

Viabilidad económica del control de la iluminación fotovoltaica en autopistas del Ecuador

Carlos Vargas, David Guevara, Alberto Ríos

¹ Estudiante de pregrado, Universidad Técnica de Ambato, Avenida los Chasquis y Río Payamino, Ambato, Ecuador, 18012.

² Profesor Titular, Universidad Técnica de Ambato, Avenida los Chasquis y Río Payamino, Ambato, Ecuador, 18012.

³ Investigador Prometeo, Universidad Técnica de Ambato, Avenida los Chasquis y Río Payamino, Ambato, Ecuador, 18012.

Autores para correspondencia: {c.vargas, d.guevara, a.rios}@uta.edu.ec

Fecha de recepción: 19 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 20 de octubre de 2014

RESUMEN

Uno de los problemas más críticos de la operación y gestión de las autopistas es el elevado consumo de energía en los sistemas de iluminación. El desarrollo e implementación de innovadores sistemas de control y la integración de sistemas renovables de generación eléctrica en los sistemas de alumbrado permitirán obtener un significativo ahorro energético en las autopistas. El Gobierno del Ecuador ha iniciado un ambicioso proyecto de construcción de nuevas autopistas en el país. La implementación práctica de sistemas de control inteligente en las instalaciones fotovoltaicas de iluminación implicará un considerable ahorro de energía y el aprovechamiento de un recurso renovable e inagotable en las futuras autopistas del Ecuador. En el presente artículo, se describen las funcionalidades y principales características de las denominadas autopistas inteligentes y de las innovadoras técnicas de control de los sistemas de iluminación. Asimismo, se presenta una evaluación preliminar del impacto en la reducción del consumo energético y del gasto económico en el alumbrado de autopistas, gracias a la sustitución de luminarias convencionales por luminarias de elevada eficiencia y la instalación de sistemas fotovoltaicos de iluminación. Además, se evalúa la influencia de la implementación de un sistema de control inteligente en las instalaciones fotovoltaicas de iluminación para las futuras autopistas del Ecuador.

Palabras clave: Alumbrado público, autopistas inteligentes, control de iluminación, sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

A most critical problem of highways is the high energy consumption associated with the lighting systems. The development of innovative control systems and the integration of renewable power generation systems in lighting systems allow for significant energy savings in highways. The Government of Ecuador has launched an ambitious project to build new highways throughout the country. The practical implementation of intelligent control lighting photovoltaic systems involves considerable energy savings and use of renewable and inexhaustible resource in the future highway network of Ecuador. In this paper, the features of so-called intelligent highways and innovative techniques for the control of lighting systems are described. Also, an introductory assessment of the potential impact on reducing the power consumption is presented.

Keywords: Lighting, smart highways, light control, photovoltaic systems.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las grandes preocupaciones de los operadores de las modernas autopistas es la reducción del consumo energético, asociado a los sistemas de iluminación y la mejora de la información a los usuarios (Ekrias *et al.*, 2008).

Diversos estudios e informes demuestran que la implementación de innovadoras técnicas de control y la integración de energías renovables en los sistemas de iluminación permite reducir el elevado consumo de energía en las autopistas. Asimismo, en las modernas autopistas se advierte un incesable proceso de modernización y digitalización de los dispositivos de información, especialmente en paneles y carteles. En este sentido, el usuario puede recibir y visualizar información relacionada con los diferentes eventos y contingencias que suelen ocurrir en las autopistas (atascos, inundaciones, retenciones y accidentes), además de información meteorológica de interés (Holt & Pengelly, 2008; Behrendorff Poulsen *et al.*, 2013).

En algunos países industrializados se ha desarrollado e implementado el concepto de autopista inteligente. Una autopista inteligente es un espacio destinado a un alto nivel de flujo vehicular, que brinda servicios en tiempo real interactuando con los usuarios. Las autopistas inteligentes se caracterizan por disponer de una serie de funcionalidades que proporcionan información y seguridad a los usuarios. En (Tsugawa, 2008; Males *et al.*, 2012) se presenta información sobre proyectos de autopistas inteligentes en fase de ejecución en Holanda, Noruega, Reino Unido, Alemania, Japón.

En los últimos años, el gobierno del Ecuador ha elaborado e impulsado un Plan Estratégico de Movilidad. El mencionado Plan consiste en la promoción y financiación de actividades de reparación, modernización y construcción de la infraestructura vial en el Ecuador (MTOPE, 2011). El alto consumo energético en los sistemas de iluminación de las autopistas ecuatorianas en construcción y planificación implicará un elevado coste económico en su gestión y operación (MTOPE, 2012).

En este artículo, se presenta un análisis técnico y económico del impacto en el consumo energético debido a la implementación de sistemas de control inteligente en los sistemas de iluminación de las futuras autopistas del Ecuador. El presente artículo se estructura de la siguiente manera: en el apartado II se describen las funcionalidades y principales características de las autopistas inteligentes. El apartado III desvela la importancia de la selección de las luminarias del sistema de alumbrado público y su impacto en el consumo energético. En el apartado IV se incide en la importancia de la implementación de sistemas de control inteligente en las instalaciones de iluminación para obtener una reducción adicional del consumo energético. En el apartado V se presenta un estudio sobre el consumo energético asociado al alumbrado público en el Ecuador.

En el apartado VI se realiza un estudio preliminar del impacto económico debido al cambio de luminarias convencionales por sistemas fotovoltaicos de iluminación en un tramo de autopista de 100 Km en un horizonte de tiempo de 20 años. Asimismo, se procede a evaluar el impacto económico de la implementación de sistemas fotovoltaicos de iluminación y de sus sistemas de control asociados en el alumbrado público del Ecuador.

2. AUTOPISTAS INTELIGENTES

Las autopistas inteligentes representan un nuevo concepto en infraestructura vial, que se caracterizan por la introducción de innovadoras funcionalidades en las vías de alta velocidad. Entre las nuevas funcionalidades destacan: vías iterativas, información meteorológica en las vías, carriles exclusivos para carga de vehículos eléctricos, control inteligente de la iluminación y sistemas auxiliares de emergencia. Estas funcionalidades convierten a las autopistas en infraestructura viales muy versátiles, adaptativas y sostenibles (Roosegaarde & Heijmans, 2012).

Asimismo, estas infraestructuras tienen un nivel elevado de seguridad y confort para sus usuarios permitiendo un mejor desarrollo de su población así como una mayor comunicación entre sus vecinas poblaciones. Las innovadoras funcionalidades de las autopistas inteligentes permiten la implementación de dispositivos integrados y técnicas de optimización en los sistemas de

comunicación, monitoreo, detección de accidentes, mantenimiento y control inteligente de la iluminación (Fig. 1) (Ozguner, 2008; Cheon, 2003; Johnson *et al.*, 2014).

<p>DETECCION AUTOMATICA DE INCIDENTES</p>	 <p>Sistemas de Monitoreo</p>		 <p>Sistemas de Control</p>
<p>MEDIDAS DE EMERGENCIA</p>	 <p>Llamadas de emergencia.</p>	 <p>Control de incendios</p>	 <p>Centros de Control</p>
<p>DETECCION DEL CLIMA</p>	 <p>Detectores de Temperatura</p>	 <p>Detectores de Viento</p>	 <p>Estaciones de Visibilidad, contenido de sal en las calles</p>

Figura 1. Innovadoras funcionalidades de las autopistas inteligentes (Cheon, 2003).

Las autopistas convencionales han evolucionado hacia una nueva generación de autopistas, las denominadas autopistas inteligentes. Las modernas autopistas inteligentes emplean las últimas innovaciones tecnológicas en sistemas de comunicaciones y control. Las autopistas inteligentes se caracterizan por disponer de un conjunto de sistemas automatizados, conocidos por su acrónimo anglosajón AHS (Automatic Highway Systems). En la Tabla 1 se presenta una breve descripción de los sistemas automatizados introducidos en las autopistas inteligentes. Los sistemas automatizados de las autopistas inteligentes garantizan una mayor calidad, seguridad y sostenibilidad del servicio prestado a los usuarios (Cheon, 2003) y proporcionan grandes funcionalidades a las modernas autopistas. La característica más destacada de las autopistas inteligentes es el establecimiento de sistemas de control que permiten detectar vehículos, controlar el flujo vehicular, monitorizar posibles eventualidades y sucesos inesperados en la autopista (Zou & Li, 2010).

Los denominados sistemas AHS permiten disponer de una infraestructura de alta velocidad controlada de forma automatizada. En este sentido, es posible establecer carriles de auxilio mediante la cooperación de los vehículos que transitan por las autopistas inteligentes. Asimismo, existe la posibilidad de gestionar, en ocasiones puntuales, la mejor ruta de circulación para los usuarios de la autopista. Gracias a las sofisticadas e innovadoras funcionalidades de las autopistas inteligentes, anteriormente descritas, es posible coordinar la detección de vehículos y objetos en las vías de la autopista e integrarlos en un sistema inteligente que proporcione un óptimo control y automatización de del flujo vehicular (Yuan *et al.*, 2013).

Tabla 1. Descripción de los sistemas automatizados en autopistas (Zou & Li, 2010).

Concepto del sistema	Concepto del sistema	Cambio de carril	Obstrucción en el camino	Control de flujo vehicular
AUTÓNOMO Automatización completa de vehículos a través de sensores y computadoras sin requerir la asistencia de infraestructura y comunicación.	Vehículo automatizado con sensores que detecten vehículos y problemas en el camino.	Busca y se desplaza en una apertura entre vehículos.	Vehículos que se detienen ante obstáculos detectados, cambiando de carril si es posible.	
COOPERATIVO Vehículos equipados con sensores externos y computadoras que comparten información con otros vehículos para la coordinación de maniobras y permitir un viaje automatizado.	Comunicación con otros vehículos para los cambios de tráfico y desniveles de la superficie.	Negociación cooperativa entre vehículos	Comunicación de los sentidos de circulación de los vehículos advirtiendo y coordinando las maniobras de conducción	
SOPORTE DE INFRAESTRUCTURA Vehículos completamente automatizados operando en carriles exclusivos, con información global de dos vías de comunicación para la toma de decisiones.	La misma idea de cooperación, pero dentro de las directrices de infraestructura	Lo mismo que el anterior	Coordinación de la infraestructura para el sentido de circulación de los vehículos.	Monitoreo de tráfico en infraestructura, enviando información del entorno a un grupo de vehículos.
GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA Tener un borde del camino automatizado para tener una coordinación entre vehículos en lugares de entradas, salidas y emergencias	Comunicación hacia otros vehículos de información de la infraestructura según sea necesario.	Respuestas de vehículos que cambian de Carril.	Envío de información sobre las acciones que toman los vehículos.	Infraestructura de Monitoreo individual de vehículos según sea necesario.
INFRAESTRUCTURA CONTROLADA La misma idea que el anterior, pero la infraestructura toma todo el control en todas las situaciones de conducción.	Detección de la posición del vehículo y control del mando de la aceleración y frenado.	Determinación de la infraestructura para el cambio de carril.	Envío de comandos a vehículos, basados en infraestructura y acciones de vehículos.	Monitoreo individual de los vehículos, optimizando las estrategias realizadas a través de un control individual.

En la actualidad, un ejemplo práctico de autopista inteligente está en fase de implementación práctica en los Países Bajos (Roosegaard & Heijmans, 2012). En esta moderna autopista inteligente se emplearán las novedosas funcionalidades para el control de iluminación y la información a los usuarios de las condiciones meteorológicas. En la Fig. 2, se observa la integración de paneles iterativos de información meteorológica en las vías de circulación de las autopistas.



Figura 2. Paneles iterativos de información meteorológica en las vías (Roosegaard & Heijmans, 2012).

3. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN EN AUTOPISTAS

La selección de las tecnologías de iluminación más adecuadas para las autopistas inteligentes depende de los requerimientos de luminosidad, establecidos para los sistemas convencionales y no convencionales de iluminación pública (Fig. 3) (Vitta *et al.*, 2012; Alzubaidi & Soori, 2012).



Figura 3. Sistema de iluminación en autopistas (Alzubaidi & Soori, 2012).

La eficiencia energética de las luminarias es uno de los parámetros fundamentales para la elección de los sistemas de iluminación. La integración de sistemas inteligentes de control en sistemas de iluminación eficientes permite una reducción adicional en el consumo energético y, en consecuencia, una considerable disminución de las emisiones de CO₂. En la Tabla 2, se presentan las características técnicas de las luminarias más empleadas en los sistemas de iluminación (Li *et al.*, 2009).

En la Tabla 2, se observa que las luminarias del tipo LED presentan mejores niveles de luminosidad y un período de vida útil superior a las luminarias de alta presión de sodio y de inducción, siendo las más adecuadas para la implementación de sistemas de control de luminosidad (Alvarado & Jaramillo, 2010).

En Noruega, la sustitución de luminarias convencionales por tecnología LED en los sistemas de iluminación de las autopistas permitió obtener un ahorro del 70% en el consumo de energía eléctrica, evitando alrededor de 1440 toneladas de emisiones de CO₂ (Northern Ireland Assembly, 2009).

Por otro lado, las luminarias de tecnología LED pueden ser integradas en sistemas renovables de generación eléctrica. En este sentido, es posible garantizar el suministro de energía para los sistemas

de iluminación en las autopistas con ayuda de paneles fotovoltaicos y sistemas híbridos de generación eléctrica (solar y eólico) (Georges & Slaoui, 2011).

Diversos estudios, relacionados con las tecnologías empleadas en los sistemas de iluminación, indican que la mejor opción para la reducción del consumo energético en las autopistas inteligentes son las luminarias de tecnología led alimentadas por sistemas fotovoltaicos (Patangia *et al.*, 2009).

Tabla 2. Características técnicas de las luminarias empleadas en los sistemas de iluminación de autopistas (Li *et al.*, 2009).

LUMINARIAS	CARACTERISTICAS TECNICAS														
 <p>INDUCCION</p>	<table border="1"> <tr><td>Máx. (lux)</td><td>11.2</td></tr> <tr><td>Mín. (lux)</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>Avg. (lux)</td><td>3.02</td></tr> <tr><td>Avg. min.</td><td>6.04</td></tr> <tr><td>Watts</td><td>79</td></tr> <tr><td>PF</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>CCT</td><td>2759</td></tr> </table>	Máx. (lux)	11.2	Mín. (lux)	0.5	Avg. (lux)	3.02	Avg. min.	6.04	Watts	79	PF	0.98	CCT	2759
Máx. (lux)	11.2														
Mín. (lux)	0.5														
Avg. (lux)	3.02														
Avg. min.	6.04														
Watts	79														
PF	0.98														
CCT	2759														
 <p>LED</p>	<table border="1"> <tr><td>Máx. (lux)</td><td>27</td></tr> <tr><td>Mín. (lux)</td><td>6.3</td></tr> <tr><td>Avg. (lux)</td><td>11.56</td></tr> <tr><td>Avg. min.</td><td>1.83</td></tr> <tr><td>Watts</td><td>110</td></tr> <tr><td>PF</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>CCT</td><td>6667</td></tr> </table>	Máx. (lux)	27	Mín. (lux)	6.3	Avg. (lux)	11.56	Avg. min.	1.83	Watts	110	PF	0.99	CCT	6667
Máx. (lux)	27														
Mín. (lux)	6.3														
Avg. (lux)	11.56														
Avg. min.	1.83														
Watts	110														
PF	0.99														
CCT	6667														
 <p>SODIO DE ALTA PRESION</p>	<table border="1"> <tr><td>Máx. (lux)</td><td>24.1</td></tr> <tr><td>Mín. (lux)</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>Avg. (lux)</td><td>9.96</td></tr> <tr><td>Avg. min.</td><td>3.83</td></tr> <tr><td>Watts</td><td>115</td></tr> <tr><td>PF</td><td>0.93</td></tr> <tr><td>CCT</td><td>2097</td></tr> </table>	Máx. (lux)	24.1	Mín. (lux)	2.6	Avg. (lux)	9.96	Avg. min.	3.83	Watts	115	PF	0.93	CCT	2097
Máx. (lux)	24.1														
Mín. (lux)	2.6														
Avg. (lux)	9.96														
Avg. min.	3.83														
Watts	115														
PF	0.93														
CCT	2097														

4. CONTROL INTELIGENTE DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN EN AUTOPISTAS

El uso de tecnologías inteligentes de iluminación implica un importante ahorro en el consumo energético de las modernas autopistas, proporcionando un elevado nivel de sostenibilidad a los sistemas de circulación vial. El control de la intensidad lumínica de las luminarias se realiza en función de las condiciones meteorológicas y de la detección de flujo vehicular en las autopistas (Fig. 4) (Schröder, 2013).

Es posible obtener una significativa reducción del consumo energético en la iluminación de las luminarias de alumbrado público con la implementación de sofisticados sistemas inteligentes de control de la luminosidad. Los sistemas de control inteligente permiten una comunicación

automatizada entre las luminarias del sistema de iluminación en función del flujo vehicular y de las condiciones atmosféricas en las autopistas (Fig. 5) (Venkata Lakshmi *et al.*, 2012).

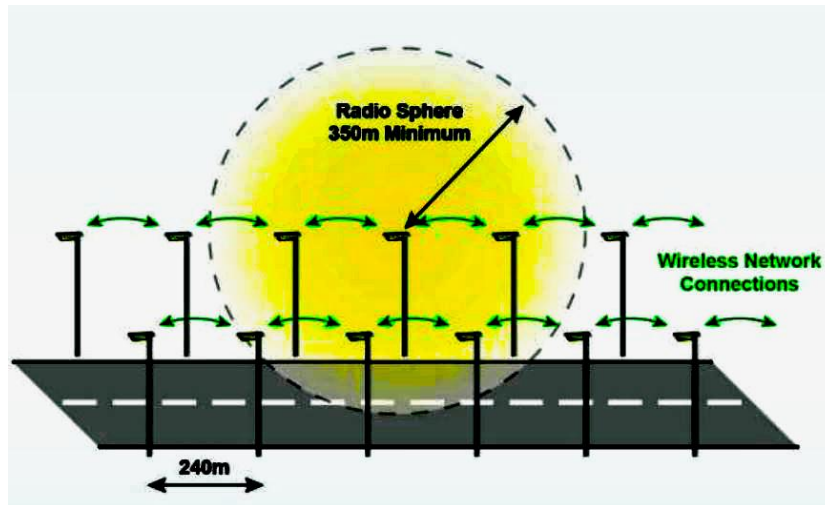


Figura 4. Sistemas inteligentes de iluminación en las autopistas (Georges & Slaoui, 2011).

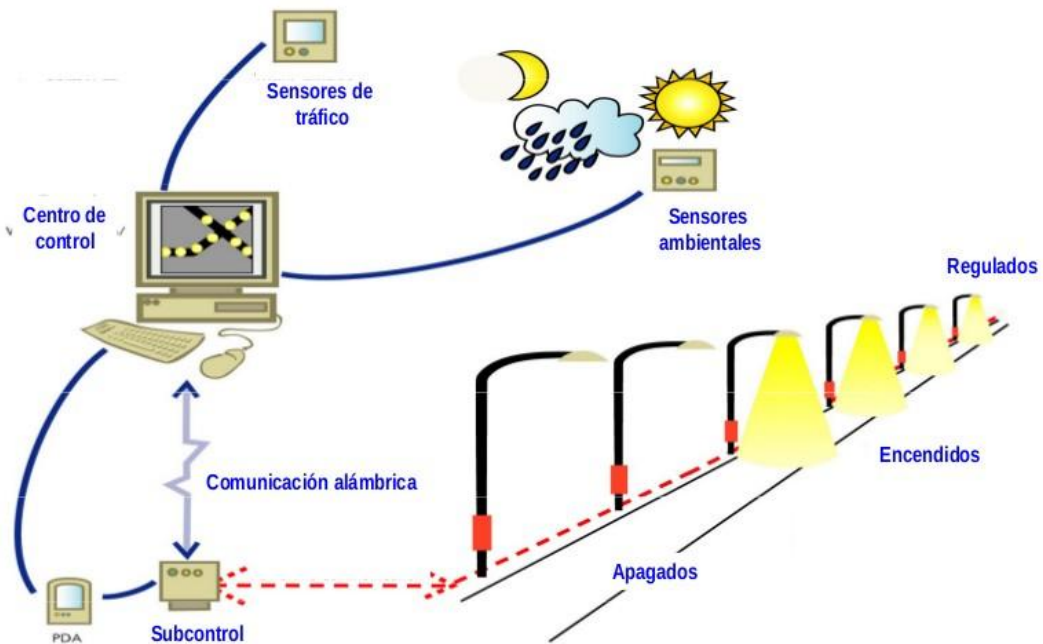


Figura 5. Sistemas de comunicación de las luminarias en autopistas inteligentes (Venkata Lakshmi *et al.*, 2012).

Los sistemas inteligentes de control de la iluminación en autopistas disponen de redes de comunicación inalámbricas para la detección de flujo vehicular y la variación de la luminosidad de las luminarias. Por otro lado, los sistemas de iluminación fotovoltaicos minimizan el empleo de cables eléctricos en la fase de montaje, reduciendo las pérdidas eléctricas en la fase de operación de los sistemas de iluminación.

Las autopistas en las que se implementan sistemas de control inteligente de la iluminación se convierten en autopistas inteligentes, puesto que pueden transmitir información a través de dispositivos de comunicación inalámbrica. En (Padmadevi *et al.*, 2012) se presentan varios estudios sobre el uso de protocolos para la comunicación remota. Los mencionados protocolos de comunicación garantizan un control más exacto de la variación de la luminosidad y un monitoreo en tiempo real de las condiciones meteorológicas y de la detección del flujo vehicular.

5. CONSUMO ENERGÉTICO DEL ALUMBRADO PÚBLICO EN EL ECUADOR

El marco normativo legal que regula el servicio de alumbrado público en el Ecuador - Regulación CONELEC N° 008/011 - establece que el tiempo medio de encendido de alumbrado público general será de 12 horas (CONELEC, 2011). Según datos del Instituto de Eficiencia Energética y Energías Renovables, INER, la potencia instalada en alumbrado público a diciembre del año 2012 fue de 176 MW de potencia instalada, correspondiente a 1.104.072 luminarias de diferente tecnología. El consumo de energía correspondiente al alumbrado público en el año 2102 superó los 913 GWh, un 5% del total de la energía eléctrica generada en el Ecuador. La facturación de la energía consumida en el alumbrado público fue superior a los 100 millones de dólares en el año 2012. Según Loor (2012) la factura eléctrica en el alumbrado público entre el año 2006 y 2012 aumente de 85,8 a 104,3 millones de dólar en el Ecuador.

Entre el año 2006 y 2012, la tasa de crecimiento anual en el consumo de energía de alumbrado público fue del 3%. Se prevé que entre el año 2012 y 2021 el crecimiento promedio anual será del 7%. Por tanto, se espera que en el año 2021, el consumo de energía en alumbrado público supere los 1678 GWh. La producción equivalente de una central hidroeléctrica de 280 MW de potencia instalada funcionando 6000 horas al año. En el año 2021, el coste económico de la energía para el alumbrado público podría superar los 190 millones de dólares. El coste del consumo energético del alumbrado público entre el año 2012 y 2021 podría superar los 1.435 millones de dólares. Un valor equivalente a la construcción de 48 nuevas escuelas del milenio al año entre 2012 y 2021.

En el año 2012, la composición de las luminarias empleadas en el alumbrado público correspondía a 86% de lámparas de sodio de alta presión, 10% de las luminarias de vapor de mercurio. El restante 4% de las luminarias se reparte entre sistemas de inducción, lámparas incandescentes y mixtas, LEDs y luminarias reflectantes. El sistema de alumbrado público puede ser optimizado con el empleo de nuevas tecnologías de iluminación, como las luminarias LEDs. Asimismo, existen sistemas compactos de iluminación pública, compuestos por sistemas fotovoltaicos y luminarias LEDs. La introducción de sistemas fotovoltaicos de iluminación representa un importante ahorro energético y económico, así como una significativa reducción de las emisiones de CO₂. Además, los sistemas de iluminación fotovoltaicos permiten un considerable ahorro en materiales, cableado y zanjas inherentes a la construcción de sistemas de alumbrado público convencional.

6. IMPACTO ECONÓMICO DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE ILUMINACIÓN PÚBLICA

En el Ecuador, entre año 2007 y 2012, la inversión en infraestructuras viales ha superado en tres veces la inversión realizada por el Estado entre el año 2000 y 2007 (Tabla 3).

Tabla 3. Comparativa de la inversión realizada en infraestructura vial (Dirección de Comunicación Social y Atención al Ciudadano, MTOP, 2011).

Período	Inversión (millones de dólares)
Enero 2000 - Diciembre 2002	0,475
Enero 2003 - Diciembre 2004	0,459
Enero 2005 - Diciembre 2006	0,570
Enero 2007 - Diciembre 2012	7,592

Por otro lado, según datos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP, 2012) entre el año 2007 y 2012 se planificaron los estudios y ejecución de los siguientes proyectos en infraestructura vial (MTOP, 2011) (Tabla 4).

Tabla 4. Proyectos emblemáticos en infraestructura vial (Dirección de Comunicación Social y Atención al Ciudadano, MTOP, 2011).

Proyectos emblemáticos a nivel nacional desde el 2007 hasta 2012	Inversión (millones de dólares)	Dimensión del proyecto
Ruta del Spondylus	802,1	954,5 Km
Troncal Amazónica	363,3	1040,6 Km
Proyecto Multimodal: Manta - Manaos	187,7	578,0 Km
Troncal Sierra E-35	396,9	849,2 Km
Tramo: Santo Domingo - Quinindé	78,1	87,6 Km
Tramo: Santo Domingo - Huaquillas	126,3	474,0 Km

Entre el año 2007 y 2012, se prevé el fortalecimiento y la construcción de 3984 Km de infraestructura vial. Además, desde el año 2013, se ejecuta y proyecta la construcción de un importante número de autopistas y superautopistas en territorio nacional, Tabla 5. En total, se pretende construir 979 Km de autopistas y superautopistas en los próximos años.

Tabla 5. Autopistas en ejecución y proyectadas (América Economía Comp. Ecuador, 2011).

Tramo	Longitud (Km)
Machala - Guayaquil	196
Guayaquil - Quevedo	175
Guayaquil - La Cadena	190
Manta - Quevedo	110
Quevedo - Santo Domingo	130
Esmeraldas y Santo Domingo	178

La construcción de nuevas infraestructuras viales incrementará el consumo de energía en el alumbrado público. En España, en el año 2011, se adoptaron medidas para reducir a la mitad el coste de consumo energético en las autopistas valorado en 25 millones de Euros al año. Las mencionadas medidas consistieron fundamentalmente en la desconexión de luminarias en tramos de carreteras de reducido tráfico y la sustitución de luminarias convencionales por sistemas de iluminación eficientes. Asimismo, en Holanda (Groot & Zandvliet, 2011), la implementación de un sistema de control inteligente de la iluminación en horas valle, en un tramo de carretera de 8 Km, permitirá un ahorro de 180.000 KWh anuales. El ahorro de energía se obtiene gracias a la posibilidad de un control inteligente del consumo de energía en los sistemas de iluminación, que permite reducir la intensidad lumínica del 100%, en las horas punta, al 20% en las horas valle.

En el Ecuador, durante el diseño y construcción de las nuevas autopistas se debería considerar seriamente la implementación de innovadores sistemas fotovoltaicos de iluminación, equipados con sistemas de control inteligente. En la Tabla 6, se presenta una evaluación económica del impacto económico debido a la sustitución de luminarias convencionales (sodio de alta presión - Na - y vapor

de mercurio - Hg) por luminarias LED. En el estudio, se propone el empleo de luminarias LED con rendimientos del 50 y 85% (US Department of Energy, 2013). Asimismo, se presenta el cálculo de la reducción adicional obtenida por la implementación de un sistema de control inteligente de luminosidad de las luminarias LED. Para el estudio propuesto se ha considerado un tramo de autopista de 100 Km. Cada kilómetro de autopista, tiene al menos 50 postes con dos luminarias por poste.

De los cálculos presentados en la Tabla 6, se deduce que el empleo de luminarias convencionales de sodio de alta presión de 250 W exigiría una inversión de 2,5 millones de dólares. El coste de cada luminaria de 250 W es de 500 dólares. Adicionalmente, se ha calculado el consumo energético anual, considerando doce horas de funcionamiento diario de las luminarias. En un año, el consumo energético de las luminarias de sodio sería de 10,95 GWh por cada 100 Km de autopista correspondiente a un gasto económico anual de 1,24 millones de dólares. En total, el coste económico del alumbrado de una autopista durante 20 años equivaldría casi 30 millones de dólares. Es importante indicar que el cálculo económico es proporcional a un precio del KWh igual a 0,0986 USD según datos del INER.

El empleo de luminarias LED con un rendimiento energético del 50% exigiría una inversión de 400 mil dólares, considerando un precio de \$290 por cada luminaria LED de 80 W. Un sistema de iluminación LED presentaría un consumo energético 3 veces inferior al sistema convencional. Un sistema de iluminación LED tendría un consumo anual de 3,5 GWh año⁻¹. En un horizonte de 20 años, supondría un coste económico de 10,9 millones de dólares. Un ahorro de casi 19 millones de dólares en relación a las luminarias convencionales de sodio.

El desarrollo de luminarias LED permite un ahorro adicional en el coste económico de la iluminación de autopistas. La instalación de luminarias LED con un rendimiento energético del 85% exige una inversión de apenas un millón dólares. El consumo energético anual del sistema de iluminación se reduce hasta 1,05 GWh, equivalente a un coste económico de 120 mil dólares. En 20 años, el coste económico de iluminar 100 Km de autopista sería de 3,4 millones de dólares. Un ahorro superior a 26 millones de dólares en relación al gasto en luminarias convencionales de sodio.

Adicionalmente, la introducción del control inteligente del sistema de iluminación LED implicaría una reducción en el consumo energético. En el estudio propuesto se ha considerado que el control inteligente permite reducciones adicionales en intervalos de 25%. Así, de la Tabla 6 se observa, que el control inteligente proporciona una reducción del consumo energético de las luminarias LED del 25, 50 y 75%. Para los niveles de reducción propuestos, el coste económico del alumbrado en el tramo de una autopista de 100 Km, en un período de 20 años, oscilaría entre 2,8 y 1,6 millones de dólares. El ahorro económico en relación a la utilización de luminarias convencionales podría superar los 28 millones de dólares en 20 años de funcionamiento del sistema de iluminación en una autopista de 100 Km.

El gobierno del Ecuador pretende construir 1000 Km de autopistas y superautopistas hasta el año 2017. El ahorro económico en los sistemas de iluminación de las nuevas autopistas del Ecuador podría representar 280 millones de dólares en 20 años. El equivalente a construir 5 escuelas del milenio al año durante 20 años. En los últimos años, los costes de instalación de los sistemas fotovoltaicos se han reducido significativamente. Así, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos (NREL, US Department of Energy, 2010), indica que el coste por vatio pico instalado en el sector residencial ha experimentado una reducción entre finales del 2009 y finales del 2012 de 6,81 USD a 3,69 USD, mientras que las instalaciones conectadas a red, en el mismo período, ha pasado de 4,30 USD a 1,92 USD. Los sistemas fotovoltaicos son económicamente muy competitivos y se espera que en el futuro continúe la reducción de los precios de instalación, operación y mantenimiento.

En la Tabla 7, se propone una evaluación preliminar del coste económico de un sistema de iluminación fotovoltaica para 100 Km de autopista. Se observa que para suministrar el consumo energético de los 5000 postes con luminarias de sodio de alta presión de una autopista de 100 Km sería necesario instalar 7,5 MWp de paneles fotovoltaicos. El cálculo se realizó considerando que las instalaciones fotovoltaicas en Ecuador presentan un tiempo de funcionamiento, a potencia nominal, equivalente 4 horas diarias de promedio. Asimismo, la estimación del coste económico de las instalaciones de iluminación fotovoltaicas se ha realizado para tres diferentes valores de precio por

vatio pico: 6,0 USD para el año 2013; 3,0 USD para el año 2016 y 2,5 USD para el año 2017. Por otro lado, dado el desarrollo tecnológico de las luminarias LEDs y de las baterías fotovoltaicas es posible despreciar los costes de operación y mantenimiento para períodos iguales o inferiores a 20 años.

Tabla 6. Coste económico del alumbrado convencional en 100 Km de autopista.

Tipos de luminarias	Potencia luminarias, W	Consumo energético, GWh	Costo económico anual iluminación pública, millones USD	Costo de luminarias, millones USD	Potencia total instalada en luminarias, MW	Coste económico en 20 años, millones USD
LED n = 50% 2010	2X80	3,5	0,4	2,9	0,8	10,9
LED n = 85% 2014	2X24	1,05	0,12	1,0	0,24	3,4
PV LED Control System 3/4	2X24	0,78	0,09	1,0	0,24	2,8
PV LED Control System 1/2	2X24	0,5	0,06	1,0	0,24	2,2
PV LED Control System 1/4	2X24	0,26	0,03	1,0	0,24	1,6

Tabla 7. Costo económico del alumbrado fotovoltaico en 100 Km de autopista.

Tipos de luminarias	Potencia luminarias, W	Potencia solar fotovoltaica por poste, Wp	Potencia solar instalada, MWp	Costo instalación solar, millones de dólares		
				2013	2016	2017
				6,0 USD/Wp	3,0 USD/Wp	2,5 USD/Wp
Luminarias sodio	2X250	1500	7,5	45	22,5	18,75
LED n = 50% 2010	2X80	500	2,5	15	7,5	6,25
LED n = 85% 2014	2X24	150	0,7	4,2	2,1	1,75

La metodología de evaluación preliminar del coste económico de la instalación de iluminación convencional y fotovoltaica para 100 Km de una autopista se extiende al alumbrado público del Ecuador. Como en el caso anterior, se evalúa un horizonte de tiempo de 20 años. La potencia de las luminarias convencionales oscila entre 70 y 400 W para las luminarias de sodio de alta presión y entre 125 W y 250 W para las luminarias de vapor de mercurio. En el análisis se incluye el coste de sustitución de las luminarias convencionales por luminarias LED. Inicialmente, las luminarias convencionales se reemplazan por tecnologías LED de 80 y 25 W, con un 50 y 85% de rendimiento, respectivamente. Posteriormente, se considera que la implementación de un sistema de control inteligente de la luminosidad de las luminarias LED permite reducir el consumo energético en un 25, 50 y 75%, respectivamente, como se muestra en la Tabla 8. En el cálculo del coste económico del alumbrado en el Ecuador se considera el precio de la electricidad igual a 0,0986 USD KWh⁻¹.

Se deduce de los resultados obtenidos, que el coste económico de una instalación de iluminación fotovoltaica a un precio de 3 USD por vatio pico instalado presenta un ahorro de más de 7 millones de dólares, en un periodo de tiempo de 20 años, en comparación con una instalación de alumbrado convencional. Si el precio del vatio pico instalado se reduce a 2,5 USD, el ahorro económico puede superar los 11 millones de dólares. El ahorro obtenido en un período de 20 años para 1000 Km de autopistas proyectadas a construir en el Ecuador implicaría un ahorro, en 20 años, igual a 110 millones de dólares. El equivalente a construir 2 escuelas del milenio al año durante 20 años.

Si en lugar de emplear luminarias convencionales de sodio de alta presión se empleasen luminarias LED de alto rendimiento energético, 50 y 85%, el ahorro económico en el alumbrado de autopistas con sistemas de iluminación fotovoltaicos podría ser superior a 23 y 28 millones respectivamente. Es decir, se obtendría el mismo impacto económico que la sustitución de luminarias convencionales por luminarias LED de alto rendimiento, equipadas con sistemas de control inteligente. Es importante indicar, que los sistemas de iluminación fotovoltaicos reducen el consumo de cableado y zanjas durante el proceso de obra civil y montaje de los sistemas de iluminación. Asimismo, la generación renovable de energía eléctrica para los sistemas de iluminación de las autopistas reduce las emisiones de CO₂, existiendo la posibilidad de adherirse a los mecanismos de desarrollo limpio y obtener un ingreso económico adicional por la venta de las emisiones de CO₂.

Adicionalmente, los sistemas de iluminación fotovoltaicos pueden disponer de dispositivos de control inteligente, lo que permitiría ampliar su vida útil y mejorar su rentabilidad económica frente a los sistemas de iluminación convencionales y LEDs. Por otro lado, una reducción adicional de los precios por vatio pico instalado en los próximos años, implicaría que ningún sistema de iluminación de alumbrado público podría competir con los sistemas fotovoltaicos. El empleo de luminarias convencionales en el alumbrado público implica un consumo energético de 913 GWh a diciembre del 2012, un informe del INER revela que el mencionado consumo energético tiene un costo económico anual de 104 millones de dólares, aproximadamente, y para los próximos 20 años se estima un costo económico de 2080 millones de dólares, sin considerar el aumento esperado del número de sistemas de alumbrado en el Ecuador en los próximos años.

Tabla 8. Costo económico del alumbrado convencional en el Ecuador.

Tipos de luminarias	Potencia luminarias, W	Consumo energético, GWh	Costo económico anual iluminación pública, millones USD	Costo cambio de luminarias, millones USD	Potencia instalada total en luminarias, MW	Coste económico 20 años, millones USD
Na / Hg	70-400 / 125-250	913	104,0	-	176	2080,0
LED n = 50% 2010	80	386,8	38,1	320,2	88,3	1082,2
LED n = 85% 2014	24	116	11,4	110,4	26,5	338,4
PV LED Control System 3/4	24	87	8,5	110,4	26,5	280,4
PV LED Control System 1/2	24	58	5,7	110,4	26,5	224,4
PV LED Control System 1/4	24	29	2,8	110,4	26,5	116,4

La sustitución de las luminarias convencionales por luminarias LED, con un rendimiento energético del 50%, implica una reducción de consumo energético anual a un valor de 386,8 GWh. El gasto económico sería igual a 31,8 millones de dólares anuales. En el período analizado de 20 años, el coste económico de los sistemas de iluminación LED equivaldría a 1082 millones de dólares. Una reducción de 998 millones de dólares en los próximos 20 años, comparados con el costo económico de las luminarias convencionales. Por otro lado, el empleo de luminarias LED con un rendimiento energético del 85% reduciría el consumo energético anual en el sistema de alumbrado público del Ecuador a 116 GWh. En este caso, el consumo energético se reduce en 5 veces, comparado con el consumo inicial de las luminarias convencionales. En un horizonte de 20 años, el costo económico sería equivalente a 338,4 millones de dólares. Un ahorro de más de 1600 millones de dólares en relación a las luminarias convencionales.

La implementación de un control inteligente de las luminarias LED, que permita una reducción del 25% del consumo energético anual, implicaría un consumo 10 veces menor en relación a las luminarias convencionales, equivalente a 87 GWh anuales. En los próximos 20 años, el costo económico sería de 280,4 millones de dólares. Para reducciones del 50 y 75%, gracias al sistema inteligente de control, el coste económico en un periodo de 20 años se reduciría a 224,4 y 116,4 millones de dólares, respectivamente.

Finalmente, en la Tabla 9, se presenta el coste económico de la sustitución del alumbrado convencional por sistemas de iluminación fotovoltaica. Es importante destacar, que en caso de sustituir todas las luminarias convencionales del alumbrado en el Ecuador por luminarias LED con un rendimiento energético del 85%, se obtendría un ahorro muy considerable. Así, el gasto económico asociado a la sustitución de sistemas de iluminación convencional por sistemas fotovoltaicos de iluminación sería de 220 millones de dólares en un periodo de 20 años. Se obtendría, en 20 años de funcionamiento, un ahorro económico equivalente a más de 2000 millones de dólares. El cálculo se ha realizado considerando los precios de instalación de sistemas fotovoltaicos para el año 2017, 2,5 USD W_p^{-1} y despreciando los costes de mantenimiento y operación de los sistemas de iluminación fotovoltaicos.

Tabla 9. Costo económico del alumbrado fotovoltaico en el Ecuador.

Tipos de luminarias	Potencia luminarias, W	Potencia solar fotovoltaica por poste W_p	Potencia solar instalada MW_p	Coste instalación fotovoltaica millones de dólares		
				2013	2016	2017
				6,0 USD W_p^{-1}	3,0 USD W_p^{-1}	2,5 USD W_p^{-1}
Na/Hg	70-400 / 125-250	600	662,4	39744	1987,2	1656
LED n=50 % 2010	80	240	264,9	1589,4	794,7	662,3
LED n=85 % 2014	24	80	88,3	529,8	264,9	220,8

7. CONCLUSIONES

La implementación de sistemas inteligentes de control en las instalaciones fotovoltaicas de iluminación se plantea como una solución al excesivo consumo energético en el alumbrado público de autopistas, sin que este servicio se vea afectado y elevando su nivel de seguridad y comodidad. El empleo de energía solar fotovoltaica en el Ecuador prevé implementar tecnologías que permitan promover el ahorro y la eficiencia energética en los diferentes sectores de la economía. Además, el impacto económico en el consumo de energía eléctrica, gracias a la sustitución del sistema de iluminación convencional por instalaciones fotovoltaicas, implica un significativo ahorro en el coste económico del alumbrado público. El ahorro obtenido por el empleo de sistemas renovables de

iluminación significará disponer de importantes volúmenes de energía eléctrica para profundizar la transformación del modelo energético del Ecuador. Asimismo, la implementación de un control de luminosidad en los sistemas de iluminación en las autopistas proporciona un ahorro energético y económico adicional y aumenta la vida útil de los principales componente de los sistemas fotovoltaicos de iluminación.

La implementación de sistemas de control inteligente en las instalaciones fotovoltaicas de iluminación formará parte de las innovadoras y novedosas funcionalidades de las futuras autopistas inteligentes del Ecuador. Asimismo, se ha demostrado la viabilidad económica de la utilización de instalaciones fotovoltaicas de iluminación en las autopistas y el considerable ahorro energético y económico asociado a la sustitución de sistemas convencionales de iluminación por sistemas fotovoltaicos equipados con sistemas inteligentes de control de las luminarias. El presente artículo, se encuentra enmarcado dentro de las políticas y lineamientos estratégicos del Plan del Buen Vivir 2013-2017, asociado a la promoción de la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles como medida de prevención de la contaminación ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, SENESCYT, y al Consorcio Ecuatoriano para el Desarrollo de Internet Avanzado, CEDIA, por su especial apoyo en el desarrollo de la presente propuesta, gracias a la financiación del proyecto PROMETEO: ‘Evaluación Técnico y Económica de la Integración de Energías Renovables en la Provincia de Tungurahua’, y del proyecto CEPRA VIII-2014-05: ‘Diseño e Instalación de un Sistema Remoto de Monitoreo de Evaluación y Análisis del Comportamiento de Instalaciones Fotovoltaicas en el Ecuador’, respectivamente.

REFERENCIAS

- América Economía Comp. Ecuador, 2011. La compañía invertirá 5.000 millones de dólares en construcción de autopistas. Disponible en <http://www.americaeconomia.com/negociosindustrias/ecuador-invertira-us5000m-en-construccion-de-autopistas>.
- Alvarado, J., J. Jaramillo, 2010. Sistemas fotovoltaicos para iluminación: Sistemas de iluminación en 12 v. Universidad Técnica Particular de Loja. Descargado de <http://www.utpl.edu.ec/jorgeluisjaramillo/wp-content/uploads/2010/06/renlux-sistemas-de-iluminacion-12V.pdf>, 4 pp.
- Alzubaidi, S., P.K. Soori, 2012. Study on energy efficient street lighting system design. *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012), Melaka, Malaysia*, 291-295.
- Behrendorff Poulsen, P., C. Dam-Hansen, A. Thorseth, S. Thorsteinsson, J. Lindén, S. Stentoft Hansen, S. Ellermann, C. Bak, W. Skrzypinski, C. Beller, C. Weber Kock, F. Bühler, R.K. Harboe, P. Boesgaard, T. Jensen, O. Søndergaard, C. Andresen, M. Fahlen, T. Maare, H. Prestegaard, J. Poulsen, S. Kremmer, 2013. Copenhagen—development of a CO2 neutral hybrid street lighting system for the Danish municipalities’ illumination classes. *28th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2013)*, 3800-3805.
- Cheon, S., 2003. An overview of automated highway systems (AHS) and the social and institutional challenges they face. University of California, Transportation Center, CA, USA. Descargado de <http://www.uctc.net/papers/624.pdf>, 30 pp.
- CONELEC, 2011. Regulación 008/01 alumbrado público. Consejo Nacional de Electricidad, Quito, Ecuador.
- Ekrias, A., L. Guo, M. Eloholma, L. Halonen, 2008. Intelligent road lighting control in varying weather conditions. *Light Eng.*, 16, 72-78.

- Georges, S., F.H. Slaoui, 2001. Case study of hybrid wind-solar power systems for street lighting. *21st International Conference on Systems Engineering*, 82-85.
- Groot, B., W., Zandvliet, 2011. Soluciones y servicios. Autopista a 44 países bajos. PHILIPS Sense and Simplicity, www.philips.es/solucionesyservicios, Technical report.
- Holt, A., I.J. Pengelly, 2008. Its and renewable energy. Road Transport Information and Control - RTIC 2008 and ITS United Kingdom Members' Conference, IET, Manchester, 6 pp. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4562193>.
- Johnson, M., A. Fabregas, Z. Wang, S. Katkoori, P-S. Lin, 2014. Embedded system design of an advanced illumination measurement system for highways. Systems Conference (SysCon), 2014 8th Annual IEEE, 579-586. Disponible en http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6819314&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6819314.
- Li, F., D. Chen, X. Song, Y. Chen, 2009. Leds: a promising energy-saving light source for road lighting. Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, 3 pp. Disponible en http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4918460&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4918460.
- Loor, R., 2012 Alumbrado público en Ecuador. Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovables. Technical report, 39 pp. Descargado de http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/05/09_Indicadores_infraest_energia_INERI.pdf.
- Males, C., I. Finis, A. Lavric, V. Popa, 2012. New technologies in street lighting systems. *20th Telecommunications Forum*. Belgrade, Serbia, 627-630, BDI IEEE Explore.
- MTOP, 2011. 82 años construyendo obras viales en el Ecuador. Diseño y Elaboración de Contenido. *Dirección de Comunicación Social y Atención al Ciudadano, MTOP*, Technical report.
- MTOP, 2012. Diseño y Elaboración de Contenido. 7.592 millones de dólares invertidos en vialidad hasta el 2012 para impulsar el crecimiento del Ecuador. *Dirección de Comunicación Social y Atención al Ciudadano, MTOP*, Technical report.
- Northern Ireland Assembly, 2009. Energy efficiency in street lighting. Research and Library Services, Research Briefing NIAR 60, 13 pp. Descargado de http://archive.niassembly.gov.uk/regional/2007mandate/research/pdf/Street_Lighting.pdf.
- Ozguner, U., 2008. A history of AHS at OSU and future progress. Proceedings of the 2008 *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety Columbus, OH, USA*, 13-15.
- Padmadevi, S., K. Santha Sheela, 2012. Survey on street lighting system based on vehicle movements. *Int. J. Innov. Res. Sci., Eng., Tech.*, 3(2).
- Patangia, H.C., 2009. Solar powered lighting for overhead highway signs. Prepared in Cooperation with the US Department of Transportation, Federal Highway Administration, MBTC and AHTD under Grant Number MBTC 2096. Final Report, 42 pp. Disponible en [ww2.mackblackwell.org](http://www2.mackblackwell.org).
- Roosegaard, D., S. Heijmans, 2012. Las autopistas del futuro. MOS Ingenieros, Technical Report. Disponible en <http://www.mosingenieros.com/2014/02/lasautopistas-del-futuro-by.html>.
- Schröder, S., 2012. Control inteligente para una iluminación eficiente. Technical Report, 8 pp. Owlet. Descargado de <http://www.schreder.com/SiteCollectionDocuments/Products/ValentinoLED/VALENTINOLED-Espanol-Folleto-V1.pdf>.
- Tsugawa, S., 2008. A history of automated highway systems in Japan and future issues. In: *Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. IEEE International Conference, 2-3. Disponible en http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4640914&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4640914.
- US Department of Energy, 2010. \$1/W photovoltaic systems. White Paper to Explore a Grand Challenge for Electricity from Solar, 28 pp. Descargado de http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pdfs/dpw_white-paper.pdf.
- US Department of Energy, 2013. Energy efficiency of leds. Energy Efficiency and Renewable Energy Division, US Department of Energy, USA. Technical report, 4 pp. Descargado de http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led_energy_efficiency.pdf.

- Venkata Lakshmi, O., B.Nageswarao Naik, S. Rajeyyagiri, 2012. The development of road lighting intelligent control system based on wireless network control. *International Journal of Science and Applied Information Technology*, 113-116.
- Vitta, P., L. Dabasinskas, A. Tuzikas, A. Petrulis, D. Meskauskas, A. Zukauskas, 2012. Concept of intelligent solid-state street lighting technology. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 18(10), 37-40.
- Yuan, Y., Y. Zhao, X. Wang, 2013. Day and night vehicle detection and counting in complex environment. *28th International Conference of Image and Vision Computing (IVCNZ)*, New Zealand, 453-458.
- Zou, J., L. Li, 2010. Optimization of luminous intensity distribution of roadway lighting luminaire based on genetic algorithm. *Second WRI Global Congress on Intelligent Systems (GCIS)*, 1, 327-330.