0,830 | 0 | -0,98 |
| L2 | 8,0 | 236 | 1,810 | 0,357 | 0,94 | 2,7 | 237 | 0,639 | 0 | -0,99 |
| L3 | 10,0 | 234 | 2,280 | 0,220 | 0,95 | 3,9 | 235 | 0,889 | 0 | -0,98 |

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

Tabla 16. Resultados de las mediciones eléctricas y % de reducción.

Como podemos ver en la tabla 16, las reducciones de potencia obtenidas son superiores al 60%, un valor que, como veremos más adelante, es muy elevado y va a permitir una recuperación de la inversión, en relativamente, poco tiempo de la nueva instalación.

- Resultados de contraste obtenidos con equipo analizador de red AR6 para las 45 luminarias LEDS de 51 W. Análisis de Armónicos.

Con el equipo analizador de red AR6 se realizaron mediciones de los parámetros eléctricos por fase para contrastar los datos tomados con el equipo de AFEISA.(Tabla 17).

| RESULTADOS DE MEDICIONES DE CONTRASTE PARA LOS 45 LEDS CON ANALIZADOR DE RED AR6 | | | |
|---|--------|--------|--------|
| | L1 | L2 | L3 |
| Tensión de Fase-Vf (V) | 241,02 | 239,60 | 239,25 |
| Intensidad por fase-I(A) | 11,28 | 10,63 | 11,31 |
| Potencia Activa por fase (Kw) | 0,9 | 0,7 | 0,9 |
| Potencia Reactiva Inductiva (KVA _{rL}) | 0 | 0 | 0 |
| Potencia Reactiva Capacitiva (KVA _c) | 0,1 | 0,0 | 0,2 |
| Potencia Aparente (KVA) | 1,8 | 1,5 | 1,8 |
| Factor de Potencia (cos f) | 1 | 1 | -0,98 |
| ARMÓNICOS DE CORRIENTE | | | |
| | L1 | L2 | L3 |
| Armónicos Fundamentales- THDV (%) | 17,412 | 12,952 | 17,282 |
| Armónicos de orden Par -THDV par (%) | 0 | 0 | 0 |
| Armónicos de orden Impar-THDV impar (%) | 3,28 | 3,45 | 3,38 |

Tabla 17. Resultados obtenidos con el analizador de red AR6.

Al contrastar con el equipo AR6 las medidas del TELEASTRO, se observan coincidentes en general. Aquí es de destacar la aparición de armónicos de orden impar con una media en torno al 3,5 % para la corriente y del 1% para la tensión (especialmente importantes los de 3º, 5º y 7º orden de la serie) debido a los equipos electrónicos de las fuentes de alimentación de los LEDs.

4.4.2.2.BALANCE LUMINOTÉCNICO.

El método seleccionado para las mediciones luminotécnicas, ha sido el método simplificado, descrito en la R.D. 1890/2008, ITC-EA-07.El balance luminotécnico se recoge en la *Tabla 18*.

| | BALANCE LUMINOTECNICO 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) -E _m | 12,2 | 12,18 | 10,6 | 11,12 | +8,70% |
| Uniformidad media-U _m | 0,31 | 0,48 | 0,13 | 0,35 | +27,08 % |
| Uniformidad extrema-U _g | 0,11 | 0,28 | 0,05 | 0,15 | +46,4% |

Tabla 18. Balance luminotécnico realizado con luxómetro GOSSEN.

Como vemos los valores obtenidos a priori, con el programa de cálculo luminotécnico SIBA son similares, a los obtenidos mediante la medición real de campo, lo que nos da fiabilidad a la hora de planificar futuras sustituciones. En la medición real también se cumplen los parámetros exigidos para nuestro tipo de vial y clase de alumbrado.

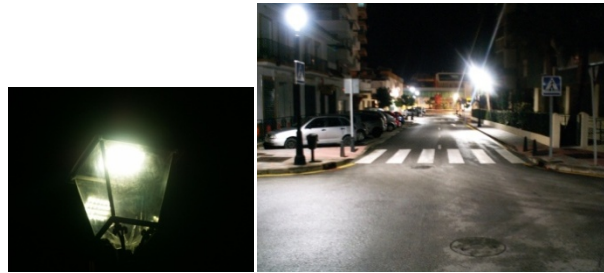


Fig. 10. Fotografía del vial y detalle de lámpara LED de 51 W



Fig. 11. Fotografía del vial y detalle de lámpara de HM de 150 W.

En las figura 10 y 11. 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.

4.4.2.3. BALANCE ENERGÉTICO 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)².

Realizamos el estudio comparativo para un uso diario estimado de 12 horas de media diaria de funcionamiento anual (tablas 19 y 20). Para este estudio comparativo tomaremos como valor de la energía, la tarifa que actualmente está pagando el ayuntamiento para el alumbrado público en ese cuadro.

| Días de funcionamiento anual: | Horas diarias (Media anual) | Coste Euros/Kw-h | Periodo de Análisis (Años) | Consumo Anual HM 150 W | Consumo Anual LED 51 W | Inflación Media Anual | Incremento Energético Anual |
|--|-----------------------------|---------------------|----------------------------|--|------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 365 | 12 | 0,16 | 5 | 33.113 Kw-h | 11.176,3Kw-h | 3 % | 3% |
| INSTALACIÓN 45 EQUIPOS HM 150 W | | | | INSTALACIÓN 45 KITS ETILED 51 W | | | |
| Potencia Lámpara HM | | 150 W | | Potencia Lámpara MÓDULO LED | | 51 W | |
| Datos Equipos | | | | Datos Equipos | | | |
| nº Luminarias: | | 45 unidades | | nº Luminarias: | | 45 unidades | |
| Potencia Unitaria | | 150 W | | Potencia Unitaria | | 46 W | |
| Potencia Consumida (Lámpara + Equipo) | | 168 W | | Potencia Consumida (Módulo + Driver) | | 52 W | |
| Horario | | | | Horario | | | |
| Nivel Pleno | | 12 horas | | Nivel Pleno | | 12,0 horas | |
| Días Año | | 365 días | | Días Año | | 365 días | |
| Costes de Consumo | | | | Costes de Consumo | | | |
| Media Energía Consumida diaria | | 90,720 kWh | | Energía Consumida diaria | | 30,62 kWh | |
| Energía Consumida Anual | | 33.113 kWh | | Energía Consumida Anual | | 11.176,3 kWh | |
| Coste Energía | | 0,16 €/kWh | | Coste Energía | | 0,16 €/kWh | |
| Coste Energético Anual | | 5.298,05 € / año | | Coste Energético Anual | | 1.788,20 € / año | |
| Costes de Operación | | | | Costes de Operación | | | |
| Vida Útil Fuente de Luz | | 15.000 horas | | Vida Útil Fuente de Luz | | 50.000 horas | |
| Horas Utilización/Año | | 4.380 horas | | Horas Utilización/Año | | 4.380 horas | |
| Tiempo Reposición | | 3,42 Años | | Tiempo Reposición | | 11,42 Años | |
| Costes Reposición Lámpara | | 30,00 € / año | | Costes Reposición Lámpara | | 0 € / año | |
| Costes de Mantenimiento | | 394,20 € / año | | Costes de Mantenimiento | | 0,00 € / año | |
| INSTALACIÓN EQUIPOS HM 150 W | | | | INSTALACIÓN 45 KITS ETILED 51 W | | | |
| COSTES ANUALES TOTALES | | 5.692,25 | | COSTES ANUALES | | 1.788,20 | |
| BALANCE ENERGÉTICO ANUAL | | | | | | | |
| Ahorro Anual | | | | 21.937 | | kWh | |
| ESTANDAR HM 150 W vs ETILED 51 W | | | | 21,93 | | MWh | |
| Ahorro Anual | | | | 3.904,05 | | € | |
| Toneladas de CO ₂ evitables | | | | 8,57 | | t/año | |
| BALANCE ENERGÉTICO A CINCO AÑOS | | | | | | | |
| INSTALACIÓN EQUIPOS ESTÁNDAR HM 150 W | | | | INSTALACIÓN 45 KITS ETILED DIM | | | |
| 45 LUMINARIAS HM 150 W | | | | 45 LUMINARIAS LED 51 W | | | |
| Año | Coste Energético | Coste Mantenimiento | Costes Totales | Coste Energético | Coste Mantenimiento | Costes Totales | AHORRO |
| 1 | 5.298,05 € | 394,20 € | 5.692,25 € | 1.788,20 € | 0,00 € | 1.788,20 € | 3.904,05 € |
| 2 | 5.456,99 € | 406,03 € | 5.863,02 € | 1.841,84 € | 0,00 € | 1.841,84 € | 4.021,18 € |
| 3 | 5.620,70 € | 418,21 € | 6.038,91 € | 1.897,01 € | 0,00 € | 1.897,01 € | 4.141,90 € |
| 4 | 5.789,32 € | 430,75 € | 6.220,07 € | 1.954,00 € | 0,00 € | 1.954,00 € | 4.266,07 € |
| 5 | 5.963,00 € | 443,68 € | 6.406,68 € | 2.012,62 € | 0,00 € | 2.012,62 € | 4.394,06 € |
| TOTAL | 28.128,06 € | 2.092,86 € | 30.220,92 € | 9.493,67 € | 0,00 € | 9.493,67 € | 20.727,26 € |

Tabla 19. Balance energético y económico comparativo a 5 años.

²La 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
- 045 € Camión grúa con canasta 1 h

Total 300 €/luminaria

Doctorando: Manuel J. Hermoso Orzáez

| ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DE LA INVERSIÓN Y AMORTIZACIÓN 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 un interés del i = 5 % | Años | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Indice actualizado | (1+i) ⁿ | 1,05 | 1,10 | 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 | ∑ Q/(1+i) ⁿ | - 9.782 | -6.135 | -2.557 | 953 | 4.395,97 |
| VAN a 5 años | 4.395,97 | | | | | |
| Plazo de Recuperación simple | 4 | | | | | |
| Plazo de Recuperación | 3,67 | | | | | |
| Tasa Interna de Rentabilidad (T.I.R) | 15,86 % | | | | | |
| Indice Beneficio Coste (IBC) | 1,33 | | | | | |

Tabla 20. Análisis de la rentabilidad de la Inversión y amortización afectada por el coste del dinero (para un tipo de interés del 5%).

Vemos que para ejecutar la inversión de sustitución de los equipos propuestos, suponiendo un funcionamiento medio de la instalación de 12 horas, obtenemos una clara rentabilidad de la inversión. Se obtiene un Pay-Back simple a 3'67, una Tasa Interna de Rentabilidad a 5 años del 15'86% y un Índice Beneficio Coste a 5 años de 1'33. Se ha tomado como referencia el precio de compra del kW.h por el Ayuntamiento en ese cuadro en concreto según tarifa establecida por la empresa comercializadora ENDESA. En la conclusiones presentaremos los resultados comparativos para simulaciones a 12, 10 y 8 horas de funcionamiento conforme a la tabla 21.

| Horas de funcionamiento de la instalación LED | VAN (5 años) | Pay-Back (simple)-Años | Pay-Back (financiado)-Años | TIR (5 años) | IBC (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 21. Estudio de rentabilidad de la inversión para cambio a LED

4.4.3 RESULTADOS Artículo 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)

4.4.3.1. BALANCE Y RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ELECTRICOS.

- Resultados obtenidos con equipo TELEASTRO.

Los resultados eléctricos obtenidos en el presente estudio, obteniendo las medias de los valores registrados diariamente, se indican en la Tabla 22 con la tensión estabilizada y reducida entorno al 15 % consiguiendo reducciones de la potencia activa entorno al 20 % .

| TENSIÓN NO REDUCIDA POR EL ESTABILIZADOR-REDUCTOR | | | | | TENSIÓN REDUCIDA POR EL ESTABILIZADOR-REDUCTOR | | | | |
|--|------------|---------|-----------------|-------------------|--|------------|---------|-----------------|-------------------|
| (Mediciones a la salida del estabilizador sin reducción) | | | | | (Mediciones a la salida del estabilizador con reducción) | | | | |
| FASES | Intensidad | Tensión | Potencia Act | Potencia aparente | FASES | INTENSIDAD | TENSIÓN | Potencia Activa | Potencia aparente |
| | (A) | (V) | (Kw) | (Kva) | | (A) | (V) | (Kw) | (Kva) |
| L1 | 0,738 | 226 | 0,156 | 0,151 | L1 | 0,65 | 198 | 0,131 | 0,124 |
| L2 | 0,737 | 228 | 0,164 | 0,162 | L2 | 0,68 | 202 | 0,129 | 0,117 |
| L3 | 0,735 | 229 | 0,148 | 0,157 | L3 | 0,67 | 204 | 0,122 | 0,123 |
| % REDUCCIÓN | | | | | | | | | |
| (Mediciones a la salida del estabilizador) | | | | | | | | | |
| FASES | Intensidad | Tensión | Potencia Activa | | Potencia Aparente | | | | |
| | % (A) | % (V) | % (Kw) | | % (Kva) | | | | |
| L1 | 11,92 | 12,39 | 16,03 | | 17,88 | | | | |
| L2 | 7,73 | 11,40 | 21,34 | | 27,78 | | | | |
| L3 | 8,84 | 10,92 | 17,57 | | 21,66 | | | | |

Tabla 22. Resultados mediciones tomadas con TELEASTRO y % de reducción.

- Resultados obtenidos con equipo AR6.

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.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 12 a 19, y que muestran los resultados eléctricos: Tensiones de fase (Fig. 12) Intensidad de fase (Fig.13) Factor de potencia (Fig. 14), Potencia activa (Fig. 15), Potencia aparente (Fig. 16), Potencia reactiva capacitiva (Fig. 17) y % de armónicos THD de orden impar (Fig. 18) obtenidos antes y después de entrar el estabilizador de tensión en cabecera. La potencia reactiva inductiva es 0, como podíamos esperar. Observar la deformación en la modulación de la forma de onda de corriente, por efecto de la contaminación armónica de orden impar. (Fig. 19)

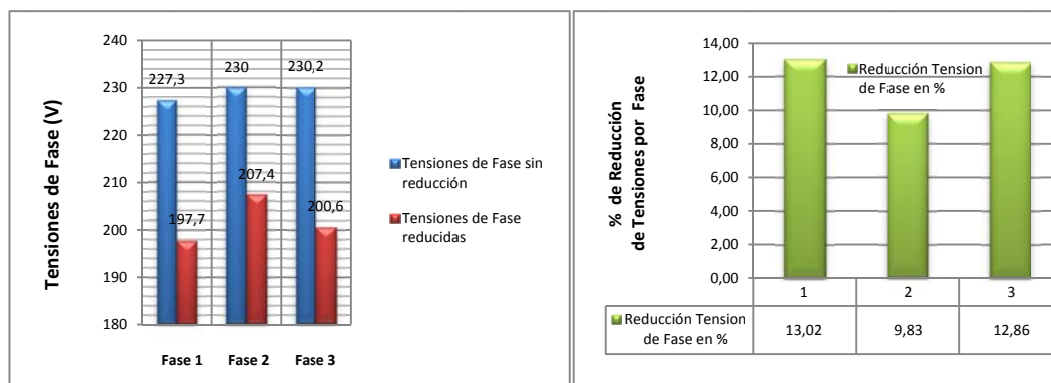


Fig.12. Tensiones de fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

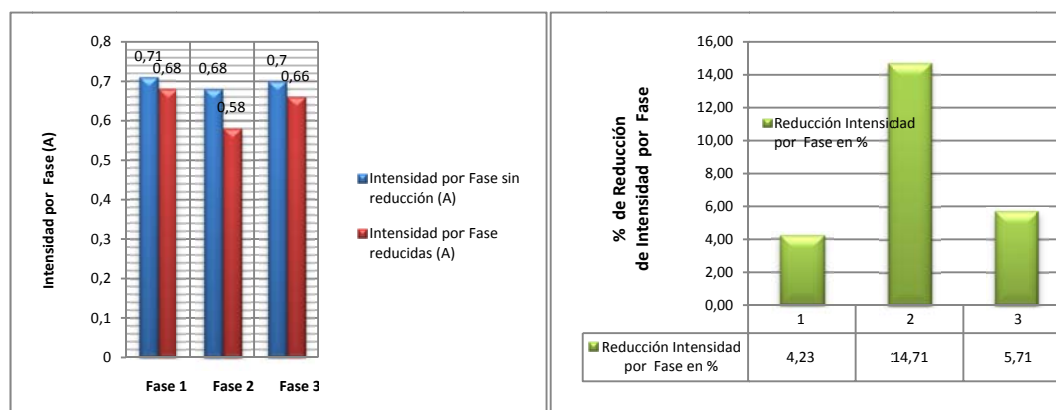


Fig.13. Intensidad de fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

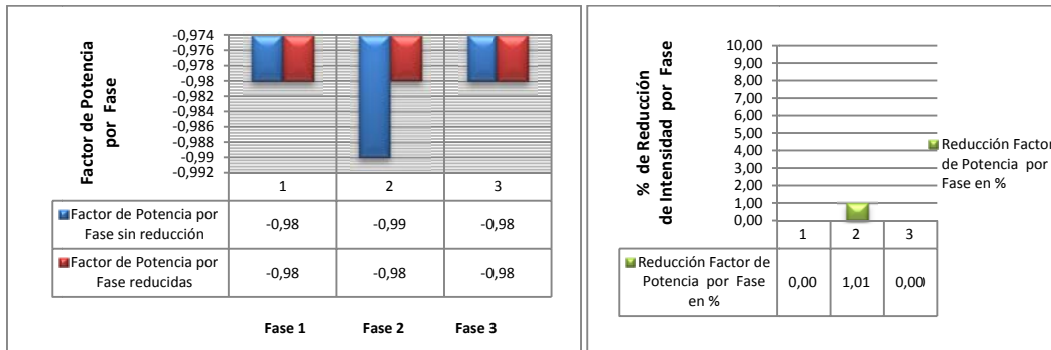


Fig. 14. Factor de potencia por fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

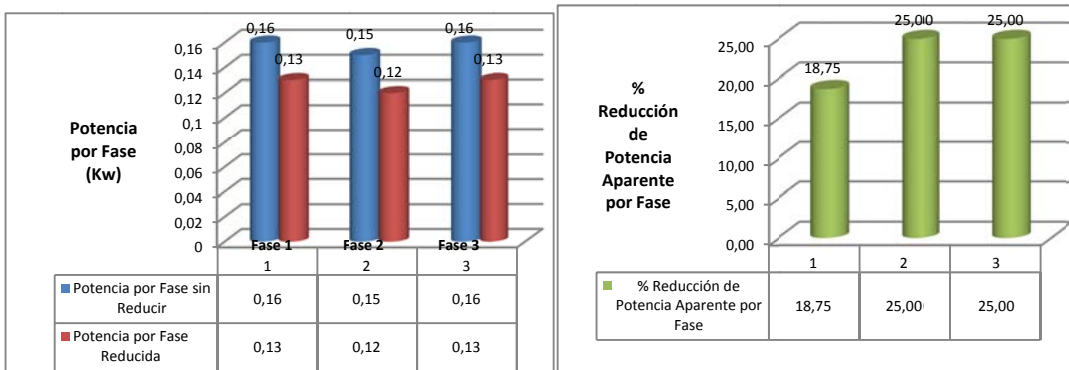


Fig. 15. Potencia activa por fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

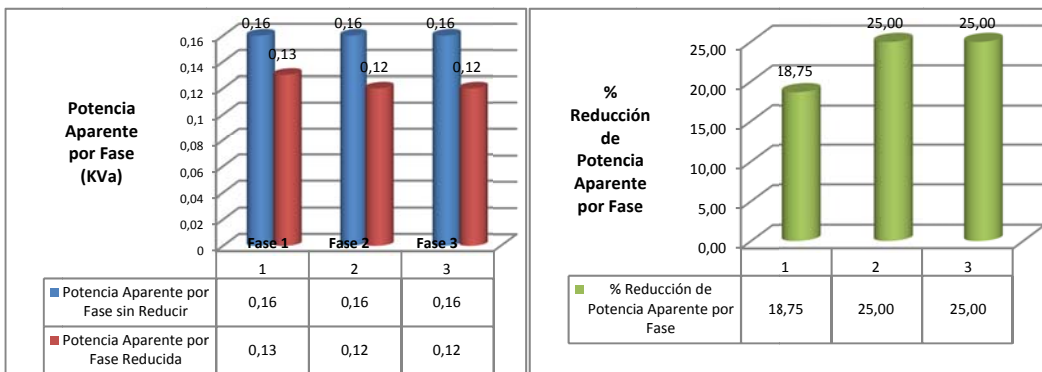


Fig. 16. Potencia aparente por fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

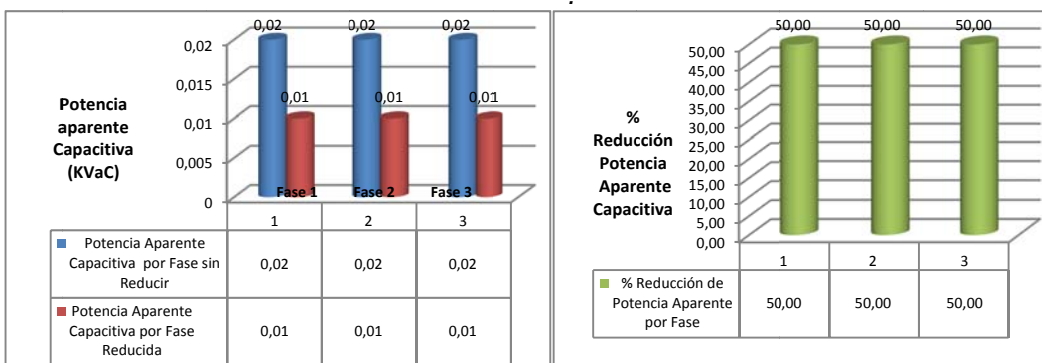


Fig. 17. Potencia Reactiva Capacitiva por fase, medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

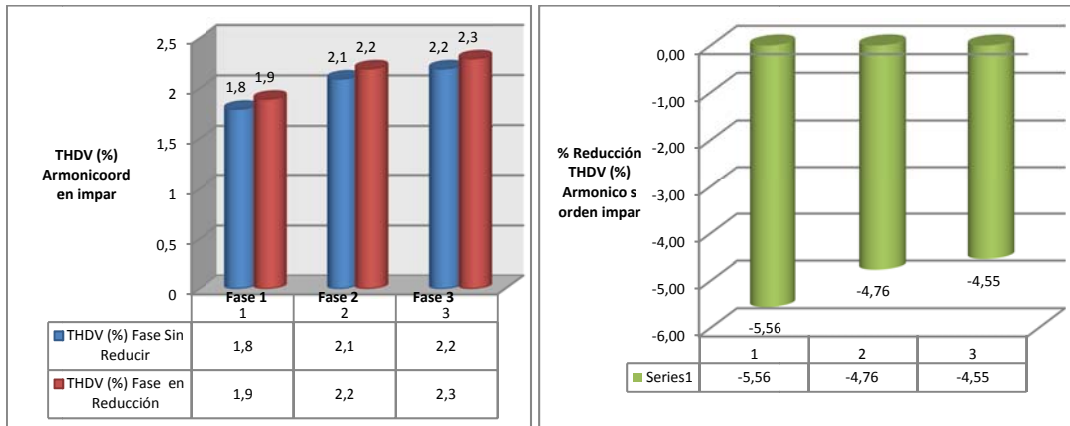


Fig.18. Análisis de Armónicos % THD de orden impar por fase, medidos con el analizador AR6 con y sin reducción.

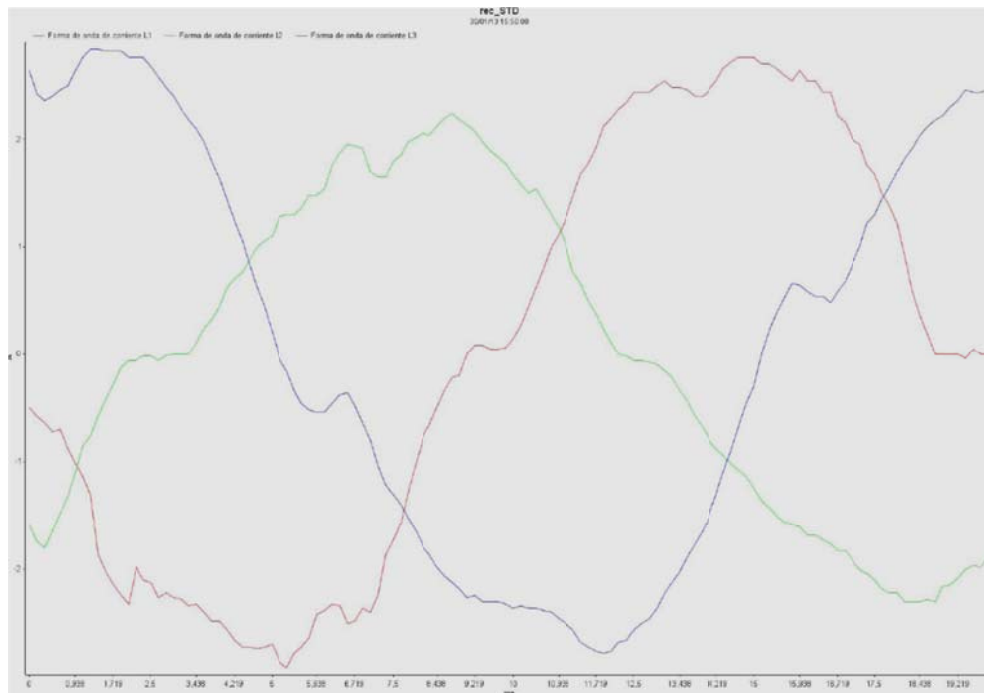


Figura 19. Forma de onda de la Intensidad (contaminada por los armónicos impares)

4.4.3.2. BALANCE Y RESULTADOS LUMINOTÉCNICOS.

El balance luminotécnico medio, comparando con los resultados de las mediciones a pie de campo, se recoge en las Tablas 23 y 24 realizados con dos luxómetros distintos para contrastar resultados. Así mismo se recogen gráficamente las variaciones de iluminancia a la baja, realizadas con luxómetro móvil LX-GPS, cuando reducimos la tensión desde el estabilizador. (Fig.20).

- Resultados obtenidos con el luxómetro móvil LX-GPS

| Datos lumínicos | | | |
|--------------------|---------------------------------------|--|----------------|
| Sonda central | (Mediciones sin Reducción de tensión) | (Mediciones con 20% reducción tensión) | Diferencia |
| Ilum. media (lux) | 25.8 | 21.4 | +20.6% (+4.4) |
| Ilum. máxima (lux) | 67.7 | 60.1 | +12.6% (+7.6) |
| Ilum. mínima (lux) | 2.9 | 2.1 | +38.1% (+0.8) |
| Uniform. media | 0.11 | 0.10 | +10.5% (+0.01) |
| Uniform. extrema | 0.04 | 0.04 | +0.0% (+0.00) |

Tabla 23 .Balance luminotécnico antes y después de reducir la tensión con el Estabilizador. Mediciones realizadas con luxómetro móvil LX-GPS.

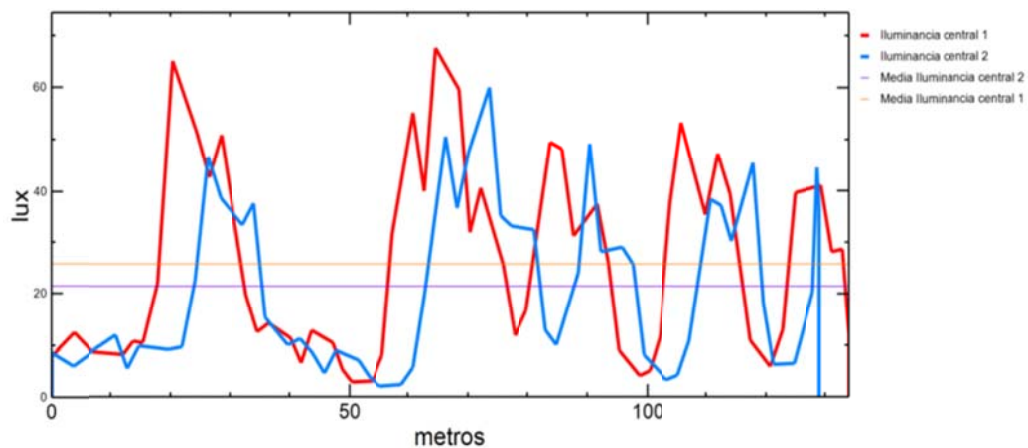


Fig.20. Representación gráfica de iluminancias antes y después de estabilizar la tensión. Color rojo representa las iluminancias medidas sin reducción de tensión y en azul las iluminancias medidas con tensión reducida. Los picos de iluminancia representan las zonas sobreiluminadas de la calzada en contraposición con las infrailuminadas.

- Resultados obtenidos con el luxómetro GOSSEN.

| BALANCE LUMINOTECNICO CALE HEROES DOS DE MAYO | | | | | |
|--|-----------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|
| | | CALCULOS TEORICOS | MEDICIÓN REAL SIN REDUCCIÓN | MEDICIÓN REAL CON REDUCCIÓN | % VARIACIÓN |
| Iluminancia media (lux) | Em | 15,3 | 19,26 | 15,12 | 21,5 |
| Uniformidad media | Um | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 5,5 |
| Uniformidad extrema | Ug | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 4,5 |

Tabla 24 .Balance luminotécnico comparativo realizado con luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B.

Aunque los niveles de iluminancia media son distintos en términos absolutos al utilizar un luxómetro u otro, debido a la diferente forma o método de operar de los dos luxómetros empleados, en términos porcentuales sí son coincidentes. 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, con resultados prácticamente iguales en términos porcentuales. Tablas 23 y 24.

En las fotografías comparativas antes y después de reducir la tensión (*Fig.21*) se puede observar que a simple vista es prácticamente imposible apreciar las diferencias de iluminación de los viales antes y después de reducir la tensión.



Vial sin reducción de tensión Vial con tensión reducida

Fig.21 .Fotografía del vial antes y después de reducir la tensión en cabecera del cuadro. Aparentemente no se observan diferencias en los niveles de iluminación ni en el color.

4.4.3.3. CONTROL DE FALLOS DE EQUIPOS DE AHORRO Y LÁMPARAS.

Señalar por último y como muy significativo, que durante este estudio que se ha llevado a cabo durante 12 meses (entre enero de 2012 y Diciembre de 2012) no se ha registrado fallo alguno, en ninguna de las lámparas LEDs, ni en los controladores DIMILED de los equipos (Datos obtenidos de GECOR-Sistema de Gestión de control y Mantenimiento Municipal). *A día de hoy tampoco hemos registrado fallo alguno.*

4.4.4.- RESULTADOS Artículo 4. STATISTICAL MET HODOLOGY PROPOSAL FOR EVALUATING UNIFORMITY: APPLICATION TO LED LUMINAIRES.

(PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD. APLICACIÓN A LUMINARIAS CON LEDS).

A continuación mostraremos los resultados obtenidos, al aplicar la metodología descrita en el punto 4.3. para cada una de las 6 fuentes de luz cuyas características y medidas eléctricas obtenidas con el analizador AR6 se exponen en la tabla 6.

| Fuente luminosa | Características | | | | Medidas eléctricas | | | |
|-----------------------|-----------------|------------|-----------------|---------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| | Pot (W) | Flujo (Lm) | Eficacia (Lm/W) | Tª Color (°K) | Pot (W) | React. Induc. (VarL) | React. Capac. (VarC) | Factor Potenc. |
| Mater City CDO TT/828 | 150 | 13.500 | 901 | 2800 | 170 | 10 | 0 | 0,95 |
| SSIE | 45 | 3.500 | 80 | 5.500 | 40 | 0 | 0 | -0,99 |
| ETILED | 51 | 4.059 | 80 | 4.000 | 50 | 0 | 20 | -0,92 |
| DLED | 56 | 3.958 | 83 | 4.000 | 60 | 0 | 10 | -0,99 |
| REXDOS 270 | 45 | 3.800 | 80 | 4.000 | 40 | 0 | 0 | -0,98 |
| REXDOS 360 | 50 | 4.000 | 80 | 4.000 | 50 | 0 | 0 | -0,99 |

Tabla 6: Características teóricas y medidas eléctricas de las fuentes de luz utilizadas. Fuente: Elaboración propia

4.4.4.1. LÁMPARA DE HM DE 150 W. MARCA PHILIPS.

Cada punto de la matriz, (Tabla 7), se corresponde con un punto de la cuadrícula de la figura 3, obteniendo los valores de iluminancias en lux a nivel del pavimento. (Tabla 7). Posteriormente representaremos la superficie en tres dimensiones que define la muestra de iluminancias obtenidas en cada punto de la matriz (fig. 4).

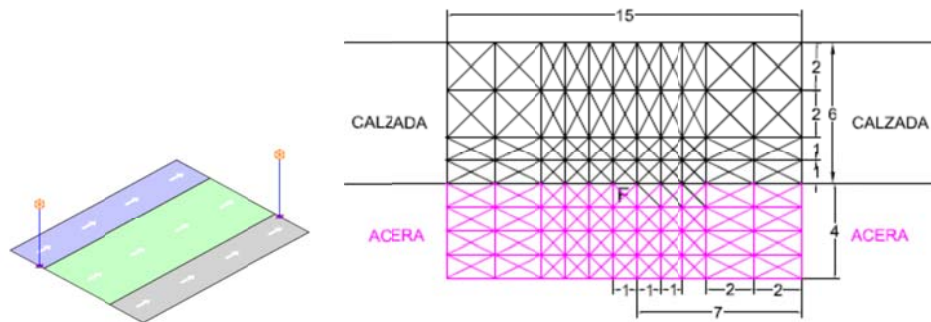


Fig. 3. Esquema del tipo de vial y dimensiones de la Cuadrícula utilizada. Fuente: elaboración propia.

| COLUMNA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|---|
| DISTANCIAS (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | Filas | |
| 6 | 2,97 | 3,96 | 5,03 | 7,79 | 6,90 | 6,80 | 6,74 | 6,24 | 5,63 | 4,66 | 3,17 | 6,0 | 1 |
| 4 | 4,93 | 4,79 | 7,45 | 7,76 | 7,17 | 6,72 | 7,57 | 7,06 | 6,95 | 4,05 | 5,30 | 4,0 | 2 |
| 2 | 7,56 | 9,19 | 7,09 | 8,87 | 14,88 | 16,14 | 12,88 | 9,00 | 6,19 | 8,59 | 6,66 | 2,0 | 3 |
| 1 | 7,60 | 12,01 | 12,86 | 13,41 | 11,36 | 11,04 | 10,61 | 12,23 | 11,66 | 10,01 | 7,60 | 1,0 | 4 |
| 0 | 8,00 | 9,65 | 14,60 | 14,78 | 16,64 | HM 150 W | 15,34 | 16,73 | 12,39 | 11,65 | 7,52 | 0,0 | 5 |
| 1 | 5,57 | 10,03 | 7,89 | 14,79 | 12,78 | 14,88 | 13,93 | 12,51 | 8,00 | 9,17 | 4,79 | 1,0 | 6 |
| 2 | 4,56 | 7,59 | 8,73 | 8,50 | 18,68 | 19,56 | 17,22 | 9,62 | 7,07 | 8,59 | 4,02 | 2,0 | 7 |
| 3 | 2,59 | 9,19 | 6,75 | 11,36 | 11,32 | 12,47 | 10,93 | 9,21 | 7,05 | 8,09 | 3,52 | 3,0 | 8 |

Tabla 7. Matriz de medición con distancia en metros y medidas en lux para la Lámpara HM de PHILIPS 150 W- Fuente: Elaboración propia.

Conforme a la metodología expuesta en el punto 4.3, definiremos la uniformidad estadística (U_s) de la iluminación como el coeficiente de variación de la muestra, expresado en %, y definido éste, como el cociente entre la desviación típica o estándar de las iluminancias medidas, y la iluminancia media.

La desviación típica o estándar de la muestra (σ) como medida de la mayor o menor dispersión de los valores de iluminancia respecto a la iluminancia media; nos permitirá definir de forma muy precisa la uniformidad de la fuente de luz. Esta nueva definición de la uniformidad estadística permite resolver el problema de la emisión multidireccional de las luminarias LEDs, presentando un nuevo método de cálculo de la uniformidad más riguroso.

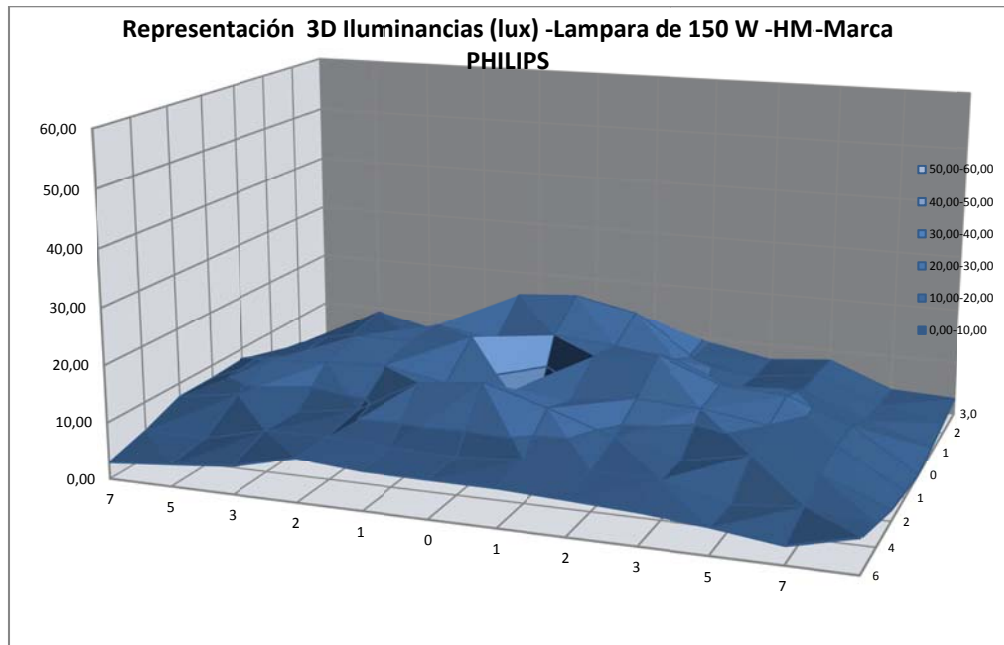


Fig.4. Representación 3D Iluminancias (lux) –
Lampara HM 150 W-Marca PHILIPS. Elaboración propia.

Los resultados y valores comparativos obtenidos para la uniformidad media (U_m) conforme a la definición de la CIE y la nueva forma definida como uniformidad estadística (U_s) se presentan en la tabla 8.

Observar cómo, cuanto menor sea la desviación típica de las iluminancias, respecto a la iluminancia media, mejor será la uniformidad estadística (U_s) de la fuente de luz.

| | <i>Metodología CIE</i> | | | | | <i>Nueva Metodología</i> | | | |
|----------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|---------------|---------------|--------------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{med} | Vari σ^2 | Desv σ | Coef | U_s |
| <i>Acera</i> | 2,59 | 19,56 | 0,25 | 0,13 | 10,42 | | | | |
| <i>Calzada</i> | 2,97 | 16,14 | 0,37 | 0,18 | 8,12 | | | | |
| Total | 2,59 | 19,56 | 0,28 | 0,13 | 9,27 | 14,89 | 3,85 | 0,4164 | 41,64 |

Tabla 8 . Tabla de Iluminancias y Uniformidades obtenidas por el método CIE) y nuevo método propuesto para la Lampara HM 150 W-Marca PHILIPS Fuente: Elaboración propia

4.4.4.2. LAMPARA LED DE 45 W. MARCA SSIE

Utilizando la misma metodología obtenemos los resultados de la matriz de iluminancias de la tabla 26. Los resultados obtenidos se han representados gráficamente en tres dimensiones.(Fig.22)

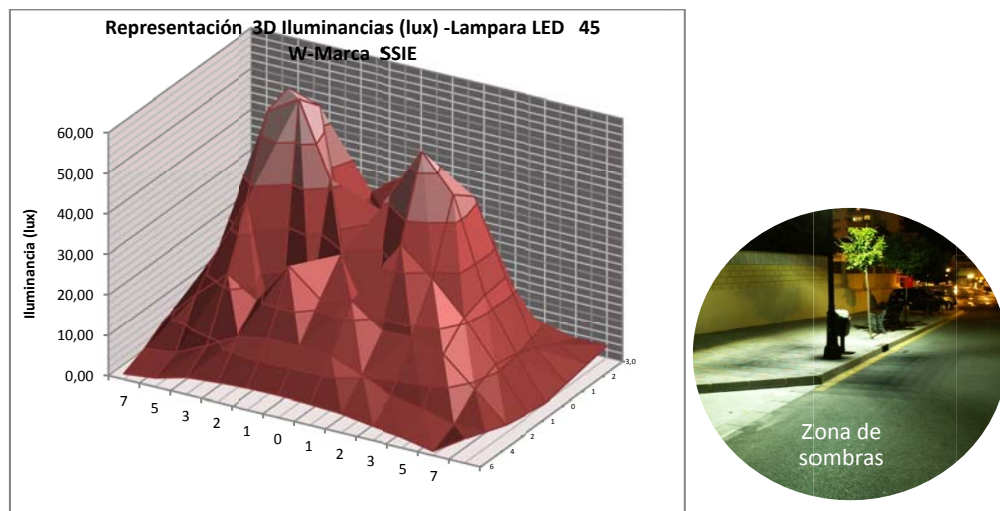


Fig.22. Representación de Iluminancias) y Foto de zona iluminada. Lampara LED 45 W-Marca SSIE. (Fuente: Elaboración propia.)

| MATRIZ DE ILUMINANCIAS | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Distancias (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 1,39 | 2,22 | 4,24 | 4,84 | 5,33 | 5,38 | 5,15 | 4,70 | 3,52 | 2,63 | 1,06 | 6,0 |
| 4 | 3,90 | 4,71 | 8,41 | 12,46 | 13,81 | 13,76 | 13,46 | 10,46 | 7,14 | 6,03 | 3,90 | 4,0 |
| 2 | 7,53 | 15,69 | 22,40 | 17,97 | 28,20 | 21,80 | 23,40 | 17,80 | 18,07 | 15,60 | 8,81 | 2,0 |
| 1 | 8,91 | 22,40 | 36,70 | 29,7 | 13,87 | 29,20 | 13,35 | 35,30 | 28,90 | 21,10 | 11,27 | 1,0 |
| 0 | 13,20 | 25,90 | 55,20 | 63,20 | 42,00 | SSIE 45 W | 42,10 | 54,60 | 45,60 | 23,00 | 10,20 | 0,0 |
| 1 | 7,06 | 26,40 | 57,00 | 54,70 | 15,18 | 32,40 | 15,83 | 36,90 | 41,50 | 23,60 | 7,88 | 1,0 |
| 2 | 8,50 | 11,64 | 32,80 | 18,21 | 31,50 | 36,80 | 36,70 | 24,00 | 21,50 | 11,00 | 5,26 | 2,0 |
| 3,0 | 2,80 | 2,50 | 5,00 | 4,00 | 5,10 | 5,04 | 5,27 | 5,09 | 2,25 | 2,40 | 2,90 | 3,0 |

Tabla 26. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la Lampara LED 45 W-Marca SSIE (Elaboración propia)

| | Metodología CIE | | | | | Nueva Metodología | | | |
|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|-------------------|---------------|--------|----------------|
| | L _{min} | L _{max} | U _m | U _g | L _{med} | Vari σ^2 | Desv σ | Coef | U _s |
| Acera | 2,25 | 63,20 | 0,10 | 0,04 | 22,64 | | | | |
| Calzada | 1,06 | 36,70 | 0,08 | 0,03 | 12,95 | | | | |
| Total | 1,06 | 63,20 | 0,06 | 0,02 | 17,80 | 231,78 | 15,22 | 0,8557 | 85,57 |

Tabla 27 . Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. LED 45 W-Marca SSIE

Al analizar las *tablas 26 y 27* y la *figura 22*, observamos como en determinados puntos de la matriz muestral, se obtienen iluminancias muy altas en distancias medias, en contraste con otras muy bajas a corta distancia del foco; lo que se refleja gráficamente como zonas de valle (infra iluminadas) en contraste y muy próximas a zonas sobre iluminadas. En general aunque la media de iluminancias es ligeramente más alta, se observa gran contraste entre las iluminancias media y máxima. Esto denota una no muy buena uniformidad, como así se ha obtenido tanto para la uniformidad media como para la extrema según CIE (*Tabla 27*) . Al calcular la desviación típica y el coeficiente de variación, obtenemos un valor muy alto casi el doble que para la lámpara de HM (*Tabla 8*).

4.4.4.3. LÁMPARA LED DE 56 W. MARCA DLED

Utilizando el método descrito en el punto anterior obtenemos los resultados de la matriz de iluminancias de la *tabla 28*. Los resultados obtenidos son representados gráficamente en tres dimensiones usando la hoja de cálculo Excel. Observar las zonas de sombra asociada a la disminución de iluminancia al alejarnos del foco (Ver *Fig. 23*)

| MATRIZ DE ILUMINANCIAS | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Distancia (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 2,61 | 3,77 | 5,39 | 5,69 | 6,72 | 6,31 | 6,05 | 6,58 | 5,30 | 4,76 | 2,95 | 6,0 |
| 4 | 3,56 | 6,02 | 11,73 | 11,87 | 14,90 | 13,17 | 14,81 | 14,78 | 11,56 | 6,98 | 3,55 | 4,0 |
| 2 | 4,41 | 8,00 | 24,20 | 27,10 | 30,30 | 30,80 | 30,30 | 27,50 | 22,20 | 10,74 | 4,92 | 2,0 |
| 1 | 5,50 | 9,44 | 24,90 | 30,70 | 35,60 | 24,20 | 35,20 | 30,30 | 26,20 | 12,76 | 5,50 | 1,0 |
| 0 | 5,50 | 11,83 | 29,40 | 35,30 | 30,40 | DLED 56 W | 25,40 | 32,20 | 28,20 | 12,29 | 5,59 | 0,0 |
| 1 | 5,30 | 14,39 | 29,70 | 34,40 | 42,20 | 25,90 | 38,00 | 33,00 | 28,30 | 13,33 | 6,00 | 1,0 |
| 2 | 5,23 | 10,02 | 22,00 | 31,40 | 37,60 | 34,00 | 31,80 | 30,70 | 24,70 | 11,27 | 5,48 | 2,0 |
| 3,0 | 4,69 | 7,62 | 21,90 | 25,50 | 26,70 | 28,10 | 26,30 | 22,10 | 18,98 | 8,64 | 4,20 | 3,0 |

Tabla.28. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la Lámpara LED 56 W-Marca DLED (Elaboración propia)

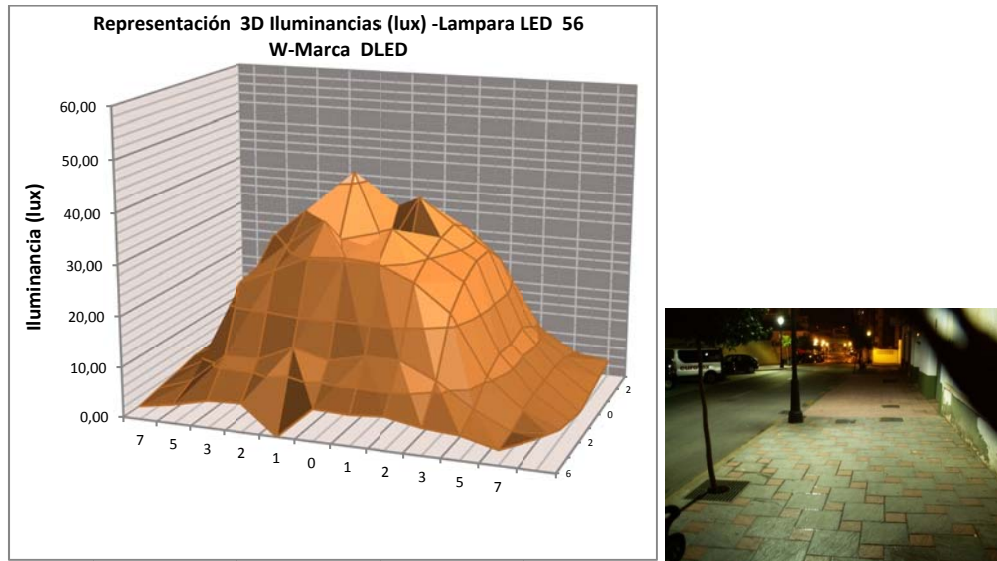


Fig.23. Representación 3D Iluminancias (lux) –Lámpara LED 56 W-Marca DLED. Foto de luminaria DLED..(Fuente: Elaboración propia.)

| | Metodología CIE | | | | | Nueva Metodología | | | |
|----------------|-----------------|-----------|-------|-------|-----------|-------------------|---------------|--------|-------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{med} | Vari σ^2 | Desv σ | Coef | U_s |
| Acera | 4,20 | 42,20 | 0,20 | 0,10 | 21,52 | 132,64 | 11,51 | 0,6395 | 63,95 |
| Calzada | 2,61 | 35,60 | 0,18 | 0,07 | 14,49 | | | | |
| Total | 2,61 | 42,20 | 0,14 | 0,06 | 18,01 | | | | |

Tabla 29. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 56 W-Marca DLED

Observar (Fig.23) y (Tabla 28) que en este caso no aparecen zonas sobre iluminadas en contraste con zonas de sombras próximas al foco emisor, la iluminación parece más homogénea. La atenuación de iluminancias con la distancia, a simple vista parece descender de manera constante. Sin embargo este es un efecto engañoso pues las medidas de iluminancia máxima y mínima, están muy separadas, dispersas y poco centradas respecto a la media.

En general para la lámpara DLED (Tabla 29), aunque la media de iluminancias es también más alta que para la lámpara de HM, aunque algo más baja que para SSIE, se observa gran contraste entre la iluminancia media y máxima. Esto denota una moderada uniformidad como así se ha obtenido tanto para los cálculos de la uniformidad media como para la extrema. Al calcular la desviación típica y el coeficiente de variación, obtenemos un valor, mayor en 22 puntos porcentuales respecto a la lámpara de HM (Tabla 8) y menor en otros 21 puntos que el obtenido para la lámpara SSIE (Tabla 27).

4.4.4.4. LAMPARA LED DE 45 W.MARCA REXDOS 270.

Volviendo a aplicar la metodología propuesta, obtenemos los resultados de la matriz de iluminancias (Tabla 30). Los resultados obtenidos son representados gráficamente en tres dimensiones usando la hoja de cálculo Excel. (Ver Fig. 24)

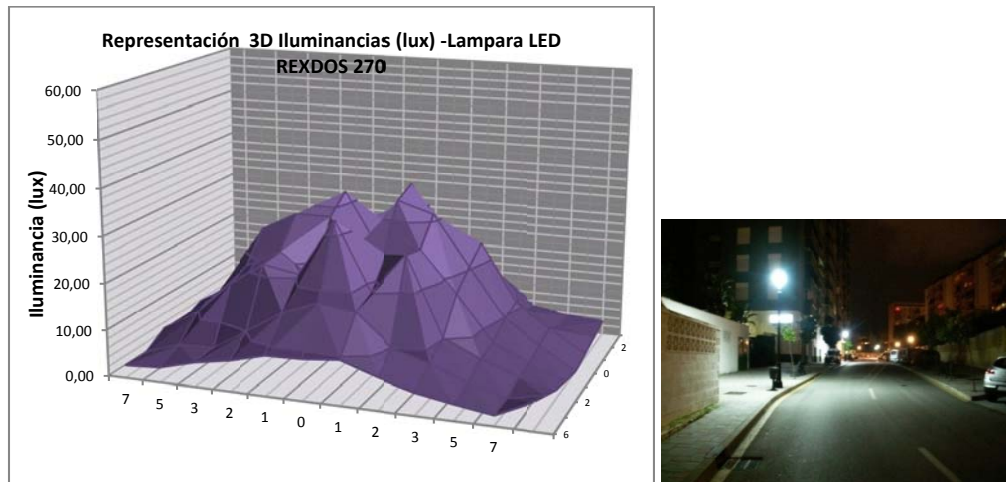


Fig.24. Representación 3D Iluminancias (lux) –
Lampara LED 45 W-Marca REXDOS 270. Elaboración propia

| MATRIZ DE ILUMINANCIAS | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Distancia (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 2,73 | 3,22 | 5,25 | 6,60 | 8,56 | 8,76 | 9,53 | 6,91 | 4,75 | 3,39 | 2,22 | 6,0 |
| 4 | 2,57 | 5,31 | 5,41 | 10,04 | 14,80 | 17,81 | 16,67 | 10,02 | 7,64 | 4,52 | 2,40 | 4,0 |
| 2 | 5,42 | 9,71 | 16,91 | 22,00 | 20,60 | 32,90 | 18,17 | 27,00 | 10,26 | 6,63 | 3,61 | 2,0 |
| 1 | 4,50 | 10,89 | 18,50 | 22,40 | 16,54 | 23,50 | 24,10 | 25,80 | 17,01 | 7,32 | 3,68 | 1,0 |
| 0 | 6,37 | 10,82 | 24,70 | 28,70 | 28,70 | REXDOS 270 | 33,60 | 31,20 | 20,50 | 9,86 | 4,87 | 0,0 |
| 1 | 5,08 | 11,17 | 22,40 | 18,73 | 32,40 | 19,70 | 35,40 | 21,40 | 23,40 | 10,80 | 5,94 | 1,0 |
| 2 | 4,90 | 7,38 | 11,40 | 20,50 | 23,80 | 22,50 | 27,10 | 21,00 | 11,20 | 6,24 | 3,51 | 2,0 |
| 3 | 3,19 | 5,02 | 11,57 | 15,56 | 18,87 | 25,70 | 17,49 | 17,22 | 10,94 | 4,80 | 3,57 | 3,0 |

Tabla 30. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la Lampara LED 45 W-Marca REXDOS 270 (Elaboración propia)

| | Metodología CIE | | | | | Nueva Metodología | | | |
|---------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|---------------------|--------|--------|----------------|
| | L _{min} | L _{max} | U _m | U _g | L _{med} | Vari σ ² | Desv σ | Coef | U _s |
| Acera | 3,19 | 35,40 | 0,20 | 0,09 | 16,26 | | | | |
| Calzada | 2,22 | 32,90 | 0,19 | 0,07 | 11,51 | | | | |
| Total | 2,22 | 35,40 | 0,16 | 0,06 | 13,89 | 82,00 | 9,05 | 0,6521 | 65,21 |

Tabla 31. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 45 W-Marca REXDOS 270

Observar que conforme a los resultados obtenidos (Tabla 31) como los valores de uniformidad media calculada por el método tradicional (U_m) y de nueva uniformidad estadística expresada (U_s) son muy similares en esta luminaria LED 45 W-Marca REXDOS 270 y la anterior analizada LED 56 W-Marca DLED. (Ver Tabla 29)

4.4.4.5. LAMPARA LED DE 50 W.MARCA REXDOS 360.

Con los trabajos de medición de campo obtenemos los resultados de la matriz de iluminancias (Tabla 32). Los resultados obtenidos son representados gráficamente en tres dimensiones usando la hoja de cálculo Excel. (Ver Fig. 25)

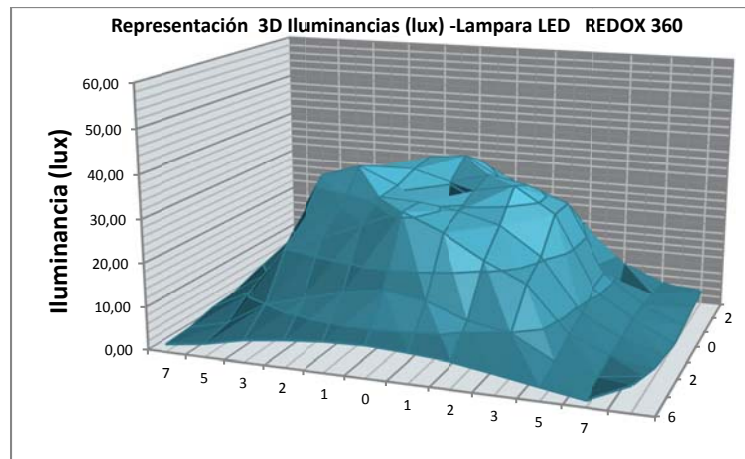


Fig.25. Representación 3D Iluminancias (lux) – Lampara LED 50 W-Marca REXDOS 360. Elaboración propia

| MATRIZ DE ILUMINANCIAS | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Distancia (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 1,82 | 3,09 | 5,10 | 6,23 | 7,07 | 7,39 | 6,87 | 6,17 | 4,67 | 3,06 | 1,48 | 6,0 |
| 4 | 2,35 | 4,47 | 9,97 | 12,49 | 14,81 | 16,42 | 15,01 | 11,60 | 9,87 | 4,70 | 2,60 | 4,0 |
| 2 | 3,85 | 8,53 | 20,20 | 23,30 | 27,10 | 31,10 | 27,20 | 21,80 | 17,53 | 7,24 | 3,61 | 2,0 |
| 1 | 4,39 | 10,47 | 24,50 | 27,90 | 31,00 | 30,60 | 29,40 | 27,00 | 20,70 | 8,61 | 3,95 | 1,0 |
| 0 | 6,30 | 15,16 | 32,30 | 35,20 | 31,30 | REXDOS 360 | 31,60 | 33,50 | 27,70 | 11,14 | 5,10 | 0,0 |
| 1 | 5,03 | 11,67 | 26,00 | 33,00 | 32,90 | 30,40 | 33,00 | 31,20 | 27,60 | 11,70 | 5,01 | 1,0 |
| 2 | 4,33 | 10,86 | 24,30 | 28,90 | 33,60 | 34,60 | 29,40 | 24,40 | 21,60 | 10,5 | 4,31 | 2,0 |
| 3,0 | 4,20 | 8,24 | 17,28 | 25,10 | 30,00 | 31,30 | 26,40 | 19,60 | 14,31 | 8,20 | 4,19 | 3,0 |

Tabla 32. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la lámpara LED 50 W-Marca REXDOS 360. (Elaboración propia)

| | <i>Metodología CIE</i> | | | | | <i>Nueva Metodología</i> | | | |
|----------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------------------|---------------|---------|-------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{med} | Vari σ^2 | Desv σ | Coef | U_s |
| <i>Acera</i> | 4,19 | 35,20 | 0,20 | 0,12 | 21,00 | | | | |
| <i>Calzada</i> | 1,48 | 31,10 | 0,11 | 0,05 | 12,89 | | | | |
| Total | 1,48 | 35,20 | 0,09 | 0,04 | 16,94 | 124,34 | 11,15 | 0,65807 | 65,80 |

Tabla 33. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 50 W-Marca REXDOS 360

Observar en este caso (Tabla 33) que a pesar de obtener una uniformidad media por el método tradicional muy baja ($U_m=0,09$), al calcular la uniformidad estadística con el método propuesto obtenemos valores de (U_s) similares a los obtenidos para las lámparas REXDOS 270 y DLED (Tablas 31 y 29).

4.4.4.6. LÁMPARA LED DE 51 W.MARCA ETILED.

Aplicando el método descrito para la Lámpara LED 51 W-Marca ETILED, obtenemos los resultados de la matriz de iluminancias de la Tabla 34. Los resultados obtenidos son representados gráficamente en tres dimensiones usando la hoja de cálculo Excel. (Ver Fig. 26).

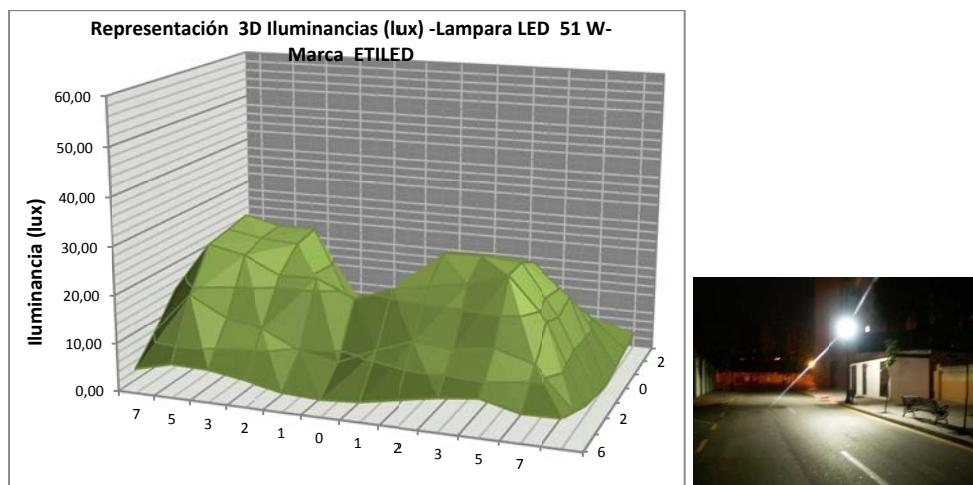


Fig.26. Representación 3D Iluminancias (lux) - Lámpara LED 51 W-Marca ETILED, (Fuente: Elaboración propia).

| MATRIZ DE ILUMINANCIAS | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Distancia (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 5,12 | 7,01 | 6,78 | 5,58 | 4,02 | 3,59 | 4,10 | 5,54 | 6,92 | 7,80 | 5,79 | 6,0 |
| 4 | 10,46 | 18,80 | 14,71 | 13,28 | 9,68 | 8,19 | 11,57 | 14,27 | 13,56 | 14,70 | 12,36 | 4,0 |
| 2 | 16,74 | 27,10 | 25,50 | 22,00 | 22,20 | 18,60 | 21,50 | 22,80 | 24,20 | 26,60 | 18,10 | 2,0 |
| 1 | 17,72 | 28,00 | 26,80 | 26,30 | 10,80 | 15,14 | 11,54 | 27,20 | 27,50 | 26,80 | 16,36 | 1,0 |
| 0 | 17,01 | 29,10 | 27,40 | 27,30 | 12,16 | ETILED 51 W | 12,91 | 25,00 | 25,20 | 24,50 | 17,92 | 0,0 |
| 1 | 11,49 | 15,83 | 16,42 | 13,61 | 7,85 | 7,29 | 8,12 | 13,01 | 15,53 | 16,83 | 12,92 | 1,0 |
| 2 | 5,85 | 7,09 | 6,80 | 6,25 | 6,06 | 6,80 | 7,57 | 9,20 | 9,22 | 10,52 | 8,80 | 2,0 |
| 3,0 | 4,09 | 4,61 | 4,83 | 5,32 | 5,69 | 5,50 | 5,60 | 5,30 | 4,82 | 4,60 | 4,10 | 3,0 |

Tabla 34. Matriz de medición con distancia en metros y medidas de iluminancias en lux para la Lámpara LED 51 W-Marca ETILED. (Elaboración propia)

| | Metodología CIE | | | | | Nueva Metodología | | | |
|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|-------------------|---------------|---------|----------------|
| | L _{min} | L _{max} | U _m | U _g | L _{med} | Vari σ^2 | Desv σ | Coef | U _s |
| Acera | 4,09 | 29,10 | 0,35 | 0,14 | 11,54 | | | | |
| Calzada | 3,59 | 28,00 | 0,23 | 0,13 | 15,53 | | | | |
| Total | 3,59 | 29,10 | 0,27 | 0,12 | 13,53 | 61,60 | 7,89 | 0,57999 | 57,99 |

Tabla 35. Resultados de Iluminancia y uniformidad (según CIE) e Indicadores estadísticos conforme Nueva Metodología propuesta. Lámpara LED 51 W-Marca ETILED.

Observar (Tabla 35) y (Fig. 26) que aunque los valores de la iluminancia máxima son más bajos que para el resto de las lámparas LED analizadas, la muestra de las iluminancias está muy centrada y poco dispersa respecto a la media. Esto se concreta en una bajo valor de la desviación típica respecto a la iluminancia media lo que se corresponde con un valor bajo del coeficiente de variación asociado a una buena uniformidad estadística (U_s).

4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La discusión que realizamos, de los resultados obtenidos en estos cuatro artículos, fruto de las experiencias evaluadas, en los cuatro estudios que sirvieron de base, para esta tesis compendiada, lo podíamos resumir diciendo que :

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

Con este estudio queda demostrado, que las lámparas de descarga de HM con quemador cerámico, son regulables con ambas tecnologías de ahorro, sin que se vea afectada de manera apreciable su vida útil, ni la calidad de la luz emitida. Se ha detectado un 30 % de fallos en balastos electrónicos regulables en una año, sin haber sufrido fallo la lámpara, en ninguna de las dos instalaciones comparadas. Este porcentaje de fallos al día de hoy está en más del 80 %.

Queda comprobado, que los niveles de ahorro energético que se pueden conseguir con los balastos electrónicos duplican (40 %), a los ahorros obtenidos con equipos de estabilización en cabecera (20%). Esta diferencia es debida, a los problemas de encendido, detectados en las lámparas de HM, con tensiones de arranque reducidas con el estabilizador en cabecera por encima del 20 % (208 V \pm 5V). Problemas de encendido asociados a la tensiones muy baja en los finales de línea de los circuitos, para secciones tipo de cobre de 6 mm², incapaces de arrancar los equipos por debajo de los 190 V.

Se ha verificado, que los niveles de iluminación se ven afectados en valores similares, a los niveles de reducción de potencia, al que se ve sometida la lámpara en reducción, sin que la uniformidad en los viales, sufra variaciones.

Puede verse con este estudio, que los Estabilizadores-reguladores de flujo suponen una inversión con un coste aproximadamente, en un 65 % inferior por Watio de lámpara instalada, que los balastos electrónicos regulables.

Queda probado que la inversión en estabilizadores de tensión-reductores de flujo, desde el punto de vista de la rentabilidad absoluta de la inversión, medida como índice beneficio coste, es mucho más interesante que la inversión en balastos electrónicos. Siendo este indicador para los estabilizadores, por encima de la unidad y el doble respectivamente, para 6,7,y 8 horas de funcionamiento, que el obtenido para los balastos electrónicos.

Así mismo, hemos comprobado que el retorno de la inversión, se reduce a la mitad (ligeramente por encima de los tres años) para los estabilizadores-reguladores de flujo. Periodo de retorno relativamente corto, comparado con los balastos electrónicos que tienen un Pay-back superior a los seis años.

La rentabilidad financiera de la inversión, medida como TIR (a 5 años), para los estabilizadores de tensión, supera en casi tres veces, el coste del capital, siempre que estos equipos funcionen un mínimo de 8 horas diarias (Tabla 15). Por otro lado los balastos electrónicos, muestran una bajísima rentabilidad económica y financiera, lo que no hace interesante, actualmente, acometer inversiones en estos equipos desde el punto de vista financiero. (Tabla 13)

| Horas de funcionamiento Sistema de ahorro | 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 15. Análisis de la inversión con Estabilizador de Tensión en cabecera para 8,6 7 horas de funcionamiento

| Horas de funcionamiento Sistema de ahorro | VAN (5 años) | VAN (9 años) | Pay-Back (simple)-Años | Pay-Back (financiado)-Años | TIR (5 años) | IBC (5 años) |
|---|----------------|----------------|------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| 8 | - 4187,83 | 1210,50 | 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 % | 0,50 |

Tabla 13. Análisis de la inversión con balastos electrónicos regulables para 8,7 y 6 horas de funcionamiento

Por tanto, a pesar de la altísima y contrastada eficiencia energética que supone la instalación de balastos electrónicos, (superior al 40 %), éstos se enfrentan actualmente, a cuatro graves problemas, a saber :

1. Elevado coste de la inversión
2. Muy baja rentabilidad financiera,
3. Periodos de retorno de la inversión muy elevados, por encima de los seis años
4. Alto nivel de fallos.

Por consiguiente, este estudio desaconseja su instalación, en tanto en cuanto no se abaraten los costes de inversión y se mejore la fiabilidad de los equipos.

- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ARTICULO 2. ANALISIS 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. (COMPARATIVE AND SUPPORTING CHANGE TO LEDS ANALYSIS IN SYSTEMS WITH METAL HALIDE LAMPS ANOTHER STEP TOWARDS ENERGY EFFICIENCY IN URBAN LIGHTING).

Con este estudio queda demostrado, que la tecnología LED, a día de hoy, se encuentra ya lo suficientemente madura para su implantación progresiva en iluminación urbana, alcanzando unos niveles calidad lumínica y prestaciones de ahorro energético, lo suficientemente buenas, como para poder competir con las lámparas de descarga, y en particular con las que utilizan HM.

Ha quedado demostrado, que con la sustitución de las lámparas HM por lámparas LEDs, se consiguen ahorros medidos en cuanto al consumo energético, comparado, para el mismo número de horas de funcionamiento, porcentualmente iguales a la reducción de potencia que consigamos con la lámpara sustituta, observando similares prestaciones lumínicas.

También se ha registrado un consumo prácticamente nulo de la energía reactiva, para los LEDs. No obstante, sí hay que hacer notar que se ha registrado un incremento en la contaminación por armónicos de corriente en torno al 3,5 % y tensión en torno al 1 % al instalar LEDs. Esta contaminación armónica, detectada como un aumento del % de THD de orden impar, (ver figura 27 y tabla 25) puede provocar deformaciones significativas, en la modulación de la forma onda de la intensidad (ver figura 19), y aconseja precaución a la hora de estimar la corriente que circula por el neutro de la instalación.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Orden | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 |
| Fase | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 |
| % | 0 | 0 | 0 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 0,6 | 1,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 25. Serie de armónicos (%) de tensión por fase L1-L2-L3 de % THD orden impar

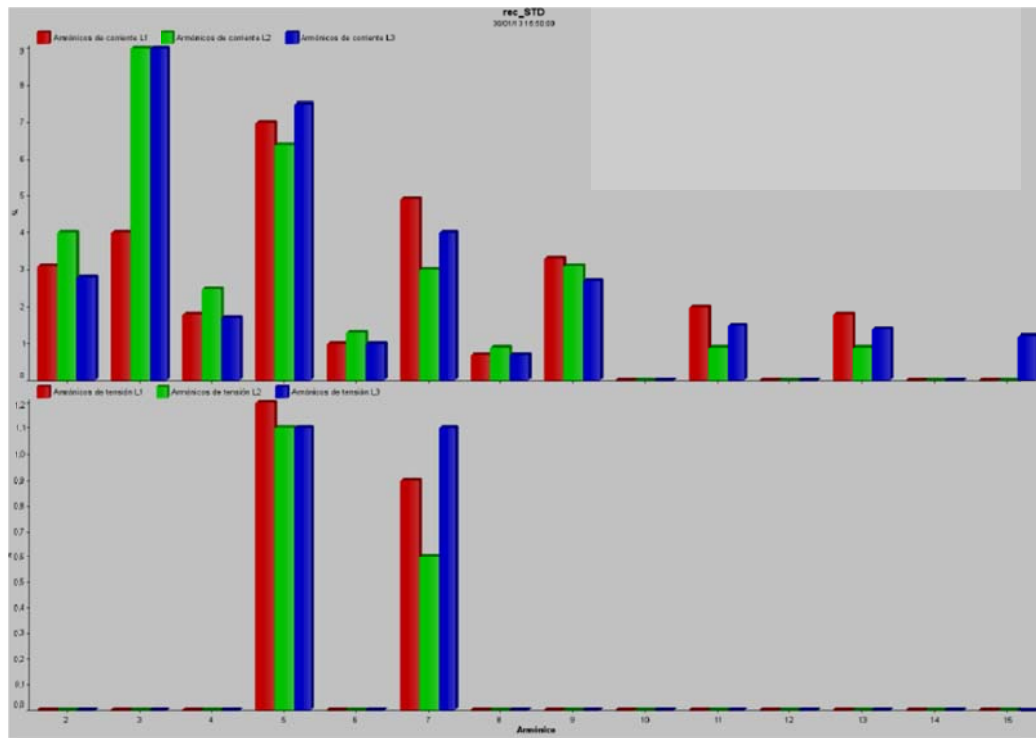


Figura 27. Gráfica que representa los armónicos de corriente (parte superior) media en torno al 3,5 % y de tensión (parte inferior) media en torno al 1% por fase desde el orden 2 al 15.

El balance luminotécnico es muy semejante, si bien es verdad que las uniformidades media y extrema son ligeramente inferiores, achacable esta diferencia a la precisión de los equipos de medida. De la evaluación de la Temperatura de Color, se observa una tendencia, hacia una luz blanca fría para el caso de los LEDs más eficientes, frente a la más cálida para lámparas de HM, pero sin que haya afectado a la apreciación de calidad por los vecinos.

Del análisis rentabilidad de la inversión realizada en este estudio, ha quedado comprobado que, a día de hoy, la inversión necesaria para la sustitución se hace viable para niveles medios de funcionamiento y durabilidad media en torno a las 40000 horas.(ver tabla 21)

| Horas de funcionamiento | VAN (5 años) | Pay-Back (simple)-Años | Pay-Back (financiado)-Años | TIR (5 años) | IBC (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 21. Estudio de rentabilidad de la inversión para cambio a LED

También es de destacar, desde el punto de vista de la fiabilidad, que después de más de dos años de funcionamiento no se han registrado fallos en los equipos LEDs instalados.

Con este estudio ha quedado demostrado, el alto potencial de ahorro energético de los LEDs. No obstante estos equipos deben aún mejorar su precio de mercado a la baja, para aumentar su rentabilidad, acortando los plazos de amortización y haciendo más atractiva la inversión.

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

Con este estudio queda demostrado, que las lámparas que utilizan tecnología LED, son perfectamente compatibles y regulables con equipos estabilizadores-reductores de tensión, instalados en la cabecera de los cuadros. Tan sólo requieren la instalación de un pequeño equipo controlador, por fuente luminosa, capaz de detectar la tensión estabilizada-reducida y actuar sobre los diodos de la lámpara LED, reduciendo los niveles de iluminación proporcionalmente a la reducción de potencia en la lámpara.

Estos equipos, siendo de reducción en cabecera y siendo exactamente los mismos, que los que se instalan para lámparas de descarga tradicionales (vapor de sodio o halogenuros metálicos), permiten el control del flujo luminoso en las luminarias LED. Tan sólo se precisa la instalación de un pequeño equipo controlador (Driver-Dimiled) capaz de actuar sobre la fuente de alimentación de la luminaria. Por tanto los estabilizadores-reductores son absolutamente compatibles para la regulación de la iluminación para ambas tecnologías.

Del balance de los parámetros eléctricos registrados, queda demostrado que al reducir la tensión en cabecera se provocan reducciones similares en la potencia activa de la lámpara y en el consumo de la misma, en la misma proporción, algo que cabía esperar, si así se programa de inicio el controlador. No obstante, sí hay que hacer notar que se ha registrado un incremento en la contaminación por armónicos en torno al 5 %, para la tensión reducida y potencia en modo ahorro del 20%. El aumento de armónicos se debe, sin duda a la mayor actuación de los PWN, de naturaleza rectangular, que hace que no existan componentes pares y aumenten los impares. Este incremento parece estar asociado claramente, a la propia naturaleza electrónica de las fuentes de alimentación de los LEDs y sus drivers, aunque a pequeña escala y en pequeñas instalaciones, como la analizada, no pensamos pueda ser un problema. No obstante, si sería necesario prevenir de esta situación en un escenario de gran utilización de estos equipos, pudiendo afectar a la modulación de la forma de onda de la señal de red y a la intensidad que puede llegar a aparecer en el neutro.

Esto sin lugar a dudas puede provocar, que tengamos que rediseñar en el futuro, los equipos de protección magnetotérmica instalados en los cuadros o bien aumentar las secciones de los neutros de las instalaciones de alumbrado, para prevenir el previsible incremento de intensidad de corriente en el neutro, como consecuencia de la contaminación armónica, así como de las deformaciones y desequilibrios provocados en las tres fases en los circuitos de alumbrado público.

De los balances luminotécnicos, se desprende, que también se producen reducciones de iluminancia media, en torno al 20 %, en el momento que el estabilizador de tensión entra en reducción; coincidiendo, con los porcentajes de reducción de la potencia consumida. Todo esto sin variar significativamente la uniformidad media y la extrema.

Queda comprobado, que los niveles de ahorro energético que se pueden conseguir con equipos de estabilizadores-reductores, aplicados a luminarias con tecnología LED y controladores por punto de luz, son directamente proporcionales a la reducción de potencia programada.

También se demuestra, que los niveles de iluminación, se ven afectados en el mismo tanto por ciento, que los niveles de reducción de potencia, al que se ve sometida la fuente de luz en reducción, con niveles de uniformidad semejantes

Y por último, en este estudio ha quedado puesto de manifiesto la altísima y contrastada eficiencia y el ahorro energético considerable, que supone la instalación de LED, así como las posibilidades de regulación compatibles con otros sistemas de iluminación de descarga. No obstante, se enfrentan, éstos equipos LED, a dos aspectos fundamentales, claramente mejorables. Por un lado un elevado precio que les hacen no ser aún competitivos y la falta de estudios o experiencias que determinen su durabilidad real.

- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ARTICULO 4. STATISTICAL METHODOLOGY PROPOSAL FOR EVALUATING UNIFORMITY: APPLICATION TO LED LUMINAIRES. (PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD. APLICACIÓN A LUMINARIAS CON LEDS).

Con la aplicación del método definido anteriormente, del análisis de las representaciones gráficas en tres dimensiones, de las iluminancias proyectadas por las luminarias estudiadas y del estudio de los indicadores estadísticos, podemos concluir que: la uniformidad media, medida de forma aislada está directamente relacionada con el coeficiente de variación, de la muestra expresado en % y definido como el cociente entre la desviación típica o estándar de las iluminancias obtenidas en la matriz de puntos medidos y el valor de la iluminancia media de la muestra. Esto nos puso en el camino de definir un nuevo concepto luminotécnico, , relacionado con la uniformidad media definido por la CIE y asociado a la mayor o menor dispersión de las iluminancias medidas respecto a la iluminancia media, al que llamaremos uniformidad estadística (Us).

De forma, que la uniformidad estadística (Us) tal cual se ha propuesto, permite de manera más precisa, evaluar la calidad lumínica de las luminarias. En los casos analizados en este estudio, y debido a la direccionalidad de las fuentes múltiples emitidas por las lámparas LEDs, se han observado en algunas de ellas, zonas sobre iluminadas muy próximas a otras de sombra muy pronunciada. Este fenómeno observado distorsiona el concepto de uniformidad clásico, al observar gran dispersión de las medidas respecto a la media, lo que estadísticamente se denomina altos valores en la desviación típica muestral calculada.

A la vista de los valores obtenidos podemos concluir que una buena uniformidad media, se corresponde con valores bajos del coeficiente de variación de la muestra de iluminancias. Valores en % de dicho coeficiente muy bajos indican valores muy altos o buenos de la uniformidad media (*Ver Tabla 36 y Fig.28*).

Evaluando los resultados de los valores de iluminancia para las seis fuentes de luz analizadas, calculando la iluminancia media, uniformidad media (U_m), la desviación típica y el coeficiente de variación (como nueva forma propuesta de medir la uniformidad media), podemos concluir y clasificar las luminarias de mayor a menor uniformidad estadística (U_s). (Ver Tabla 36)

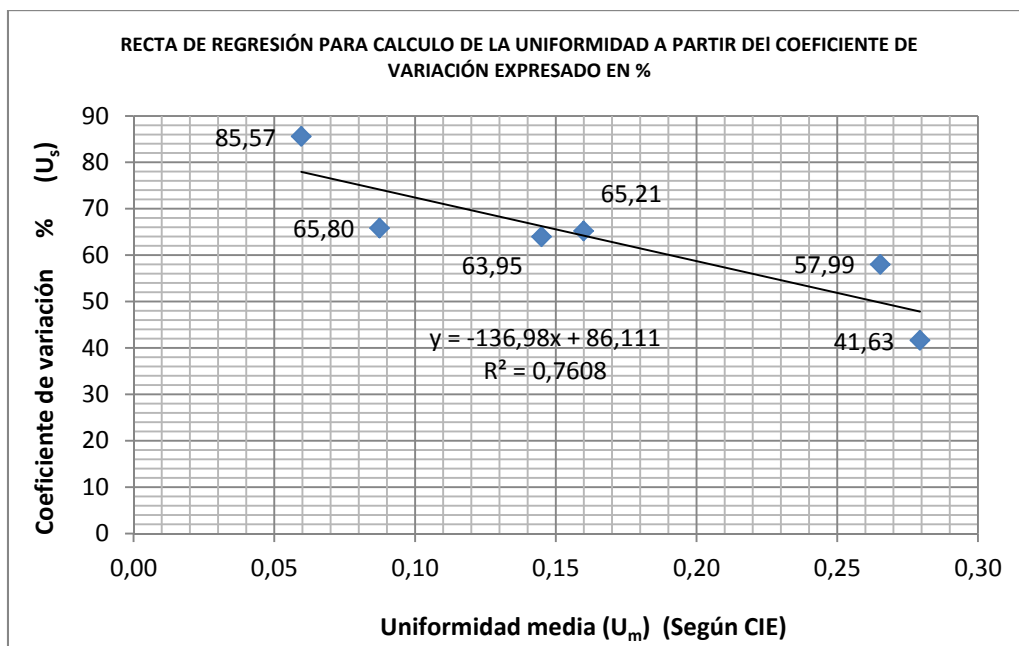


Figura 28. Representación de la recta de regresión del Coeficiente de variación (%) (U_s) (Metodología propuesta) frente a la Uniformidad Media (U_m) (según CIE)

Ordenando las lámparas analizadas de mayor a menor coeficiente de variación o uniformidad estadística (U_s), tendré una determinación muy precisa de la uniformidad, que difiere ligeramente de la clasificación que haríamos utilizando el método tradicional (U_m). (Tabla 36).

| Clasificación | Tipo de Lámpara | Iluminancia media (lux) | Uniformidad media (U_m) (según CIE-Método Tradicional) | Uniformidad Estadística (U_s) (Según Método propuesto) |
|---------------|-----------------------------------|-------------------------|--|--|
| 1 | Lámpara 150 W – HM. Marca PHILIPS | 9,27 | 0,28 | 41,63 |
| 2 | Lámpara 45W – Marca ETILED | 13,53 | 0,27 | 57,99 |
| 3 | Lámpara 45W – Marca REXDOS 270 | 13,89 | 0,16 | 65,21 |
| 4 | Lámpara 54W – Marca DLED | 18,01 | 0,14 | 63,95 |
| 5 | Lámpara 50W – Marca REXDOS 360 | 16,94 | 0,09 | 65,80 |
| 6 | Lámpara 45W – Marca SSIE | 17,80 | 0,06 | 85,57 |

Tabla 36. Resultados comparativos de evaluación de la uniformidad según el método definido

Observar como aplicando el método tradicional obtenemos valores de la uniformidad media (U_m) muy similares para el caso de la lámpara de HM y la ETILED, variando escasamente en una décima de punto. No obstante la uniformidad estadística (U_s), para la lámpara de HM, según el método propuesto, mejora en 16,35 puntos porcentuales a la lámpara ETILED, a pesar de tener una U_m muy semejante 0,28 y 0,27 respectivamente.

Algo parecido y que nos sirve para apoyar esta nueva metodología más precisa que la tradicional, ocurre al comparar la lámparas REXDOS 270, DLED y REXDOS 360. Donde advertimos que a pesar de presentar uniformidades variables, U_m de 0.16 , 0.14 y 0.09 respectivamente, observamos que las dos primeras presentan uniformidades estadísticas (U_s) similares de 65,21 % y 63,95% respectivamente, observando como la tercera presenta una uniformidad (U_s) del 65,80 %; superando y situándose en unos niveles muy parecidos a las dos primeras. Esto deja en evidencia la debilidad del método tradicional. Las representaciones gráficas en 3D vienen a ratificar lo deducido estadísticamente, observando el parecido entre las tres gráficas de referencia.

Este fenómeno también se acusa al comparar las lámparas REXDOS 360 y SSIE, donde obtenemos valores de la uniformidad U_m variables en tres décimas de punto, 0.09 y 0.06 respectivamente. Sin embargo al aplicar el método propuesto los valores de la uniformidad estadística (U_s) difieren en casi 20 puntos porcentuales 65.80 y 85.57 respectivamente.

Del análisis comparativo, queda demostrado, que los niveles de iluminación, alcanzados con las nuevas aplicaciones de lámparas LEDs alcanzan ya un nivel de iluminancia suficientemente buenos. No obstante, la uniformidad supone en algunos casos un importante inconveniente para esta incipiente tecnología.

Con este estudio queda demostrado, que es posible medir la uniformidad utilizando herramientas estadísticas muestrales como son la desviación típica muestral, la iluminancia media y el coeficiente de variación.

Esta nueva metodología propuesta, presenta claras posibilidades de aplicación en las mediciones de la uniformidad, para luminarias que utilizan tecnología tanto LED como de cualquier otro tipo, y que presentan una iluminancia media (U_m) muy distorsionada por su carácter direccional. Por esto consideramos que el concepto hasta ahora usado para definir la uniformidad media, recomendado por la CIE, perfectamente válido para las lámparas de descarga, no es tan preciso para luminarias que tienen múltiples fuentes de luz (LEDs).

Con el método de evaluación propuesto, queda demostrado que cuando la representación gráfica marca una tendencia uniforme sin altas crestas (zonas sobre-iluminados) y profundos valles (zonas infra-iluminadas), y además presenta poca dispersión con la distancia de los valores de iluminancias respecto a la media (bajos valores para la desviación típica, respecto a la iluminancia media), podemos asegurar la correcta uniformidad de la iluminación proyectada por dicha luminaria

Por último, indicar que como ha quedado demostrado en el presente estudio, el concepto de uniformidad media, definido por la CIE es y sigue siendo, perfectamente válido para lámparas de descarga, aunque requiere de una redefinición al entrar en juego tecnologías lumínicas, asociadas a múltiples fuentes de luz, a base de diodos LED's con marcado carácter multidireccional.

Se hace necesario encontrar un método, que permita calcular y comparar uniformidades de manera más precisa. De forma que la metodología estadística propuesta en el presente estudio, como ha quedado demostrado, es capaz de resolver y calcular de forma más rigurosa uniformidades medias.

4.6 CONCLUSIONES FINALES

4.6. CONCLUSIONES FINALES

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. Las rentabilidades económicas y financieras empiezan a ser interesantes, y proporcionales al número de horas de funcionamiento de los equipos. (ver Tabla 21)

| Horas de funcionamiento | VAN (5 años) | Pay-Back (simple)-Años | Pay-Back (financiado)-Años | TIR (5 años) | IBC (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 21 .Estudio de rentabilidad de la inversión para cambio a LED

No obstante, no es recomendable aún, la sustitución masiva de las actuales lámparas de descarga HM que utilizan tecnología cerámica (que tuvieron una gran acogida en la última década, con una fuerte implantación en nuestra 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. En cuanto a su durabilidad real, aún no tenemos resultados fiables, más allá de los estudios a base de previsiones temporales, dadas por los propios fabricantes, sin considerar la disminución de las prestaciones luminotécnicas que se prevee mermen la calidad de los equipos con el paso del tiempo. Aspecto éste, muy considerar en futuras investigaciones.

Por otro lado se ha comprobado que la naturaleza electrónica de las fuentes de alimentación de las lámparas LED, incrementa la contaminación armónica, deformado la señal e incrementado la corriente que circula por el neutro. Aspecto este a tener muy en consideración, en futuras investigaciones, por las consecuencias asociadas a los sobrecalentamientos de los neutros de las instalaciones de alumbrado. (Artículo 2).

En el caso de instalaciones con lámparas HM, que utilizan tecnología cerámica resulta más eficiente, desde el punto de vista inversor, económico y financiero, la aplicación de equipos de ahorro en cabecera con estabilizadores de tensión-reductores de flujo que el empleo de balastos electrónicos. 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.

Podemos concluir del presente estudio realizado en el artículo 1, que 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. Por el contrario estos equipos electrónicos son a día de hoy todavía demasiado caros, y delicados, presentando una alta sensibilidad a la temperatura y a las sobretensiones, aspecto que queda abierto como mejora tecnológica para futuras investigaciones .

Se desaconseja su instalación, debido al elevado coste por unidad de equipo y al alto nivel de fallos detectado en los mismos (superior al 30% en un año de análisis y llegando a un 80 % después de 4 años), al menos para la marca y tipo analizado en este estudio.

Por otro lado, el principal inconveniente de los equipos estabilizadores de tensión analizados, está en la limitación en la reducción de tensiones en cabecera. Esto es debido a las caídas de tensión de final de línea medida en los circuitos analizados. Este fenómeno puede llegar a provocar el apagado de las lámparas de HM, si se reduce la tensión, por debajo de los 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. (Artículo 1). Quizás sería interesante plantear para mejorar las prestaciones de estos equipos, un aumento de las secciones de cableado para los circuitos de iluminación (actualmente cobre en 6 mm^2) por secciones de 10 mm^2 . Esto, seguro que podría suponer la mejora de los porcentajes de ahorro de los estabilizadores-reductores en cabecera por encima del 20 % verificado en este estudio.

Es muy destacable, la alta rentabilidad financiera y económica de estos equipos, que aumenta proporcionalmente al aumentar las horas de funcionamiento medio del alumbrado en modo ahorro. (ver Tabla 15)

| Horas de funcionamiento Sistema de ahorro | 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 15. Estudio de rentabilidad para instalar Estabilizadores de Tensión en instalaciones con lámparas HM

Fruto del 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. Un pequeño driver instalado en la luminaria es suficiente para detectar las caídas de tensión desde la cabecera de los cuadros y reducir la potencia de las lámparas LEDs. Comprobando que una reducción de la potencia, controlada por el driver, supone una reducción similar y proporcional en las iluminancias medias medidas. Viéndose reducidas dichas iluminancias medias en el mismo porcentaje que la potencia reducida, con mínima influencia en las uniformidades. Consiguiendo ahorros semejantes, sin limitaciones de reducción y con control nulo de fallos. (Artículo 3)

Por último, conforme al cuarto estudio y artículo de este compendio hemos observado que el carácter multidireccional de las fuentes múltiples de luz, con la que están construidas las luminarias a base de LEDs y la alta dispersión de los valores de iluminancia medidos respecto a la iluminación media (desviación típica muestral). Nos conducen a la necesidad de replantearnos el concepto clásico de la uniformidad media, relacionándolo con el coeficiente de variación de la muestra de iluminancias y definiendo un nuevo concepto luminotécnico asociado a la uniformidad de las fuentes de luz y que llamaremos uniformidad estadística (U_s). Observando cómo valores en % de dicho coeficiente muy bajos indican valores muy altos o buenos de la uniformidad media (Ver Tabla 36). De forma que la metodología estadística propuesta en este estudio, como ha quedado demostrado, es capaz de resolver y calcular de forma más rigurosa uniformidades medias.

| Clasificación | Tipo de Lámpara | Iluminancia media (lux) | Uniformidad media (Um) (según CIE-Método Tradicional) | Uniformidad Estadística (Us) (Según Método propuesto) |
|---------------|---------------------------------|-------------------------|---|---|
| 1 | Lámpara 150 W –HM.Marca PHILIPS | 9,27 | 0,28 | 41,63 |
| 2 | Lámpara 45W – Marca ETILED | 13,53 | 0,27 | 57,99 |
| 3 | Lámpara 45W –Marca REXDOS 270 | 13,89 | 0,16 | 65,21 |
| 4 | Lámpara 54W – Marca DLED | 18,01 | 0,14 | 63,95 |
| 5 | Lámpara 50W – Marca REXDOS 360 | 16,94 | 0,09 | 65,80 |
| 6 | Lámpara 45W –Marca SSIE | 17,80 | 0,06 | 85,57 |

Tabla 36. Resultados comparativos de evaluación de la uniformidad según el método definido

A continuación y de forma resumida exponemos las cuatro conclusiones principales a las que hemos llegado en estos cuatro estudios y una futura línea de investigación.

PRIMERA CONCLUSIÓN:

Queda demostrado, que se pueden regular lámparas de descarga de HM con equipos estabilizadores de tensión en cabecera y que aunque son menos eficientes energéticamente que los balastos electrónicos, instalados punto a punto, debido a las limitaciones de las caídas de tensión de los circuitos en los finales de línea, son mucho más rentables económica y financieramente.

SEGUNDA CONCLUSIÓN:

Queda demostrado que la tecnología LED, es una tecnología muy eficiente energéticamente, con características luminotécnicas muy aceptables y una rentabilidad financiera y económica suficiente, aunque manifiestamente mejorable, sin que a día de hoy, exista un método o modelo fiable que permita predecir su durabilidad real. Al igual que se espera mejoren sus prestaciones en general, se espera una mejora de los precios, que la hagan ser día a día más competitiva. Se desaconsejan actualmente las inversiones en sustituciones masivas, pero sí se aconseja su instalación paulatina aprovechando inversiones globales o financiaciones a bajo interés.

TERCERA CONCLUSIÓN:

Por último pensando en los años que previsiblemente se preveen, aún de convivencia entre las lámparas HM y LED. Se aconseja, de manera global, apostar por inversiones en equipos de ahorro en cabecera de los cuadros, con estabilizadores-reductores de tensión. Estos equipos, a pesar de las limitaciones demostradas en este compendio para las lámparas de HM, permiten ahorrar y compatibilizar ambas formas tecnológicas de iluminación, a la espera de una progresiva consolidación e implantación de la nueva tecnología LED.

CUARTA CONCLUSIÓN:

El carácter multidireccional de las fuentes de luz que componen las luminarias a base de diodos LEDs, y la dispersión de los valores de la iluminancias medidas respecto a la iluminancia media. Nos lleva a la necesidad de plantear un nuevo concepto luminotécnico-estadístico asociado a la uniformidad media de las fuentes, más preciso y que denominaremos uniformidad estadística (U_s).

CONCLUSIÓN FINAL Y FUTURA LINEA DE INVESTIGACIÓN

Los LEDs, sin lugar a dudas, están llamados a ser, en un futuro, más cercano que lejano, la nueva forma de iluminación vial de nuestra ciudades. No obstante se espera un periodo de convivencia con las lámparas tradicionales de HM. Por lo que debemos pensar en un cambio progresivo y en sistemas de ahorro que permitan compatibilizar ambas fuentes de luz.

No obstante, debemos anticiparnos y estar preparados para poder afrontar, las consecuencias derivadas de los previsibles incrementos de contaminación armónica, provocados por estos equipos y su naturaleza electrónica en las redes de alumbrado. Resulta inquietante y preocupante a la vez, imaginarse a medio o largo plazo, un escenario de iluminación vial con gran presencia de equipos electrónicos instalados.

En esta línea se plantea como futura línea de investigación el estudiar las posibles consecuencias de este fenómeno, trabajando en la línea de proponer medidas alternativas para poder amortiguarlo. Además se propone estudiar los picos de corriente detectados en el arranque, las corrientes de fuga a tierra, además de las corrientes observadas en el neutro de las instalaciones de alumbrado.

4.7 RECOMENDACIONES

4.7. RECOMENDACIONES

De los estudios realizados, podemos considerar algunas recomendaciones fruto de los resultados obtenidos y algunas consideraciones a tener en cuenta para futuros estudios.

PRIMERA

Al día de hoy, la tecnología LED aplicada a la iluminación urbana es, aunque novedosa, muy eficiente en cuanto a prestaciones lumínicas, y prácticamente se encuentra al mismo nivel, que las lámparas de HM. No obstante, se ha podido comprobar en este estudio que los precios de mercado, aún siguen estando un poco elevados, aunque últimamente se observa una clara tendencia a la reducción de costes por equipo. Por ello, las amortizaciones de los estudios de inversión para unos usos medio en torno a las 10 horas de funcionamiento, empiezan ya a ser interesantes, obteniéndose una rentabilidad moderada. Estos números se mejoran sensiblemente al aumentar las horas de funcionamiento, con amortizaciones a 3 años y rentabilidades próximas al 15 %. No obstante se espera que la tendencia a bajar los precios de los equipos puede hacer que a muy corto plazo, se obtengan amortizaciones y rentabilidades bastante mejores. Se puede concluir que a día de hoy, se desaconseja la sustitución masiva de las lámparas de descarga por LEDs, a menos que se obtengan líneas de financiación con interés a muy bajo coste. Se recomienda, como así se desprende del presente estudio, que hay que apostar de manera paulatina y progresiva por ir implantando esta nueva tecnología, que sin duda será en un futuro muy cercano la forma de iluminación vial en nuestras ciudades.

SEGUNDA

En tanto en cuanto los precios de los equipos de iluminación que utilizan tecnología LED no empiecen a abarataarse, se recomienda actuar con prudencia y mantener la convivencia con los equipos de iluminación con lámparas de descarga HM. Y puestos a convivir con ambas formas de iluminar, se recomienda utilizar equipos de ahorro y eficiencia compatibles con ambas formas tecnológicas. Como ha quedado demostrado en la presente tesis. Se recomienda que se instalen estabilizadores de tensión en la cabecera de los cuadros que alimentan a circuitos mixtos que comparten lámparas HM y LED, como paso intermedio hasta la definitiva consolidación de la iluminación LED. Instalando para el caso de los LEDs los drivers o controladores en cada luminaria que permita su regulación punto a punto.

TERCERA

Del estudio planteado en el artículo uno del presente compendio, ha quedado demostrado que los equipos estabilizadores de tensión, instalados en cabecera, presentan una clara limitación asociada a las caídas de tensión de los finales de línea de los circuitos. Por esta razón se recomienda que para no tener problemas de encendido, una vez instalados en cabecera de los cuadros, se calibren para verificar que las reducciones de tensión no provocan problemas de encendido en las lámparas HM. Se ha podido verificar que reducciones de tensión de fase, por debajo del 20 %, pueden ocasionar problemas de arranque y encendido en las lámparas de HM. No obstante este problema no se ha presentado con las lámparas tipo LED que pueden regularse con reducciones de hasta el 50 %, sin problemas. Quizás la solución para obtener mejores rendimiento de ahorro en los estabilizadores, pasaría por aumentar la sección de los conductores, como hemos propuesto en las conclusiones, pasando de secciones en los circuitos de alumbrado de 6 mm² a secciones de 10 mm². Esto sin lugar a dudas, permitiría aumentar las reducciones de tensión en cabecera, sin provocar problemas de encendido en las lámparas de HM, situadas a final de línea.

CUARTO

Caso de tener que elegir, para lámparas de HM, entre un sistema de ahorro por control punto a punto con balastos electrónicos o un control con estabilizadores-reductores de tensión en cabecera en los cuadros, sería preferible y recomendable el decantarse por los segundos. Este estudio, demuestra que los balastos electrónicos son más eficientes desde el punto de vista energético, con posibilidades de ahorros del 40 % (el doble que los estabilizadores). No obstante y en su contra, los precios de los equipos y el alto nivel de fallos registrados de casi el 80 %, desaconseja su instalación. Al menos para los equipos probados en el presente estudio. El análisis en profundidad, de las causas provocadas en este alto nivel de fallos registrado, se dejan propuestas como objeto de futuras líneas de investigación. Aunque conforme a los informes emitidos por el fabricante, en laboratorio, parecen estar asociados a la alta sensibilidad de estos equipos a las sobretensiones, y a la temperatura.

QUINTA

El carácter multidireccional de las fuentes de luz a base de LEDs aconseja solicitar a los fabricantes que aporten fotometrías reales más rigurosas. Debiendo especificar en función de los parámetros de diseño, altura de la fuente, tipo de vía y de las dimensiones del vial, no sólo los niveles de iluminancia (máximo, mínimo y medio) además de la uniformidad media y extrema. Sino que se aconseja complementen estos estudios con cálculos o simulaciones que justifiquen la uniformidad estadística real (U_s) definida en este compendio. Para así, justificar la mayor o menor, dispersión o concentración de los valores de iluminancia medidos respecto a la iluminación media (desviación típica muestral) respecto a la iluminancia media calculada. Además se aconseja representar gráficamente en tres dimensiones, la nube de iluminancias proyectada sobre el pavimento, conforme hemos aconsejado en este estudio. De esta forma tendremos una medida muy real y exacta de la uniformidad media de la fuente de luz.

4.8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

4.8 . FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Fruto del trabajo realizado y aquí expuesto en forma de artículos compendiados, han quedado abiertas algunas líneas de investigación para futuros estudios, que pasamos a resumir brevemente.

- Del primer experimento, discutido en el artículo 1, observamos y es muy de destacar, el alto nivel de fallos, registrado en los balastos electrónicos. Al menos para el tipo, marca y características de los empleados en este estudio. Todo esto y a pesar de ser equipos, muy eficientes energéticamente, de primera calidad, y con un potencial de ahorro energético muy superior al de los estabilizadores de tensión, como hemos podido verificar. Sería muy conveniente, y queda propuesta como futura línea de investigación, estudiar en profundidad, las causas que han propiciado este alto índice de fracaso, al menos en estos equipos en concreto. En cualquier caso la respuesta a esta propuesta, como futura línea de investigación conseguiría resolver esta incognita que entendemos clave para el futuro desarrollo tecnológico y mejora de estos eficientes equipos electrónicos.
- Sería muy interesante plantear un estudio que permitiera analizar las posibilidades de mejora en los balances de ahorro energético, que se pueden obtener con el uso de estabilizadores, en circuitos eléctricos para alumbrado, que utilizan sección de cobre mayor de 6 mm². Quizas de esta manera podamos aumentar los % de reducción, y mejorar los beneficios económicos asociados a estos equipos.
- De los estudios analizados en los artículos 2 y 3, se propone como futura línea de investigación. Tratar de establecer o definir algún modelo matemático que, en base a los datos de parámetros externos medibles, asociados a la temperatura, humedad, picos de intensidad en el encendido, horas de funcionamiento diario de los equipos, etc... permitiera determinar o simular con garantías suficientes de aproximación, la durabilidad real proyectada de los equipos de iluminación que utilizan Tecnología LED.

- Después de analizar y discutir los resultados de la sustitución de las lámparas HM por LEDs. Se han observado muy buenos rendimientos luminotécnicos, nulo consumo de energía reactiva inductiva, aunque con un ligero aumento de la contaminación por armónicos, especialmente los de orden impar. Sería muy conveniente, y queda también propuesta como futura línea de investigación, el realizar un estudio en profundidad de la contaminación armónica aportada a la red por estos equipos electrónicos. Se propone tratar de estimar, valorar, evaluar y amortiguar las consecuencias de este fenómeno eléctrico. El abuso de equipos electrónicos en la iluminación urbana, puede provocar, importantes distorsiones de la modulación de las señales eléctricas en la red, observando un incremento de la corriente detectada en el neutro de las instalaciones de alumbrado público. Sería muy interesante y queda propuesta como futura línea de investigación, el analizar los problemas que este fenómeno puede acarrear en un hipotético escenario de empleo masivo de la tecnología LED en nuestras ciudades, tratando de buscar alternativas eficaces capaces de amortiguar este fenómeno. Además se propone estudiar las corrientes de pico detectadas en el arranque de las instalaciones de alumbrado con LEDs capaces de hacer saltar las protecciones. En este sentido se está intentado resolver este problema con arranques progresivos, retardados y escalonados en el momento del encendido.

4.9. BIBLIOGRAFÍA

4.9. 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; Lee, W. (2000).”*Verification of electrical energy savings for lighting retrofit using short- and long-term monitoring*”. Energy Conversion & Management. 41:1999-2008.
- .- Atkinson, B.A; McMahan, 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. “*Recomendations to illuminate roads for motorized vehicles and pedestrian transit*” ISBN 978 3 90196 78 4
- .- 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.

.- Gómez-Lorente, D; Rabaza, O; Espin Estrella, A; Peña-García, A; (2014) "A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm". Expert System with Applications, 2013.Vol.40.Nº 6 p.2156-2164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.10.026>

.- 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, 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>)

.- 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>)

.- Hermoso, MJ; De Andrés JR; (2014) "Statistical methodology proposal for evaluating uniformity: application to led luminaires.", Light & Engineering. (SVETOTEKHNIKA). Junio 2014 • Vol. 22. Nº 2. Pendiente de asignar página y Doi.

.- 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. y Pendiente de asignar página y Doi. Se adjunta Certificado de publicación del director de la Editorial.

.- 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 M; Nursahida, M.A; (2011). "Life cycle cost analysis and payback period of lighting retrofit at the University of 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: 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)

.- O. Rabaza, A. Peña-García, F. Pérez-Ocón, Gómez-Lorente, D. A simple method for designing efficient public lighting, based on new parameter relationships Expert Systems with Applications, Volume 40, Issue 18, 15 December 2013, Pages 7305-7315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.037>

.- 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, J.D; Freyssinier, J.P; Bierman, A.A. (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.
- .- 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; Anzurez, 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)

4.10. COMPENDIO DE PUBLICACIONES Y CERTIFICADOS

Artículo 1. “COMPARATIVE STUDY OF ENERGY-EFFICIENCY AND CONSERVATION SYSTEMS FOR CERAMIC METAL-HALIDE DISCHARGE LAMPS.” *ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA APLICADOS A LÁMPARAS DE DESCARGA DE HALUGENUROS METÁLICOS CON TECNOLOGÍA CERÁMICA*

Energy

Certificate of publication for the article titled

“Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps”

Authored by:

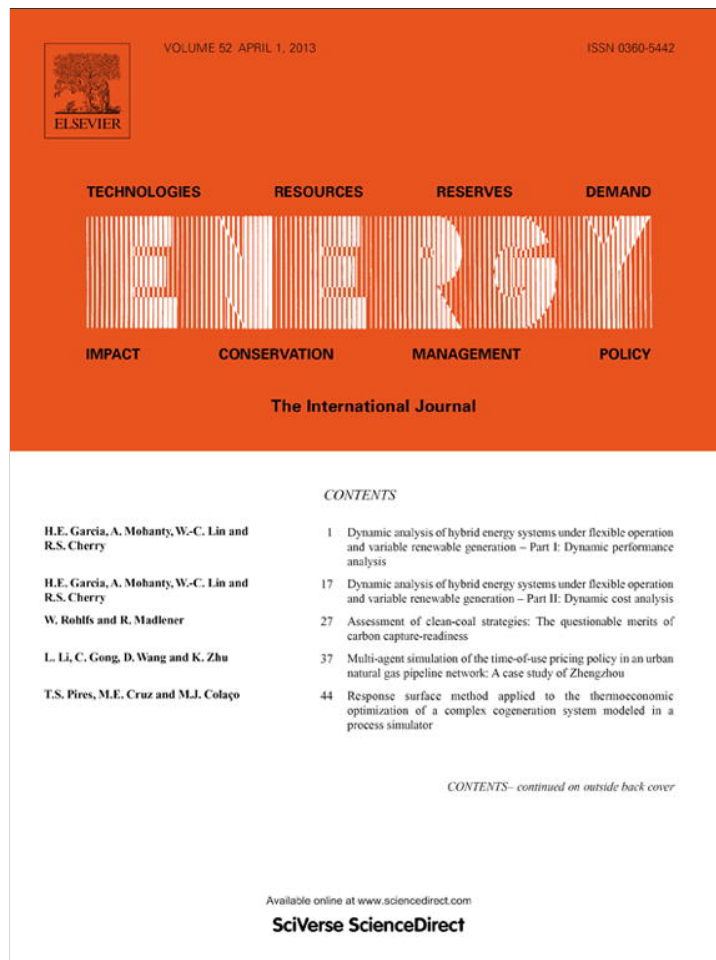
Manuel Jesús Hermoso Orzáez, José Ramón de Andrés Díaz

Published in:

Volume 52C (2013), Pages 258–264



Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/authorsrights>



Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps



Manuel Jesús Hermoso Orzáez^{a,b,c,1}, José Ramón de Andrés Díaz^{d,*}

^a City Government of Fuengirola, Spain

^b Polytechnic School of Engineering, Engineering and Projects Department, University of Jaén, Spain

^c C/Churruga, No 2, Edificio Astigi 1 Portal 1, Planta 2, No 8, C.P 29640 Fuengirola, Malaga, Spain

^d School of Industrial Engineering, University of Malaga, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 July 2012

Received in revised form

19 December 2012

Accepted 27 January 2013

Available online 7 March 2013

Keywords:

Public-lighting

Dimmable electronic ballast

Energy-efficiency

Metal-halides

Lighting flow dimmer-stabilizer

ABSTRACT

Interest in energy savings in urban lighting is gaining traction and has become a priority for municipal administrations.

LED (light-emitting diode) technology appears to be the clear future lighting choice. However, this technology is still rapidly developing and has not been sufficiently tested.

As an intermediate step, alternative proposals for energy-saving equipment for traditional discharge lamps are desirable so that the current technologies can coexist with the new LED counterparts for the short and medium term.

This article provides a comparative study between two efficiency and energy-saving systems for discharge lamps with metal-halide and ceramic technologies, i.e., a lighting flow dimmer-stabilizer and a double-level electronic ballast.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Actually, public lighting accounts for 2.3% of global electricity use [1,2], up to 80% of municipal electricity use, and up to 60% of the municipal energy bill [4–6].

As indicated in a study carried out by the Andalusia Energy Agency [3], for certain cases, the possibilities for public lighting energy savings are high [4], allowing for a reduction in electricity use between 20% and 50% [8,9] with amortisations fewer than 3 years.

The clear choice for the future appears to be located in LED's technology. However, this technology is still developing very quickly and is not sufficiently tested. That is why high intensity discharge lamps are intended to coexist with new LED technologies in the short and medium term.

There are systems proposed for this HID (high-intensity discharge) lamps that achieve energy savings and the amortisation of actual installations. There are few works evaluating real

situations of energy savings with these systems. This study seeks to compare the results obtained from two energy-saving and -efficiency systems:

- Lighting flow dimmer-stabilizer.
- Dimmable electronic ballast [9].

Here we will follow the tendency of previous authors [7,10,11].

The objective of this research is to evaluate in real conditions these two energy-saving systems, analysing real savings, necessary investments and profitability, and reliability of the equipments involved. To do this a year-long study has been carried out, and during this year there has been continues data acquisition to test the energy-saving systems and how it affects the installation.

2. Methodology

2.1. System characteristics

Two roads with similar characteristics and lighting arrangements, which involve 7 m double-luminaire streetlamps (ATP, model Siglo) and metal-halide discharge lamps (Philips, model Master City), that are located in Fuengirola (Málaga) were selected for this study (Tables 1 and 2).

Corresponding author. Tel.: +34 951 952 272; fax: +34 951 952 600.
E-mail addresses: mhorzaez@ujaen.es, mhermosoorzaez@gmail.com (M.J. Hermoso Orzáez), deandres@ctima.uma.es (J.R. de Andrés Díaz).
Tel.: +34 610 389 020.

Table 1
Lamp type.

| Type | Power | Colour temperature | Flow | Luminaire case | Luminous efficacy |
|-----------------------------|-------|--------------------|----------|----------------|-------------------|
| Master City WHITE CDO-TT/28 | 150 W | 2800 K | 13.5 Klm | E-40 | 110 lm/W |
| Master City WHITE CDO-TT/28 | 100 W | 2800 K | 10.7 Klm | E-40 | 109 lm/W |

The present study analyses energy-saving and regulation systems, as described below:

1. Lighting flow dimmer-stabilizer.

A stabilizer regulator (SALICRU, model ILUEST) was installed at the head end of the lighting line in the control panel. This regulator was previously manually adjusted according to the voltage in the circuit. Though it is possible higher voltage reduction, the voltage was set to 208 V ± 5 V as ignition problems from insufficient voltage at the end of the line were confirmed. By fixing this value as the maximum limit of the regulation for the stabilizer, a reduction of approximately 20% was obtained.

2. Dimmable electronic ballasts.

The electromagnetic ballasts at each location were substituted with two-level dimmable electronic ballasts (TRIDONIC) with a control thread that was remotely managed from the control panel.

2.2. Luminotechnical input calculations

To control the evolution of the lighting levels, previous theoretical studies involving the two previously mentioned roads were performed with the luminotechnical calculation program SIBA. This program was created for ATP by the Luminotechnical Laboratory of the Polytechnic University of Catalonia. The results of these studies are presented in Table 3

These luminotechnical studies have been carried out according to CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) and other authors recommendations [12–14].

2.3. Data collection

2.3.1. Electrical

Data were recorded for one year (at 15-min intervals) for electrical data (energy, power, voltage, intensity, and power factor) and failure monitoring and control. A comparative analysis was performed before and after the initiation of a reduction system on the two described regulation systems to evaluate consumption.

Measuring equipment characteristics are indicated in Tables 4 and 5.

2.3.2. Lighting

Monthly lighting measurements were performed in situ. The influence of the two regulation and control systems on the decrease in lighting levels (in terms of illuminance and uniformity) was

Table 2
Power assessment with panel and regulation system.

| Street | Regulation system | Total power | Regulated luminaires | Power por luminaria |
|-------------------|---|----------------|----------------------|----------------------|
| C. Condesa Málaga | Electronic ballast Stabiliser-regulator | 3600 12.600 | 24 54 + 45 | 150 W 150 W–100 W |

Table 3
Luminotechnical calculations.

| Street | Maximum illuminance Emax Lux | Average illuminance Emed Lux | Minimum illuminance Emin Lux | Average uniformity Umed % | Extreme uniformity Uext % |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Calle Málaga | 27.5 | 22.8 | 17.8 | 87 | 65 |
| Calle de la Condesa | 57.0 | 38.8 | 21.8 | 56 | 38 |

compared. The theoretical results were compared with the experimental results, along with a visual perception with a chromatic reproduction.

Lighting measurements were based on the simplified measurement method for average illuminance, as described in R.D. 1890/2008, ITC-EA-07.

Two luxometers were employed to verify the contrast of the obtained results, as follows:

1. The GOSSEN model MAVOLUX 5032C/B luxometer owned by the Area of Engineering Projects of the School of Engineering of the University of Málaga.
2. The KOBAN model Digital KL-1330 luxometer owned by the Technical Maintenance Services of the City Government of Fuengirola.

Both luxometers were calibrated and verified.

3. Results

3.1. Assessment and comparative study of electrical parameters

3.1.1. Dimmable electronic ballasts – Camino de la Condesa street

For the 24,150 W luminaires regulated with two-level electronic ballasts, average annual active power reductions of 40% were recorded for each regulated luminaire (Fig. 1), confirming that there was no reactive power consumption.

3.1.2. Lighting flow dimmer-stabilizer – Málaga street

With the voltage stabilizer, an average annual reduction of 20 and 40% for active (Fig. 2) and reactive power (Fig. 3), respectively, was achieved. As previously mentioned, this change was dependant on the maximum allowable voltage that did not cause ignition problems.

3.2. Energy assessment

Tables 6 and 7 include a summary of the average energy assessment for the regulation systems after 12 months based on the obtained data for the active (kWh) and reactive (kVAh) energy. Based on the commercial prices of the voltage stabilizer and of the two-level electronic ballast, the initial investment (cost per W) and return on investment (“payback”) were calculated (estimated energy cost 0.140069 €/kWh).

Table 4
Characteristics and precision of the TELEASTRO measurement equipment features and type of intensity transformer.

| Type | Closed core toroidal |
|----------|----------------------------|
| Relation | xA/1.5 VAC |
| Type | 2 |
| Diameter | Based on transformer model |
| Class | 2 |

Table 5
Units and ranges of the measurement entries.

| Entry | Units | Range |
|----------------|--------------|---------------------------------|
| VL | Volts × 10 | 0–3000 |
| PL | Watts | 0–65,535 |
| MA0 | – | F_SCALE_MA0–F_SCALE_MA0 |
| IL | Amperes × 10 | 0–F_SCALE_I × 10 ⁽¹⁾ |
| QL | VAR | 0–0.65535 |
| PFL | – | –1–1 |
| P_ACTIVE_III | Watts | 0–196,605 |
| P_REACTIVE_III | VAR | 0–196,605 |
| CNT_ACTIVE | kWh × 10 | 0–4,294,967,295 |
| CNT_REACTIVE | kVARh × 10 | 0–4,294,967,295 |

We can see that the energy savings for the electronic ballast regulation (44%) are twice that of the stabilizers (18%). Additionally, the return-on-investment period is twice as long for the electronic ballast regulation (in excess of 5 years) when compared with the stabilizers. These results are congruent with similar studies [15,16].

3.3. Luminotechnical assessment

The luminotechnical assessment is compared with the field measurements in Table 8.

From the luminotechnical assessment, the illuminance reduction (in percent variation) for the electronic ballasts regulation system is twice (43%) that of the voltage stabilisers (19.83%), which coincides with the percentage reduction of active energy.

Other important issue is the quality of lighting. First we have found that, regardless the energy-saving system used, the lamp colour temperature is similar. For both cases, at the time of the reduction, the white balance (Figs. 4 and 5) tended to result in a “greenish light (in the web version)”. Besides the light flow reduction did not affect the average or extreme uniformities (Table 8) [17].

4. Financial and economic investment analysis

We use four criteria to evaluate and compare the investments in a dynamic nature that considers the capital cost (i): the NPV (net present value), the cost-benefit index, the payback period, and the IRR (internal rate of return). Similar costs analysis is carried out in other studies [18,19].

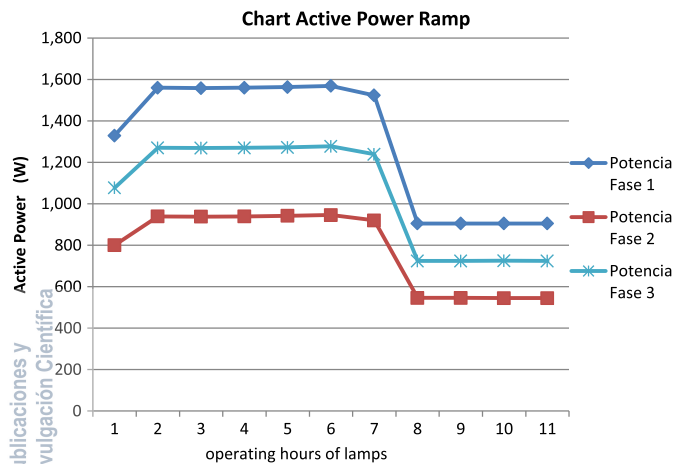


Fig. 1. Active power consumption reduction. Electronic ballast.

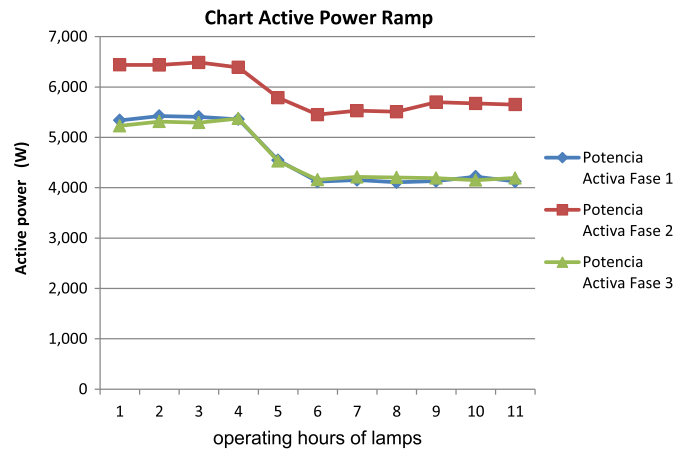


Fig. 2. Decreasing active power ramp. Head-end stabilizer for reduction.

To compare the investments, we are to homogenise both facilities by supposing the same total power installed: 12,600 W (this corresponds to the higher one). Besides we are doing this study for 6, 7 and 8 h of reduction time.

4.1. Regulation system with dimmable electronic ballast

We have considered a 12,600 W installation (84 luminaries at 150 W each). According to this we have 12,600 € investment (1 €/W, see Table 6) considering 84 ballasts at 150 € each. We have obtained a positive NPV at ninth year taking into account the proved energy savings (Table 6) and considering an interest rate of 5%. Besides the payback period is over 6 years.

We have obtained five years IRR of –8% when studying the financial profitability. From the financial point of view, the investment profitability in questioned due to this value (see Table 9).

We have analysed financial values for 6, 7 and 8 h of daily reduction time as indicated in Table 10. As expected, the results indicate that fewer hours imply worse investment profitability.

Similar results were obtained by Miomir Kostic and Lidija Djokic [2].

4.2. Regulation system with lighting flow dimmer-stabilizer

For a lighting flow dimmer-stabilizer system an investment of 4500 € is necessary. As in the previous case, we have considered a

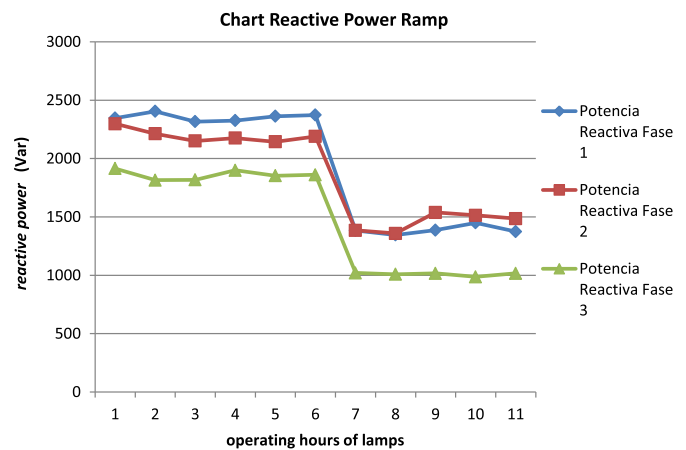


Fig. 3. Detailed decreasing reactive power ramp. Head-end stabilizer for reduction.

Table 6
Energy assessment and return-on-investment period. Electronic ballast.

| Average values | Without energy-saving system | With energy-saving system | Reduction |
|---|--------------------------------------|---------------------------|-----------|
| Average active energy (kWh) | 2.7 | 1.5 | 44% |
| Average reactive energy (kVARh) | 0.9 | 0.9 | 0% |
| Average cost every 15 min (€) | 0.37818 | 0.21178 | |
| Average saving every 15 min (€) | | | 0.166402 |
| Total investment | 3600 € (24 Ballasts * 150 €/Ballast) | | |
| Total power installed | 3600 W (24,150 W luminaries) | | |
| Investment per W | 1 €/W | | |
| Investment by light-point installed (€) | 150 €/light-point | | |
| Return on investment by W (min) | 90.14 min | | |
| Return on investment by light-point (h) | 13.521 min (225 h) | | |
| Total return on investment (years) | 6 years | | |

Table 7
Energy assessment and return-on-investment period. Voltage stabilizer.

| Average values | Without energy-saving system | With energy-saving system | Reduction |
|---|---|---------------------------|-----------|
| Average active energy (kWh) | 4.3 | 3.5 | 18.6% |
| Average reactive energy (kVARh) | 1.55 | 0.95 | 38.71% |
| Average cost every 15 min (€) | 0.60223 | 0.49018 | |
| Average saving every 15 min (€) | | | 0.11205 |
| Total investment | 4500 € | | |
| Total power installed | 12,600 W (45,100 W luminaries and 54,150 W) | | |
| Investment by W | 0.35573 €/W | | |
| Investment by light-point installed (€) | 35 €/Light-point | | |
| Return on investment by W (min) | 47.62 min | | |
| Return on investment by light-point (h) | 4.762 min (79.36 h) | | |
| Total return on investment (years) | 3 years | | |

12,600 W installation, 8 h of reduction time and an interest rate of 5%. With these conditions we obtain positive NPV at third year and five year IRR of 14%, which suggests a profitable investment (see Table 11).

We have analysed financial values for 6, 7 and 8 h of daily reduction time as indicated in Table 12. As expected, the results indicate that fewer hours imply longer payback period.

4.3. Comparative table for the analysed systems

From the economic point of view, when we analyse the previous tables we establish that lighting flow dimmer-stabilizer system is far more profitable than the dimmable electronic ballast one. The economic and financial indicator obtained, the necessary investment per watt, the investment payback and its profitability, confirm what has been indicated above.

It can also be established that if the lighting flow dimmer-stabilizer is used fewer than 7 h per day, the investment payback goes to 5 years or above. This questions the system profitability when daily operation is less than 8 h.

Table 8
Comparative luminotechnical assessment.

| | Without reduction | With reduction | % Variation |
|------------------------------------|-------------------|----------------|-------------|
| Málaga street | | | |
| Average illuminance (lux), Em | 21.4 | 15.25 | 21.63 |
| Average uniformity, Um | 0.78 | 0.74 | 0.05 |
| Extreme uniformity, Ug | 0.65 | 0.60 | 0.07 |
| Camino de la Condesa street | | | |
| Average illuminance (lux), Em | 38.8 | 19.61 | 47.31 |
| Average uniformity, Um | 0.56 | 0.55 | 0.01 |
| Extreme uniformity, Ug | 0.38 | 0.37 | 0.02 |

5. Failure control of energy-saving equipment and lamps

During the year-long study (from December 2010 to December 2011), 8 failures occurred with the dimmable electronic ballast equipment installed on Camino de la Condesa street, which was more than a 30% failure rate (24 devices installed). These devices were analysed in the laboratory to determine the origin of the failures. The preliminary laboratory results suggest problems with high thermal sensitivity to the elevated temperatures from the close placement to the lamp [20].

For the lighting flow dimmer-stabiliser on Málaga street, no performance failures were reported.

Two replacements lamp replacements were necessary on Málaga street, and none were required for Camino de la Condesa street, which was a 1% and 0% failure rate for the lamps on each street, respectively.

6. Discussion

This study demonstrated that ceramic metal-halide lamps are dimmable with both energy-saving technologies without affecting the service life and the light quality. However, a 30% failure rate was observed for the dimmable electronic ballasts (without causing lamp failure).

The savings that can be obtained with electronic ballasts are double (40%) that of the lighting flow dimmer-stabilizer equipment (20%).

It has been shown that the illumination levels are reduced by the power-reduction percentage, without causing variations in the uniformity of lighting on the roads.

The lighting flow dimmer-stabilizer needs up to 40% lesser investment than needed with the dimmable electronic ballasts system.

CAMINO DE LA CONDESA (Balasto electrónico de doble nivel)



Fig. 4. Comparison of colour perception with colour balance. The photographs on the left use the electronic ballast for reduction.

It has been demonstrated that the profitability of the lighting flow dimmer-stabilizer system is far better than the dimmable electronic ballast one. In the first case the cost-benefit index is above the unit, and the values obtained for the different number of

operation hours are double than those obtained for electronic ballasts.

Besides, the payback periods are approximately half the ones needed for the electronic ballasts. The financial profitability for

CALLE MÁLAGA (Estabilizador de tensión en cabecera)



Fig. 5. Comparison of colour perception with white balance. The photographs on the left use the lighting flow dimmer-stabilizer.

Table 9
Investment analysis for dimmable electronic ballasts.

| DIMMABLE ELECTRONIC BALLASTS -CAMINO DE LA CONDESA STREET PANEL (8 Hours of daily operation) | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|----------|-------|
| Savings (15 minute sampling rate) | 0,16640 | | | | | | | | | | |
| Annual Savings (€) | 1.943 | | | | | | | | | | |
| Installation cost (€) | 12.600 | | | | | | | | | | |
| | | | YEARS | | | | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Energy savings | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 |
| Total income (€) | 1.943 | | | | | | | | | | |
| ANNUAL QUASI-RENTS (€) | | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 | 1.943 |
| NPV Considering 5% interest | Años | | | | | | | | | | |
| Update index | $(1+i)^n$ | 1,05 | 1,10 | 1,16 | 1,22 | 1,28 | 1,34 | 1,41 | 1,48 | 1,55 | |
| Update Quasirents | $Q/(1+i)^n$ | 1.850 | 1.762 | 1.678 | 1.599 | 1.522 | 1.450 | 1.381 | 1.315 | 1.252 | |
| summations | $\sum Q/(1+i)^n$ | -10.750 | -8.987 | 7.309 | - | 5.710 | - | 4.187,83 | - | 2.737,93 | - |
| 5 years NPV (€) | -4187,83 | | | | | | | | | | |
| 9 years NPV (€) | 1210,50 | | | | | | | | | | |
| Payback period | 9 | | | | | | | | | | |
| Simple payback period | 6,48 | | | | | | | | | | |
| Internal rate of return IRR (5 YEARS) | -8 % | | | | | | | | | | |
| Cost-benefit index | 0,67 | | | | | | | | | | |

Table 10
Investment analysis using dimmable electronic ballasts for 6, 7 and 8 daily operation hours.

| Daily operation time of energy-saving system hours | NPV (5 year) | NPV (9 years) | Payback (simple)-years | Payback (with financial cost)-years | Internal rate of return (IRR) (5 years) | Cost-benefit index (5 years) |
|--|--------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------|
| 8 | -4187.83 | 1210.50 | 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% | 0.50 |

Table 11
Investment analysis for lighting flow dimmer-stabilizer.

| LIGHTING FLOW DIMMER-STABILIZER CONTROL MALAGA STREET PANEL- (8 Hours of daily operation) | | | | | | | | |
|--|------------------|--------|-------------|-------|------------|-------------|-------------|---|
| Savings (15 minute sampling rate) | 0,1120552 | | | | | | | |
| Annual Savings (€) | 1308,804736 | | AÑOS | | | | | |
| Installation cost (€) | 4.500 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | | | | | | | | |
| Energy savings | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | |
| Total income (€) | 1.309 | | | | | | | |
| ANNUAL QUASI-RENTS (€) | | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | 1.309 | |
| NPV Considering 5% interest | Años | | | | | | | |
| Update index | $(1+i)^n$ | 1,05 | 1,10 | 1,16 | 1,22 | 1,28 | 1,34 | |
| Update Quasirents | $Q/(1+i)^n$ | 1246 | 1186 | 1130 | 1076 | 1025 | 976 | |
| summations | $\sum Q/(1+i)^n$ | - 3254 | -2068 | -938 | 138 | 1162 | 2139 | |
| NPV after 5 years (€) | 1162 | | | | | | | |
| NPV after 6 years (€) | 2139 | | | | | | | |
| Payback period | 4 | | | | | | | |
| Simple payback period | 3,44 | | | | | | | |
| Internal rate of return IRR (5 YEAR) | 14 % | | | | | | | |
| Cost-benefit index | 1,26 | | | | | | | |

Table 12
Investment analysis using lighting flow dimmer-stabilizer for 6, 7 and 8 daily operation hours.

| Daily operation time of energy-saving system hours | NPV (5 year) | NPV (9 years) | Payback (simple)-years | Payback (with financial cost)-years | Internal rate of return (IRR) (5 years) | Cost-benefit index (5 years) |
|--|--------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------|
| 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 |

lighting flow dimmer-stabilizer is above capital costs, while the profitability of electronic ballasts is questioned.

Despite the high and contrasted energy-efficiency and considerable savings from the system with the dimmable electronic ballasts (in excess of 40%), this system faces 4 main problems:

- high initial investment
- low financial profitability
- long payback periods
- high rate of failure due to thermal sensitivity.

Acknowledgements

We should like to express my gratitude to the Lighting Technical Services of the City Government of Fuengirola.

References

- [1] Reusel KV. A look ahead at energy-efficient electricity applications in a modern world. In: ECT conference. Bergen, Norway, <www.ect2008.com>; 2008.
- [2] Kostic M, Djokic L. Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting. *Energy* August 2009;34(10):1565–72.
- [3] Agencia Andaluza de la Energía Guia de ahorro y eficiencia energética en municipios. [Sevilla].
- [4] Saunders HD, Tsao JY. Rebound effects for lighting. *Energy Policy* 2012;49:477–8.
- [5] Atkinson BA, McMahon JE, Nadel M. A review of U.S. and Canadian lighting programs for the residential, commercial, and industrial sectors. *Energy* 1993; 18(2):145–158.
- [6] Mills E, Piette MA. Advanced energy-efficient lighting systems: progress and potential. *Energy* 1993;18(2):75–97.
- [7] Radulovic D, Skok S, Kirincic V. Energy efficiency public lighting management in the cities. *Energy* April 2011;36(4):1908–15.
- [8] Papagiannis G, Dagoumas A, Lettas N, Dokopoulos P. Economic and environmental impacts from the implementation of an intelligent demand side management system at the European level. *Energy Policy* January 2008;36: 163–80.
- [9] Martinot E, Borg N. Efficient lighting programs of experience and lessons from eight countries. *Energy Policy* 1999;26(14):1071–81.
- [10] Russell LP. A simple cost estimation technique for improving the appearance and security of outdoor lighting installations. *Building and Environment* May 1998;33(2–3):79–95.
- [11] Li DHW, Cheung KL, Wong SL, Lam TNT. An analysis of energy-efficient light fittings and lighting controls. *Applied Energy* 2010;87:558–67.
- [12] CEN EN 13201. Public lighting; 2003.
- [13] CIE no 115 Recommendations to illuminate roads for motorized vehicles and pedestrian transit; 1995.
- [14] Rea MS, Bullough JD, Freyssinier-Nova JP, Bierman A. A proposed unified photometry system. *Lighting Research and Technology* 2004;36(2):85–111.
- [15] Di Stefano J. 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* 2000;25(9):823–39.
- [16] Alex H, Lee W. Verification of electrical energy savings for lighting retrofit using short- and long-term monitoring. *Energy Conversion & Management* 2000;41:1999–2008.
- [17] Doulos L, Tsangrassoulis A, Topalis F. Quantifying energy savings in daylight responsive systems: the role of dimming electronic ballasts. *Energy and Buildings* 2008;40:36–50.
- [18] Mahlia* TMI, Said MFM, Masjuki HH, Tamjis MR. Cost-benefit analysis and emission reduction of lighting retrofits in residential sector. *Energy and Buildings* 2005;37:573–678.
- [19] Mahlia TMI, Razak H Abdul, Nursahida MA. Life cycle cost analysis and payback period of lighting retrofit at the University of Malaya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* February 2011;15(2):1125–32.
- [20] Inspect report TRIDONIC. Customer: Huxley S.L RMA 400168818. Ref.no.: 20111209905 Dysur Report date 27-02-12. www.tridonic.com.

Artículo 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).

Análisis 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

Manuel Jesús Hermoso-Orzáez de la Universidad de Jaen y José Ramón de Andrés-Díaz de la Universidad de Málaga

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5803>

1. INTRODUCCIÓN

El Alumbrado Público supone el 2,3% en el consumo eléctrico mundial [1], y hasta el 80% de la energía eléctrica municipal consumida [2] [3] [4]. Es por ello que en la actualidad son numerosos los estudios y análisis orientados a mejorar la eficiencia y el ahorro energético de los sistemas de iluminación [8].

Desde hace algún tiempo parecía que iba a ser posible sustituir lámparas de descarga tradicionales de halogenuros metálicos (en adelante HM), por luminarias con tecnología LED con prestaciones lumínicas semejantes [5]; de hecho se estimaban ahorros del consumo eléctrico entre el 20 y 40% con amortizaciones en torno a los 4 años [6] [7].

La iluminación urbana con LEDs, es ya una realidad que poco a poco tiende a imponerse en nuestras ciudades [9]. Aunque aún no parece recomendable realizar sustituciones masivas, debido a su elevado coste, la tendencia de los precios a la baja y la mejora en su eficiencia en los últimos años permite pensar, que a corto o medio plazo, puedan ser totalmente competitivas en términos de rentabilidad económica y prestaciones [11] [12].

Una de las grandes ventajas de los LEDs, además de su eficiencia y vida útil, es la direccionalidad. Las fuentes

de luz tradicionales, que emiten en muchas direcciones, necesitan utilizar reflectores, difusores, lamas, etc. para su correcta orientación. En definitiva elementos auxiliares que siempre disminuyen el rendimiento del punto de luz, aprovechando solo parcialmente el flujo de la fuente de luz. En cambio los LEDs, al ser direccionales, tienen la ventaja de que todo su flujo de luz, sin apenas pérdidas llega al elemento que se quiere iluminar.

Este estudio de un caso real a un año, pretende analizar y exponer los resultados (lumínicos, eléctricos, energéticos y económicos) de sustituir 45 luminarias HM, por el mismo número de luminarias con tecnología LED.

2. MATERIALES, EQUIPOS DE MEDICIÓN Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

2.1. CARACTERÍSTICAS, NÚMERO Y DISPOSICIÓN DE LAS LÁMPARAS ANALIZADAS

Para el estudio se ha seleccionado un vial residencial, en la localidad de Fuengirola (Málaga), con un ancho total de 12 m, (calzada de 6 m, y aceras de 3 m). De acuerdo con el Reglamento de Eficiencia Energética R.D 1890/2008 ITC-EA-02, dicho vial se ha clasificado como calle residencial suburbana con aceras para peatones y velocidad limitada (D3) y clase de alumbrado normal (S3).

Existían 45 farolas de 3,5 m de altura, equipadas con lámparas de HM de 150 W CDO TT/828, (Fig.1). Posteriormente, y tras estudio luminotécnico justificativo que se presenta más adelante, se sustituyeron por otras 45 luminarias de 51 W equipadas con LEDs ETI-LED60 NP (Fig.2) (Tabla.1)

Como pueden verse en las Figuras anteriores, existe gran similitud en la fotometría de las luminarias, aunque la de la luminaria LED, debido a su direccionalidad, aprovecha mejor el flujo luminoso emitido.

La fuente de alimentación para los LEDs serán del tipo LDAC-1500 I-75 con las siguientes características: (ver Tabla 2).



Lámpara:

Tipo: HM 150 T
Potencia: 150 W (171.0 W)
T color: 3000° K

Flujo: 14.5 Klum
Casquillo: E40
Eficacia luminosa: 93 lm/W

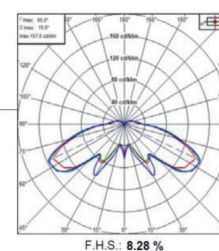


Fig.1: Luminaria ATP mod Villa lámpara HM -150 W. Fuente: Catalogo ATP



Lámpara:

Tipo: LED ETILED60 NP 4000 K
Potencia: 51 W (51.0 W)
T color: 4000° K

Flujo: 4,059 Klum
Casquillo: PLACA
Eficacia luminosa: 80 lm/W

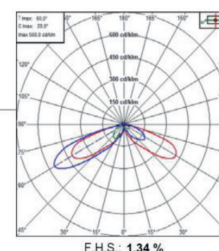


Fig. 2: Luminaria ATP modelo Villa y con fuente de luz LED 51 W. Fuente: Catalogo ATP

| Tipo lámpara HM | Marca | Potencia (W) | Tº Color (ºK) | Flujo Luminoso (Lm) | Eficacia luminosa (Lm/W) | Vida Util (h) |
|------------------------|---------|--------------|---------------|---------------------|--------------------------|---------------|
| MASTER CITY CDO-TT/828 | PHILIPS | 150 | 2.800 | 13.500 | 90 | 15.000 |
| ETILED | ETI S.A | 51 | 4.000 | 4.059 | 80 | 50.000 |

Tabla 1: Características de las fuentes de luz. Fuente: Catálogos PHILIPS y ETI

| LDAC-1500 I-75 | |
|------------------------|--------------------|
| Tension nominal: | 110-240 Vac |
| Factor de potencia: | > 0,95 |
| Corriente de salida: | 1200 mA |
| Potencia máxima | 75 W |
| Corriente de arranque: | 45 A (230 Vac) |
| Frecuencia | 50 Hz |
| Potencia Nominal | 51 W |
| Rango de tensión | 90-295 Vac |
| Corriente de fuga: | <0,75 mA (240 Vac) |
| Corriente de arranque: | 45 A (230 Vac) |

Tabla 2: Características de la fuente de alimentación de los LEDs. Fuente: ETI

Las lámparas de HM cuentan con equipo completo con reactancia, arrancador y condensador de corrección de f.d.p modelo VSI 15/22-3AF-150 de la marca ELT S.L.

2.2. CÁLCULOS LUMINOTÉCNICOS TEÓRICOS DE PARTIDA

Como se ha indicado antes, y previamente a la selección de los equipos de sustitución, se realizó estudio lumínico teórico para lámparas HM y LED (fig. 3 y 4), usando programa de Calculo Luminotécnico SIBA, elaborado para ATP por el Laboratorio de Luminotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Como puede verse por los valores obtenidos, teóricamente, las calidades de iluminación van a mantenerse a pesar de haber cambiado a una tecnología que nos va a permitir reducir el consumo en más de un 60%. Con ambas disposiciones cumple conforme a la Tabla 8 de ITC-EA-2 del Reglamento de Eficiencia Energética R.D 1890/2008. Para una situación de proyecto D3 y clase de alumbrado S3 tiene valores equivalentes a los valores de iluminancia media 7,5 lux e iluminancia mínima 1,5 lux recogidos en dicha tabla.

2.3. METODOLOGÍA Y EQUIPOS DE MEDIDA

Siguiendo las recomendaciones de estudios similares [13] [14] [15] la metodología consistió en:

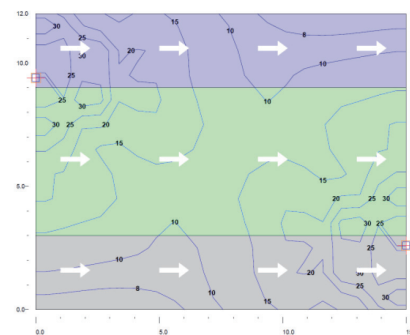
1. Recopilar datos de los parámetros eléctricos registrados diariamente, durante un año, con el equipo de medida TELEASTRO fabricado por AFEISA, instalado en cabecera, contrastando estos resultados con el analizador de red tipo AR6 de CIRCUTOR.

2. Realizar mediciones luminotécnicas con el luxómetro marca GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B del Área de Proyectos de Ingeniería de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Málaga [10].

Estos datos nos servirán para estudiar en su conjunto, contrastar resulta-

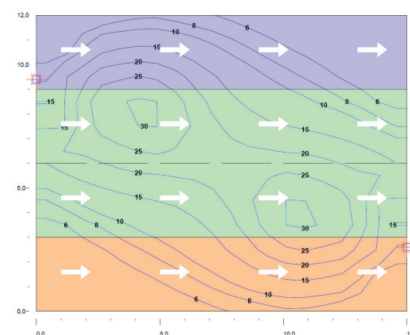
| | Iluminancias (20 m interdistancia) (Lux) |
|--------|--|
| Máxima | 34,7 |
| Media | 12,2 |
| Mínima | 3,8 |
| Umed | 0.31 |
| Uext | 0.11 |

Fig. 3: Iluminancias y Curvas Isolux. Lámpara HM 150W. Fuente: Elaboración propia



| | Iluminancias 20 m de interdistancia) (Lux) |
|--------|--|
| Máxima | 28,6 |
| Media | 10,6 |
| Mínima | 1,4 |
| Umed | 0.13 |
| Uext | 0.05 |

Fig. 4: Iluminancias y Curvas Isolux LED 51W. Fuente: Elaboración propia



dos y realizar un análisis comparativo, para las 45 luminarias, antes y después de la sustitución de las lámparas de descarga HM por las lámparas LEDs. De esta forma podremos evaluar las minoraciones en el consumo y contrastar, comparativamente, los resultados al realizar la sustitución.

2.3.1. Equipos para la medida de los parámetros eléctricos

Los equipos utilizados para las medidas de los diferentes parámetros eléctricos son:

1. Equipo de medida TELEASTRO cuyas características y rango de medidas, se indican a continuación (Tabla 3).
2. Equipo de medida analizador de red tipo AR6 cuyas característica, se indican a continuación. (Tablas 4 y 5).

2.3.2. Equipos para la medida de los parámetros luminotécnicos

Se empleó un luxómetro con las características que se recogen en la Tabla 6.

3. RESULTADOS

3.1. BA LANCE Y RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DURANTE 12 MESES

3.1.1. Resultados medios obtenidos con equipo TELEASTRO

Los resultados medios comparativos registrados con el TELEASTRO durante 12 meses se recogen en la Tabla 7.

Las diferencias de potencia entre las líneas se deben a que la asignación de puntos de luz por fase no es exactamente igual, ya que en la práctica esta asignación viene condicionada por la forma y distribución de la calle. En nuestro caso, la fase L1 tiene conectadas 16 puntos de luz, la L2 tiene 12, y la L3 tiene 17.

Como podemos ver en la Tabla 7, las reducciones de potencia obtenidos 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.

3.1.2. Resultados de contraste obtenidos con equipo analizador de red AR6 para las 45 luminarias LEDS.

Con el equipo analizador de red AR6 se realizaron mediciones de los parámetros eléctricos por fase para comprobar la calidad de los datos tomados con el equipo de AFEISA.

Al contrastar con el equipo AR6 las medidas del TELEASTRO, se observan coincidentes en general. Aquí es de destacar la aparición de armónicos debidos a los equipos electrónicos de los LEDS.

3.2. BALANCE LUMINOTÉCNICO

El método seleccionado para las mediciones luminotécnicas, ha sido el

método simplificado, denominado de los “nueve puntos”, descrito en la *R.D. 1890/2008*, ITC-EA-07.

El balance luminotécnico se recoge en la *Tabla 9*.

Como vemos los valores obtenidos analíticamente con el programa de cálculo luminotécnico SIBA son semejantes, a los obtenidos mediante la medición en

campo, lo que nos da fiabilidad a la hora de planificar futuras sustituciones. En la medición real también se cumplen los parámetros exigidos para nuestro tipo de vial y clase de alumbrado.

En las Figuras 5 y 6. se realiza una evaluación de la temperatura de color, mediante fotografía en la que se ha forzado el balance de blancos. Se

| | |
|----------------------------------|--|
| Transformadores de intensidad: | |
| Tipo Toroidal con núcleo cerrado | |
| Relación xA / 1,5 VAC | |
| Clase 2 | |

| REGISTRO | UNIDADES | RANGO |
|----------------|---------------|-------------------------------------|
| VL | Voltios x 10 | 0...3000 |
| PL | Wattios | 0...65535 |
| MAO | ---- | F_ESCALA_MAO..F_ESCALA_MAO |
| IL | Amperios x 10 | 0...F_ESCALA_I x 10 ^{*(1)} |
| QL | VAR | 0...65535 |
| PFL | ---- | -1...1 |
| P_ACTIVIA_III | Wattios | 0...196605 |
| P_REACTIVA_III | VAR | 0...196605 |
| CNT_ACTIVIA | kWh x 10 | 0...4294967295 |
| CNT_REACTIVA | kVARh x 10 | 0...4294967295 |

Tabla 3: Características, precisión y unidades y rangos de los registros de medida. Fuente: AFEISA

| | |
|----------------------------------|--|
| AR6 | |
| Clase 0,5 en la medida | |
| Class B según UNE-EN 61000-4-30 | |
| Medida y registro según EN 50160 | |

| | |
|---|--|
| AR6 | |
| Tensión nominal : 12 Vdc | |
| Corriente : 2 A | |
| Potencia máxima : 24 W | |
| Consumo : 30 VA | |
| Temperatura de funcionamiento : 0...50 °C | |
| Altitud : 2000 m | |
| Humedad sin condensación: 5...95 % | |
| Grado de contaminación : 2 | |

Tabla 4: Características técnicas generales del analizador AR6 (Fuente: CIRCUTOR)

| Características entradas de tensión | Características entradas de corriente | Clase de precisión |
|--|--|-----------------------------------|
| Entradas de tensión U1, U2, U3, UN, Tierra, | Entradas de corriente I1, I2, I3, IN, Ifuga, | Tensión 0,5% +- 2 dígitos |
| tensión de entrada 10...800 Vrms fase-neutro | Tensión de entrada 0...2 V | Corriente 0,5% +- 2 dígitos |
| Máxima tensión admisible 2.500 Vpic | Margen de medida 1...120 de In % | Potencia Activa 0,5% +-2 dígitos |
| Ancho de banda 3,2 kHz | Intensidad máxima 3 In A | Potencia Reactiva 1% +- 2 dígitos |
| | Impedancia de entrada 10 k_ | |

Tabla 5: Características técnicas y precisión del Analizador AR6. Fuente: CIRCUTOR

| Especificaciones técnicas Luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B | |
|---|---|
| Modelo de luxómetro | 5032C |
| Rangos (I...IV) | 0,1...199,9 lx 1...1.999 lx 10...19.990 lx 100...199.900 lx |
| Resolución (I...IV) | 0,1 lx 1 lx 10 lx 100 lx |
| Precisión | ±3 % del valor de medición + 4 dígitos para luz de bombilla (luz normalizada clase A) |
| Cuota de medición | 2,5 mediciones / segundo |
| Sensor de luz | Fotodiodo de silicio con filtro V (I) corresponde a la clase de precisión DIN 5032 apartado 7 clase C |
| Funciones | Data-Hold, Max-Hold y control de batería Auto-Power-Off a los 2 min no operativo |

Tabla 6: Características técnicas y precisión Luxómetro MAVOLUX 5032C/B. Fuente: GOSSEN

| 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 Activa | Potencia Reactiva | Factor de Potencia | Intensidad (A) | Tensión | Potencia Activa (Kw) | Potencia Reactiva (Kva) | Factor de Potencia |
| | (A) | (V) | (Kw) | (Kva) | | | (V) | (Kw) | (Kva) | |
| L1 | 9,7 | 235 | 2,140 | 0,687 | 0,92 | 3,5 | 236 | 0,830 | 0 | -0,98 |
| L2 | 8,0 | 236 | 1,810 | 0,357 | 0,94 | 2,7 | 237 | 0,639 | 0 | -0,99 |
| L3 | 10,0 | 234 | 2,280 | 0,220 | 0,95 | 3,9 | 235 | 0,889 | 0 | -0,98 |

| FASES | % de reducción al pasar de Halogenuros Metálicos a LEDs | |
|-------|---|----------------------|
| | Potencia Act (Kw) | Potencia React (Kva) |
| | L1 | 61,21% |
| L2 | 64,70% | 100,00% |
| L3 | 61,01% | 100,00% |

Tabla 7: Resultados de las mediciones eléctricas y % de reducción. Fuente: Elaboración propia

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 [16] [17]. Esto puede entenderse porque, 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 un año) ninguna incomodidad por el cambio de temperatura de color, por lo que lo admitimos como válido.

4. 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 LEDs suponen unos costes aproximados de inversión de 13.500 Euros (45 luminarias x 300 Euros / luminaria = 13.500 Euros)¹.

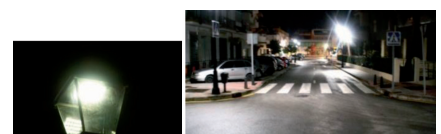


Fig. 5: Fotografía del vial y detalle de lámpara LED de 51 W

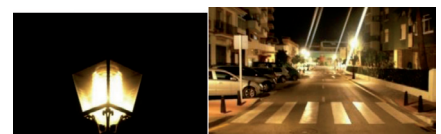


Fig. 6: Fotografía del vial y detalle de lámpara de HM de 150 W. Fuente: elaboración propia

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

045 € Camión grúa con canasta 1 h

Total 300 €/luminaria

| RESULTADOS DE MEDICIONES DE CONTRASTE PARA LOS 45 LEDS CON ANALIZADOR DE RED AR6 | | | |
|---|--------|--------|--------|
| | L1 | L2 | L3 |
| Tensión de Fase-Vf (V) | 241,02 | 239,60 | 239,25 |
| Intensidad por fase-I(A) | 11,28 | 10,63 | 11,31 |
| Potencia Activa por fase (Kw) | 0,9 | 0,7 | 0,9 |
| Potencia Reactiva Inductiva (KVArl) | 0 | 0 | 0 |
| Potencia Reactiva Capacitiva (KVAc) | 0,1 | 0,0 | 0,2 |
| Potencia Aparente (KVA) | 1,8 | 1,5 | 1,8 |
| Factor de Potencia (cos f) | 1 | 1 | -0,98 |
| ARMÓNICOS DE CORRIENTE | | | |
| | L1 | L2 | L3 |
| Armónicos Fundamentales- THDV (%) | 17,412 | 12,952 | 17,282 |
| Armónicos de orden Par -THDV par (%) | 0 | 0 | 0 |
| Armónicos de orden Impar -THDV impar (%) | 3,28 | 3,45 | 3,38 |

Tabla 8: Resultados obtenidos con el analizador de red AR6. Fuente: Elaboración propia

| | BALANCE LUMINOTECNICO 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) |

Tabla 9: Balance luminotécnico realizado con luxómetro GOSSEN. Fuente: elaboración propia

Realizaremos el estudio comparativo para un uso diario estimado de 12 horas de media diaria de funcionamiento anual (tablas 10 y 11) [8]. Para este estudio comparativo tomaremos como valor de la energía el que actualmente está pagando el Ayuntamiento para el alumbrado público.

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 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.

5 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Con este estudio queda demostrado que la tecnología LED, a día de hoy, se encuentra ya lo suficientemente madura para su implantación progresiva en

iluminación urbana, alcanzando unos niveles calidad lumínica y prestaciones de ahorro energético lo suficientemente buenas como para poder competir con las lámparas de descarga, y en particular con las que utilizan HM.

Ha quedado demostrado que con la sustitución de las lámparas HM por lámparas LEDs se consiguen ahorros en el consumo, para el mismo número de horas de funcionamiento, porcentualmente iguales a la reducción de potencia que consigamos con la lámpara sustituta tipo LED. También se ha registrado un consumo prácticamente nulo de la energía reactiva para los LEDs. No obstante, sí hay que hacer notar que se ha registrado un incremento en la contaminación por armónicos en torno al 4% al instalar LEDs. Esta contaminación puede provocar deformaciones significativas en la modulación de la forma onda de la intensidad, y aconseja precaución a la hora de estimar la corriente que cir-

cula por el neutro de la instalación.

El balance luminotécnico es muy semejante, si bien es verdad que las uniformidades media y extrema son ligeramente inferiores. De la evaluación de la Temperatura de Color se observa una tendencia hacia una luz blanca fría para el caso de los LEDs más eficientes, frente a la más cálida para lámparas de HM.

Del análisis rentabilidad de la inversión realizada en este estudio, ha quedado comprobado que, a día de hoy, la inversión necesaria para la sustitución se hace viable para niveles medios de funcionamiento en torno a las 40000 horas anuales.

También es de destacar, desde el punto de vista de la fiabilidad, que después de un año y medio no se han registrado fallos en los equipos LEDs instalados.

Con este estudio ha quedado demostrado el alto potencial de ahorro ener-

| Días de funcionamiento anual: | Horas diarias (Media anual) | Coste Euros/Kw-h | Periodo de Análisis (Años) | Consumo Anual HM 150 W | Consumo Anual LED 51 W | Inflacion Media Anual | Incremento Energético Anual |
|--|--|---------------------|----------------------------|--|------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 365 | 12 | 0,16 | 5 | 33.113 Kw-h | 11.176,3 Kw-h | 3 % | 3% |
| INSTALACIÓN 45 EQUIPOS HM 150 W | | | | INSTALACIÓN 45 KITS ETILED 51 W | | | |
| Potencia Lámpara HM | | 150 W | | Potencia Lámpara MÓDULO LED | | 51 W | |
| <u>Datos Equipos</u> | | | | <u>Datos Equipos</u> | | | |
| nº Luminarias: | | 45 | unidades | nº Luminarias: | | 45 | unidades |
| Potencia Unitaria | | 150 | W | Potencia Unitaria | | 46 | W |
| Potencia Consumida (Lámpara + Equipo) | | 168 | W | Potencia Consumida (Módulo + Driver) | | 52 | W |
| <u>Horario</u> | | | | <u>Horario</u> | | | |
| Nivel Pleno | | 12 | horas | Nivel Pleno | | 12,0 | horas |
| Días Año | | 365 | días | Días Año | | 365 | días |
| <u>Costes de Consumo</u> | | | | <u>Costes de Consumo</u> | | | |
| Media Energía Consumida diaria | | 90,720 | kWh | Energía Consumida diaria | | 30,62 | kWh |
| Energía Consumida Anual | | 33.113 | kWh | Energía Consumida Anual | | 11.176,3 | kWh |
| Coste Energía | | 0,16 | €/kWh | Coste Energía | | 0,16 | €/kWh |
| Coste Energético Anual | | 5.298,05 | € / año | Coste Energético Anual | | 1.788,20 | € / año |
| <u>Costes de Operación</u> | | | | <u>Costes de Operación</u> | | | |
| Vida Útil Fuente de Luz | | 15.000 | horas | Vida Útil Fuente de Luz | | 50.000 | horas |
| Horas Utilización/Año | | 4.380 | horas | Horas Utilización/Año | | 4.380 | horas |
| Tiempo Reposición | | 3,42 | Años | Tiempo Reposición | | 11,42 | Años |
| Costes Reposición Lámpara | | 30,00 | € / año | Costes Reposición Lámpara | | 0 | € / año |
| Costes de Mantenimiento | | 394,20 | € / año | Costes de Mantenimiento | | 0,00 | € / año |
| INSTALACIÓN EQUIPOS HM 150 W | | | | INSTALACIÓN 45 KITS ETILED 51 W | | | |
| COSTES ANUALES TOTALES | | 5.692,25 | | COSTES ANUALES | | 1.788,20 | |
| BALANCE ENERGÉTICO ANUAL | | | | | | | |
| Ahorro Anual | | | | 21.937 | | kWh | |
| ESTANDAR HM 150 W vs ETILED 51 W | | | | 21,93 | | MWh | |
| Ahorro Anual | | | | 3.904,05 | | € | |
| Toneladas de CO ₂ evitables | | | | 8,57 | | t/año | |
| BALANCE ENERGÉTICO A CINCO AÑOS | | | | | | | |
| | INSTALACIÓN EQUIPOS ESTÁNDAR HM 150 W | | | INSTALACIÓN 45 KITS ETILED DIM | | | |
| | 45 LUMINARIAS HM 150 W | | | 45 LUMINARIAS LED 51 W | | | |
| Año | Coste Energético | Coste Mantenimiento | Costes Totales | Coste Energético | Coste Mantenimiento | Costes Totales | AHORRO |
| 1 | 5.298,05 € | 394,20 € | 5.692,25 € | 1.788,20 € | 0,00 € | 1.788,20 € | 3.904,05 € |
| 2 | 5.456,99 € | 406,03 € | 5.863,02 € | 1.841,84 € | 0,00 € | 1.841,84 € | 4.021,18 € |
| 3 | 5.620,70 € | 418,21 € | 6.038,91 € | 1.897,01 € | 0,00 € | 1.897,01 € | 4.141,90 € |
| 4 | 5.789,32 € | 430,75 € | 6.220,07 € | 1.954,00 € | 0,00 € | 1.954,00 € | 4.266,07 € |
| 5 | 5.963,00 € | 443,68 € | 6.406,68 € | 2.012,62 € | 0,00 € | 2.012,62 € | 4.394,06 € |
| TOTAL | 28.128,06 € | 2.092,86 € | 30.220,92 € | 9.493,67 € | 0,00 € | 9.493,67 € | 20.727,26 € |

Tabla 10: Balance energético y económico comparativo a 5 años. Fuente: elaboración propia

| ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DE LA INVERSIÓN Y AMORTIZACIÓN 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 un interés del $i = 5\%$ | Años | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Indice actualizado | $(1+i)^n$ | 1,05 | 1,10 | 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 simple | 4 | | | | | |
| Plazo de Recuperación | 3,67 | | | | | |
| Tasa Interna de Rentabilidad (T.I.R) | 15,86 % | | | | | |
| Indice Beneficio Coste (IBC) | 1,33 | | | | | |

Tabla 11: Análisis de la rentabilidad de la Inversión y Amortización afectada por el coste del dinero (para un tipo de interés del 5%). Fuente: elaboración propia

AGRADECIMIENTOS

Expresar mi agradecimiento al Servicio Técnico de Alumbrado del Ayuntamiento de Fuengirola.

PARA SABER MÁS

- [1] Kostic M, Djokic L. 2009. "Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting". *Energy*. August 2009. Vol. 34 num.10 p.1565-1572. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.056>)
- [2] Agencia Andaluza de la Energía. 2011. *Guía de ahorro y eficiencia energética en municipios*; Sevilla SE-232-2011. www.agenciaandaluzadelaenergia.es
- [3] Saunders H.D, Tsao J.Y. 2012. "Rebound effects for lighting". *Energy Policy*. October 2012. Vol 49 p.477-478 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.050>)
- [4] 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*. February 1993. Vol. 18 No. 2 p.145-158. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442\(93\)90098-X](http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442(93)90098-X))
- [5] Mills E, Piette M. A. 1993 "Advanced energy-efficient lighting systems: progress and potential". *Energy*. 1993. Vol. 18 No.2. p.75-97.(doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442\(93\)90092-R](http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442(93)90092-R))
- [6] 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*. December 2009. Vol 13. Issue 4. p.271-279, ISSN 0973-0826. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2009.10.005>)
- [7] Radulovic D, Skok S, Kirincic V. 2011. "Energy efficiency public lighting management in the cities". *Energy*. April 2011. Vol. 36 No.4 p.1908 -1915.(doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.016>)
- [8] Hermoso Orzáez MJ, de Andrés Díaz JR. 2013. "Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps", *Energy*. 2013. Available online 7 March 2013 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>)
- [9] Rea M.S. 2010. "The future of LED lighting: Greater benefit or just lower cost". *Lighting Research and Technology*. 2010. Vol.42 p.370. (doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153510390978>)
- [10] CIE Report 194:2011. "On site Measurement of the Photometric Properties of the road and Tunnel Lighting". ISBN 978 3 901906 92 3
- [11] Zalewski S. 2012. "A proposed method for the calculation of light emitting diode road lighting". *Lighting Research and Technology*. June 2012. Vol.44 2 p.186-196.(doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153511423881>)
- [12] Svilainis L. 2008. "LED directivity measurement in situ", *Measurement*, July 2008. Vol 41 Issue 6 p. 647-654. ISSN 0263-2241. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2007.09.003>)
- [13] 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: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153512450866>)
- [14] 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*. 2011. Vol. 9 p.244-248. ISSN 1875-3892. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.156>)
- [15] Villanueva I, Lázaro I, Anzurez J. 2012. "Reliability analysis of LED-based electronic devices". *Procedia Engineering*. 2012. Vol.35 p. 260 - 269. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.189>)
- [16] Pousset N, Rougié B, Razet. A. 2010. "Impact of current supply on LED colour ". *Lighting Research and Technology*. Dec 2010. Vol. 42, 4 p.371-383. (doi: <http://dx.doi.org/10.1177/14771535103733159>)
- [17] CIE Report no 115:1995. Recommendations to illuminate roads for motorized vehicles and pedestrian transit.

Artículo 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)

31 de octubre de 2013

Gonzalo Casino Rubio, director de la revista *Técnica Industrial*, certifica que el artículo técnico titulado “Regulación de lámparas LED con estabilizadores de tensión-reductores de flujo en cabecera”, remitido el 12 de junio de 2013 por Manuel Hermoso Orzáez, ha sido aceptado para su próxima publicación tras superar la preceptiva revisión por pares con fecha de 25 de octubre de 2013.



Director
Técnica Industrial
director@tecnicaindustrial.es

Análisis y resultados de regular lámparas led con estabilizadores-reductores de flujo en cabecera

Manuel Jesús Hermoso Orzáez, José Ramón de Andrés Díaz

Analysis and results of controlling LEDs lamps with lighting flow dimmer-stabilisers

RESUMEN

En la actualidad existe un gran interés dentro del ámbito de la iluminación urbana por la aplicación de las nuevas lámparas con tecnología led (*light emitting diode* o diodo emisor de luz). Estas pueden llegar a tener ahorros superiores al 50% comparadas con las lámparas de descarga tradicionales. Este estudio pretende dar un paso más en la búsqueda de la eficiencia y ahorro energético, mostrando la compatibilidad de la tecnología led con los equipos estabilizadores-reguladores de flujo en cabecera. De los análisis lumínico y eléctrico recogidos en el presente estudio se pone de manifiesto que es posible obtener reducciones superiores al 20% en los consumos de las lámparas led, regulando en cabecera del cuadro de maniobra, obteniendo reducciones lumínicas equivalentes, sin afectar a la uniformidad de la iluminación de los viales. Se analiza, además, la contaminación por armónicos con el sistema de ahorro propuesto.

Recibido: 18 de julio de 2013

Aceptado: 25 de octubre de 2013

ABSTRACT

Actually, LED technology is generating much interest in public lighting. This technology has potential savings of over 50% compared with traditional discharge lamps. This study aims to go one step further in the quest for energy efficiency and savings. It demonstrates the compatibility of LED technology with lighting flow dimmer-stabilizer. The analysis of lighting and electrical parameters collected in this study shows that it is possible to obtain more than 20% reduction in consumption of LED lamps, regulating with lighting flow dimmer-stabiliser. Besides, equivalent reductions of lighting are obtained, having little effect on uniformity of illumination of the vials. It also discusses the harmonic pollution of the saving system proposed.

Received: July 18, 2013

Accepted: October 25, 2013

Keywords

Public lighting, LED lighting, energy efficiency lighting flow dimmer-stabilisers.



Foto: Jesus Keller / Shutterstock

Introducción

El alumbrado público supone el 2,3% en el consumo eléctrico mundial (Reusel, 2008; Kostic, 2009), hasta el 80% de la energía eléctrica municipal consumida y hasta el 60% de su factura energética (AAE, 2011).

Las posibilidades de ahorro, sustituyendo las lámparas de descarga tradicionales por luminarias con tecnología led con prestaciones lumínicas semejantes, son elevadísimas (Saunders, 2012; Atkinson, 1993) (Mills, 1993) y permiten reducir el consumo eléctrico entre el 20% y el 50% (Mahapatra, 2009; Wen-Shing, 2011; Gil de Castro, 2012) con amortizaciones en menos de tres años.

La iluminación urbana con tecnología led es ya una realidad que poco a poco tiende a ir imponiéndose en nuestras ciudades (Svilainis, 2008). A pesar de ello, todavía no parece recomendable realizar sustituciones masivas debido a su elevado coste. No obstante, la tendencia a la baja en los últimos años permite pensar que, a corto o medio plazo, las haga competitivas en precio y prestaciones, en comparación con las lámparas tradicionales de descarga.

Este estudio intenta dar un paso más en la búsqueda de la eficiencia energética aplicada a la tecnología led de iluminación urbana. Se pretende analizar y exponer los resultados de regular el flujo

luminoso sobre un vial iluminado con luminarias led, mediante el empleo de equipos estabilizadores-reguladores de flujo en cabecera (equipos que permiten reducir la tensión por fase en cada uno de los circuitos de salida, operando desde la cabecera, en el cuadro de maniobra y control, manteniendo dicha tensión estabilizada), incorporando a la luminaria un equipo controlador que lo hace compatible.

Para ello se han utilizado datos eléctricos y lumínicos tomados en el cuadro de mando telegestionado (cuadro con control remoto monitorizado e informatizado, para la captura de datos eléctricos e incidencias cada 15 minutos, para su posterior procesamiento y elaboración de informes, conectado a un terminal central, vía Internet, utilizando tecnología GPRS), contrastados con un analizador de red y dos luxómetros, uno fijo y otro móvil, para poder analizar así los resultados antes y después de reducir la tensión (Hermoso, 2013).

Desarrollo, materiales, equipos de medición y metodología del estudio

Características de la instalación analizada

Para el estudio se ha seleccionado 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 son de la marca ATP modelo Villa y vienen equipadas con lámpara led, de la marca Etilled, con 51 W de potencia y diodos led fabricados por Cree (tabla 1).

La fuente de alimentación para los leds será del tipo LDAC-1500 I-75 con las características que se especifican en la tabla 2.

Cálculos luminotécnicos teóricos de partida

Previamente, se realizó el estudio lumínico teórico, a potencia completa, sin reducir, para led (figura 1) del vial, usando programa de cálculo luminotécnico SIBA, elaborado para ATP por el laboratorio de luminotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña (Smet, 2012; Ryckaert, 2012).

| Tipo lámpara led | Marca lámpara | Marca led | Potencia (W) | T° Color (°K) | Flujo luminoso(Lm) | Efic. luminosa (Lm/W) | Vida útil (h) |
|------------------|---------------|-----------|--------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------|
| ETILED | ETIS.A | CREE | 51 | 4.000 | 4.059 | 80 | 50.000 |

Tabla 1. Características de las fuentes de luz. Fuente: Catálogo del fabricante ETI SA.

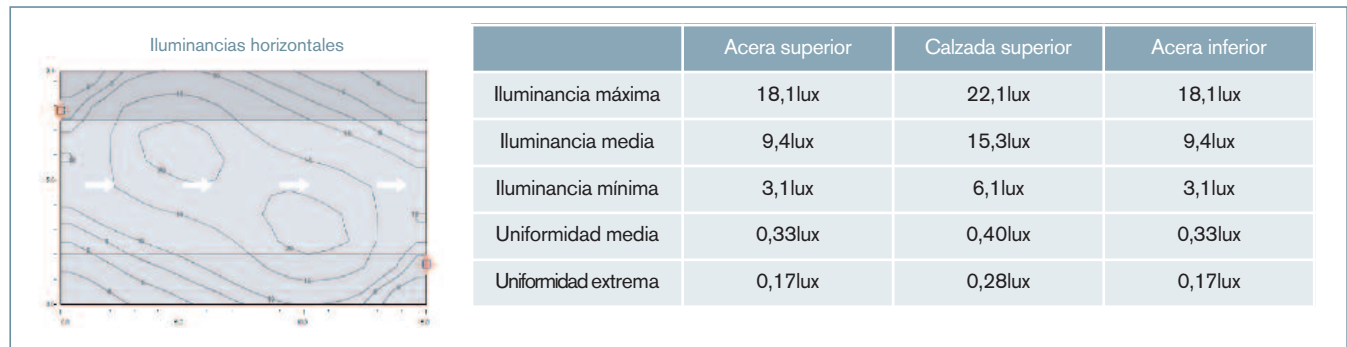
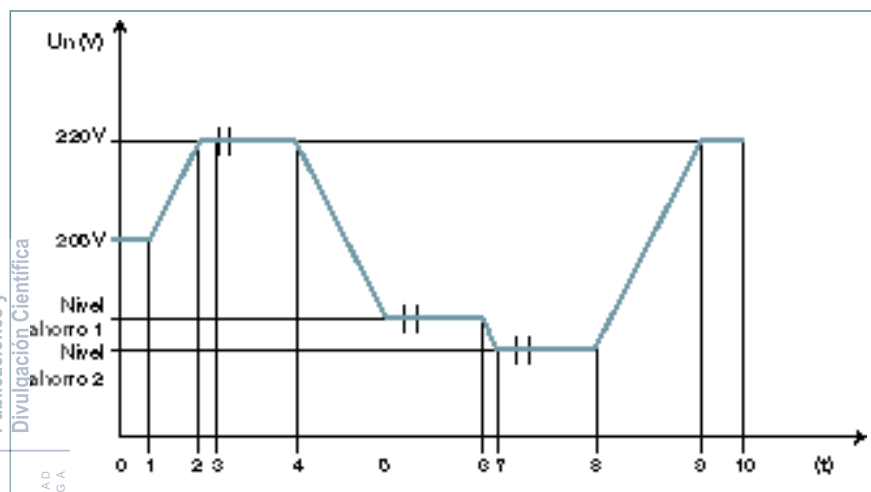


Figura 1. Cuadro de iluminancias y curvas Isolux de iluminancias horizontales [Lux] (2D). Fuente: Catálogo ATP y programa SIBA.

| LDAC-1500 I-75 | |
|-----------------------|--------------------|
| Tensión nominal | 110-240 Vac |
| Factor de potencia | > 0,95 |
| Corriente de salida | 1.200 mA |
| Potencia máxima | 75 W |
| Corriente de arranque | 45 A (230 Vac) |
| Frecuencia | 50 Hz |
| Potencia nominal | 51 W |
| Rango de tensión | 90-295 Vac |
| Corriente de fuga | <0,75 mA (240 Vac) |
| Corriente de arranque | 45 A (230 Vac) |

Tabla 2. Características de la fuente de alimentación de los leds. Fuente: ETI SA.

Figura. 2. Detalle de rampa de funcionamiento durante el proceso de estabilización de tensión del equipo Iluest. Fuente: Salicru.



Definición del sistema de ahorro y eficiencia

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. El modelo es Iluest fabricado por Salicru.

- Controlador universal para módulo led, marca Dimiled, instalado en cada una de las luminarias (figura 3).

Los datos eléctricos, se recogieron registrando medidas a intervalos de 15 minutos, telegestionadas mediante equipo Teleastro de Afeisa.

Estos datos fueron contrastados mediante la realización de mediciones in situ, a la salida de las tres fases y neutro del circuito de las nueve lámparas leds (repartidas tres por fase), con un equipo analizador de red tipo AR6 de la marca Circuitur.

El estabilizador-reductor de flujo en cabecera se instaló en un cuadro sito en calle Málaga, con cuatro circuitos de salida. Tres de ellos están conectados a líneas con lámparas de descarga, que no serán objeto de estudio, y un cuarto circuito alimenta exclusivamente las nueve luminarias led que pretendemos analizar de forma aislada, tanto con el equipo de medida telegestionado de la marca Afeisa, como con el analizador de red AR6 de la marca Circuitur. De esta forma, podremos contrastar medidas eléctricas (tensión, intensidad, potencia activa y reactiva, así como el análisis de armónicos) antes y después de estabilizar la tensión de salida en el circuito de leds (véase la rampa de funcionamiento del estabilizador de tensión de la figura 2).

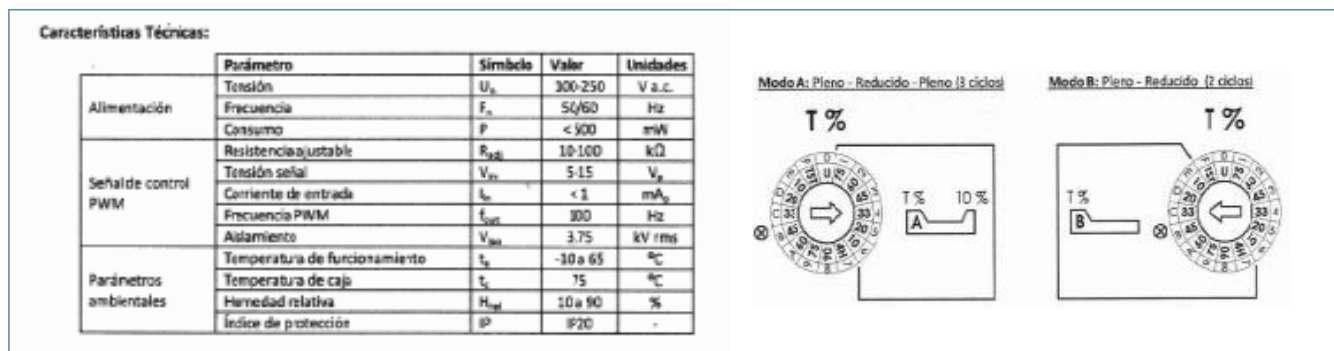


Figura 3. Características técnicas de las señales de entrada y salida (señal de control PWM) del controlador Dimiled instalado en cada luminaria led que permite reducir flujo en función de la tensión reducida desde el estabilizador Iluest. Fuente: ETI SA.

| Registro | Unidades | Rango |
|--------------------|-------------|--------------------------|
| Tensión | Volt x 10 | 0...3000 |
| Potencia | Watt | 0...65535 |
| Intensidad | Ampere x 10 | 0...F_ESCALA_I x 10 *(1) |
| Factor de potencia | --- | -1...1 |
| Potencia activa | Watt | 0...196605 |
| Potencia reactiva | VAR | 0...196605 |
| Energía activa | kWh x 10 | 0...4294967295 |
| Energía reactiva | kVARh x 10 | 0...4294967295 |

Tabla 3. Unidades y rangos de los registros de medida. Fuente Afeisa.

| Analizador Ar6 |
|---|
| Clase 0,5 en la medida |
| Clase B según UNE-EN 61000-4-30 |
| Medida y registro según EN 50160 |
| Tensión nominal: 12 Vdc |
| Corriente: 2 A |
| Potencia máxima: 24 W |
| Consumo: 30 VA |
| Temperatura de funcionamiento: 0...50 °C |
| Altitud: 2.000 m |
| Humedad sin condensación: 5...95 % |
| Grado de contaminación: 2 |
| Tensión (alimentador externo): 100...240 V c.a. |
| Corriente (alimentador externo): 3,33 A |
| Frecuencia: 50...60 Hz |
| Potencia máxima: 40 W |

Tabla 4. Características técnicas generales del analizador AR6 de Circuitor. Fuente: Circuitor.

Previamente, se procedió al ajuste manual del equipo de ahorro, en función de las caídas de tensión, por circuito. Se fijó la tensión reducida, en 208 V ± 5 V con una reducción entorno al 20%.

En el controlador Dimled, el selector de modo/tiempos (T%) determina el modo de funcionamiento. En la posición 0(t) la señal de salida de control establece un nivel de potencia reducido en función de la tensión de red medida, con el fin de realizar el control desde el reductor Iluest de cabecera.

El controlador Dimiled (figura 3) dispone de un sistema inteligente que permite determinar la tensión máxima de línea, correspondiente al nivel pleno. Esta característica lo hace apto para redes tanto de 220, 230 y 240 V AC. El selector de nivel, que permite seleccionar ocho porcentajes de potencia distintos, deter-

mina el nivel mínimo de potencia, es decir, limita la reducción máxima obtenida, aunque la tensión de la línea disminuya por debajo de dicho nivel.

Metodología y equipos de medida

Metodología para el estudio

El proceso seguido en el estudio consistió en (Khan, 2011; Zalewski, 2012):

- Se aisló el circuito que alimenta exclusivamente a las nueve luminarias led (tres luminarias led por fase del circuito independiente analizado).

- Se midieron los parámetros eléctricos, con el equipo de medida y telegestión Teleastro, instalado de manera permanente en cabecera, en el cuadro de maniobra, y contrastaron los resultados de las medidas con el analizador de red tipo AR6, instalado provisionalmente en el mismo a la salida del circuito que alimenta las lámparas led.

- Se realizaron mediciones luminotécnicas con dos luxómetros, uno fijo tipo Gossen modelo Mavolux 5032C/B del área de proyectos de ingeniería de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Málaga, calibrado y verificado, y se contrastaron las mediciones con otro luxómetro móvil LX-GPS para medida de iluminancia mediante vehículo y GPS marca Afei Sistemas de Automatización SA, propiedad del Ayuntamiento de Fuengirola.

- Se llevó a cabo un análisis comparativo, antes y después de entrar en funcionamiento el sistema de reducción de tensión. De esta forma, se evaluaron las minoraciones en el consumo y se contrastó la influencia de los sistemas de regulación y control comparados en la reducción de los niveles lumínicos, expresados en términos de iluminancia y uniformidad, estudiando y comparando los resultados teóricos con los prácticos.

| Tensión no reducida por el estabilizador-reductor | | | | | Tensión reducida por el estabilizador-reductor | | | | |
|--|------------|---------|-----------------|-------------------|--|------------|---------|-----------------|-------------------|
| (Mediciones a la salida del estabilizador sin reducción) | | | | | (Mediciones a la salida del estabilizador con reducción) | | | | |
| Fases | Intensidad | Tensión | Potencia Activa | Potencia Reactiva | Fases | Intensidad | Tensión | Potencia Activa | Potencia Reactiva |
| | (A) | (V) | (Kw) | (Kva) | | (A) | (V) | (Kw) | (Kva) |
| L1 | 0,738 | 226 | 0,156 | 0,151 | L1 | 0,65 | 198 | 0,131 | 0,124 |
| L2 | 0,737 | 228 | 0,164 | 0,162 | L2 | 0,68 | 202 | 0,129 | 0,117 |
| L3 | 0,735 | 229 | 0,148 | 0,157 | L3 | 0,67 | 204 | 0,122 | 0,123 |

| % Reducción | | | | |
|--|------------|---------|-----------------|-------------------|
| (Mediciones a la salida del estabilizador) | | | | |
| Fases | Intensidad | Tensión | Potencia Activa | Potencia Reactiva |
| | (A) | (V) | (Kw) | (Kva) |
| L1 | 11,92 | 12,39 | 16,03 | 17,88 |
| L2 | 7,73 | 11,40 | 21,34 | 27,78 |
| L3 | 8,84 | 10,92 | 17,57 | 21,66 |

Tabla 5. Resultados mediciones tomadas con Teleastro y porcentaje de reducción. Fuente: Elaboración propia.

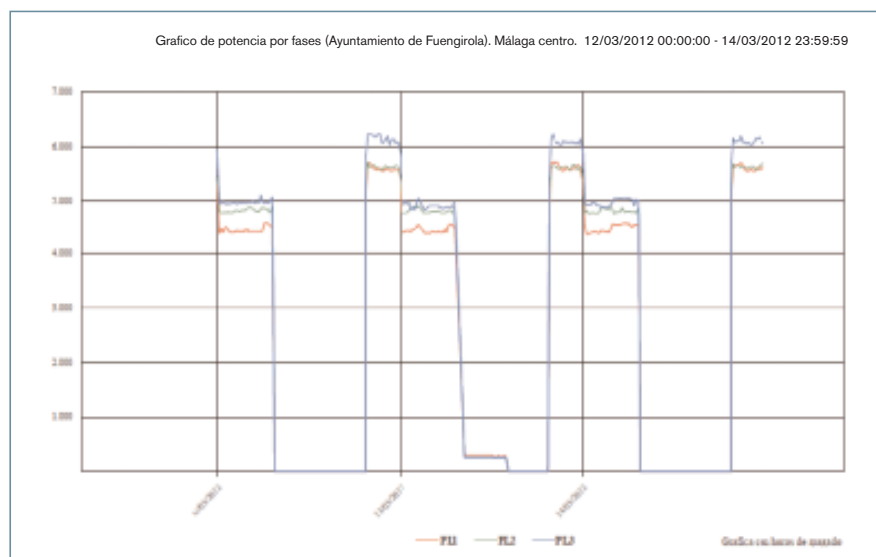


Figura 4. Gráfica en la que se observa la reducción de tensión del 20% en las tres fases del circuito al entrar el estabilizador de tensión reduciendo la tensión en cabecera al 20%.

Fuente: Elaboración propia con datos del equipo Teleastro de Afeisa.

Equipos para la medida de los parámetros eléctricos

– El equipo de medida Teleastro, cuyas características y rango de medida se indican en la tabla 3, utiliza un transformador de intensidad tipo toroidal con núcleo cerrado y clase 2 (tabla 3).

– Equipo de medida analizador de red tipo AR6 de la marca Circuiton, cuyas características, rango de medida y precisión se indican a continuación (tabla 4).

Equipos para la medida de los parámetros luminotécnicos

El método seleccionado para las mediciones luminotécnicas ha sido el método simplificado de medida de la iluminancia media, denominado de los “nueve puntos”, descrito en el R.D. 1890/2008, ITC-EA-07.

Se han empleado dos luxómetros para verificar el contraste de los resultados obtenidos:

– Luxómetro Gossen modelo Mavolux 5032C/B.

– Luxómetro móvil LX-GPS para medida de iluminancia mediante vehículo y GPS marca Afei Sistemas de Automatización SA.

Resultados

Balance y resultados del estudio de los parámetros eléctricos

Resultados obtenidos con equipo Teleastro

Los resultados eléctricos obtenidos en el presente estudio, obteniendo las medias de los valores registrados diariamente, a intervalos de 15 minutos se indican en la tabla 5. Así mismo, se puede observar la gráfica de reducción de la tensión estabilizada y reducida en un 20% (figura 4).

Resultados obtenidos con equipo AR6

Con el equipo analizador de red AR6 se realizaron como contraste, mediciones de los parámetros eléctricos por fase y entre fase y fase (tensión, intensidad, potencia activa, reactiva capacitiva e inductiva, factor de potencia y armónicos fundamentales). Se compararon los resultados de dichas medidas con y sin reducción de tensión desde el equipo estabilizador-reductor. 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. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5 a 12, de elaboración propia y que muestran los resultados eléctricos: tensiones de fase (figura 5), tensiones de línea (figura 6), intensidad de fase (figura 7) factor de potencia (figura 8),

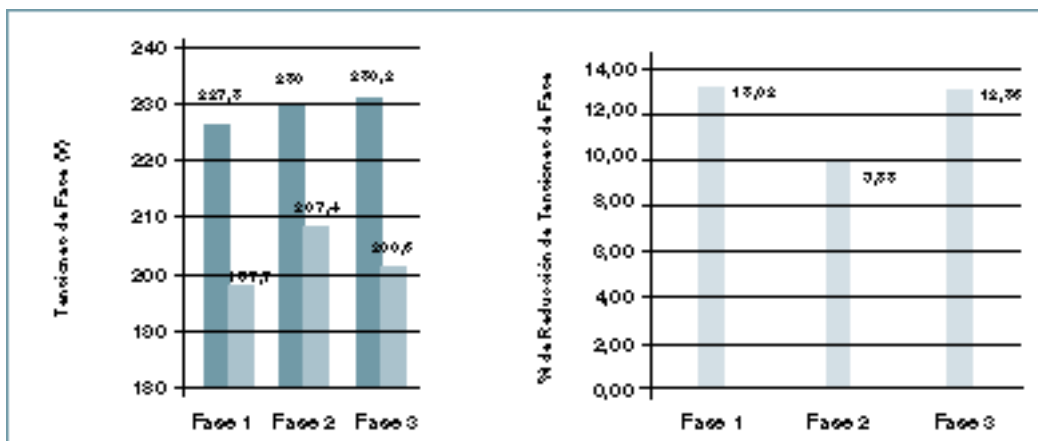


Figura 5. Tensiones de fase medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

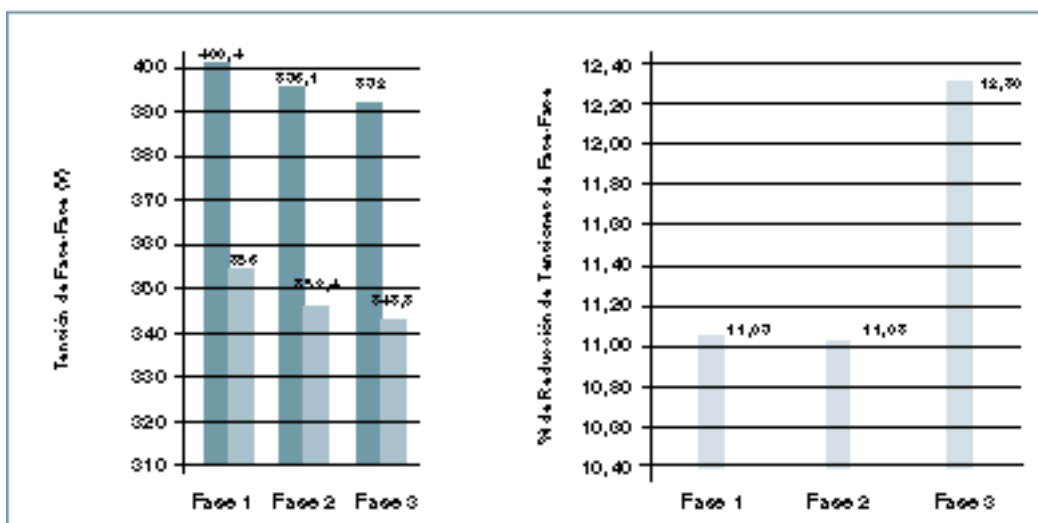


Figura 6. Tensiones de línea (fase-fase) medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

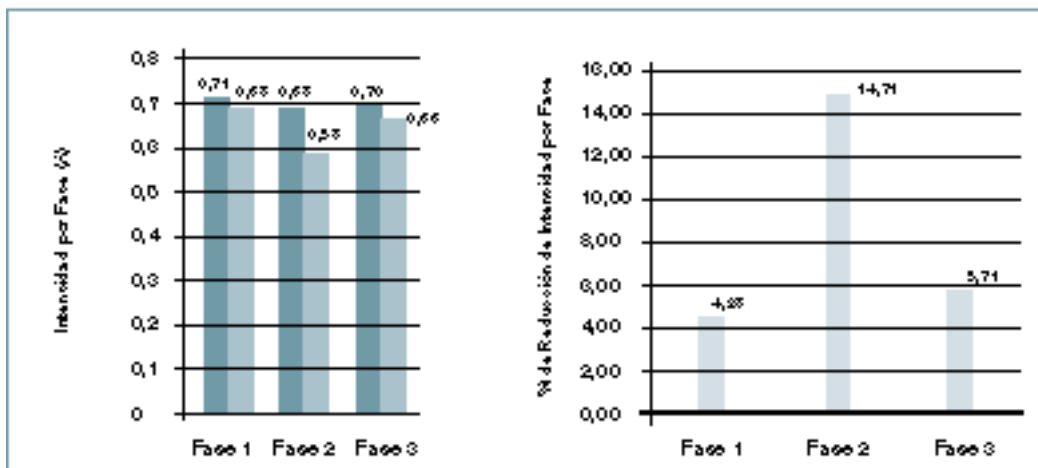


Figura 7. Intensidad de fase medida con el analizador AR6 con y sin reducción.

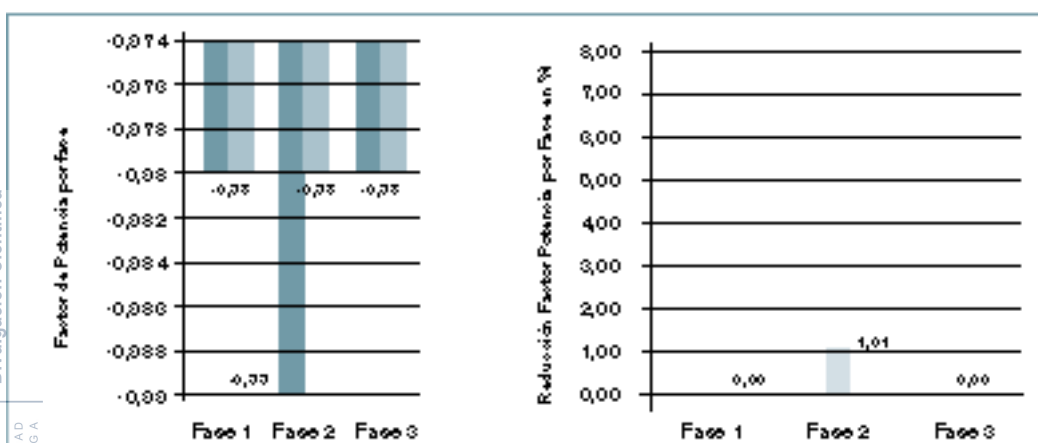


Figura 8. Factor de potencia por fase medida con el analizador AR6 con y sin reducción.

Figura 9. Potencia activa por fase medida con el analizador AR6 con y sin reducción.

Potencia por Fase sin Reduoir
 Potencia por Fase reducida
 % de Reducción de Potencia Aparente por Fase

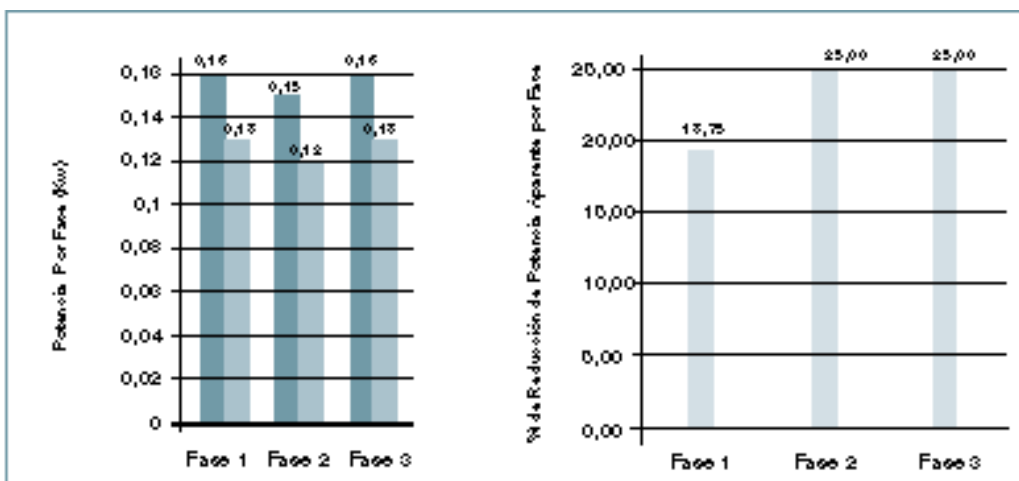


Figura 10. Potencia reactiva por fase medida con el analizador AR6 con y sin reducción.

Potencia Aparente por Fase sin Reduoir
 Potencia Aparente por Fase reducida
 % de Reducción de Potencia Aparente por Fase

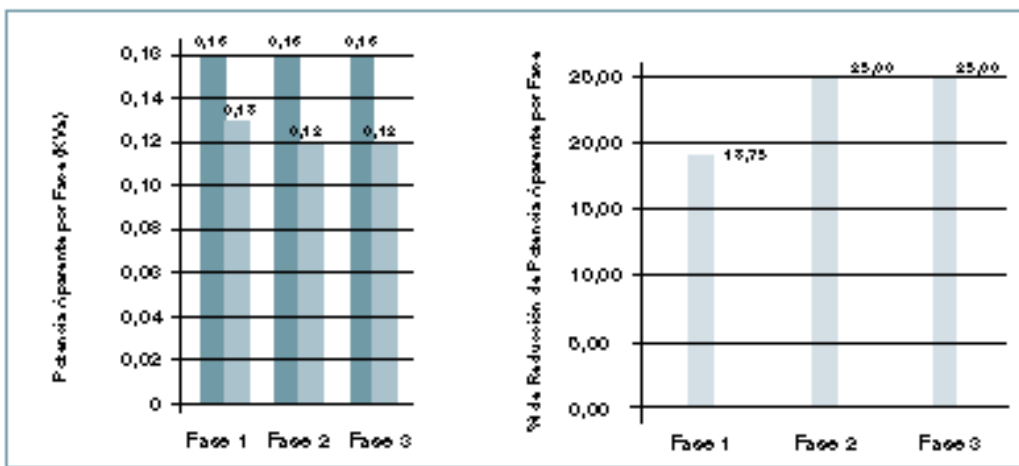


Figura 11. Potencia reactiva capacitiva por fase medida con el analizador AR6 con y sin reducción.

Potencia Aparente Capacitiva por Fase sin Reduoir
 Potencia Aparente Capacitiva por Fase Reduicida
 % Reducción Potencia Aparente Capacitiva

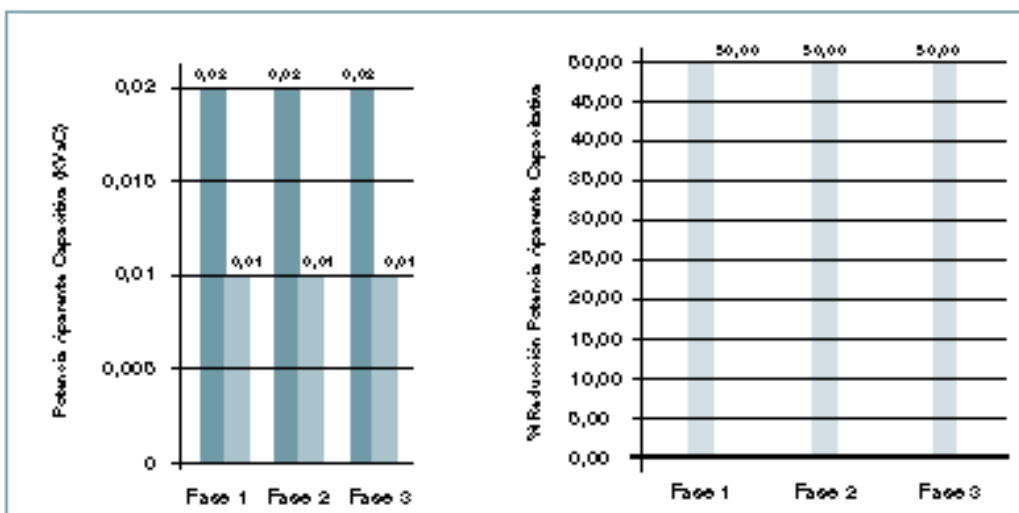
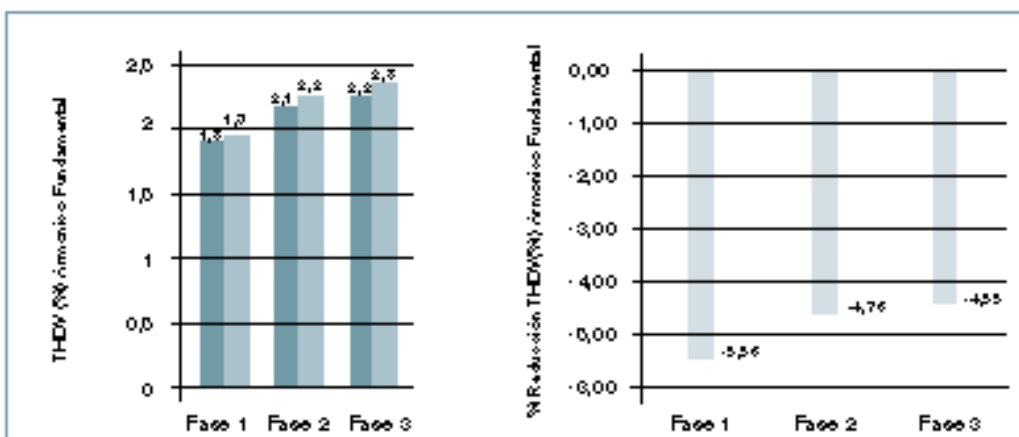


Figura 12. Análisis de armónicos por fase, medidas con el analizador AR6 con y sin reducción.

THD/(%) Fase sin reduoir
 THD/(%) Fase en reducción
 % Reducción THD/(%) Armónico Fundamental



potencia activa (figura 9), potencia reactiva (figura 10), potencia reactiva capacitiva (figura 11) y armónicos fundamentales (figura 12) obtenidos antes y después de entrar el estabilizador de tensión en cabecera.

Balance luminotécnico

El balance luminotécnico medio, comparando con los resultados de las mediciones a pie de campo, se recoge en las tablas 9 y 10 y se realizó con dos luxómetros distintos para contrastar resultados. Así mismo, se recogen gráficamente las variaciones de iluminancia a la baja (color azul) cuando reducimos la tensión

desde el estabilizador (figura 13) (CIE,1989; CIE,1995).

Resultados obtenidos con el luxómetro móvil LX-GPS

En tabla 9 y figura 13.

Resultados obtenidos con el luxómetro Gossen

Al entrar el estabilizador de tensión, reduciendo la tensión 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 con resultados prácticamente iguales (tablas 9 y 10).

En las fotografías comparativas antes y después de reducir la tensión (figura 14) se puede observar que a simple vista es prácticamente imposible apreciar las diferencias de iluminación de los viales antes y después de reducir la tensión.

Control de fallos de equipos de ahorro y lámparas

Por último y como muy significativo, queremos señalar que durante este estudio que se ha llevado a cabo durante 12 meses (entre enero y diciembre de 2012) no se ha registrado fallo alguno, en ninguna de las lámparas leds, ni en los controladores Dimiled de los equipos (datos obtenidos de Gecor).

Conclusiones y discusión

Con este estudio queda demostrado que las lámparas que utilizan tecnología led son perfectamente compatibles y regulables con equipos de ahorro, estabilizadores-reductores de tensión, instalados en la cabecera de los cuadros. Estos equipos, que son exactamente los mismos que los que se instalan para lámparas de descarga tradicionales (vapor de sodio o halogenuros metálicos), permiten el control de flujo luminoso en las luminarias led, sin precisar equipamientos especiales y son absolutamente compatibles para la regulación de la iluminación para ambas tecnologías. Tan solo requieren la instalación de un pequeño equipo controlador en la luminaria capaz de detectar la tensión estabilizada reducida y actuar sobre los diodos de la lámpara led

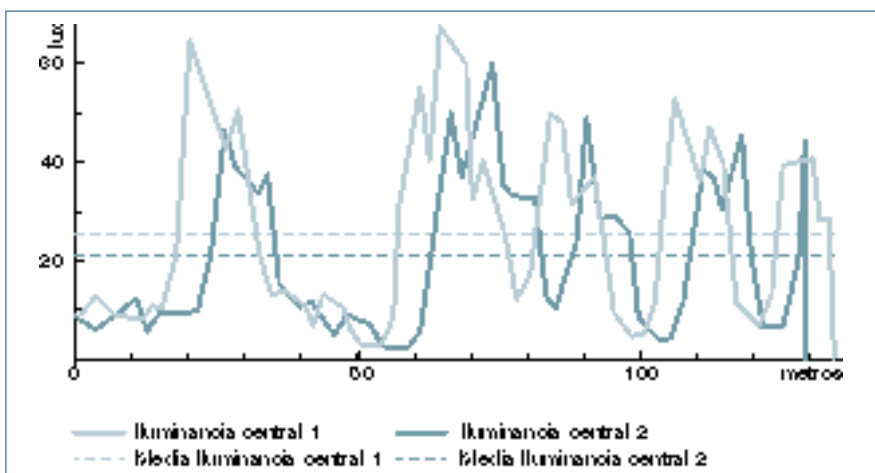


Figura 13. Representación gráfica de iluminancias antes y después de estabilizar la tensión. El color rojo representa las iluminancias medidas sin reducción de tensión y en azul las iluminancias medidas con el 20% de tensión reducida. Fuente: Elaboración propia.

| Datos lumínicos | | | |
|--------------------|---------------------------------------|---|----------------|
| Sonda central | (Mediciones sin reducción de tensión) | (Mediciones con el 20% de reducción de tensión) | Diferencia |
| Ilum. media (lux) | 25,8 | 21,4 | +20,6% (+4,4) |
| Ilum. máxima (lux) | 67,7 | 60,1 | +12,6% (+7,6) |
| Ilum. mínima (lux) | 2,9 | 2,1 | +38,1% (+0,8) |
| Uniform. media | 0,11 | 0,10 | +10,5% (+0,01) |
| Uniform. extrema | 0,04 | 0,04 | +0% (+0,00) |

Tabla 9. Balance luminotécnico antes y después de reducir la tensión con el estabilizador. Mediciones realizadas con luxómetro móvil LX-GPS. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Balance luminotécnico comparativo realizado con luxómetro Gossen modelo Mavolux 5032C/B. Fuente: Elaboración propia.

| Balance luminotécnico. (Calle héroes dos de mayo) | | | | | | |
|---|----|--|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|
| | | | Cálculos teóricos | Medición real sin reducción | Medición real con reducción | % Variación |
| Iluminancia media (lux) | Em | | 15,3 | 19,26 | 15,12 | 21,5 |
| Uniformidad media | Um | | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 5,5 |
| Uniformidad extrema | Ug | | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 4,5 |



Figura 14. Vial sin reducción de tensión y vial con tensión reducida al 20%. Fotografía del vial antes y después de reducir la tensión en cabecera del cuadro. Aparentemente no se observan diferencias en los niveles de iluminación ni en el color.

reduciendo los niveles de iluminación proporcionalmente.

Del balance de los parámetros eléctricos registrados, queda demostrado que reducciones de tensión en cabecera de torno al 20% provocan reducciones en la potencia activa y reactiva de la lámpara y en el consumo de la misma, en la misma proporción, algo que cabía esperar. No obstante, sí hay que hacer notar que se ha registrado un incremento en la contaminación por armónicos en torno al 5%, para la tensión reducida de ahorro. El aumento de armónicos se debe, sin duda, a la mayor actuación de los PWN, de naturaleza rectangular, que hace que no existan componentes pares y aumenten los impares. Este incremento parece estar asociado claramente a la propia naturaleza electrónica de los led y sus drivers, aunque a pequeña escala y en pequeñas instalaciones, como la analizada, no pensamos pueda ser un problema. No obstante, sería necesario prevenir esta situación en un escenario de gran utilización de estos equipos, lo que puede afectar a la modulación de la forma de onda de la señal. Y a la intensidad que puede llegar a aparecer en el neutro en caso de ser común.

De los balances luminotécnicos, se desprende que también se producen reducciones de iluminancia media, en torno al 20%, en el momento que el estabilizador de tensión entra en reducción, coincidiendo, con los porcentajes de reducción de la tensión en cabecera. Todo esto sin variar significativamente la uniformidad media y la extrema. Notar como la ilumi-

nancia mínima, aunque aparentemente parece verse más afectada por la reducción de tensión, en torno al 40%, debe explicarse y relacionarse este valor extremo, con la baja precisión del equipo luxómetro móvil para rangos de medida por debajo de los 5 lux.

Queda comprobado que los niveles de ahorro energético que se pueden conseguir con equipos de estabilizadores-reductores, aplicados a luminarias con tecnología led, son directamente proporcionales a la reducción de tensión programada en cabecera del mismo.

También se demuestra que los niveles de iluminación se ven afectados en el mismo tanto por ciento que los niveles de reducción de potencia a los que se ve sometida la fuente de luz en reducción, con niveles de uniformidad semejantes.

Y, por último, en este estudio ha quedado puesta de manifiesto la altísima y contrastada eficiencia energética y el ahorro energético considerable que supone la instalación de leds, así como las posibilidades de regulación compatibles con otros sistemas de iluminación de descarga. No obstante, se enfrentan estos equipos led a dos aspectos fundamentales claramente mejorables. Por un lado, un elevado precio que les hacen no ser aún competitivos y la falta de estudios o experiencias que determinen su durabilidad real.

Agradecimientos

Queremos agradecer al Servicio Técnico de Alumbrado del Ayuntamiento de Fuengirola el apoyo prestado durante la fase experimental del presente estudio.

Bibliografía

- AAE (2011). Agencia Andaluza de la Energía Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Municipios. Sevilla SE-232. Disponible online: [http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050](http://www.agenciaanAtkinson 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.</p>
<p>CIE (1995). Recomendaciones para la iluminación de las carreteras para el motor y el tránsito de peatones. Publicación n° 115.</p>
<p>CIE (1989). Mesópica fotometría: historia, problemas y soluciones prácticas. Publicación n° 115.</p>
<p>Gil de Castro A, Moreno Muñoz A, Larsson A, de la Rosa JGG, y Bollen MHJ (2012). LED Street lighting: A power quality comparison among street light technologies. <i>Lighting Research and Technology</i>, 1477153512450866, first published on August 7.</p>
<p>Hermoso Orzáez MJ, de Andrés Díaz JR, (2013). Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps, <i>Energy</i>. 52: 258-264. Available online: <a href=).
- 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.
- Mahapatra S, Chanakya HN, 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, 10.1016/j.esd.2009.10.005.
- Mills E, Piette MA (1993). Advanced energy-efficient lighting systems: progress and potential. *Energy*. 18: 75-97.
- Reusel KV (2008). A look ahead at energy-efficient electricity applications in a modern world. <www.ect2008.com> ECT conference. Bergen, Norway.
- Ryckaert WR, SmetK. AG, Roelandsl AA, 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.
- Saunders HD, Tsao JY (2012). Rebound effects for lighting. *Energy Policy*. 49:477-478.
- Smet KAG, Ryckaert WR, Pointer MR, 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, 10.1016/j.measurement.2007.09.003.
- 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, 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.

Manuel Jesús Hermoso Orzáez

mhermosoorzaez@gmail.com
 Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos. Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén.

José Ramón de Andrés Díaz

Profesor titular del Departamento de Expresión Gráfica Diseño y Proyectos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Málaga.

Artículo 4. STATISTICAL METHODOLOGY PROPOSAL FOR EVALUATING UNIFORMITY: APPLICATION TO LED LUMINAIRES. (PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD. APLICACIÓN A LUMINARIAS CON LEDS).

Light & Engineering SVETOTEKHNIKA

Editorial office:
VNISI, room 331, 334
106 Prospekt Mira

Moscow 129626, Russia
Tel: 7 (095) 682 58 46
E-mail:lights-nr@inbox.ru

Dear Manuel Jesus Hermoso Orzaez and Jose Ramón de Andrés Diaz,

Your paper “Statistical Methodology Proposal for Evaluating Uniformity: Application to LED Luminaires” will be published in Light & Engineering Journal #2-2014, which will be ready on the end of June 2014. Information about publication is in contents, see page 91 of #1-2014 in attachment. So, you can use it in your thesis.

With best regards



Julian Aizenberg

Editor-in-Chief,
Dr. of technical science,
Professor

CONTENTS

VOLUME 22

NUMBER 2

2014

LIGHT & ENGINEERING
(SVETOTEKHNİKA)

D.S. Strebkov

Prospective of Using Technologies of Nicola Tesla in Up-To-Date Power Engineering

Lucia Ronchi

Warm and Cold Lights as Related to the Fine Grain of Circadiancy

Peter Alstone, Kristen Radecsky, Arne Jacobson, and Evan Mills

Field Study Methods and Results from a Market Trial of Led Lighting for Night Market Vendors in Rural Kenya

A. S. Sakhno, I.E. Faizullin, and A.M. Frolov

Physical and Analytical Recommendations on Insolation Factor Application when Designing Microdistrict Buildings

Manuel Jesús Hermoso Orzáez and José Ramón de Andrés Díaz

Statistical Methodology Proposal for Evaluating Uniformity: Application to LED Luminaires

Parthasarathi Satvaya and Saswati Mazumdar

Studies on Road Lighting Luminaires with Advanced Features

Banu Tabak Erginoz and Cenk Yavuz

Energy Quality Analysis and Improvement for Fluorescent and LED Light Sources

M. Kriuglaitė-Jarašiūnienė and S. Masiokas

Shrinkage of Colour Gamut of Digital Multimedia Projector under Influence of Ambient Light and Different Standard Illuminants

Mehmet Sait CENGİZ and Sabir RUSTEMLİ

The Relationship between Height and Efficiency and Solution Offerings in Tunnel and Sub-sea Tunnels

V. L. Zhbanova, and V.V.Nyubin

A Method of Improving Colour Rendition of Digital Photo- and Video cameras

Rengin Ünver, Esra Küçükçiliç Özcan and Mine Yavuz

Perceived Colours under Different Light Sources, a Study on Façade Colour

STATISTICAL METHODOLOGY PROPOSAL FOR EVALUATING UNIFORMITY: APPLICATION TO LED LUMINAIRES

Author: *Manuel Jesús Hermoso Orzáez*
Municipal Engineer, City Government of Fuengirola
Associate Professor, Polytechnic School of Engineering.
(Engineering and Projects Department) University of Jaen



UNIVERSITY OF JAÉN



Corresponding Author: *José Ramón de Andrés Díaz*

Lecturer at the Engineers' Graduate Technical
(Area of Engineering Projects). University of Malaga



UNIVERSITY OF MÁLAGA

C/CHURRUCA. N° 2.EDIFICIO ASTIGI 1 PORTAL 1.PLANTA 2. N° 8 -
C.P 29640. FUENGIROLA (MALAGA)
• TELÉFONO 610389020

mhermosoorzaez@gmail.com; mhorzaez@ujaen.es;

ABSTRACT:

A growing interest has arisen in new technology related to LED street lighting.

The energy savings of this technology are evident due to the reduced power and energy achieved with LED luminaires in comparison to equivalent traditional discharge lamps.

However, uniformity, directionality and the associated optics involved in LED luminaires remain a problem.

In this article, we propose a methodology that enables a graphic-statistical uniformity study for luminaires in general and LEDs in particular. Thus, we can compare lighting performance measures of LED lighting technology in terms of brightness and uniformity for comparison with traditional discharge lamps.

Keywords: Public lighting, LED lighting, energy efficiency, metal-halides, uniformity.

1.- INTRODUCTION

Street lighting accounts for 2.3% of the world's electricity consumption [0][1], as much as 80% of municipal electric energy and 60% of associated energy costs[2] [3] [4].

Opportunities for energy savings are high, with the possibility of reductions between 20% and 50% for power consumption and amortisation periods of less than 5 years [5] [6] [7] [8].

The progressive substitution of traditional sodium-vapour discharge lamps and metallic halogen lamps by novel lamps based on LED (Light Emission Diode) technology is gradually becoming the norm in urban lighting.

A general and massive replacement is not recommended based on the cost-effectiveness and novelty of this technology, but the significant energy savings (up to 40%) and increased duration (the LED lifespan is three times longer than that of discharge-based lamps) of LED technology have motivated experimental tests of this new generation of lamps in street lighting [9].

However, based on observations and studies of the illuminances and uniformities of LED luminaires and recommendations from the International Commission on Illumination (CIE) and the Regulation of Energy Efficiency for Exterior Lighting (RD-1890/2008), it is clear that illuminance and uniformity require new, more rigorous definitions. According to current research, average uniformity, as defined by the CIE [10], is a perfectly valid term for discharge-based conventional lamps (due to their light emission from a single light source). However, for LED lamps, due to their directionality and light projection from several light sources, the definition of average uniformity has been described as insufficient (as described above).

In this paper, we propose a statistical methodology for analysing and computing uniformities in a more rigorous fashion for LED luminaires. This methodology enables the comparison of LED luminaires and discharge-based lamps with similar performance.

To carry out this study, we equipped a single luminaire with five LED applications (provided by four manufacturers) that utilise the same type of diode (CREE brand) and have similar powers but different optic systems. Previous studies have followed a similar methodology [11] [12] [13].

2.- MATERIALS AND METHODS.

2.1.- MEASURED LUMINAIRE CHARACTERISTICS FOR COMPARING LED AND DISCHARGE-BASED TECHNOLOGIES

We selected a VILLA-type luminaire manufactured by ATP (*commercial trademark: Public Street Lighting, Ltd. [Alumbrado Técnico Público S.A]*) installed on a street in Fuengirola (Malaga, Spain). The luminaire is located 3.5 m high above an asphalt road with terrazzo tiles in the pavement, where a PHILIPS 150-W metal-halide (MH) discharge lamp was initially installed. The road is a two-way street, 6 m wide, with two 3-m-wide side walk and no side parking (Fig. 1).

We compared the MH lamp with five LED lighting systems provided by four manufacturers that already apply this novel LED technology adapted to the same VILLA-type luminaire.

| <i>Luminous source</i> | <i>Characteristics</i> | | | | <i>Electrical measurements</i> | | | |
|------------------------------|------------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| | Pot (W) | Flux (Lm) | Efficiency (Lm/W) | T ^a Colour (°K) | Pot (W) | React. Induc. (VarL) | React. Capac. (VarC) | Power factor |
| <i>Mater City CDO TT/828</i> | 150 | 13.500 | 90.1 | 2800 | 170 | 10 | 0 | 0.95 |
| <i>SSIE</i> | 45 | 3.500 | 80 | 5.500 | 40 | 0 | 0 | -0.99 |
| <i>ETILED</i> | 51 | 4.059 | 80 | 4.000 | 50 | 0 | 20 | -0.92 |
| <i>DLED</i> | 56 | 3.958 | 83 | 4.000 | 60 | 0 | 10 | -0.99 |
| <i>REXDOS 270</i> | 45 | 3.800 | 80 | 4.000 | 40 | 0 | 0 | -0.98 |
| <i>REXDOS 360</i> | 50 | 4.000 | 80 | 4.000 | 50 | 0 | 0 | -0.99 |

Table 1: Theoretical parameters and electric measurements of the light sources. Source: Elaborated by the authors.

2.2.- EQUIPMENT AND INSTRUMENTS

For illuminance and electric parameter measurements, we used two luxmeters and one electric network analyser apparatus:

1. GOSSSEN lux meter, model MAVOLUX 5032C/B, developed by the Engineering Projects Department within the Engineering School of the University of Malaga; this meter was calibrated and tested.
2. KOBAN lux meter, model Digital KL-1330, provided by the Maintenance Technical Services of the Fuengirola City Council; this meter was calibrated and tested.
3. AR6 electric network analyser, manufactured by CIRCUITOR, a company owned by the Maintenance Technical Services of the Fuengirola City Council; this meter was calibrated and tested.

2.3.- METHODOLOGIES AND GRAPHICAL AND STATISTICAL PROCEDURES FOR COMPARATIVE UNIFORMITY MEASUREMENTS

We selected six VILLA luminaire-type street lamps according to the previous description. In one of the lampposts, a discharge-based MH lamp was installed, with two years of usage and approximately 6000 hours of operation. The remaining lamps were installed with LED light sources.

The electric parameters were measured with the AR6 analyser, which tested the lamp power and its parameters according to the manufacturer's specifications, as shown in Table 1.

Below, we describe the proposed methodology based on luminance measurements obtained from lux meters for the 150-WMH lamp. Previous studies [14][15][16] [17] [18] have followed a similar methodology.

On the pavement (sidewalks and driveway), we drew 87 points organised in a matrix of 8 rows and 11 columns. The centre point corresponds to the origin coordinates (0, 0), and the lamppost is located in the same point (row 5, column 6). The curb corresponds to row 5, rows 1 to 4 correspond to the road (6 m wide), and the sidewalk pavement is represented by rows 5 to 8 (3 m). (Fig.1) (Table 2)

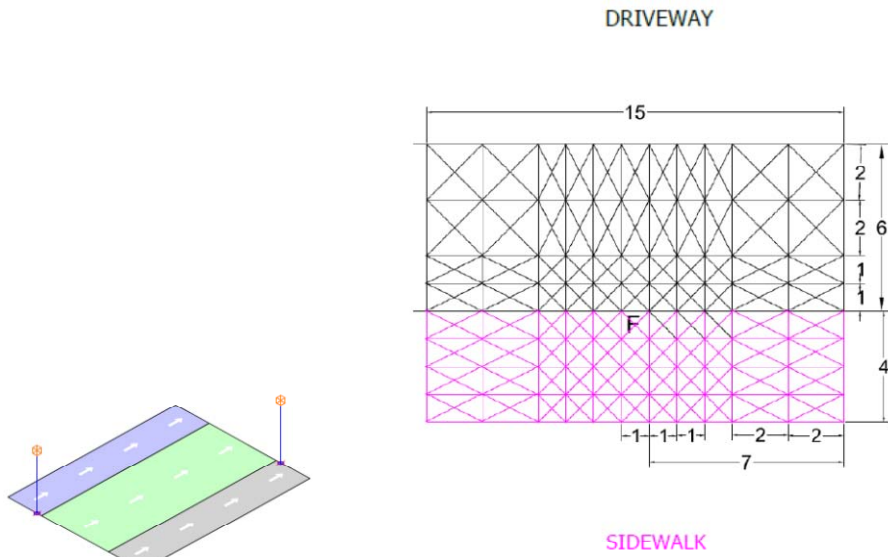


Fig. 1. Road type and grid dimensions. Source: Elaborated by the authors.

We performed weekly illuminance measurements in situ. Average values were obtained for these measurements for a localised point in the grid using the two lux meters to achieve a contrast measurement.

Each point in the matrix (Table 2) corresponds to a point in the grid shown in Figure 1. The illuminance is given in units of lux at the ground level for each point. Subsequently, the surface is defined by the illuminance samples obtained for each point in the matrix (Fig. 2).

| COLUMN | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
|--------------|------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|------|-----|------|
| DISTANCE (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | | Rows |
| 6 | 2.97 | 3.96 | 5.03 | 7.79 | 6.90 | 6.80 | 6.74 | 6.24 | 5.63 | 4.66 | 3.17 | 6.0 | 1 |
| 4 | 4.93 | 4.79 | 7.45 | 7.76 | 7.17 | 6.72 | 7.57 | 7.06 | 6.95 | 4.05 | 5.30 | 4.0 | 2 |
| 2 | 7.56 | 9.19 | 7.09 | 8.87 | 14.88 | 16.14 | 12.88 | 9.00 | 6.19 | 8.59 | 6.66 | 2.0 | 3 |
| 1 | 7.60 | 12.01 | 12.86 | 13.41 | 11.36 | 11.04 | 10.61 | 12.23 | 11.66 | 10.01 | 7.60 | 1.0 | 4 |
| 0 | 8.00 | 9.65 | 14.60 | 14.78 | 16.64 | MH 150 W | 15.34 | 16.73 | 12.39 | 11.65 | 7.52 | 0.0 | 5 |
| 1 | 5.57 | 10.03 | 7.89 | 14.79 | 12.78 | 14.88 | 13.93 | 12.51 | 8.00 | 9.17 | 4.79 | 1.0 | 6 |
| 2 | 4.56 | 7.59 | 8.73 | 8.50 | 18.68 | 19.56 | 17.22 | 9.62 | 7.07 | 8.59 | 4.02 | 2.0 | 7 |
| 3 | 2.59 | 9.19 | 6.75 | 11.36 | 11.32 | 12.47 | 10.93 | 9.21 | 7.05 | 8.09 | 3.52 | 3.0 | 8 |

Table 2. Matrix of measurements with respect to the distance expressed in meters and illuminance measurements expressed in lux for the PHILIPS 150-W MH lamp. Source: Elaborated by the authors.

The following graphical and statistical analysis of the illuminance measurements will result in the definition of a novel concept: *statistical uniformity* (hereafter U_s). We compute U_s for each of the light sources and compare the results of this statistical uniformity with the average uniformity (U_m), which is computed from the traditional method according to CIE recommendations. Let us first consider Equations (1) and (2):

$$U_m = \frac{L_{min}}{L_{av}} \quad (1) \text{ (Definition of the theoretical average uniformity } (U_m) \text{ according to CIE)}$$

where:

U_m = Average uniformity

L_{min} = Minimal illuminance (lux)

L_{av} = Average illuminance (lux)

$$U_s = \frac{\text{Standard deviation } (\sigma)}{L_{av}} = \text{Coef. of variation } (\%)(2) \text{ (Definition of statistical uniformity } (U_s) \text{ proposed in this paper)}$$

where:

U_s = Statistical uniformity

Standard deviation (σ) = Standard deviation of the sample

L_{av} = Average illuminance (lux)

The coefficient of variation is expressed as a percentage.

We aimed to accurately compute both the coefficient of variation of the sample, which is defined as the ratio between the standard variation of the average illuminance and the average illuminance, and the illuminance statistical uniformity (U_s).

The standard deviation (σ) measures the data dispersion with respect to the average illuminance and allows us to accurately define the illuminance uniformity. This new definition resolves the problem of investigating multi-directional LED luminaires with a new and more rigorous computational method.

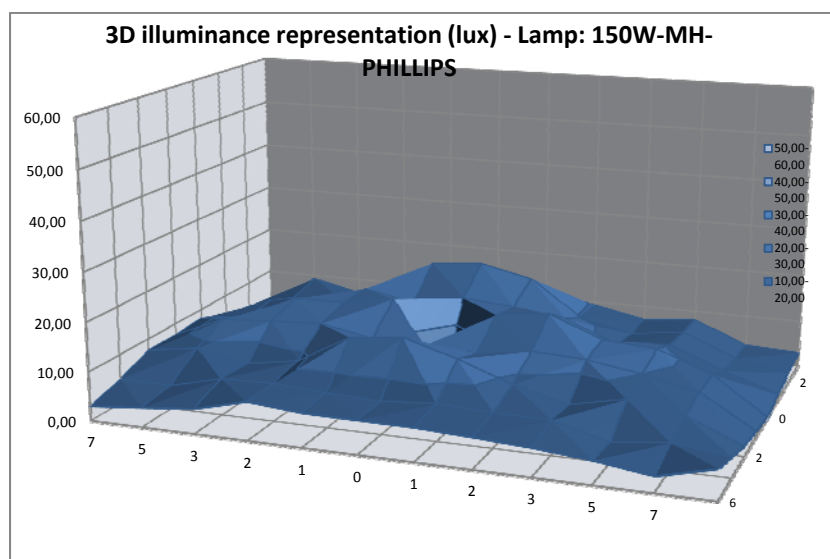


Fig. 2. 3D illuminance representation (lux) – Lamp: MH 150–W, manufacturer: PHILIPS. Elaborated by the authors.

As indicated in the previous formula, the data dispersion is computed as the standard deviation of the average illuminance. Thus, it is statistically defined as the coefficient of variation expressed as a percentage.

In this way, a smaller standard deviation with respect to the average illuminance corresponds to a higher statistical uniformity (U_s) of the illuminance. Moreover, we computed the average uniformity (U_m) and the extreme uniformity (U_g) according to the CIE specifications (Table 3).

| | <i>CIE methodology</i> | | | | | <i>New methodology</i> | | | |
|---------------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|---------------|--------------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{av} | $Var \sigma^2$ | $SD \sigma$ | Coef. | U_s |
| <i>Sidewalk</i> | 2.59 | 19.56 | 0.25 | 0.13 | 10.42 | | | | |
| <i>Driveway</i> | 2.97 | 16.14 | 0.37 | 0.18 | 8.12 | | | | |
| <i>Total</i> | 2.59 | 19.56 | 0.28 | 0.13 | 9.27 | 14.89 | 3.85 | 0.4164 | 41.64 |

Table 3 . Illuminances and uniformities obtained from the CIE method and the proposed method. Source: Elaborated by the authors.

4.- RESULTS OF A COMPARATIVE STUDY OF LEDS

4.1. 45-W LED LAMP MANUFACTURED BY SSIE

Table 4 shows the illuminance matrix obtained after applying the method described in the previous section. The results are displayed in three dimensions (Fig. 3).

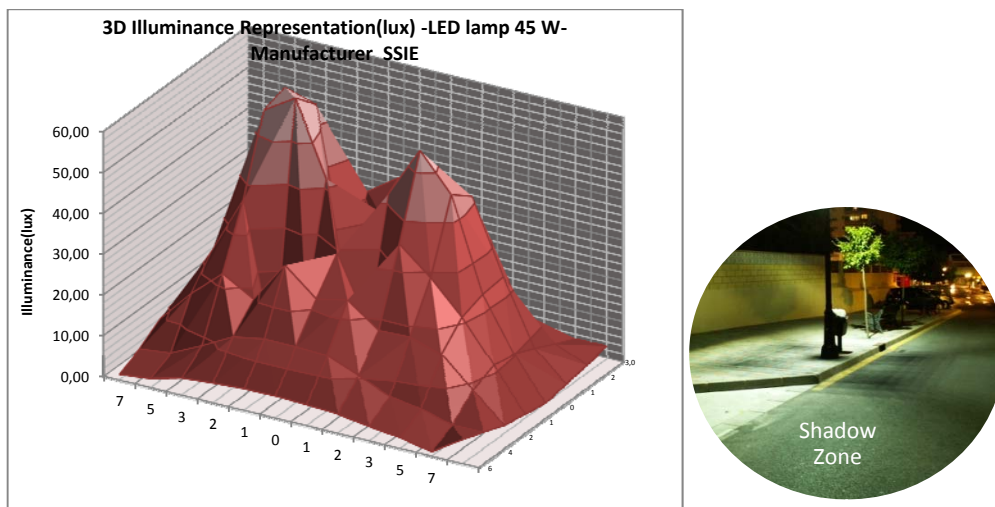


Fig. 3. Illuminance representation and photograph of the illuminated zone.45-W LED lamp, manufactured by SSIE. Source: Elaborated by the authors.

| MATRIX OF ILLUMINANCES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Distance (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 1.39 | 2.22 | 4.24 | 4.84 | 5.33 | 5.38 | 5.15 | 4.70 | 3.52 | 2.63 | 1.06 | 6.0 |
| 4 | 3.90 | 4.71 | 8.41 | 12.46 | 13.81 | 13.76 | 13.46 | 10.46 | 7.14 | 6.03 | 3.90 | 4.0 |
| 2 | 7.53 | 15.69 | 22.40 | 17.97 | 28.20 | 21.80 | 23.40 | 17.80 | 18.07 | 15.60 | 8.81 | 2.0 |
| 1 | 8.91 | 22.40 | 36.70 | 29.7 | 13.87 | 29.20 | 13.35 | 35.30 | 28.90 | 21.10 | 11.27 | 1.0 |
| 0 | 13.20 | 25.90 | 55.20 | 63.20 | 42.00 | SSIE 45 W | 42.10 | 54.60 | 45.60 | 23.00 | 10.20 | 0.0 |
| 1 | 7.06 | 26.40 | 57.00 | 54.70 | 15.18 | 32.40 | 15.83 | 36.90 | 41.50 | 23.60 | 7.88 | 1.0 |
| 2 | 8.50 | 11.64 | 32.80 | 18.21 | 31.50 | 36.80 | 36.70 | 24.00 | 21.50 | 11.00 | 5.26 | 2.0 |
| 3.0 | 2.80 | 2.50 | 5.00 | 4.00 | 5.10 | 5.04 | 5.27 | 5.09 | 2.25 | 2.40 | 2.90 | 3.0 |

Table4. Matrix of measurements with respect to distance (in meters) and measurements of illuminance (in lux) for the 45-W LED lamp, manufactured by SSIE. Source: Elaborated by the authors.

| | CIE methodology | | | | | New methodology | | | |
|-----------------|-----------------|-----------|-------|-------|----------|-----------------|-------------|--------|-------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{av} | $Var \sigma^2$ | $SD \sigma$ | Coef | U_s |
| Sidewalk | 2.25 | 63.20 | 0.10 | 0.04 | 22.64 | | | | |
| Driveway | 1.06 | 36.70 | 0.08 | 0.03 | 12.95 | | | | |
| Total | 1.06 | 63.20 | 0.06 | 0.02 | 17.80 | 231.78 | 15.22 | 0.8557 | 85.57 |

Table5. The illuminance and uniformity (according to the CIE method) and statistical indicators according to the new methodology.

The results shown in Tables 4 and 5 and Figure 3 indicate the existence of specific points in the sample matrix with very high illuminances at intermediate distances. In contrast, some points present low illuminances at a small distance from the focus and correspond to sub-illuminated zones close to over-illuminated zones. In general, although the average illuminance is slightly higher than that of the MH lamp, there is a significant contrast between the average and maximum illuminances. This result corresponds to a sub-optimal uniformity for both the average and extreme uniformity, according to the CIE methodology (Table 5). The standard deviation and the coefficient of variation are both high, two-fold higher than those of the MH lamp (Table 3).

4.2. 56-W LED LAMP MANUFACTURED BY DLED

Table 6 shows the results for the illuminance matrix obtained with the newly proposed method. The results were graphically presented in three dimensions using an Excel sheet. Note the shadow zones associated with reductions in illuminance as the distance from the focus increases (see Fig. 4).

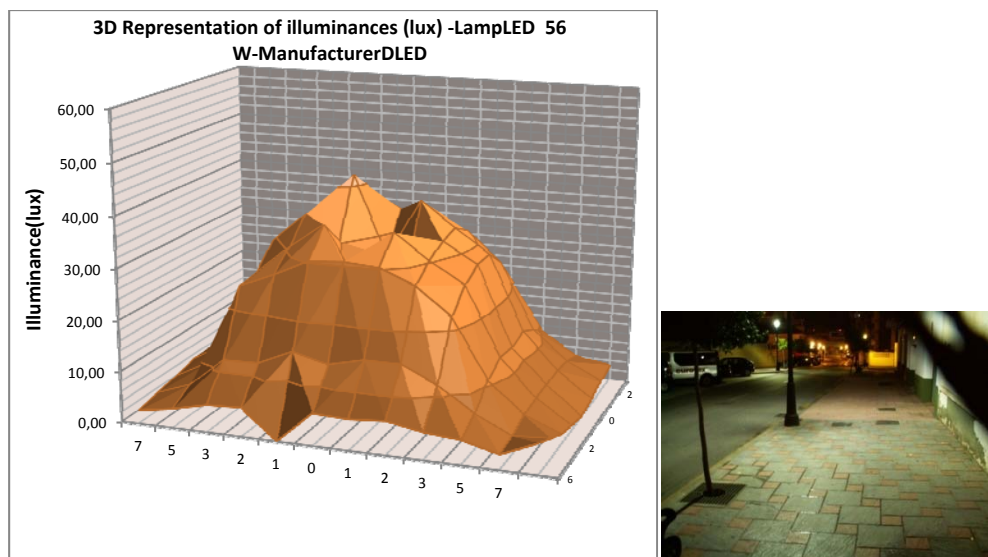


Fig. 4. 3D illuminance representation(lux) –56-W LED lamp, manufactured by DLED. Photograph of the DLED luminaire. Source: Elaborated by the authors.

| MATRIX OF ILLUMINANCES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Distance (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 2.61 | 3.77 | 5.39 | 5.69 | 6.72 | 6.31 | 6.05 | 6.58 | 5.30 | 4.76 | 2.95 | 6.0 |
| 4 | 3.56 | 6.02 | 11.73 | 11.87 | 14.90 | 13.17 | 14.81 | 14.78 | 11.56 | 6.98 | 3.55 | 4.0 |
| 2 | 4.41 | 8.00 | 24.20 | 27.10 | 30.30 | 30.80 | 30.30 | 27.50 | 22.20 | 10.74 | 4.92 | 2.0 |
| 1 | 5.50 | 9.44 | 24.90 | 30.70 | 35.60 | 24.20 | 35.20 | 30.30 | 26.20 | 12.76 | 5.50 | 1.0 |
| 0 | 5.50 | 11.83 | 29.40 | 35.30 | 30.40 | DLED 56 W | 25.40 | 32.20 | 28.20 | 12.29 | 5.59 | 0.0 |
| 1 | 5.30 | 14.39 | 29.70 | 34.40 | 42.20 | 25.90 | 38.00 | 33.00 | 28.30 | 13.33 | 6.00 | 1.0 |
| 2 | 5.23 | 10.02 | 22.00 | 31.40 | 37.60 | 34.00 | 31.80 | 30.70 | 24.70 | 11.27 | 5.48 | 2.0 |
| 3.0 | 4.69 | 7.62 | 21.90 | 25.50 | 26.70 | 28.10 | 26.30 | 22.10 | 18.98 | 8.64 | 4.20 | 3.0 |

Table.6. Matrix of measurements with respect to the distance expressed in meters and illuminance measurements expressed in lux for the56-W LED lamp, manufactured by DLED. Source: Elaborated by the authors.

| | CIE methodology | | | | | Newmethodology | | | |
|-----------------|-----------------|-----------|-------|-------|----------|----------------|-------------|------|-------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{av} | $Var \sigma^2$ | $SD \sigma$ | Coef | U_s |
| Sidewalk | 4.20 | 42.20 | 0.20 | 0.10 | 21.52 | | | | |
| Driveway | 2.61 | 35.60 | 0.18 | 0.07 | 14.49 | | | | |
| Total | 2.61 | 42.20 | 0.14 | 0.06 | 18.01 | | | | |

Table 7. Illuminance results and uniformity (according to the CIE method) and statistical indicators according to the new methodology.

Note that for the case displayed in Figure 4 and Table 5, there are over-illuminated zones contrasting the shadow zones close to the emitting focus; therefore, the illumination appears more homogeneous. The illuminance as a function of distance shows a constant decrease. However, this effect is misleading, as the maximum and minimum illuminances are considerably separated, dispersed and poorly focused with respect to the average value.

In general, for the DLED lamp (Table 7), although the average illuminance is also higher than the corresponding average for the MH lamp and slightly lower than that of the SSIE, there is a significant contrast between the maximum and average illuminances. This result indicates a moderate uniformity, as it has been obtained from the average and extreme uniformities. For the standard deviation and coefficient of variation, we obtain a value 22 percentage points higher than that of the MH lamp (Table 3) and 21 points lower with respect to that of the SSIE lamp (Table 5).

4.3. REXDOS 27045-W LED LAMP

Table 8 shows the results obtained for the new methodology, and Figure 5 shows a 3D representation of the data in an Excel sheet.

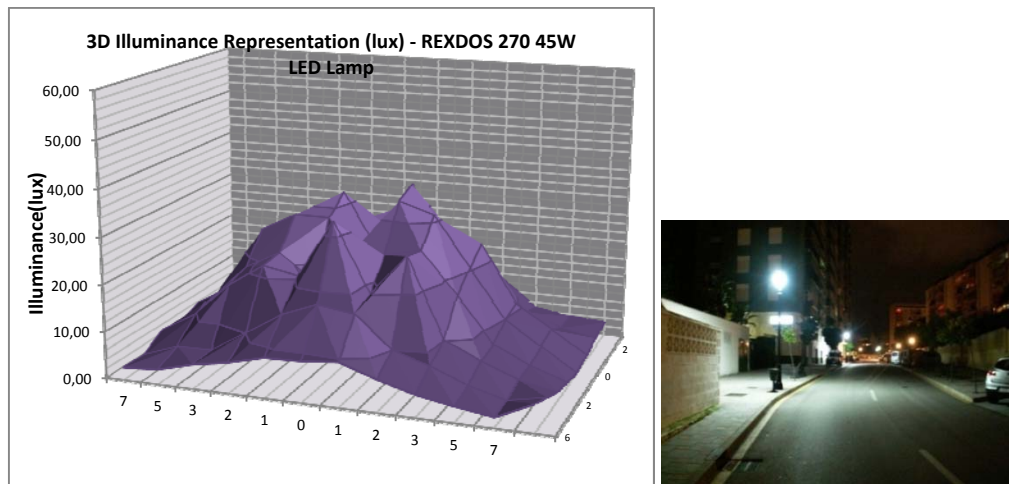


Fig. 5. 3D illuminance representation (lux) – REXDOS 270 45-WLED lamp, manufactured by REXDOS. Source: Elaborated by the authors.

| MATRIX OF ILLUMINANCES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Distance (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 2.73 | 3.22 | 5.25 | 6.60 | 8.56 | 8.76 | 9.53 | 6.91 | 4.75 | 3.39 | 2.22 | 6.0 |
| 4 | 2.57 | 5.31 | 5.41 | 10.04 | 14.80 | 17.81 | 16.67 | 10.02 | 7.64 | 4.52 | 2.40 | 4.0 |
| 2 | 5.42 | 9.71 | 16.91 | 22.00 | 20.60 | 32.90 | 18.17 | 27.00 | 10.26 | 6.63 | 3.61 | 2.0 |
| 1 | 4.50 | 10.89 | 18.50 | 22.40 | 16.54 | 23.50 | 24.10 | 25.80 | 17.01 | 7.32 | 3.68 | 1.0 |
| 0 | 6.37 | 10.82 | 24.70 | 28.70 | 28.70 | REXDOS 270 | 33.60 | 31.20 | 20.50 | 9.86 | 4.87 | 0.0 |
| 1 | 5.08 | 11.17 | 22.40 | 18.73 | 32.40 | 19.70 | 35.40 | 21.40 | 23.40 | 10.80 | 5.94 | 1.0 |
| 2 | 4.90 | 7.38 | 11.40 | 20.50 | 23.80 | 22.50 | 27.10 | 21.00 | 11.20 | 6.24 | 3.51 | 2.0 |
| 3 | 3.19 | 5.02 | 11.57 | 15.56 | 18.87 | 25.70 | 17.49 | 17.22 | 10.94 | 4.80 | 3.57 | 3.0 |

Table 8. Matrix of measurements with respect to the distance expressed in meters and illuminance measurements expressed in lux for the REXDOS 270 45-WLED lamp. Source: Elaborated by the authors.

| | <i>CIE methodology</i> | | | | <i>New methodology</i> | | | | |
|-----------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|------------------------|----------------|-------------|--------|-------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{av} | $Var \sigma^2$ | $SD \sigma$ | Coef | U_s |
| <i>Sidewalk</i> | 3.19 | 35.40 | 0.20 | 0.09 | 16.26 | | | | |
| <i>Driveway</i> | 2.22 | 32.90 | 0.19 | 0.07 | 11.51 | | | | |
| Total | 2.22 | 35.40 | 0.16 | 0.06 | 13.89 | 82.00 | 9.05 | 0.6521 | 65.21 |

Table 9. Illuminance results and uniformity (according to the CIE method) and statistical indicators according to the new methodology.

According to the results (Table 9), the average uniformity computed with the traditional method (U_m) and the new statistical uniformity (U_s) are very similar for both the REXDOS 270 45-W LED lamp and the DLED 56-WLED lamp (Table7).

4.3 REXDOS 360 50-W LED LAMP

Table 10 shows the illuminance matrix obtained from field measurements. The results are displayed in three dimensions using an Excel sheet (see Fig. 6).

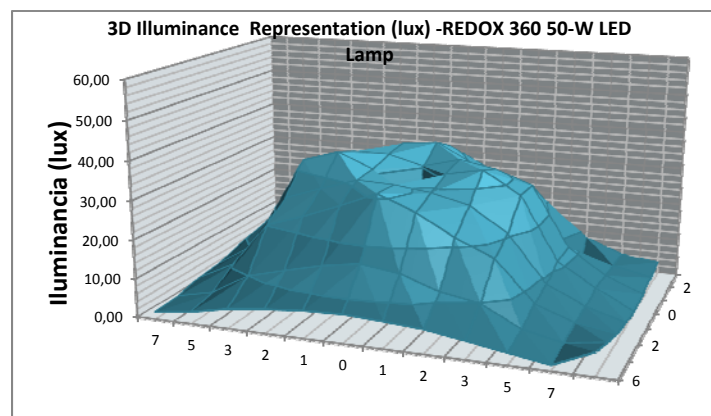


Fig. 6. 3D illuminance representation (lux) – REXDOS 360 50-WLEDlamp, manufactured by REXDOS. Source: Elaborated by the authors.

| MATRIX OF ILLUMINANCES | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| Distance (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 1.82 | 3.09 | 5.10 | 6.23 | 7.07 | 7.39 | 6.87 | 6.17 | 4.67 | 3.06 | 1.48 | 6.0 |
| 4 | 2.35 | 4.47 | 9.97 | 12.49 | 14.81 | 16.42 | 15.01 | 11.60 | 9.87 | 4.70 | 2.60 | 4.0 |
| 2 | 3.85 | 8.53 | 20.20 | 23.30 | 27.10 | 31.10 | 27.20 | 21.80 | 17.53 | 7.24 | 3.61 | 2.0 |
| 1 | 4.39 | 10.47 | 24.50 | 27.90 | 31.00 | 30.60 | 29.40 | 27.00 | 20.70 | 8.61 | 3.95 | 1.0 |
| 0 | 6.30 | 15.16 | 32.30 | 35.20 | 31.30 | REXDOS 360 | 31.60 | 33.50 | 27.70 | 11.14 | 5.10 | 0.0 |
| 1 | 5.03 | 11.67 | 26.00 | 33.00 | 32.90 | 30.40 | 33.00 | 31.20 | 27.60 | 11.70 | 5.01 | 1.0 |
| 2 | 4.33 | 10.86 | 24.30 | 28.90 | 33.60 | 34.60 | 29.40 | 24.40 | 21.60 | 10.5 | 4.31 | 2.0 |
| 3.0 | 4.20 | 8.24 | 17.28 | 25.10 | 30.00 | 31.30 | 26.40 | 19.60 | 14.31 | 8.20 | 4.19 | 3.0 |

Table 10. Matrix of measurements with respect to the distance expressed in meters and illuminance measurements expressed in lux for the REXDOS 360 50-W LED lamp, manufactured by REXDOS. Source: Elaborated by the authors.

| | <i>CIE methodology</i> | | | | | <i>Newmethodology</i> | | | |
|-----------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------|---------|-------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{av} | $Var \sigma^2$ | $SD \sigma$ | Coef | U_s |
| <i>Sidewalk</i> | 4.19 | 35.20 | 0.20 | 0.12 | 21.00 | | | | |
| <i>Road</i> | 1.48 | 31.10 | 0.11 | 0.05 | 12.89 | | | | |
| Total | 1.48 | 35.20 | 0.09 | 0.04 | 16.94 | 124.34 | 11.15 | 0.65807 | 65.80 |

Table 11. Illuminance results and uniformity (according to the CIE method) and statistical indicators according to the new methodology.

Although both the REXDOS 270 and DLED lamps (Table 11) present a very low average uniformity according to the traditional method ($U_m=0.09$), when we compute the statistical uniformity (U_s), we obtain similar values for both models (Tables 9 and 7).

4.4 ETILED 51-W LED LAMP

After applying the described method to the 51-W LED lamp manufactured by ETILED, we obtained the illuminance matrix shown in Table 12. We also obtained a graphical representation in three dimensions using an Excel sheet (see Fig. 7).

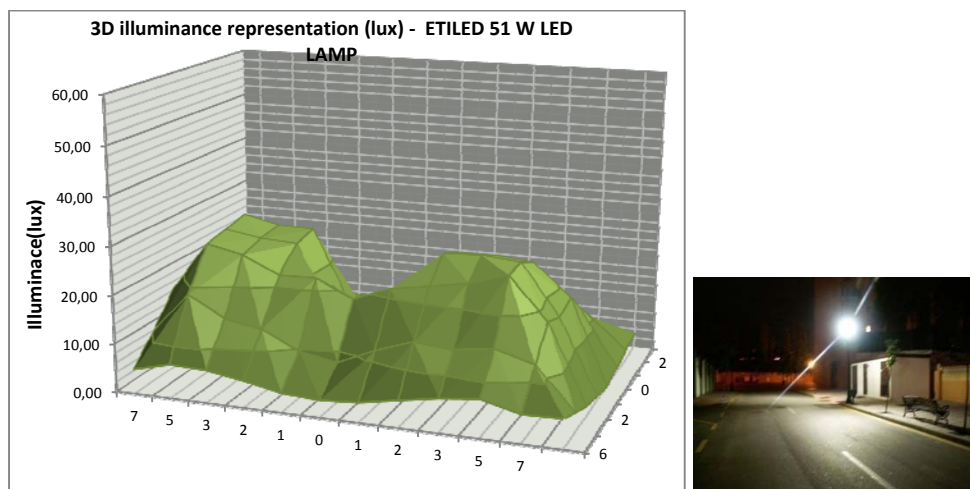


Fig. 7. 3D illuminance representation (lux) –ETILED 51-W LED lamp, manufactured by ETILED. Source: Elaborated by the authors.

| MATRIX OF ILLUMINANCES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Distance (m) | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | |
| 6 | 5.12 | 7.01 | 6.78 | 5.58 | 4.02 | 3.59 | 4.10 | 5.54 | 6.92 | 7.80 | 5.79 | 6.0 |
| 4 | 10.46 | 18.80 | 14.71 | 13.28 | 9.68 | 8.19 | 11.57 | 14.27 | 13.56 | 14.70 | 12.36 | 4.0 |
| 2 | 16.74 | 27.10 | 25.50 | 22.00 | 22.20 | 18.60 | 21.50 | 22.80 | 24.20 | 26.60 | 18.10 | 2.0 |
| 1 | 17.72 | 28.00 | 26.80 | 26.30 | 10.80 | 15.14 | 11.54 | 27.20 | 27.50 | 26.80 | 16.36 | 1.0 |
| 0 | 17.01 | 29.10 | 27.40 | 27.30 | 12.16 | ETILED 51 W | 12.91 | 25.00 | 25.20 | 24.50 | 17.92 | 0.0 |
| 1 | 11.49 | 15.83 | 16.42 | 13.61 | 7.85 | 7.29 | 8.12 | 13.01 | 15.53 | 16.83 | 12.92 | 1.0 |
| 2 | 5.85 | 7.09 | 6.80 | 6.25 | 6.06 | 6.80 | 7.57 | 9.20 | 9.22 | 10.52 | 8.80 | 2.0 |
| 3.0 | 4.09 | 4.61 | 4.83 | 5.32 | 5.69 | 5.50 | 5.60 | 5.30 | 4.82 | 4.60 | 4.10 | 3.0 |

Table 12. Matrix of measurements with respect to the distance expressed in meters and illuminance measurements expressed in lux for the ETILED 51-W LED lamp. Source: Elaborated by the authors.

| | CIE methodology | | | | | New methodology | | | |
|-----------------|-----------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|----------------|--------------|
| | L_{min} | L_{max} | U_m | U_g | L_{av} | $Var \sigma^2$ | $SD \sigma$ | Coef | U_s |
| <i>Sidewalk</i> | 4.09 | 29.10 | 0.35 | 0.14 | 11.54 | | | | |
| <i>Driveway</i> | 3.59 | 28.00 | 0.23 | 0.13 | 15.53 | | | | |
| Total | 3.59 | 29.10 | 0.27 | 0.12 | 13.53 | 61.60 | 7.89 | 0.57999 | 57.99 |

Table 13. The results for illuminance and uniformity (according to the CIE method) and statistical indicators according to the new methodology.

Although the values for the maximum illuminance are lower than those for the other LED lamps (Table 13 and Fig. 17), there is a high concentration of illuminance near the average. This finding is reflected in the low standard deviation of the average illuminance and the corresponding low value for the coefficient of variation, which is associated with an optimal statistical uniformity (U_s).

5.- DISCUSSION AND CONCLUSIONS

After applying the previously defined method to analyse graphical representations and statistical indicators of the illuminance, we can conclude that the average uniformity (measured separately) is directly related to the coefficient of variation (expressed as a percentage), defined as the ratio of the standard deviation of the obtained illuminance in the sample matrix and the average illuminance.

The statistical uniformity (U_s) allows for a more precise evaluation of the illuminance quality of the luminaires. In the analysed cases, we observed over-illuminated zones very close to dark zones, which occur due to the inherent directionality of the LED light sources.

According to the obtained values, we can conclude that an optimal average uniformity corresponds to low coefficients of variation. Very low values of this parameter indicate high or optimal values for the average uniformity (see Table 14 and Fig. 8).

After computing the average illuminance, the average uniformity (U_m), the standard deviation and the coefficient of variation (as a new parameter for measuring average uniformity) for the six analysed light sources, we can conclude that the luminaires can be classified from higher to lower statistical uniformity (U_s) values (see Table 14).

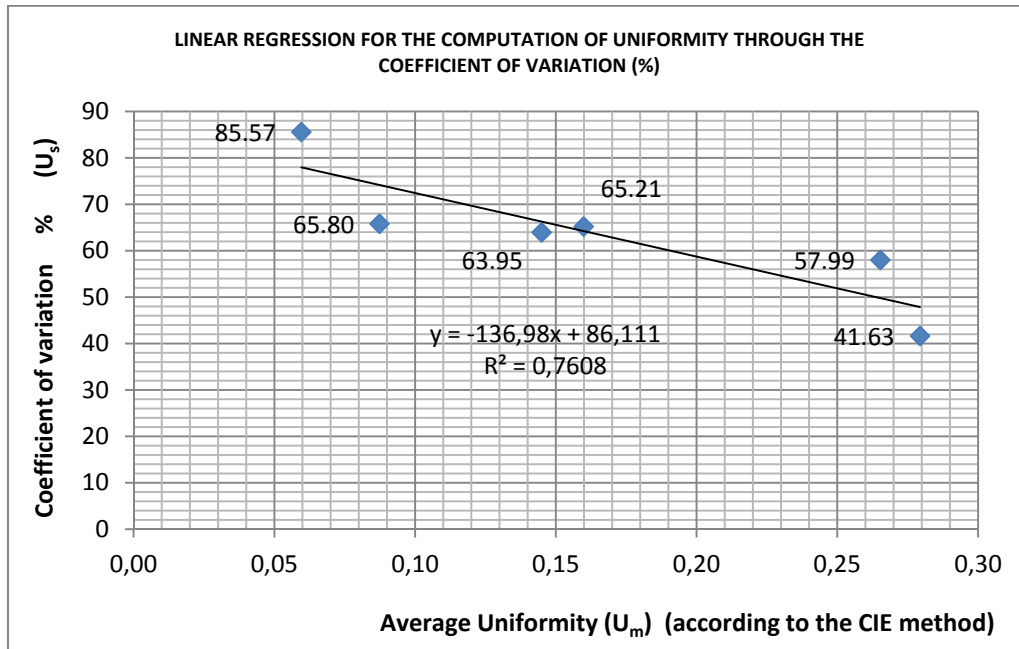


Figure 8. Linear regression for the coefficient of variation (%) (U_s) (proposed methodology) as a function of the average uniformity (U_m) (according to the CIE method).

The ordering of the analysed lamps from higher to lower coefficients of variation or statistical uniformity (U_s) gives a precise description of the uniformity, which differs slightly from the classification obtained from the traditional method (U_m) (Table 14).

| Classification | Lamp Type | Average Illuminance (lux) | Average Uniformity (U_m) (according to the traditional CIE method) | Statistical Uniformity (U_s) (according to the proposed method) |
|----------------|-----------------------|---------------------------|--|---|
| 1 | PHILIPS 150-W MH Lamp | 9.27 | 0.28 | 41.63 |
| 2 | ETILED 45-W Lamp | 13.53 | 0.27 | 57.99 |
| 3 | REXDOS 270 45-W Lamp | 13.89 | 0.16 | 65.21 |
| 4 | DLED 54-W Lamp | 18.01 | 0.14 | 63.95 |
| 5 | REXDOS 360 50-W Lamp | 16.94 | 0.09 | 65.80 |
| 6 | SSIE 45-W Lamp | 17.80 | 0.06 | 85.57 |

Table 14. A comparison of the uniformity according to the applied method.

With the traditional method, we obtain similar average uniformity values (U_m) for both the MH and the ETILED lamps, as there is very little variation. However, the statistical uniformity (U_s) for the MHLamp is 16.35 points higher than that of the ETILED lamp, despite both lamps having very similar U_m values: 0.28 and 0.27, respectively.

Similar results are found for the REXDOS 270, DLED and REXDOS 360 lamps, which have variable U_m uniformities of 0.16, 0.14 and 0.09, respectively; the first two lamps exhibit similar statistical uniformities (U_s) (65.21% and 63.95%, respectively). The third lamp has a statistical uniformity of 65.80%, exceeding the uniformity of the other two lamps but remaining at a similar level. This clearly demonstrates the weakness of the traditional method. The 3D graphical representations confirm these statistical findings (note the similarity among the three 3D graphs).

This phenomenon is also observed for the REXDOS 360 and SSIE lamps. The uniformity (U_m) values vary by three tenths of a percentage point, 0.09 and 0.06, respectively. However, the statistical uniformity values differ by nearly 20 percentage points, 65.80 and 85.57, respectively.

Based on this comparative study, it has been shown that LED lamps perform at sufficient illuminance levels. However, in some cases, uniformity is a limiting factor for this emerging technology.

In this study, we have shown that the uniformity can be measured using statistical tools such as the standard deviation, the average illuminance and the coefficient of variation.

The new methodology presents potential for uniformity measurements of luminaires that operate with LEDs or any other type of lighting technology, even if they exhibit a high distortion of the average illuminance (U_m) due to their directional characteristics. Therefore, although it is valid for discharge lamps, we consider the concept used to define the average uniformity, as recommended by the CIE, to be inaccurate for luminaires with multiple light sources, such as LEDs.

Using the proposed evaluation method, we have shown that an optimal uniformity can be ensured when the graphical representation shows a uniform trend without crests (over-illuminated zones) or deep valleys (sub-illuminated zones). Optimal uniformity can also be obtained when there is low dispersion in the illuminance (as a function of distance) with respect to the average illuminance (small standard deviation of the average illuminance).

Finally, this study reaffirms the CIE definition for the concept of average illuminance in discharge lamps; however, this concept requires a redefinition in the case of LED technologies that make use of various light sources, as these show a significant multi-directional behaviour generated by the presence of several LED diodes.

A more precise method is required for computing and comparing uniformities. In this regard, the statistical methodology proposed in this paper can resolve this issue and can more rigorously compute average uniformities.

5.- ACKNOWLEDGEMENTS

We acknowledge support provided by the Lighting Technical Service of the City of Fuengirola and express our particular gratitude to Dr. Rafael Martin Vega.

6.- REFERENCES

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

[1] Kostic M, Djokic L. Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting. Energy. August 2009; 34: 1565-1572

[2] Guide for energy savings and efficiency in municipalities. Energy Agency from Andalusia; Sevilla SE-232-2011. www.agenciaandaluzadelaenergia.es

[3].Saunders H. D, Tsao J.Y. Rebound effects for lightin". Energy Policy. 2012; 49: 477-478

- [4] Atkinson B. A., McMahon J. E., Nadel M. A review of U.S. and Canadian lighting programs for the residential, commercial, and industrial sector. *Energy* 1993 ; 18:145-158,
- [5] Mills E., Piette M. A. Advanced energy-efficient lighting systems: progress and potential. *Energy* 1993; 18: 75-97,
- [6] Mahapatra S., Chanakya H.N, Dasappa S., Evaluation of various energy devices for domestic lighting in India: Technology, economics and CO2 emissions. *Energy for Sustainable Development*. December 2009; 13 :271-279.
- [7] Radulovic D, Skok S, Kirincic V. Energy efficiency public lighting management in cities. *Energy*. April 2011; 36:1908 -1915
- [8] Hermoso Orzáez MJ, de Andrés Díaz JR, Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps, *Energy*. April 201; 52: 258-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>
- [9] Rea M.S.. The future of LED lighting: Greater benefit or just lower cost. *Lighting Research and Technology*. 2010; 42: 370
- [10] CIE 194:2011. " On-site Measurement of the Photometric Properties of Road and Tunnel Lighting ". ISBN 978 3 901906 92 3
- [11] Zalewski S. A proposed method for the calculation of light-emitting diode road lighting. *Lighting Research and Technology*. June 2012; 44 : 186-196.
- [12] Svilainis L., LED directivity measurement in situ., *Measurement*. July 2008; 41:647-654, ISSN 0263-2241, 10.1016/j.measurement.2007.09.003.
- [13]. Gil-de-Castro A, Moreno Muñoz A., Larsson A., de la Rosa JJG, Bollen MHJ. LED street lighting: A power quality comparison among street light technologies .*Lighting Research and Technology*, 1477153512450866, first published on August 7, 2012
- [14] Wen-Shing S, Chih-Hsuan T, Yi-Han H. Simulating the Illuminance and Efficiency of LEDs Used in General Household Lighting., *Physics Procedia*. 2011; 19: 244-248, ISSN 1875-3892, 10.1016/j.phpro.2011.06.156.
- [15] Villanueva I, Lázaro I, Anzurez J. .Reliability analysis of LED-based electronic device. "Procedia Engineering. 2012; 35:260 – 269
- [16] N. Pousset, B. Rougié, A. Razet. Impact of current supply on LED colour. *Lighting Research and Technology*. Diciembre 2010; 42: 371 - 383.
- [17] Gómez-Lorente, D; Rabaza, O; Espin Estrella, A; Peña-García, A; (2014) "A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm". *Expert System with Applications*, 2013.Vol.40.Nº 6 p.2156-2164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.10.026>
- [18] O. Rabaza, A. Peña-García, F. Pérez-Ocón, Gómez-Lorente, D. A simple method for designing efficient public lighting, based on new parameter relationships *Expert Systems with Applications*, Volume 40, Issue 18, 15 December 2013, Pages 7305-7315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.037>

En Madrid, a 7 de Febrero de 2014.

Sesiones Científicas XL Simposium Nacional de Alumbrado - Selección de Trabajos

El Comité de selección de Trabajos para la presentación en las sesiones Científicas del XL Simposium de Alumbrado, que se celebrará en Málaga del 28 al 31 de Mayo del 2014 ha elegido el trabajo presentado en la modalidad de Ponencia, cuyos título, ámbito en que se encuadra, así como la empresa y ponentes que la expondrán, quedan expuestos a continuación:

Por todo lo anterior, les rogamos que, antes del próximo 18 de Febrero nos comunique si desea seguir adelante con la presentación de su trabajo, solicitándole igualmente que antes del día 21 de Marzo obre en poder de la Secretaría del CEI el texto completo de su trabajo, en un documento informatizado, utilizando el formato que se encuentra colgado de la página Web del CEI (www.ceisp.com), requisito imprescindible para poder incluirlo en el CD y en la página web.

Título de la Ponencia: (35) Fuengirola: LED o Descarga, confirmando la eficiencia energética

Ambito: REALIZACIONES

Empresa: Ayuntamiento de Fuengirola. Alumbrado Técnico Público S.A. (ATP iluminación), Universidad de Málaga

Autor o autores: Manuel Hermoso, Guillermo Redrado, Jose Ramon de Andres

Le rogamos que tome muy buena nota del tiempo para exponer su ponencia incluidas las preguntas al final de la misma que será de 15 minutos. Los moderadores cuidarán de que este punto se cumpla. Además deberán enviarnos antes del 20 de Mayo, el documento informatizado, que presentarán en el Simposium el día de su exposición, para que pueda ser cargado antes del evento. Los documentos se enviarán a cei.secretaria@ceisp.com. La entrega de trabajos fuera de los plazos indicados, y en orden a optimizar el desarrollo del programa de exposición, puede penalizar al autor, su inclusión en la lista de ponencias admitidas para futuros Simposium en este formato

Igualmente, le informamos que, según acuerdo de la Junta de Gobierno del CEI, TODAS LAS PERSONAS QUE PRESENTEN PONENCIAS DEBEN ESTAR INSCRITAS EN EL SIMPOSIUM Y HABER ABONADO LA CORRESPONDIENTE INSCRIPCIÓN, ASÍ COMO PERTENECER A LAS ENTIDADES COLABORADORAS DEL CEI, EN CASO DE EMPRESAS, Y/O SOCIOS NUMERARIOS DE LA ASOCIACIÓN, EN EL CASO DE PERSONAS INDIVIDUALES.

Así mismo, le informamos que el resumen enviado de su ponencia, estará colgado en la página web del CEI, como información del XL Simposium Nacional de Alumbrado.

Quedamos a la espera de sus noticias, y aprovechamos la ocasión para saludarles muy atentamente.

Fdo: Jesús Gil



Secretario General del CEI

4.11. ANEXO: AYUDAS PUBLICAS DE LA U.M.A PARA LA TESIS

SOLICITUD DE AYUDAS DOCTORALES PARA LA REALIZACIÓN DE TESIS

(Según el Plan de Ayudas para Estudiantes de Doctorado de la Universidad de Málaga, aprobado en Consejo de Gobierno de 18 de abril de 2013)

DATOS PERSONALES

D/D^a: Manuel Jesús Hermoso Orzáez

D.N.I./Pasaporte: 26016942D Nacionalidad: Español

Dirección Postal: 29640

E-mail: mhermosoorzaez@gmail.com Tel: 610389020

DATOS DE LA TESIS

Título Tesis: Los Servicios de alumbrado público hacia la gestión municipal eficiente en el entorno local actual de políticas medioambientalmente sostenibles. Aplicación de las TIC's. Telegestión

Programa de Doctorado: 35.INGENIERIA Y GESTIÓN DE PROYECTOS

Fecha inicio doctorado: 04-03-2009 Fecha lectura tesis: Calificación: Cum Laude :

Director(es): Dr. José Ramón de Andrés Díaz (DNI:25080054)

Tesis con mención de Doctor Internacional: Tesis realizada en régimen de cotutela:

TIPO DE AYUDA QUE SE SOLICITA

- Por publicación de contribuciones de calidad (Indique los datos de dichas publicaciones en la siguiente página).
- Por defensa de tesis (indique las publicaciones que avalan la tesis en la página siguiente).
- Por colaboración con empresas (Empresa donde trabaja el director externo de la tesis:).
- Por tesis Andalucía Tech (Polo de excelencia en donde se enmarca el tema de la tesis:).

PRESENTACIÓN DE SOLICITUDES

- Según se recoge en el Plan de Ayudas para Estudiantes de Doctorado de la Universidad de Málaga, las solicitudes deberán presentarse en cualquier momento del año, a través del Registro General de la Universidad de Málaga, o a través de cualquiera de las opciones recogidas en el apartado 4, del artículo 38 de la Ley 30/92 de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.
- Las solicitudes podrán presentarse hasta cuatro meses después de la defensa de su tesis doctoral.

DOCUMENTACION PRESENTADA

- Documentos que acreditan las publicaciones y contribuciones resultantes de la tesis que se presentan para obtener la ayuda, así como una descripción de los indicios de calidad de cada una de ella, y su valoración de acuerdo a los criterios establecidos por la ANECA.
- Fotocopia del documento que acredita haber realizado la lectura de la Tesis Doctoral o, en su caso, fotocopia del recibo de haber abonado los derechos de expedición del título de Doctor (sólo para las ayudas por defensa de tesis, tesis con empresas y tesis Andalucía Tech).

Los abajo firmantes declaran que las contribuciones presentadas para obtener la ayuda no se utilizarán para obtener ayudas similares por parte del mismo doctorando o de otros autores de la contribución.

En Málaga, a 20 de Octubre de 2013.

El Doctorando:

El tutor y/o Directores:



Fdo.: Manuel J.Hermoso

Fdo.: Dr. José Ramón de Andrés Díaz

INFORMACIÓN SOBRE LAS CONTRIBUCIONES QUE AVALAN LA TESIS

Título: Comparative study of Energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps.

Autores (por orden de firma): Manuel J. Hermoso Orzaez, José Ramón de Andrés Díaz

Tipo de publicación (Artículo, Libro, etc.): Artículo

Datos de la Contribución:

(Título de la revista, año de publicación, editorial, páginas (inicial-final), DOI, y toda aquella otra información que permita identificar la publicación)
ENERGY,(2013),Elsevier,52:258-264, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>

Indicios de calidad:

(p.ej., índice de impacto, categoría y posición relativa en el listado de JCR, número de citas, y cualquier otra información que permita avalar la calidad de la publicación y justificar su puntuación según los criterios de la ANECA)

Issn: 0360-5442. Total citas:13276.Factor de Impacto: 3.651.Factor de Impacto a 5 años:4.107.
Quartil: Q1.Inmediacy Index: 0,693.Citable Items: 775. Cited Half life: 4.1.Citing Half life: 5.4
Eigen factor Score. 0.02978. Article influence Score: 0.859

Category names: Energy and Fuels. Journal Rank in Category : 14. Total Journals in category: 81
Category names: Thermodynamics. Journal Rank in Category : 2. Total Journals in category: 54

>>Indique si ya le ha sido concedida ayuda por esta publicación: o la está solicitando ahora:

Título: Análisis comparativo y justificativo para el cambio a LEDs en instalaciones con lámparas de halogenuro metálico

Autores (por orden de firma): Manuel J. Hermoso Orzaez, José Ramón de Andrés Díaz

Tipo de publicación (Artículo, Libro, etc.): Artículo

Datos de la Contribución:

(Título de la revista, año de publicación, editorial, páginas (inicial-final), DOI, y toda aquella otra información que permita identificar la publicación)
DYNA-BILBAO.(2013).Noviembre-Diciembre. Vol 88: nº6. (Publicado previamente por el procedimiento DYNA Acelerado previamente en la Web). <http://dx.doi.org/10.6036/5803>

Indicios de calidad:

(p.ej., índice de impacto, categoría y posición relativa en el listado de JCR, número de citas, y cualquier otra información que permita avalar la calidad de la publicación y justificar su puntuación según los criterios de la ANECA)

Issn: 0012-7361. Total citas: 64.Factor de Impacto: 0.237. Factor de Impacto a 5 años: 0.160.
Quartil: Q4. Inmediacy Index: 0,049. Citable Items: 61. Cited Half life: 0.
Eigen factor Score. 0.00018. Article influence Score: 0.030

Category name: Engineering, Multidisciplinary.

Journal Rank in Category :81.

Total Journals in category: 90

>> Indique si ya le ha sido concedida ayuda por esta publicación: o la está solicitando ahora:

RESOLUCIÓN DE AYUDAS DOCTORALES PARA LA REALIZACIÓN DE TESIS

(Según el Plan de Ayudas para Estudiantes de Doctorado de la Universidad de Málaga, aprobado en Consejo de Gobierno de 18 de abril de 2013)

Número de Resolución: **2013 – 060**

Tras ser evaluada la solicitud de ayuda de doctorado presentada por D/D^a: Manuel Jesús Hermoso Orzáez con fecha 05/11/2013, el Centro Internacional de Posgrado y Escuela de Doctorado de la Universidad de Málaga

RESUELVE:

Conceder las ayudas que se detallan a continuación, junto con los importes que se indican para cada una de ellas

| | |
|---|--------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Por publicación de contribuciones de calidad. | Importe concedido: 1.400,00 €. |
| <input type="checkbox"/> Por defensa de tesis. | Importe concedido: . |
| <input type="checkbox"/> Por colaboración con empresas | Importe concedido: . |
| <input type="checkbox"/> Por tesis Andalucía Tech | Importe concedido: . |
| TOTAL: 1.400,00 € | |

Denegar la solicitud de ayuda por los motivos que a continuación se detallan.

JUSTIFICACIÓN DE LA AYUDA:

1. Tal y como se recoge en el Plan de Ayudas para Estudiantes de Doctorado de la Universidad de Málaga, estas ayudas podrán ser utilizadas para cubrir gastos asociados a:

- a) la encuadernación de la tesis;
- b) la publicación de los artículos en revistas o de las contribuciones que avalan la tesis;
- c) el material fungible utilizado en la realización del trabajo;
- d) la asistencia a congresos internacionales en donde se publiquen resultados de la tesis;
- e) la realización de estancias en empresas, universidades o centros de investigación de fuera de Málaga;
- f) en su caso, el viaje del director externo a la Universidad de Málaga para asistencia a la defensa de la tesis, si éste residiera fuera de la provincia de Málaga.

2. El doctorando dispondrá de hasta seis meses después de leer la tesis para justificar la ayuda concedida. Todos los gastos deberán ser justificados mediante factura o recibo (a su nombre o al de otros, pero *no se admiten facturas a nombre de la Universidad de Málaga*). En el caso de asistencia a congresos, necesitará presentar además una copia de la comunicación presentada. En el caso de estancias, deberá presentar justificación por parte del investigador responsable.

En Málaga, a 11 de Noviembre de 2013.



Fdo.: Antonio Vallecillo Moreno
Director del Centro Internacional de Posgrado y Escuela de Doctorado



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

0617062523

0617062523

DOCUMENTO DE PAGO DE MATRÍCULA DOCTORADO (PERIODO DE INVESTIGACIÓN: TESIS) CURSO ACADÉMICO 2013 / 2014

SECCIÓN DE TERCER CICLO

DATOS PERSONALES DEL ESTUDIANTE QUE FORMALIZA LA MATRÍCULA

Primer apellido: HERMOSO Segundo apellido: ORZAEZ
Nombre: MANUEL JESÚS D.N.I.: 26016942 Expediente: 7304
Dirección: C/ Narciso, 4 portal 1 8ºB Código Postal: 29640 Provincia: Málaga
Localidad: Fuengirola

PROYECTO DE TESIS EN EL QUE FORMALIZA LA MATRÍCULA

PROGRAMA DE DOCTORADO: 35. INGENIERÍA Y GESTIÓN DE PROYECTOS

Denominación del Proyecto de Tesis

LOS SERVICIOS DE ALUMBRADO PÚBLICO HACIA LA GESTIÓN MUNICIPAL EFICIENTE. EN EL ENTORNO LOCAL ACTUAL DE POLÍTICAS MEDIOAMBIENTALMENTE SOSTENIBLES. APLICACIÓN DE LAS TIC'S. TELEGESTIÓN.

LIQUIDACIÓN DE PRECIOS PÚBLICOS POR LA MATRÍCULA QUE SE FORMALIZA

TIPO DE MATRÍCULA: ORDINARIA

LIQUIDACIÓN:

- Por servicios docentes.....
- A descontar por matricula de honor.....
- Por servicios administrativos.....
- Por seguro escolar.....
- Por carnet de actividades deportivas.....

Importe de la matrícula

60,30 eur.
0,00 eur.
0,00 eur.
0,00 eur.
0,00 eur.
60,30 eur.

TOTAL MATRÍCULA.....



FORMA DE PAGO: ÚNICO

en Internet, a través de Unicaja (www.univia.es) o del Santander (www.gruposantander.com); en cajeros automáticos de Unicaja o en la red de cajeros 4B; o directamente en cualquiera de las oficinas de Unicaja o del Santander.

(fecha, firma y sello o impresión mecánica de la correspondiente oficina de Unicaja)

A ABONAR (Plazo límite: 4/10/13)

EUR****60,30

Este documento carece de validez si no está autenticado por la correspondiente impresión mecánica o en su defecto por sello y/o firma de persona autorizada para ello

Fecha y hora de emisión: 2/10/13 11:56:46

Este documento anula cualquier otro emitido con anterioridad

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