



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
COMUNICACIONES

TEMA:

CONTROL INTELIGENTE DE ILUMINACIÓN FOTOVOLTAICA PARA
AUTOPISTAS EN ECUADOR

Trabajo de Graduación. Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Fuentes de energías alternativas.

AUTOR: Carlos Luis Vargas Guevara

TUTOR: PhD. Alberto Ríos Villacorta

Ambato - Ecuador

Octubre, 2015

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el Tema:

“CONTROL INTELIGENTE DE ILUMINACIÓN FOTOVOLTAICA PARA AUTOPISTAS EN ECUADOR” del señor: Vargas Guevara Carlos Luis estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Octubre de 2015

PhD. Alberto Ríos Villacorta

TUTOR

AUTORÍA

El presente Proyecto de Investigación titulado: CONTROL INTELIGENTE DE ILUMINACIÓN FOTOVOLTAICA PARA AUTOPISTAS EN ECUADOR, es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Octubre de 2015

Carlos Luis Vargas Guevara

CC: 1805030028

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ambato, Octubre de 2015

Carlos Luis Vargas Guevara

CC: 1805030028

APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORES

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes, Ing. Manuel Otorongo e Ing. Paulina Ayala, revisó y aprobó el Informe Final del Proyecto de Investigación titulado: CONTROL INTELIGENTE DE ILUMINACIÓN FOTOVOLTAICA PARA AUTOPISTAS EN ECUADOR, presentado por el señor Vargas Guevara Carlos Luis de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. José Vicente Morales Lozada, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Manuel Otorongo, Mg.
DOCENTE CALIFICADOR

Ing. Paulina Ayala, Mg.
DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA

A Dios, quien me ha bendecido en gran manera para la culminación de esta etapa de mi vida y sé que me guiará para llegar más lejos.

El presente trabajo se lo dedico a mis padres que siempre me brindan su amor, confianza, enseñándome a superar cada reto de la vida.

A mis hermanos, de quienes he recibido la fortaleza, los ánimos y mejores deseos de superación que han formado un pilar fundamental en mi vida.

Carlos Luis Vargas Guevara

AGRADECIMIENTO

A mis queridos padres y hermanos quienes me apoyan incondicionalmente, enseñándome a ser siempre constante para solidificar mis sueños.

Agradezco a mis profesores que depositaron su tiempo y conocimientos en mi formación profesional, de manera especial a mi tutor, Alberto Ríos una gran persona y excelente profesional.

A mis amigos y compañeros por su compañía y apoyo durante mi carrera.

Carlos Luis Vargas Guevara

ÍNDICE

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORA	v
Dedicatoria	vi
Agradecimiento	vii
Introducción	xxiv
CAPÍTULO 1 EL PROBLEMA	1
1.1 Tema de Investigación	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.3 Delimitación del Problema	3
1.4 Justificación	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 General	5
1.5.2 Específicos	6
CAPÍTULO 2 MARCO TEORICO	7
2.1 Antecedentes Investigativos	7
2.2 Fundamentación teórica	25
2.2.1 Autopistas inteligentes	25
2.2.1.1 Definición y funcionalidades	25
2.2.1.2 Experiencias internacionales	30
2.2.1.3 Autopistas en Ecuador	34
2.2.2 Sistemas renovables de iluminación	36
2.2.2.1 Descripción de los sistemas renovables de iluminación	37

2.2.2.2	Radiación solar en Ecuador	46
2.2.2.3	Tipos de luminarias	48
2.2.2.4	Casos reales de iluminación renovable	54
2.2.2.5	Aspectos generales de Iluminación.	63
2.2.3	Iluminación pública en Ecuador	65
2.2.3.1	Regulación del sistema de alumbrado público	65
2.2.3.2	Situación de la iluminación pública en el Ecuador . .	66
2.2.3.3	Criterios de optimización del alumbrado público . . .	68
2.2.4	Control de sistemas de iluminación	73
2.2.4.1	Sistemas de Detección de vehículos	74
2.2.4.2	Sistemas de inalámbricos de comunicación	80
2.2.4.3	Descripción de las tecnologías Zigbee	81
2.2.4.4	Control de luminosidad	84
2.2.4.5	Plataformas de monitorización	86
2.3	Propuesta de Solución	88
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA		89
3.1	Modalidad básica de la investigación	89
3.2	Recolección de información	89
3.3	Procesamiento y análisis de datos	89
3.4	Desarrollo de la propuesta	90
CAPÍTULO 4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA		91
4.1	Datos Informativos.	91
4.1.1	Tema de la propuesta	91
4.1.2	Beneficiarios.	91
4.2	Objetivos.	91
4.2.1	General.	91
4.2.2	Específicos.	91
4.2.3	Análisis de factibilidad.	92
4.2.3.1	Factibilidad Técnica.	92
4.2.3.2	Factibilidad Operativa.	92
4.2.3.3	Factibilidad Económica.	93
4.3	Etapas para el desarrollo de la propuesta.	93
4.3.1	Descripción general del control inteligente de iluminación fotovoltaica	93
4.3.2	Selección del sistema de detección de vehículos en tiempo real	96
4.3.2.1	Análisis comparativo de los sistemas de detección. . .	96

4.3.2.2	Descripción del sistema de detección propuesto.	99
4.3.3	Sistema de Comunicación	100
4.3.3.1	Descripción de los módulos de comunicación.	101
4.3.3.2	Configuración del flujo de información de los módulos XBee	101
4.3.3.3	Programación del control de iluminación integrado con el sistema de detección	102
4.3.4	Sistema de control de iluminación	109
4.3.4.1	Descripción del control de iluminación	109
4.3.4.2	Análisis de las posibles fallas del sistema electrónico de detección de vehículos.	112
4.3.4.3	Fallas del sistema electrónico asociado a topologías de los paneles fotovoltaicos.	112
4.3.5	Plataformas de monitorización del control de iluminación.	114
4.3.6	Simulaciones del control de iluminación.	117
4.4	Metodología de evaluación del impacto de la integración de un control inteligente en los sistemas de iluminación pública.	120
4.4.1	Consideraciones básicas de la propuesta metodológica.	120
4.4.2	Evaluación energética del alumbrado público en 100Km de autopista.	122
4.4.2.1	Sustitución de luminarias HPS por LED.	122
4.4.2.2	Implementación de LED en sistemas fotovoltaicos.	125
4.4.3	Evaluación energética del alumbrado público a escala nacional.	127
4.4.3.1	Sustitución de luminarias HPS por LED en el sistema de iluminación pública nacional.	127
4.4.3.2	Sustitución de luminarias HPS por LED integrados en sistemas fotovoltaicos.	129
4.4.4	Escenarios de control de iluminación	131
4.4.4.1	Escenario de un vehículo por hora.	131
4.4.4.2	Escenario de dos vehículos por hora.	132
4.4.4.3	Escenario de tres vehículos por hora.	133
4.4.4.4	Escenario de cuatro vehículos por hora.	133
4.4.4.5	Escenario de seis vehículos por hora.	134
4.4.4.6	Escenario de once vehículos por hora.	134
4.4.4.7	Escenarios mixtos del control de iluminación.	135
4.4.4.8	Impacto económico del control de iluminación.	136

5.1 Conclusiones.	138
5.2 Recomendaciones.	140
Bibliografía	142
CAPÍTULO 6 Anexos	148
ANEXOS	148

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Tipo de intervención en las carreteras bajo administración estatal [1].	2
2.1	Comparación de emisiones en Autopistas de países industrializados [14].	8
2.2	Funcionalidades de las Autopistas Inteligentes [29].	30
2.3	Autopistas con sistemas inteligentes [28, 29].	34
2.4	Vías primarias del Ecuador [33].	35
2.5	Proyectos emblemáticos en infraestructura vial [1].	36
2.6	Ancho de vía de los carriles [34].	36
2.7	Materiales para la fabricación de los distintos tipos de baterías [38].	45
2.8	Análisis comparativo de las características técnicas de las luminarias [41].	52
2.9	Tecnología de las luminarias en Copenhagen [46].	58
2.10	Clasificación de las vías en función de la velocidad [51].	64
2.11	Clasificación del nivel de iluminancia media para diferentes autovías [52].	64
2.12	Relación del flujo luminoso de las lámparas y su altura de montaje [52].	64
2.13	Inversión realizada en infraestructura vial [2].	66
2.14	Comparación entre tecnologías de comunicación inalámbrica [61].	80
2.15	Características ZigBee [fuente propia].	82
4.1	Sistemas de detección vehicular [9].	97
4.2	Datos técnicos del Sensor HC-SR04 [fuente propia basado en 67].	99
4.3	Configuración del módulo XBee como coordinador [fuente propia].	106
4.4	Configuración del módulo XBee como router [fuente propia].	107
4.5	Principales características del Arduino MEGA [fuente propia].	108
4.6	Rendimiento entre luminarias de sodio de alta presión y LED [fuente propia].	121
4.7	Costo económico del servicio de alumbrado público convencional de 100Km de autopista [fuente propia].	123
4.8	Costo instalación fotovoltaica en 100 Km de autopista [fuente propia].	125

4.9	Costo económico del alumbrado público convencional en el Ecuador [fuente propia]	128
4.10	Costo económico del alumbrado fotovoltaico en Ecuador [fuente propia]	130
4.11	Ahorro energético del control de iluminación [fuente propia]	136

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Autopistas en construcción [fuente propia basado en 5].	5
2.1	Arquitectura del sistema de tele-gestión en alumbrado público [18]. .	10
2.2	Cifras de ahorro obtenido con sistemas de tele-gestión [18].	11
2.3	Porcentaje de ahorro de los sistemas de telegestión [18].	12
2.4	Ahorro en el consumo energético en la autopista Oslo - Asker [19]. . .	13
2.5	Evolución del comportamiento del sistema de iluminación en Oslo [19].	13
2.6	Sistema de comunicación del alumbrado público en Oslo [14].	14
2.7	Control de iluminación en Gothenburg, Högsboleden y Tuveleden [14].	15
2.8	Sistema de control de iluminación en Finlandia [18].	16
2.9	Esquema del sistema Luxicom [18].	16
2.10	Sistema de iluminación en Bélgica [18].	17
2.11	Estructura del sistema de gestión de alumbrado público JÚPITER [20].	18
2.12	Sistema de monitorización de iluminación adaptativo [10].	19
2.13	Esquema de bloques de la interfaz ZigBee-GPRS [10].	20
2.14	Sistema de iluminación en base el seguimiento de vehículos [21]. . . .	20
2.15	Algoritmo genético desarrollado en MATLAB [22].	21
2.16	Diagrama de bloques del sistema de monitorización en la nube [23]. .	22
2.17	Esquema del sistema de iluminación eficiente con sensores en red [9]. .	23
2.18	Diagrama de bloques del sistema de iluminación [24].	24
2.19	Tramo de la autopista Jambelí – Latacunga – Ambato [26].	25
2.20	Autopista doble de 4 carriles [27].	26
2.21	Indicadores de tráfico por carril en la autopista A9 [29].	27
2.22	Iluminación eficiente en túneles [29].	28
2.23	Asfalto recubierto por pintura dinámica con información de la vía [28].	29
2.24	Turbinas eólicas accionadas por el movimiento de vehículos [28]. . . .	29
2.25	Sistema fotovoltaico en Oregon [30].	31
2.26	Iluminación LED en la autopista A44 [31].	31
2.27	Autopistas proyectadas en Corea del Sur [32].	32
2.28	Pinturas dinámicas [28].	33
2.29	Sistemas renovables de iluminación [35].	37

2.30	Celda solar fotovoltaica [36].	38
2.31	Regulador de carga y descarga de un sistema solar fotovoltaico [36].	39
2.32	Inversor de corriente continua en corriente alterna [37].	40
2.33	Baterías usadas en los sistemas fotovoltaicos [36].	40
2.34	Esquema de una instalación solar fotovoltaica [37].	41
2.35	Diagrama de conexiones de los sistemas conectados a la red [36].	42
2.36	Diagrama de conexiones de un sistema fotovoltaico aislado [36]	43
2.37	Sistemas fotovoltaicos de iluminación [investigador basado en 36]	44
2.38	Insolación Global Horizontal en Sudamérica [39].	46
2.39	Insolación Directa, Difusa, Global del Ecuador [39].	47
2.40	Insolación global promedio sobre el territorio ecuatoriano [39].	48
2.41	Lámpara Fluorescente [40].	49
2.42	Lámpara de mercurio [40].	49
2.43	Lámpara Sodio de alta presión [40].	50
2.44	Lámpara LED [40].	50
2.45	Lámpara de Inducción [40].	51
2.46	Escala evolutiva de las luminarias en alumbrado público [42].	53
2.47	Distribución de las luminarias [7].	53
2.48	Diagrama de bloques de un sistema de generación híbrido [43].	54
2.49	Diagrama de la micro-red del sistema de iluminación en Lincoln [35]	55
2.50	Diagrama de conexiones del datalogger [44]	56
2.51	Medición de potencia [44]	56
2.52	Escenarios de operación el sistema de iluminación [45]	57
2.53	Proyección del consumo energético en Copenhagen [46]	58
2.54	Sistemas Renovables de generación eléctrica para Copenhagen [46]	59
2.55	Sistema de iluminación propuesto en Bangladesh [47].	60
2.56	Concentrador solar en la ciudad de Dhaka [48]	60
2.57	Sistema híbrido propuesto en la universidad de Houston [49].	61
2.58	Luminarias LED en estructuras tradicionales de iluminación [49].	62
2.59	Arquitectura del sistema TALiSMaN [50]	63
2.60	Facturación del servicio de alumbrado público entre 2006 y 2012 [53]	67
2.61	Luminarias deficientes en el alumbrado público [fuente propia]	69
2.62	Luminarias con escaso mantenimiento [fuente propia]	69
2.63	Disposición de luminarias para alumbrado público [54].	70
2.64	Excavaciones y tomas a tierra en alumbrado público [fuente propia]	71
2.65	Flujo luminoso de las luminarias LED a diferentes alturas [54]	72
2.66	Iluminación LED a superficies de diferentes dimensiones [fuente propia]	72

2.67	Esquema básico de un sistema inteligente de iluminación [55]	74
2.68	Errores en la identificación de vehículos [56]	75
2.69	Manguera Neumática en Carretera [58]	77
2.70	Instalación de un lazo de inducción [fuente propia]	77
2.71	Sistema RFID en la detección de vehículos [59]	78
2.72	Detección de vehículos por Radar de ondas milimétricas [60]	79
2.73	ZigBee Aliance [62]	81
2.74	Módulos XBee y sus placas compatibles para Arduino [fuente propia].	83
2.75	Topologías de red con XBee [62]	84
2.76	Control de la intensidad luminosa de luminarias LED [63]	85
2.77	Arquitectura del control MPPT [65]	85
2.78	Interfaz gráfica del control de iluminación [8]	86
2.79	Control y monitorización de información variada [66]	87
2.80	Diagrama de acceso a la plataforma cloud [23]	87
2.81	Configuración de la red de sensores [63]	88
4.1	Arquitectura del control inteligente de iluminación [fuente propia]	95
4.2	Descripción general del control de iluminación [fuente propia]	96
4.3	Sensor Ultrasonico HC-SR04 [67]	98
4.4	Esquema del sistema de detección vehicular [fuente propia]	100
4.5	Módulo XBee serie 2 [62]	101
4.6	Conexión básica de un módulo XBee [62]	102
4.7	Programador Usb XBee [fuente propia]	103
4.8	Interfaz del software X-CTU [fuente propia]	104
4.9	Configuración de los módulos XBee [fuente propia]	105
4.10	Arduino MEGA [fuente propia]	108
4.11	Valor de tensión en los paneles fotovoltaicos [fuente propia]	109
4.12	Esquema de bloques del Sistema Integrado Detección-Iluminación [fuente propia]	110
4.13	Diagrama de flujo para el control inteligente de iluminación [fuente propia]	111
4.14	Paneles fotovoltaicos con hongos [fuente propia]	112
4.15	Interfaz de usuario [fuente propia]	114
4.16	Tablero de servicios en hostinger [fuente propia]	115
4.17	Página web en hostinger [fuente propia]	116
4.18	Tabla de valores en la base de datos del servidor web [fuente propia]	116
4.19	Postes de iluminación propuestos [fuente propia]	117

4.20 Simulación del flujo vehicular en un solo sentido de la autopista [fuente propia]	118
4.21 Luminarias encendidas en función del flujo vehicular [fuente propia] .	119
4.22 Iluminación en ambos sentidos de circulación de la autopista [fuente propia]	119
4.23 Relación entre el flujo luminoso y la altura de montaje de las luminarias [fuente propia]	121
4.24 Relación del coste económico en función del tipo de luminaria [fuente propia]	124
4.25 Coste económico con instalación fotovoltaica [fuente propia]	126
4.26 Coste económico en iluminación pública nacional [fuente propia] . . .	129
4.27 Coste económico instalación fotovoltaica en Ecuador [fuente propia] .	130
4.28 Horas del control de iluminación pública [fuente propia]	131
4.29 Escenario 1 de iluminación [fuente propia]	132
4.30 Escenario 2 de iluminación [fuente propia]	132
4.31 Escenario 3 de iluminación [fuente propia]	133
4.32 Escenario 4 de iluminación [fuente propia]	133
4.33 Escenario 5 de iluminación [fuente propia]	134
4.34 Escenario 6 de iluminación [fuente propia]	135
4.35 Escenario mixto del control de iluminación [fuente propia]	135

RESUMEN

El consumo energético es un importante punto a tener en consideración en la operación y gestión de las autopistas. En el Ecuador, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas pretende construir un importante número de autopistas y superautopistas a nivel nacional. Por tal razón, es importante el desarrollo e implementación de innovadores sistemas de control en la iluminación pública de los espacios viales a construir. Además, en la presente propuesta se plantea la integración de sistemas renovables de generación eléctrica en el servicio de alumbrado público en las futuras autopistas y superautopistas del Ecuador.

En el desarrollo del presente trabajo de investigación, se describen las funcionalidades y principales características de las novedosas autopistas inteligentes a nivel internacional. Las experiencias internacionales indican que los sistemas e innovadoras técnicas de control en la iluminación pública de autopistas permitirían un importante ahorro de energía eléctrica. Asimismo, el empleo de eficientes luminarias LED brindarán un mejor servicio de iluminación y permitirán un mejor control de la energía a consumirse.

De esa manera, se plantea el diseño de un control inteligente de iluminación que estará integrado con módulos fotovoltaicos como fuente de generación de energía eléctrica, analizando así los sistemas de detección vehicular que operen junto al servicio de alumbrado público. El desarrollo de la presente propuesta comprende dos partes. En la primera parte, se determinan los requerimientos técnicos para la integración de sistemas de iluminación solar fotovoltaica en el servicio de alumbrado público de las autopistas. La segunda parte comprende una evaluación del impacto económico que alcanzaría la futura implementación práctica del control inteligente de iluminación fotovoltaica en las autopistas del Ecuador.

ABSTRACT

Energy consumption is an important point to be considered in the operation and management of highways. In Ecuador, the Ministry of Transport and Public Works plans to build a number of highways and superhighways nationwide. For this reason, it is important to develop and implement innovative control systems in public lighting of road space will build. Furthermore, in this proposal the integration of renewable power generation systems in public lighting service in future highways and superhighways of Ecuador arises.

In the development of this research, the main features and characteristics of novel intelligent highways internationally are described. International experience suggests that systems and innovative control techniques in public lighting highways allow significant electricity in savings. Likewise, the use of efficient LED lights provide better lighting service and allow better control of energy consumption.

Thus, this propose the design of an intelligent lighting control to be integrated with photovoltaic modules as a source of electricity generation, and the analyzing is of a vehicle detection systems that operate alongside the public lighting service. The development of this proposal comprises two parts. First the determination of a technical requirements for a solar photovoltaic lighting for street lighting service highways are determined. Second assestments of the economic impact to reach the future practical implementation of an intelligent control of photovoltaic lighting for highways in Ecuador.

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

Arduino: Es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, que se implementa para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

ASK: Del acrónimo en inglés Amplitude Shift Keying, significa modulación por desplazamiento de amplitud. Permite la modulación de datos digitales en base a la variación de la amplitud de la frecuencia portadora en función de la información a enviar.

ATMEGA: Representa la serie de chips de microcontroladores creados por la compañía de semiconductores Atmel que pertenecen a la serie Mega AVR. Como ejemplos de microcontroladores están: ATMEGA 328, ATMEGA 2560, ATMEGA 1280.

Bluetooth: Sistema de comunicación inalámbrica que permite la interconexión de diferentes dispositivos electrónicos. Es un estándar creado por importantes empresas del sector de la informática y de las telecomunicaciones.

CIE: Significa Corporación para la Investigación Energética que se desarrolla en el Ecuador.

CONELEC: Consejo Nacional de Electricidad. Es la institución que en Ecuador regula, planifica y controla los servicios públicos de suministro de energía eléctrica y de alumbrado público a nivel nacional.

CO₂: Dióxido de carbono o también conocido como anhídrido carbónico o gas carbónico. Las emisiones de este gas incentivan un incremento de temperatura en el proceso de calentamiento global.

Flujo Luminoso: Se refiere a la medida de la potencia luminosa percibida por el ojo humano.

FSK: Del acrónimo en inglés Frequency Shift Keying, significa modulación por desplazamiento de frecuencia, que permite la modulación de los datos para transmisión digital donde se utiliza dos o más frecuencias diferentes para cada símbolo o dato.

GWh: Son las siglas de Gigavatio hora. Es una medida de energía eléctrica equivalente a la que desarrolla una potencia suministrada de un gigavatio durante una hora.

Gnd: Son las siglas de Ground que significa tierra. Es el referente para conexiones de elementos electrónicos conocido como voltaje de referencia indicado por Gnd.

H: Representa la altura de montaje de las luminarias del servicio de alumbrado público.

Hardware Libre: Representa a dispositivos de hardware cuyas especificaciones y diagramas esquemáticos son de acceso público, ya sea bajo algún tipo de pago o de forma gratuita.

HC: Son las siglas de Hidrocarburos. Son compuestos básicos de la química orgánica formados por Hidrógeno y Carbono.

HPS: Son las siglas de High Pressure Sodium, que hace referencia a las luminarias del servicio de alumbrado público compuestas por vapor de sodio de alta presión.

HSP: Representan las horas solar pico de radiación que inciden sobre la superficie terrestre.

Hg: Símbolo químico del Mercurio. Hace referencia a las luminarias de vapor de mercurio empleadas en el servicio de alumbrado público.

IEC: Acrónimo de Comisión Electrotécnica Internacional. Hace referencia a la norma internacional IEC-61215 de certificación de los módulos fotovoltaicos en Ecuador.

INEN: Son las siglas del Instituto Ecuatoriano de Normalización. Hace referencia a la norma N° 162-2010 que establece las definiciones y condiciones necesarias para la señalización de las vías.

INER: Son las siglas del Instituto Ecuatoriano de Eficiencia Energética y Energías Renovables.

Lx: Símbolo del Lux. Es la unidad del sistema internacional que representa la iluminancia o nivel de iluminación. Es equivalente a un lumen /m².

Lm: Símbolo del Lumen. Es la unidad del Sistema internacional de medidas para medir el flujo luminoso emitido por una fuente de luz.

LED: Del acrónimo inglés Light Emitting Diode que significa diodo emisor de luz, hace referencia a los elementos pasivos optoelectrónicos que conforman una luminaria del servicio de alumbrado público.

Linux: Es uno de los términos empleados para referirse a la combinación del núcleo o kernel libre similar a Unix denominado Linux con el sistema GNU.

Luminosidad: Es el número de partículas por unidad de superficie y por unidad de tiempo en un haz de luz.

MW: El megavatio es una unidad de potencia en el Sistema Internacional equivalente a un millón de vatios

MAC: Es un entorno operativo basado en Unix, desarrollado, comercializado y vendido por Apple Inc.

MTOP: Son las siglas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Su misión es garantizar un sistema nacional del transporte intermodal y multimodal, sustentado en una red de transporte con estándares internacionales de calidad.

MWp: Significa Mega vatio pico. Hace referencia al máximo valor de energía que alcanzan los módulos fotovoltaicos según especificaciones de su fabricante.

Na: Símbolo químico del Sodio.

NREL: Son las siglas de National Renewable Energy Laboratory que significa Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos.

PVLED: En inglés es Photovoltaic Light Emitting Diode. Hace referencia a las luminarias integradas por LED que operan en el servicio de alumbrado público.

RaspberryPi: Es un ordenador de placa reducida de bajo coste, desarrollado en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación.

Reloj Astronómico: Es un tipo de reloj en donde se representan datos astronómicos como son: la posición del sol, la luna, las constelaciones de estrellas. Asimismo, existen relojes interruptores que calculan automáticamente la hora de salida y puesta del sol en función de la posición geográfica del lugar donde está instalado el reloj.

RFID: En inglés es Radio Frequency Identification, que en español es identificación por radiofrecuencia. Es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remoto que usa dispositivos denominados etiquetas, tarjetas, transpondedores o tags RFID.

RTB: Son las siglas de Red Telefónica Básica. Se define como el conjunto de elementos constituido por todos los medios de transmisión y conmutación necesarios para enlazar a voluntad dos equipos terminales mediante un circuito físico.

SAPG: Son las siglas del Servicio de Alumbrado Público General que regula el CONELEC.

Software Libre: es la denominación del software que respeta la libertad de todos los usuarios que adquirieron el producto y, por tanto, una vez obtenido el mismo, puede ser usado, copiado, estudiado, modificado y redistribuido libremente de varias formas.

Shield: Significa Escudo. Hace referencia a los módulos de expansión de Arduino formados por dispositivos semiconductores y microchips.

Vcc: Se refiere al flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial, que no cambia de sentido con el tiempo.

VRLA: Son las siglas que representan a una batería de ácido-plomo regulada por válvula, más comúnmente conocida como batería sellada o batería libre de mantenimiento.

Wi-Fi: Es un mecanismo de conexión de dispositivos electrónicos de forma inalámbrica.

Windows: Es el nombre de una familia de distribuciones de Sistemas operativos para PC, smartphone, servidores y sistemas empujados, desarrollados y vendidos por Microsoft.

XBee: Es el nombre comercial de Digi International para una familia de módulos de comunicación inalámbrica por radio frecuencia.

ZigBee: Es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal.

INTRODUCCIÓN

El Gobierno Nacional a través del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, MEER, plantea el uso eficiente de la energía como una solución ante el cambio climático y la contaminación medioambiental. En este sentido, la energía empleada en el sistema de alumbrado público de autopistas, calles, carreteras, plazas, es un escenario importante para aplicar medidas de control y gestión energética. El MEER busca que el sistema de alumbrado público integre criterios de eficiencia energética en el diseño, operación y mantenimiento en las instalaciones del servicio de alumbrado público.

El presente trabajo analiza las diversas características y funcionalidades de las autopistas inteligentes desarrolladas e implementadas en varios países industrializados. En base a las diferentes experiencias internacionales encontradas a nivel mundial ha surgido la idea de diseñar un innovador control de iluminación en las autopistas. El mismo que se plantea desarrollar en el territorio continental ecuatoriano.

La ubicación geográfica del Ecuador es privilegiada para la implementación de nuevas fuentes generadoras de energía como es el caso de la energía solar fotovoltaica. A escala mundial, los sistemas fotovoltaicos se encuentran muy desarrollados. Lo que permite utilizarlos en un gran número de aplicaciones, como en sistemas de iluminación pública. Las experiencias internacionales indican que la iluminación pública con sistemas fotovoltaicos presentan un gran rendimiento y un importante ahorro tanto económico como energético.

El control de iluminación contará con un sistema de generación eléctrica autónoma que estará conformado por módulos fotovoltaicos. Es decir que se tendrá estaciones fotovoltaicas aisladas en cada poste para la iluminación de las vías.

Además, desde el punto de vista medio ambiental el presente trabajo promete ser una solución ante la emisión de gases contaminantes que se producen en el proceso de generación de energía eléctrica, para aquellos países con un sistema de generación eléctrico predominantemente fósil.

Para obtener un mayor ahorro energético y económico se ha planteado que el control de la iluminación fotovoltaica sea inteligente. El control empleará un sensor que permita la detección de los vehículos que circulan por las autopistas. De esta manera, el sistema de iluminación fotovoltaica pasará a operar en función de los vehículos que se encuentren circulando por la autopista en ese momento.

Las luminarias se podrán controlar de forma independiente, ya que se comunicarán de manera inalámbrica, lo que permite crear redes con una mejor operabilidad del sistema de iluminación pública.

Además, el control inteligente de iluminación fotovoltaico estará liderado por un microcontrolador. Se prevé que en un futuro no muy lejano, el control inteligente de iluminación fotovoltaico podrá integrarse en las nuevas tecnologías de la información y comunicación.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA

1.1. Tema de Investigación

“Control Inteligente de Iluminación Fotovoltaica para Autopistas en Ecuador”

1.2. Planteamiento del problema

El incremento de la población condiciona el funcionamiento de los sistemas de transporte público y privado. Para garantizar niveles adecuados de movilidad, los Estados deben realizar importantes inversiones en la construcción de autopistas, líneas de metros y tranvías.

En los países industrializados existe una gran preocupación por transformar las grandes vías de transporte en autopistas inteligentes. Las autopistas inteligentes proporcionan una serie de funcionalidades e innovaciones tecnológicas en cuanto a materiales de construcción y a la utilización de dispositivos inteligentes para mejorar la conducción, ahorrar energía y que sean más sostenibles e interactivas tanto para los conductores y usuarios de las autopistas como para las brigadas de mantenimiento.

En el Ecuador, en los últimos años se ha implementado un ambicioso Plan de Construcción de Autopistas. El Gobierno Nacional ha realizado una gran inversión en la construcción, reconstrucción, mejoramiento, ampliación, rectificación, rehabilitación, terminación, mantenimiento y remodelación de carreteras, puentes, puertos y aeropuertos ubicados a lo largo y ancho del territorio nacional. De acuerdo al Ministerio de Transporte y Obras Públicas existen 8.653 kilómetros de carreteras, de las cuales 6.741 son administradas de forma directa, 1.350 kilómetros están concesionados y 562 kilómetros delegados a los consejos provinciales.

En la tabla 1.1, se observa el tipo de intervención realizado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en las carreteras bajo administración estatal [1].

El incremento de la población condiciona el funcionamiento de los sistemas de transporte público y privado. Para garantizar niveles adecuados de movilidad, los Estados deben realizar importantes inversiones en la construcción de autovías, autopistas, líneas de metros y tranvías.

En los países industrializados existe una gran preocupación por transformar las grandes vías de transporte en autopistas inteligentes. Las autopistas inteligentes proporcionan una serie de funcionalidades e innovaciones tecnológicas en cuanto a materiales de construcción y a la utilización de dispositivos inteligentes para mejorar la conducción, ahorrar energía y que sean más sostenibles e interactivas tanto para los conductores y usuarios de las autovías como para las brigadas de mantenimiento.

En el Ecuador, en los últimos años se ha implementado un ambicioso Plan de Construcción de Autopistas. El Gobierno Nacional ha realizado una gran inversión en la construcción, reconstrucción, mejoramiento, ampliación, rectificación, rehabilitación, terminación, mantenimiento y remodelación de carreteras, puentes, puertos y aeropuertos ubicados a lo largo y ancho del territorio nacional. De acuerdo al Ministerio de Transporte y Obras Públicas existen 8.653 kilómetros de carreteras, de las cuales 6.741 son administradas de forma directa, 1.350 kilómetros están concesionados y 562 kilómetros delegados a los consejos provinciales.

En la tabla 1.1, se observa el tipo de intervención realizado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en las carreteras bajo administración estatal [1].

Tabla 1.1: Tipo de intervención en las carreteras bajo administración estatal [1].

ESTADO ACTUAL	TIPO DE PAVIMENTO	LONGITUD KM	PORCENTAJE %
INTERVENIDAS	Pavimento Flexible	3.382	50.2
	Pavimento Rígido	1.118	16.6
	Doble Tratamiento Superficial Bituminoso	180	2.7
	Mantenimiento	2.061	30.5
TOTAL		6.741	100.00

Con una inversión aproximada de 5.000 millones de dólares, se estima que hacia el año 2014, unos 1.286 kilómetros de vías serán convertidas en súperautopistas. Estas inversiones proporcionarán al Ecuador una infraestructura de gran estándar técnico y funcional a nivel internacional. Según el informe de rendición de cuentas del año 2012 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, la inversión total contratada en vialidad desde el año 2007 hasta el año 2012 fue de 7.592 millones de dólares. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas intervino en un total de 7.600 kilómetros de carreteras [2]. En el Ecuador, en los últimos años se ha visto un gran avance en la construcción de obras viales. Sin embargo, la iluminación de las autopistas implica un gran consumo de energía eléctrica en esas infraestructuras. Esta situación ha generado una gran preocupación en diversos organismos gubernamentales por reducir el coste económico del consumo energético en los sistemas de iluminación urbano y rural. El Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), es el encargado de regular el suministro eléctrico del sistema de iluminación público en calles y autopistas. En la Regulación No 008/11 del CONELEC se define que la continuidad del servicio de alumbrado público general debe estar encendido un tiempo promedio de 12 horas [3]. El empleo de 12 horas de iluminación pública refleja un excesivo consumo de energía. En el caso de la iluminación de autopistas y carreteras, en períodos nocturnos con tráfico reducido, ese consumo energético es exagerado y se deberán adoptar las medidas adecuadas para la minimización del consumo energético en los períodos nocturnos. Actualmente, el CONELEC, se llama ARCONEL que es la Agencia de Regulación y Control de la Electricidad.

Además, los sistemas de iluminación empleados en las autopistas y carreteras del país provoca un excesivo consumo de energía, ya que utiliza luminarias de gran potencia y reducida eficiencia impidiendo un significativo ahorro energético. El elevado consumo energético en iluminación implica un coste económico muy elevado para el Estado ecuatoriano.

1.3. Delimitación del Problema

De Contenido

Área Académica: Física y Electrónica

Línea de Investigación: Sistemas Electrónicos

Sub línea de Investigación: Fuentes de Energías Alternativas

Delimitación Espacial:

La investigación se llevo a cabo en la ciudad de Ambato.

Delimitación Temporal:

La duración de la investigación se llevo a cabo en un tiempo de doce meses a partir de la aprobación del proyecto por parte del Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato.

1.4. Justificación

El presente proyecto tiene como finalidad presentar un innovador sistema de control de la iluminación de autopistas en Ecuador, coadyuvando un considerable ahorro en el consumo de energía destinado a los sistemas de iluminación pública.

La integración de fuentes renovables en la iluminación de autopistas está en concordancia con los objetivos de la Subsecretaría de Energía Renovable y Eficiencia Energética, encargada de promover y proponer la implementación de políticas, estrategias, proyectos y acciones tendientes a desarrollar y aplicar planes de energía renovable y el uso eficiente de la misma en todo el país [4, 5].

El plan estratégico de movilidad que el gobierno nacional propone es muy ambicioso. En este sentido, la construcción de carreteras de alta capacidad en todo el país permitirá implementar vías terrestres que unirán Machala-Guayaquil (196 kilómetros), Guayaquil-Quevedo (175 kilómetros), Guayaquil-La Cadena (190 kilómetros), Manta-Quevedo , Quevedo-Santo Domingo (130 kilómetros) y Esmeraldas-Santo Domingo, Santo Domingo-Alóag [6].

En la figura 1.1, se muestran las autopistas que se proyectan construir en el Plan Estratégico de Movilidad.

1.5.2. Específicos

1. Analizar los sistemas de detección vehicular.
2. Analizar los sistemas de iluminación fotovoltaica para autopistas inteligentes.
3. Determinar los requerimientos técnicos para el diseño de un control inteligente de iluminación fotovoltaica para autopistas en Ecuador.
4. Calcular el ahorro energético del sistema de alumbrado gracias a la implementación de un sistema de control inteligente de iluminación fotovoltaica para autopistas en Ecuador.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes Investigativos

La investigación sobre tecnologías de control y gestión de la iluminación pública en calles, vías y autopistas es un tema de especial interés para la comunidad científica. Los sistemas de iluminación en alumbrado público presentan un elevado consumo de energía eléctrica. Se estima que el consumo de electricidad en iluminación representa el 19 % del total de energía eléctrica mundial según la Administración de Información de Energía de Estados Unidos, EIA, [7]. Asimismo, el servicio de alumbrado público de autopistas presenta un consumo anual de 14 mil millones de kWh, equivalente al 3 % del total del consumo eléctrico. En China, el valor anteriormente indicado se incrementa al 6 % [8]. En el Reino Unido, existen alrededor de 9 millones de farolas con una facturación de 110 millones de libras al año [9]. En la India, existen 4,4 millones de luminarias con un consumo anual de 3 billones de kWh, equivalente a 2,3 millones de toneladas de emisiones de CO₂ a la atmósfera [10].

En el Ecuador, el porcentaje de luminarias de alto consumo eléctrico, sodio de alta presión, vapor de mercurio, lámparas halógenas e incandescentes, supera el 99 % sobre el total existente. El Estado ecuatoriano gasta más de 100 millones de dólares anuales en el servicio de iluminación pública de calles, vías y autopistas. La construcción de nuevas y más modernas autopistas, así como las viviendas de inclusión incrementarían significativamente el consumo de energía en los sistemas de iluminación. Las luminarias de estado sólido de tecnología LED presentan, actualmente, una eficiencia superior a los 100 lm/w. Se prevé que la eficiencia de las luminarias LED alcance los 150 lm/w en los próximos años [8]. Asimismo, los LED han evolucionado hacia los novedosos High Brightness LED, HB-LED, que no emiten luz ultravioleta y permiten reducir la radiación de calor en un 80 % menos en comparación con las bombillas incandescentes [11].

En [12], se presentó un estudio comparativo entre luminarias LEDs y las luminarias de sodio de alta presión, considerando características técnicas, económicas y parámetros de percepción visual humana. El estudio de las luminarias LED se sustentó en base a la novedosa tendencia tecnológica de los High Brightness LED, Low Power HB-LEDs y Power HB-LED, donde, las luminarias con LEDs de alto brillo y bajo consumo eléctrico poseen un valor nominal de intensidad de 20mA, a diferencia de HB-LEDs de alto consumo, que proporcionan un flujo de intensidad que oscila entre 350 y 1000 mA. En el mencionado trabajo, se demostró que una luminaria de 250 W puede ser reemplazada por luminarias LEDs con valor mínimo de 97,53 W y un valor máximo de 120 W. Asimismo, se menciona que la diferencia más importante entre las dos tecnologías es la tasa de distorsión armónica, en términos anglosajones, THD, con valores de 22,4 % para las luminarias Low Power HB-LEDs y 3,33 % para las luminarias Power HB-LED.

En México, en el año 2012, la Comisión Federal de Electricidad evaluó el impacto ambiental de la sustitución de luminarias convencionales por luminarias LED. Se estimó un ahorro en energía del 64 %, equivalente a 33.192 toneladas de dióxido de carbono que no serán emitidas a la atmósfera [13]. En la tabla 2.1, se resume un análisis comparativo de consumo de energía en los sistemas de iluminación y el coste económico e impacto medio ambiental de los sistemas de iluminación en diferentes países industrializados [14].

Tabla 2.1: Comparación de emisiones en Autopistas de países industrializados [14].

Location and Number of Residents	Estimated Number of Streetlights	Estimated Number of KWh per Year	Estimated Annual Electricity Cost for Streetlights	Estimated Annual CO₂ Emissions due to Streetlights (in tons)
U.S	> 68 millions	> 300 billion	> \$18 billion	>150 million
European Union	> 90 millions	> 450 billion	> \$45.5 billion	>180 million
U.K	7.5 million	> 4 billion	> \$650 million	>1.9 million
France	8.6 million	5.3 billion	\$520 million	583,000
Los Angeles (U.S.)	220.000	> 100 million	> \$17 million	>60,000
Paris (France)	170.000	> 80 million	> \$10.2 million	>9,000
<i>Want to get an idea for your city? (Estimates based on average figures in Europe)</i>				
If N is the number of residents in your city	Streetlights (S) = N/6	E = Sx490	B= Ex0.09	CO ₂ = Ex0.45
Example for a city of 60,000 residents	10,000 Streetlights	4.9 million KWh Per year	\$440.000	2,200 tons of CO ₂

La integración de las innovadoras tecnologías LED en sistemas renovables de iluminación se configura como una estrategia energética sostenible, que evitará el grave impacto medioambiental y visual de las redes de iluminación en calles y vías, además, de proporcionar un importante ahorro económico relacionado con la construcción de zanjas, postes y uso de cables eléctricos.

Existen numerosas experiencias de integración de tecnologías de generación eléctrica, basadas en energías renovables, en sistemas de iluminación pública en diversos países del mundo. En países como Bangladesh, Estados Unidos, China, Dinamarca, México, Marruecos y en la India se han implementado sistemas renovables de iluminación pública en calles, vías, carreteras y autopistas.

Estas instalaciones de iluminación renovable demuestran la viabilidad técnica y económica de integrar sistemas renovables para el suministro de energía a las luminarias de los sistemas de iluminación públicos.

Las fuentes de energías renovables permiten mitigar las emisiones contaminantes, aprovechar un recurso autóctono y local, evitar las pérdidas en los sistemas de distribución eléctrica, reducir el empleo de cables y zanjas en la fase de construcción de los sistemas de iluminación y desacoplar el consumo eléctrico de las luminarias del sistema eléctrico convencional. Así, los sistemas de iluminación integrados en sistemas de generación eléctrica renovable presentan un crecimiento del 20-25 % anual. Adicionalmente, la tecnología de las luminarias LED son compatibles con los sistemas renovables de iluminación pública [15].

En la actualidad, todas las investigaciones relacionadas con los sistemas de iluminación se centran en implementar dispositivos y elementos que reduzcan significativamente el consumo de energía eléctrica. Los innovadores sistemas de control de luminosidad y la integración de energías renovables para el suministro de energía a las luminarias son las innovaciones tecnológicas más implementadas y experimentales. En los siguientes párrafos, se presentan los estudios de diferentes investigaciones realizadas con el objetivo de reducir el consumo energético con ayuda de sistemas de control de las luminarias y la integración de energías renovables.

A finales del siglo XXI, se iniciaron las investigaciones relacionadas con la implementación de sistemas de control inteligente de la iluminación en calles y vías. En Holanda, en los años 90, se implementó un proyecto piloto de control inteligente de iluminación en 14 kilómetros de una autopista de 6 carriles. El prototipo evaluó los niveles de iluminación a aplicar en función de la capacidad de percepción y conducción segura. El proyecto piloto demostró que no existen efectos negativos a niveles de iluminación equivalentes al 20 % del nivel de iluminación convencional.

Por tanto, según los resultados del mencionado proyecto, se concluyó que un nivel de iluminación del 20% es suficiente para flujos reducidos de tráfico nocturno y buenas condiciones climáticas. En Estados Unidos y China, desde el año 2000 se inició la implementación de sistemas de tele-gestión del control de la iluminación pública. Los sistemas de tele-gestión implementados se basaron en la programación de temporizadores de control de iluminación [16, 17].

Entre el año 2005 y 2008, Noruega, Portugal, Bulgaria, Suecia, Eslovenia, Alemania, Dinamarca, República Checa, Polonia, Irlanda, Finlandia y Holanda consolidaron el proyecto *E – Street*. El proyecto consiste en transformar las autopistas tradicionales en entornos inteligentes con grandes funcionalidades. En el proyecto se propuso un esquema de tele-gestión del alumbrado público en las autopistas, adaptado e implementado en cada país participante en función de sus características meteorológicas y condiciones geográficas particulares. El esquema de tele-gestión consta de un grupo de sensores que recogen información de las condiciones climáticas y del tráfico vehicular, el conjunto de sensores es llamado como segmento de caja, -segment box-. La información recogida es procesada en unidad central, la misma que envía señales de control de luminosidad a las luminarias a través de diferentes protocolos de comunicación, figura 2.1 [18].

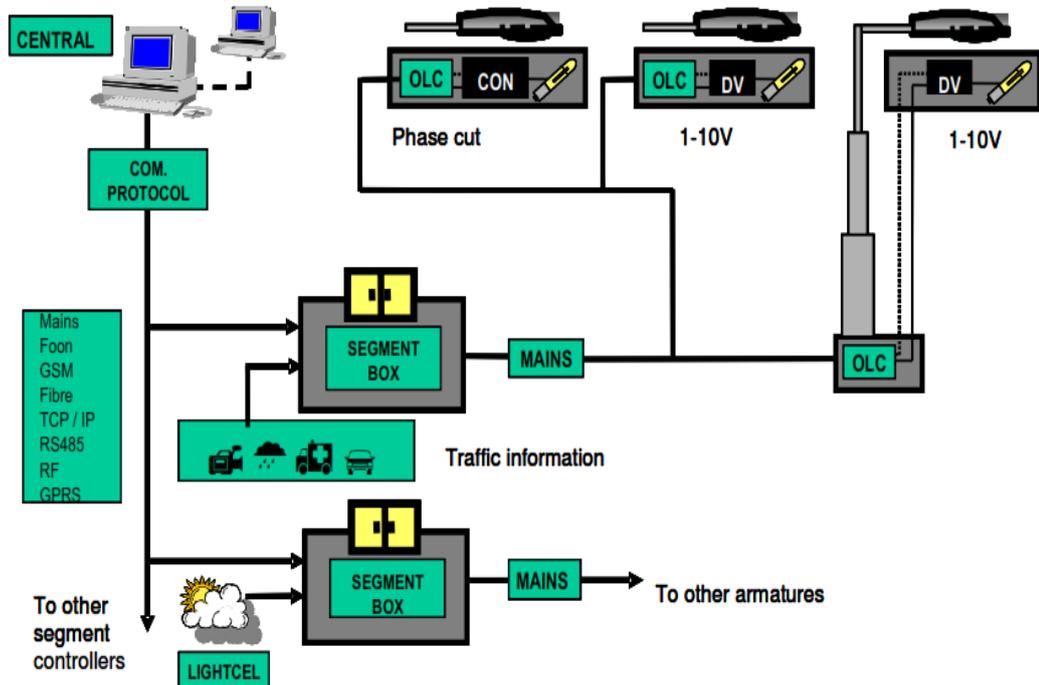


Figura 2.1: Arquitectura del sistema de tele-gestión en alumbrado público [18].

En el Proyecto E-Street, se realizó una primera aproximación del cálculo de ahorro de energía gracias a la implementación de un sistema de control de iluminación en una autopista. En el cálculo se considera un sistema de tele-gestión que controla la iluminación en 1000 luminarias. Cada luminaria tiene una potencia instalada de 150 W.

Una cabina de control contiene un sistema de programación y control de 100 luminarias y funcionan según los datos astronómicos de la localización geográfica. En Europa, se obtendrán mayores ahorros de energía en invierno que en verano. La implementación de sistemas de tele-gestión de los sistemas de iluminación, basados en datos meteorológicos, permiten ahorros de energía de hasta un 45 % en relación a los consumos convencionales sin ningún tipo de control o reemplazo de luminarias ineficientes [18].

En la figura 2.2, se presenta el ahorro anual obtenido por la implementación de un sistema de tele-gestión de control de la iluminación en autopistas en Noruega.

ENERGY SAVINGS	Telemanagement	No TM	
Overall Installed Power	150	150	kW
Annual working hours	4.150	4,150	h
Annual energy consumption	622.500	622,500	kWh
Annual energy saving (kWh)	280.125	-----	kWh
Annual energy saving (%)	45	-----	%
Light Points	1,000	1,000	

Figura 2.2: Cifras de ahorro obtenido con sistemas de tele-gestión [18].

La implementación de un sistema inteligente de telegestión de la iluminación en las calles, vías y autopistas de Europa permitiría obtener un ahorro anual de 36 TWh, un 63,7 % del consumo total de energía eléctrica dedicado a los sistemas de iluminación [18].

En la figura 2.3, se observa el comportamiento diario de un sistema de tele-gestión y el nivel de ahorro que se puede obtener.

Energy savings with telemanagement



Figura 2.3: Porcentaje de ahorro de los sistemas de telegestión [18].

En Noruega, en la ciudad de Oslo, desde el año 2003, se ha implementado uno de los más innovadores y avanzados sistemas de control de iluminación para autopistas en el mundo.

En el año 2005, en los alrededores del noreste de la ciudad de Oslo se reemplazaron 4500 luminarias, con un total instalado de 677,8 kW y un promedio de 150,6 W de potencia instalada en cada luminaria, por 4400 luminarias, con un total instalado de 444,3 kW y un promedio de 101 W de potencia instalada en cada luminaria.

El simple recambio de antiguas luminarias por luminarias más modernas permitió obtener un ahorro de 34,5% en la potencia instalada total de las luminarias. En Noruega, además, se ha implementado un sistema de control en el tramo de autopista entre las ciudades de Oslo y Asker que ha permitido obtener una reducción en el consumo de energía igual al 30%.

En la figura 2.4, se muestra la reducción de coste anual en iluminación en función del precio de la energía en el tramo de autopista entre Oslo y Asker [19].

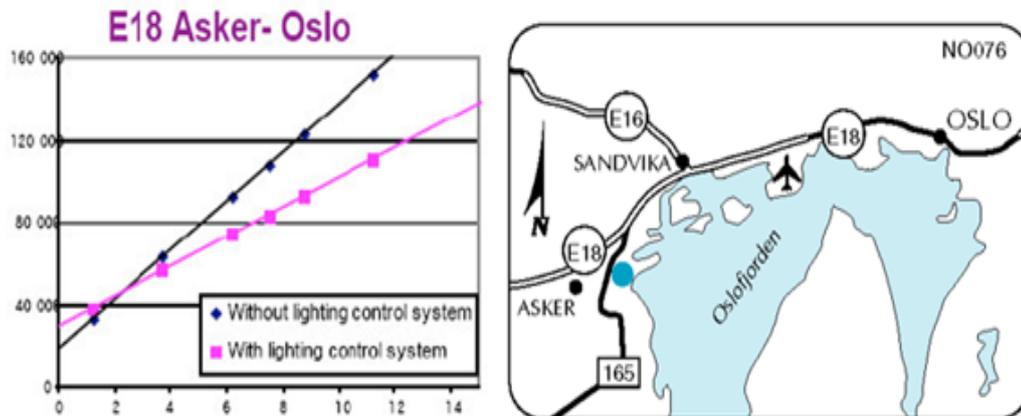


Figura 2.4: Ahorro en el consumo energético en la autopista Oslo - Asker [19].

El re-diseño del sistema de iluminación en Oslo demostró la posibilidad de un importante ahorro energético, aproximadamente un 70 %, al sustituir luminarias de vapor de mercurio por luminarias de sodio de alta presión. La reducción de consumo energético se realizó en dos fases: el reemplazo de luminarias poco eficientes y el control inteligente de la luminosidad de las luminarias. La evolución del comportamiento del sistema de iluminación en la ciudad de Oslo se muestra en la figura 2.5 [19].

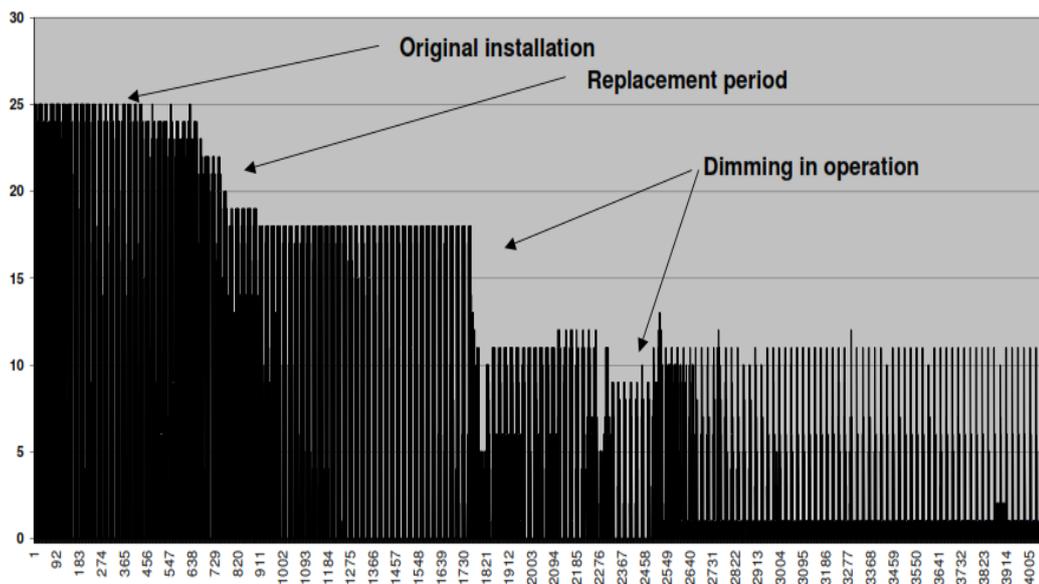


Figura 2.5: Evolución del comportamiento del sistema de iluminación en Oslo [19].

En la ciudad de Oslo, 100 servidores de Internet permiten la monitorización del sistema de iluminación pública. El sistema de telegestión implementado permite controlar 55000 luminarias conectadas a la red del servicio de alumbrado público.

En la figura 2.6, se muestra la conexión del sistema de iluminación con los servidores de Internet. El sistema de comunicación implementado entre luminarias utiliza la tecnología power line communications, PLC [14].

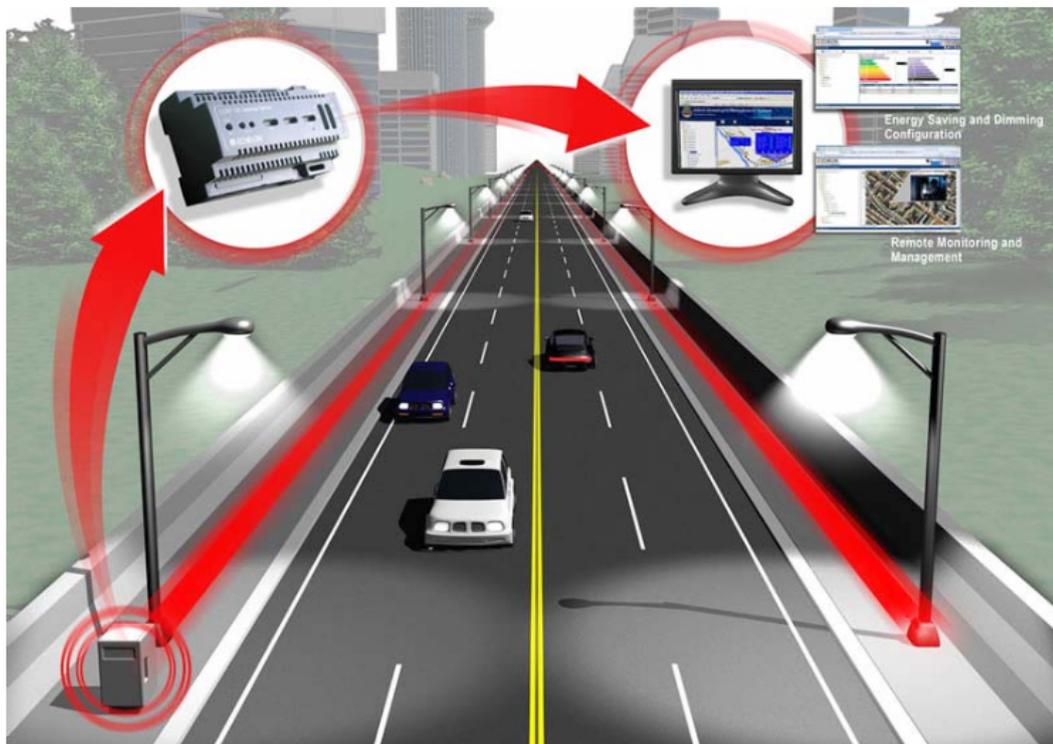


Figura 2.6: Sistema de comunicación del alumbrado público en Oslo [14].

En [14], se estima que la implementación de 10 mil luminarias modernas de cualquier sistema de iluminación pública de autopistas, vías y calles en la ciudad de Oslo podría evitar la emisión de 1440 toneladas anuales de CO₂ en países con un sistema eléctrico basado en centrales térmicas de carbón o petróleo.

Por otro lado, en Suecia, entre agosto del año 2006 y septiembre del 2007, se implementó un sistema de control de iluminación adaptativa en un tramo de autopista que une las ciudades de Gothenburg, Högsboleden y Tuveleden. En el mencionado tramo, se reemplazó 366 luminarias tradicionales de elevado consumo eléctrico por 283 luminarias inteligentes de mayor eficiencia. Este cambio permitió un ahorro del 37% en verano y se espera que ese porcentaje aumente entre el 40% y 45% en la estación de invierno.

El sistema está conformado por dos esquemas: una red de sensores detectan las condiciones meteorológicas y del flujo vehicular, conectados a través de una red PLC hacia las luminarias; y un nodo de red que permite la monitorización del sistema desde un ordenador.

Se estimó que el tiempo de retorno de la inversión se encuentra en un rango entre 8 y 12 años, figura 2.7 [14].

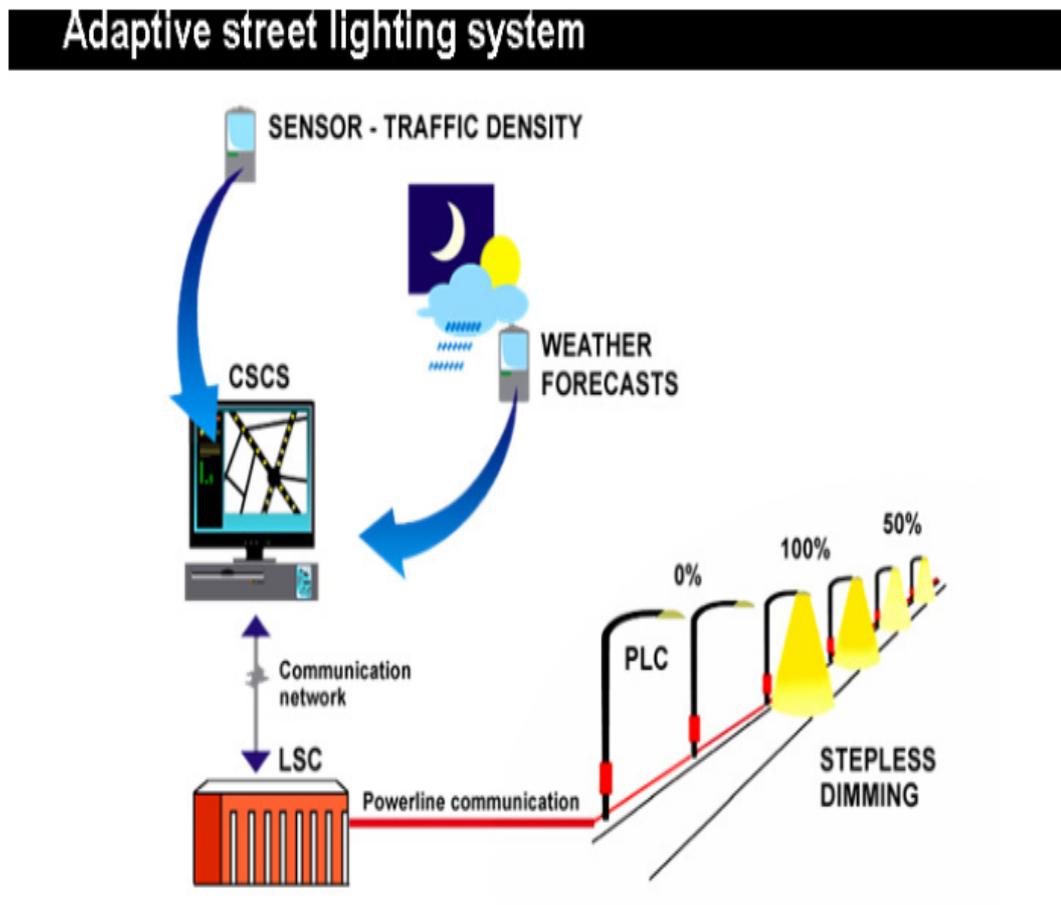


Figura 2.7: Control de iluminación en Gothenburg, Högsboleden y Tuveleden [14].

En Finlandia, dentro del proyecto E-Street, se ha implementado un sistema inteligente que recoge información del tráfico vehicular, las condiciones climáticas y la calidad de iluminación en las vías.

En un tramo de 4 kilómetros de autopista se controlan 492 luminarias que garantizan el servicio de iluminación en la carretera. En un futuro, se espera que el sistema garantice un ahorro en iluminación vial y una mejor calidad y eficiencia del servicio.

La comunicación de las luminarias está basada en una red telefónica, figura 2.18.

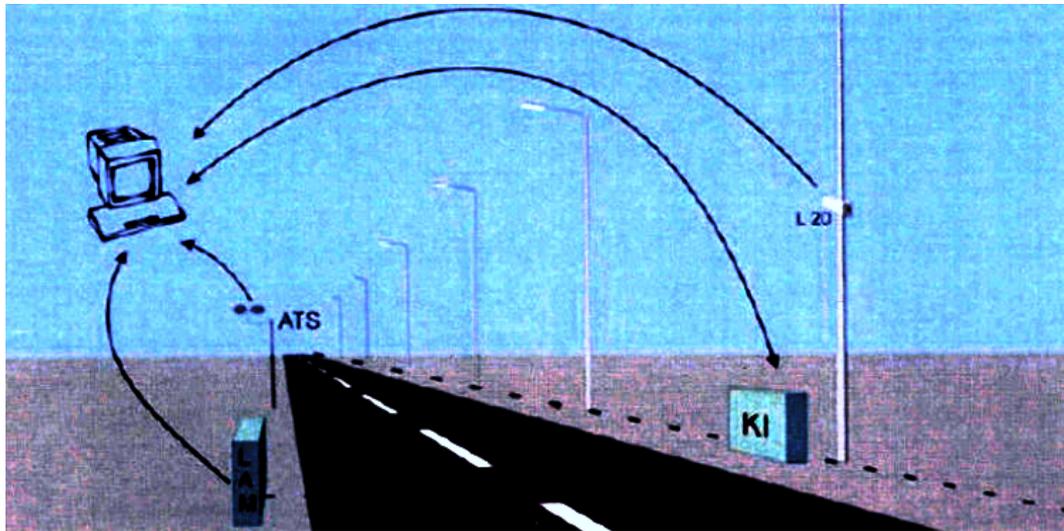


Figura 2.8: Sistema de control de iluminación en Finlandia [18].

En la República Checa, bajo financiación del proyecto E-Street, se implementó un control de iluminación individual para cada luminaria. En su capital, la ciudad de Praga, se han instalado sistemas de ahorro de energía como el sistema de tele-gestión Luxicom. Inicialmente, se tenía un consumo de 5080 kWh/año, con la implementación del moderno sistema de tele-gestión se consume 3911 kWh/año, se calcula un ahorro del 23%, figura 2.9 [18].

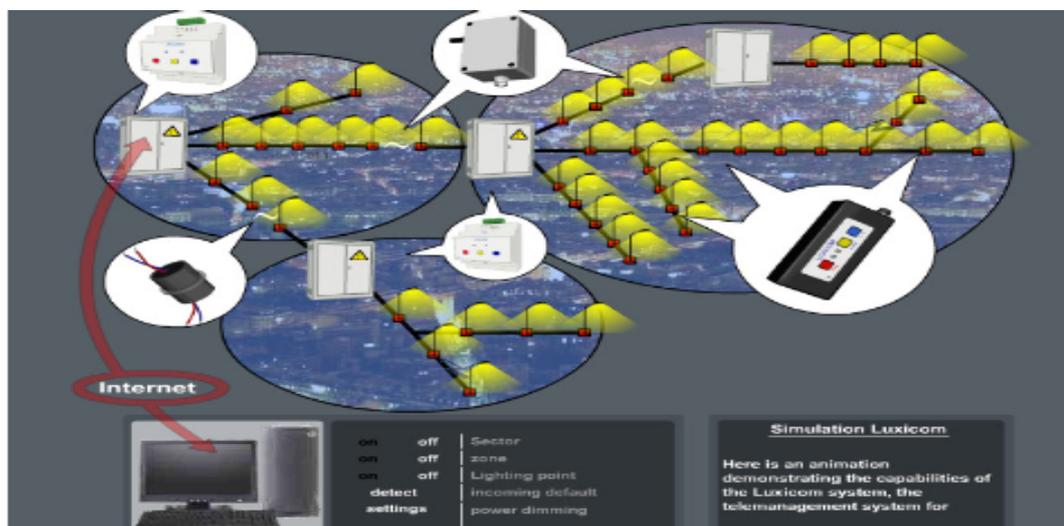


Figura 2.9: Esquema del sistema Luxicom [18].

En Bulgaria, bajo el proyecto E-Street, se puso en ejecución varios proyectos de iluminación eficiente. Así en la ciudad de Sofía, el municipio planificó el diseño de un sistema piloto de iluminación inteligente. En este sentido, la empresa SIEMENS ha desarrollado un sistema de iluminación inteligente en la ciudad de Sliven. Por otro lado, el diseño del sistema de iluminación en la ciudad de Varna se implementó en cuatro niveles: un centro de información y control, segmentos controlados, luminarias controladas y balastos electrónicos o magnéticos, que controlan el nivel de luminosidad de las luminarias. El sistema está enlazado a través de las redes existentes y en algunos tramos por una red GSM.

Por otra parte, en Bélgica, gracias al proyecto E-Street, se desarrolló e implementó un innovador sistema de iluminación. El sistema presenta un mayor ahorro en iluminación pública al controlar el nivel de iluminación de las luminarias en función de las condiciones meteorológicas y del flujo vehicular. El control de las luminarias redujo el nivel de contaminación lumínica. Las zonas de iluminación se controlan de manera independiente empleando una interfaz gráfica de control que opera a través de Internet, figura 2.10 [18].

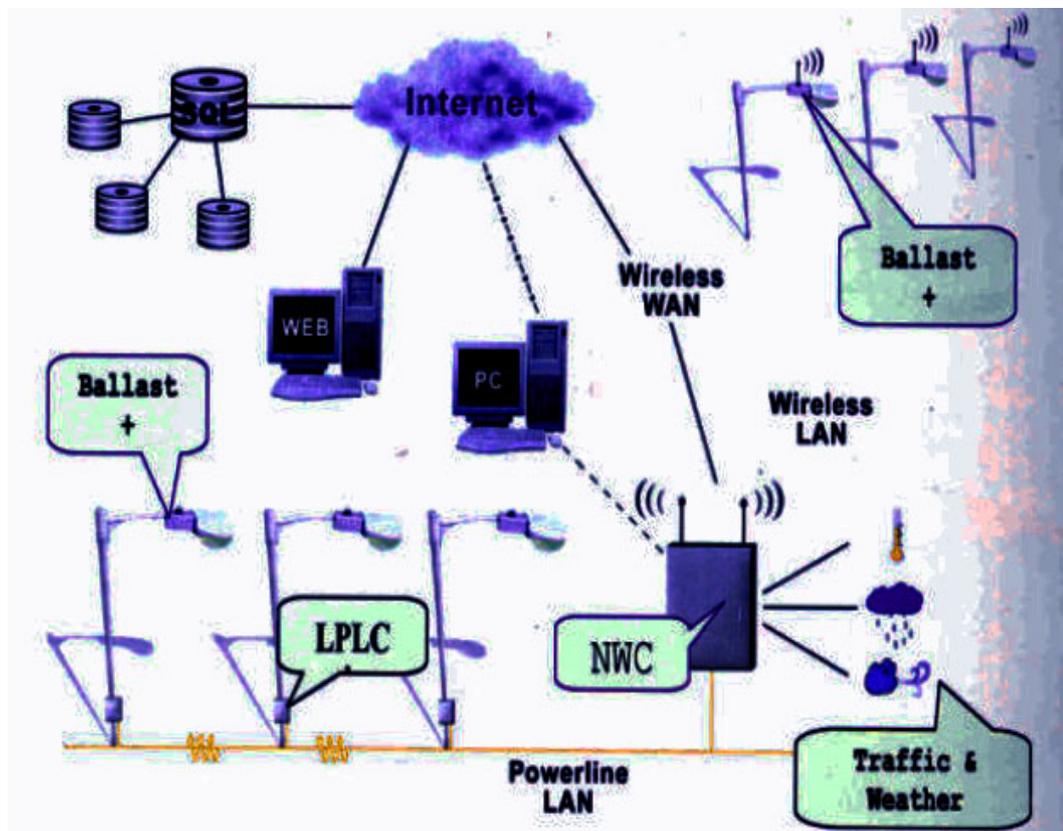


Figura 2.10: Sistema de iluminación en Bélgica [18].

En el año 2009, en Polonia, la empresa Elektroim S.A. realizó una importante investigación sobre la implementación de un sistema de gestión del alumbrado público denominado “Júpiter” [20].

El sistema SCADA establece una comunicación inalámbrica con los dispositivos de interfaz humana. En la figura 2.11, se muestra la estructura del sistema de gestión Júpiter y las principales conexiones entre sus capas de gestión.

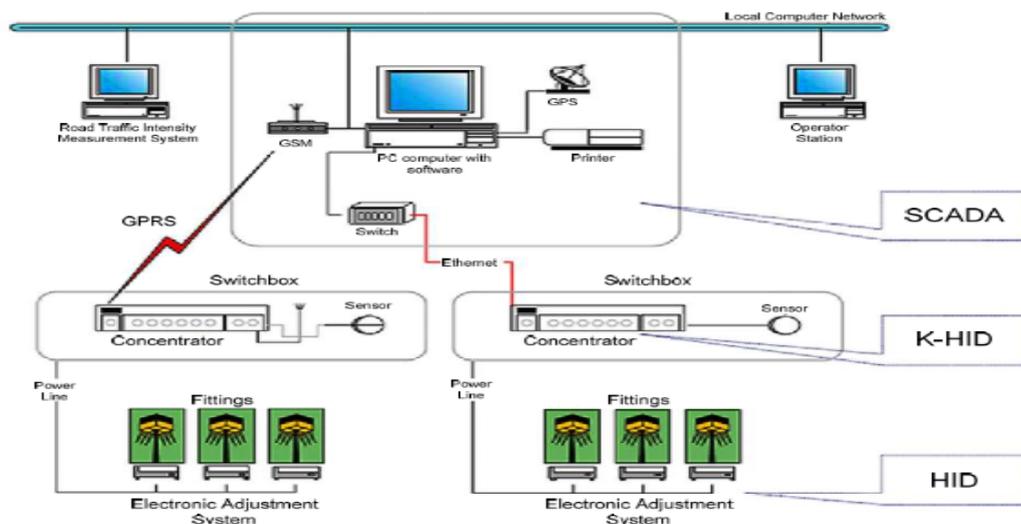


Figura 2.11: Estructura del sistema de gestión de alumbrado público JÚPITER [20].

El sistema de gestión SCADA, anteriormente mencionado, se desarrolló en tres etapas:

- La primera etapa se basó en el desarrollo del software de gestión del alumbrado público, ofreciendo así una interfaz amigable con el usuario para una futura comercialización.
- La segunda etapa correspondió a la realización de mediciones del balastro electrónico, controlando el paso de corriente eléctrica hacia las luminarias. Las mediciones se realizaron en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad de Tecnología de Wroclaw en Polonia.
- La tercera y última etapa se centró en el análisis económico de los diversos factores que influyen los costos de operación y mantenimiento del sistema “Júpiter” y en una evaluación comparativa con los sistemas de alumbrado tradicional.

En el año 2012, en la India, [10], se implementó un control de iluminación inteligente basado en una red inalámbrica que permite realizar una monitorización adaptativa en tiempo real del sistema de iluminación de la carretera. El sistema de monitorización se basa en una red inalámbrica conformada por tecnología GPRS, un microprocesador y terminales informáticos, figura 2.12.

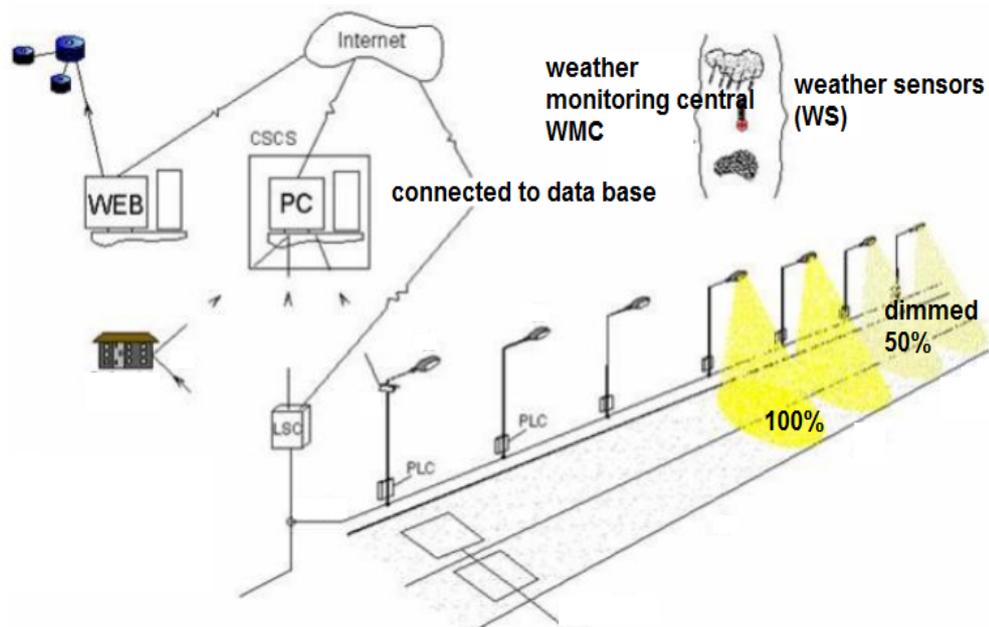


Figura 2.12: Sistema de monitorización de iluminación adaptativo [10].

El sistema de monitorización adaptativo integra cinco subsistemas: un equipamiento de detección al borde de la vía, un sistema de potencia, un control local del sistema, un sistema de control de supervisión central y un sistema de comunicación en red.

El control del sistema de iluminación permite reducir el nivel de luminosidad en un 40 % para las horas en que no existe aglomeración de flujo vehicular. Una reducción de la luminosidad superior al 50 % afecta a la visión de humana, puesto que el mencionado nivel de iluminación es imperceptible para el ojo humano. Por otro lado, la comunicación de las luminarias se establece a través de una interfaz ZigBee-GPRS donde los datos son procesados por un microcontrolador MC9S08DZ60 de escala libre, figura 2.13 [10].

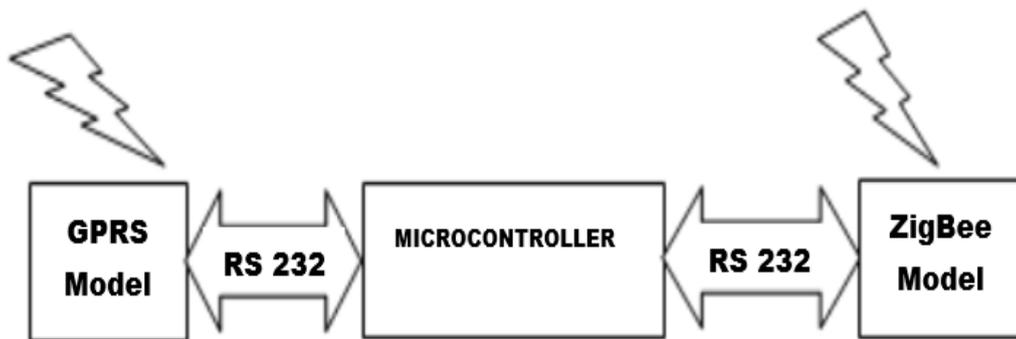


Figura 2.13: Esquema de bloques de la interfaz ZigBee-GPRS [10].

En el año 2012, en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Osijek, Croacia, se presentó un novedoso sistema de detección vehicular, basado en una red ZigBee de sensores de transmisión de información [21]. El mencionado trabajo se divide en dos propuestas. En la primera, se realiza la monitorización del flujo vehicular y las condiciones atmosféricas que se presentan durante el día. Mientras que la segunda propuesta consiste en implementar un sistema de monitorización en tiempo real del tráfico existente. Si existen vehículos circulando por la autopista, el sistema predice su movimiento y envía señales inalámbricas a las luminarias para incrementar su luminosidad en un radio de 350 metros de alcance, figura 2.14.

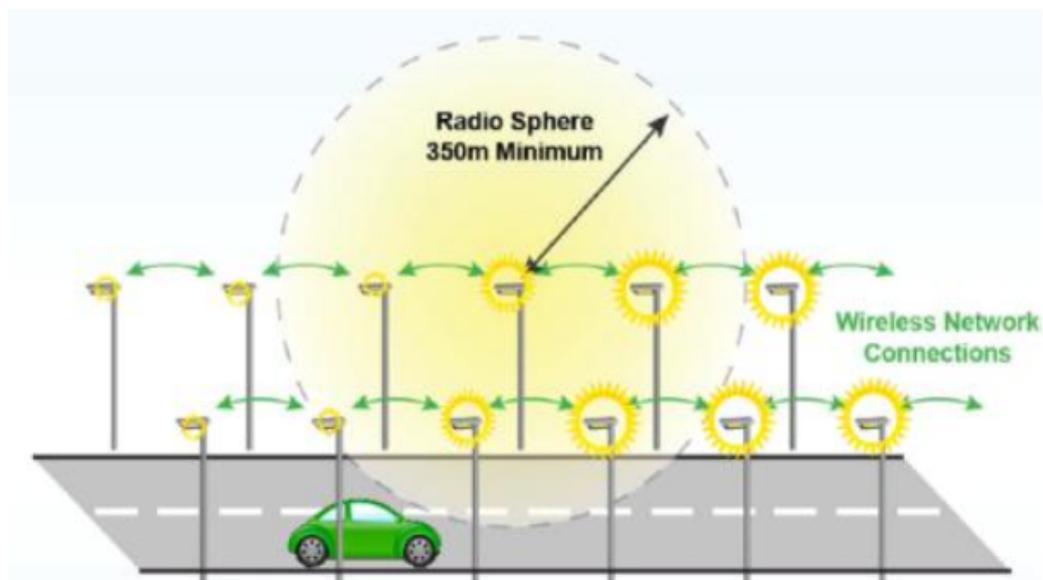


Figura 2.14: Sistema de iluminación en base el seguimiento de vehículos [21].

En el año 2013, en la Universidad Tecnológica de Malasia, realizó un estudio que aborda la optimización del control de iluminación pública y el desarrollo óptimo de sistemas híbridos de energía renovable. En este sentido, se desarrolló un algoritmo basado en un método inteligente que regula el nivel de iluminación en función de las condiciones de flujo vehicular. Las simulaciones del comportamiento del sistema de iluminación se realizó con el software MATLAB en base a datos reales del flujo vehicular y las condiciones meteorológicas. En la figura 2.15, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado en MATLAB. La variable principal del sistema de control es la radiación solar, permitiendo determinar el estado de operación del sistema de generación fotovoltaico [22].

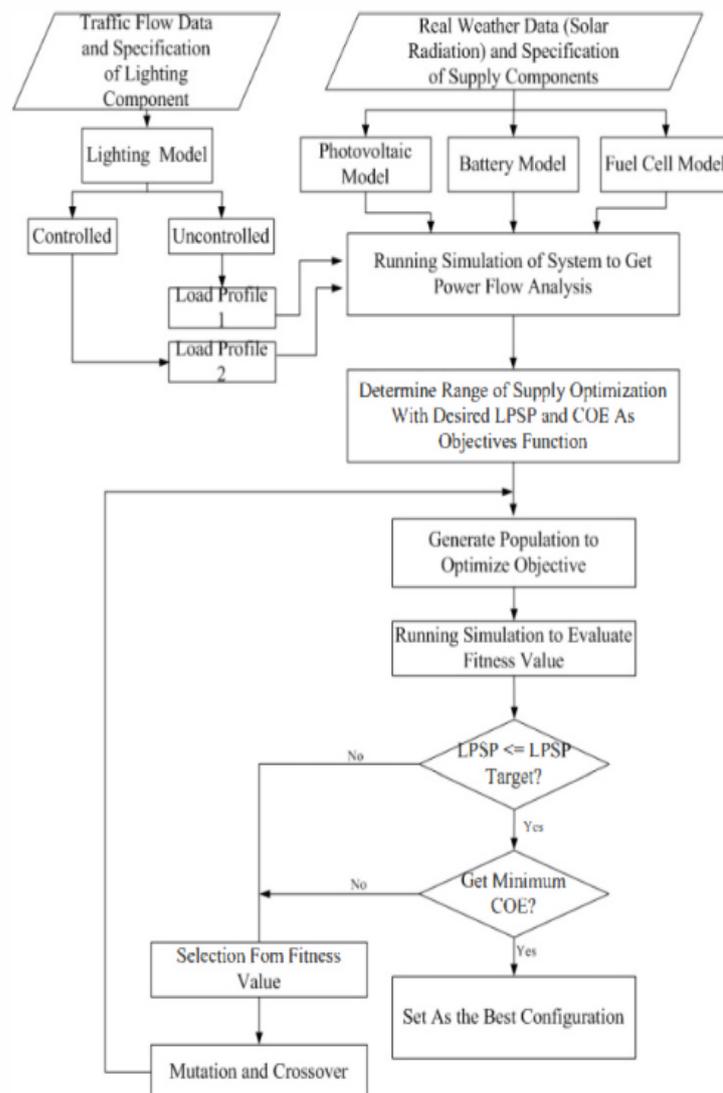


Figura 2.15: Algoritmo genético desarrollado en MATLAB [22].

En Chennai, en el Instituto Tecnológico de Ingeniería, India, en el año 2014, se propuso un sistema de iluminación basado en una plataforma de monitorización en la nube. La información acerca del estado de operación del sistema de iluminación se actualizará automáticamente a través de Internet [23]. Además, en casos de emergencia la información estará disponible en una estación base.

Por otra parte, el control del nivel de luminosidad está integrado por sensores infrarrojos que detectan el movimiento de las personas y dispositivos ZigBee que establecen una comunicación inalámbrica entre la estación base y las luminarias, figura 2.16.

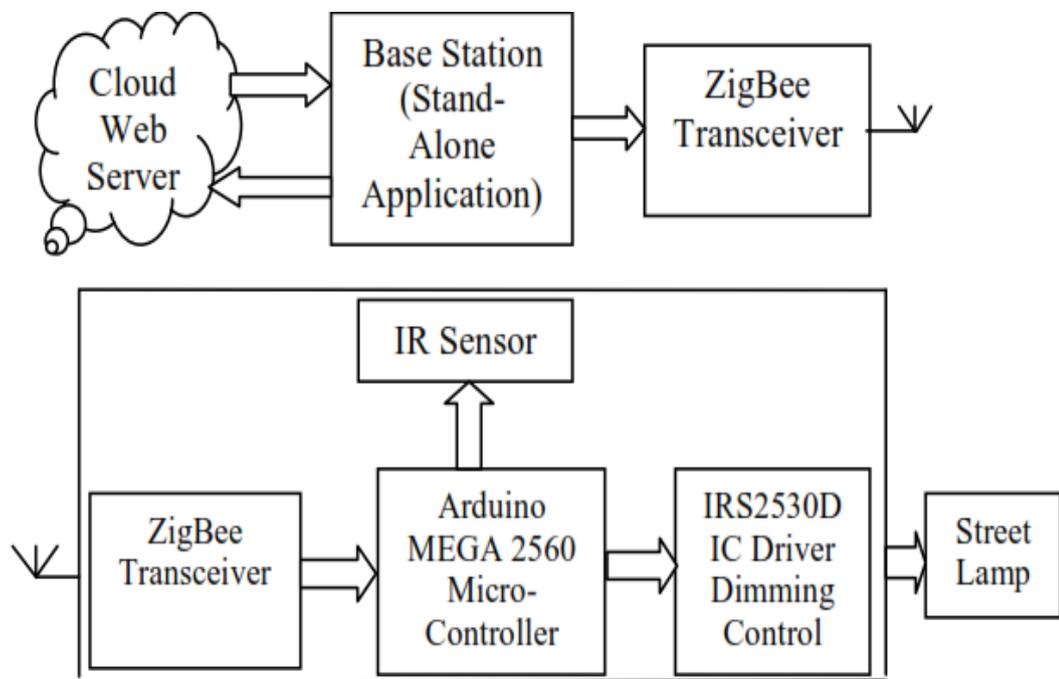


Figura 2.16: Diagrama de bloques del sistema de monitorización en la nube [23].

En Marruecos, en la Universidad Al Akhawayn, en el año 2014, se desarrolló una red de sensores que transmiten información a través de módulos ZigBee.

En conjunto, los dispositivos ZigBee y las luminarias se integran en un eficiente sistema de iluminación. Para obtener un nivel eficiente de iluminación, el mencionado sistema establece una distancia máxima entre las luminarias igual a 15 metros. Si el vehículo es detectado en un tramo de autopista, los sensores transmiten la información a una unidad de control, que procesa dicha información y las luminarias incrementan su flujo luminoso, figura 2.17 [9].

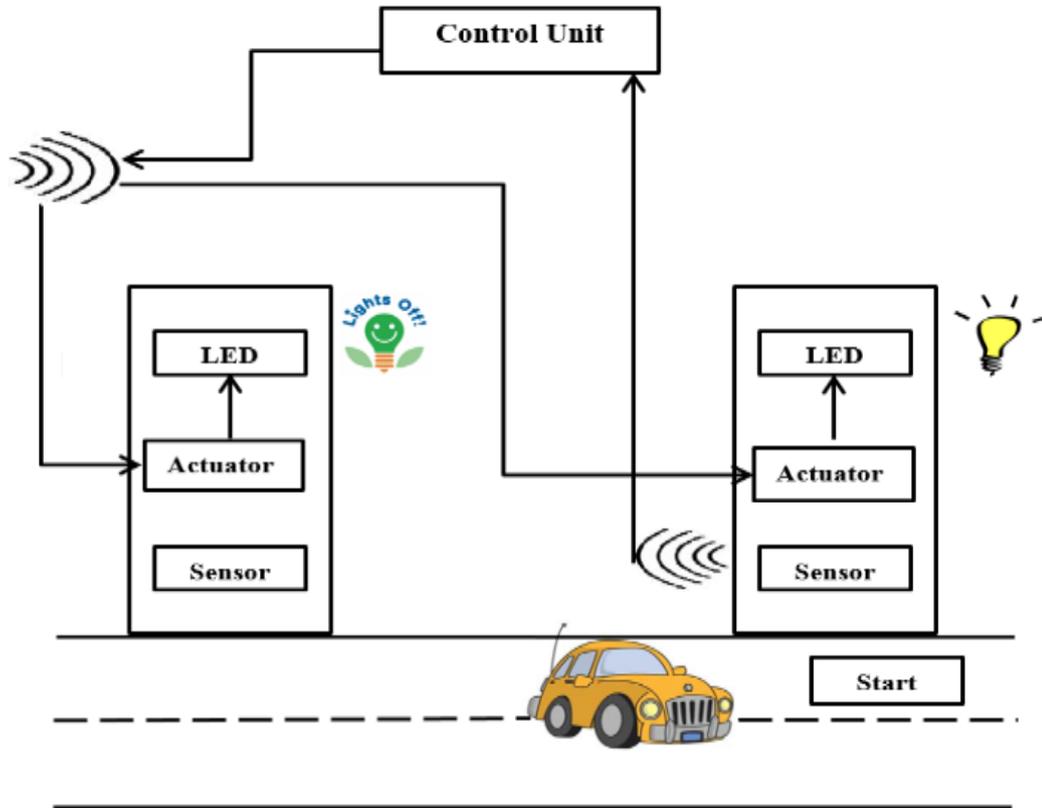


Figura 2.17: Esquema del sistema de iluminación eficiente con sensores en red [9].

Finalmente, en el año 2014, en la Universidad Karunya, India,[24], se presentó un método que transforma los sistemas fotovoltaicos de iluminación LED en sistemas inteligentes.

El método integra un conjunto de sensores que detectan la presencia de vehículos y de personas. La información de los sensores se transmite a través de enlaces inalámbricos ZigBee a una estación de control conformada por un microcontrolador ATMEGA 16. El microcontrolador genera una modulación por ancho de pulso, PWM, que regula la intensidad luminosa sobre un arreglo de diodos LED.

Además, el sistema de iluminación posee un pequeño interruptor que controlará el encendido de las luminarias en casos de emergencia. El método presentado supone un ahorro entre el 20 y 35 % del consumo de energía del sistema inteligente de alumbrado público en comparación con los sistemas de iluminación convencionales.

La interfaz RS232 permite la comunicación de la estación de control con el sistema de visualización. La visualización permite la interacción del usuario con el sistema de control a través de una interfaz gráfica desarrollada en Visual Basic, figura 2.18.

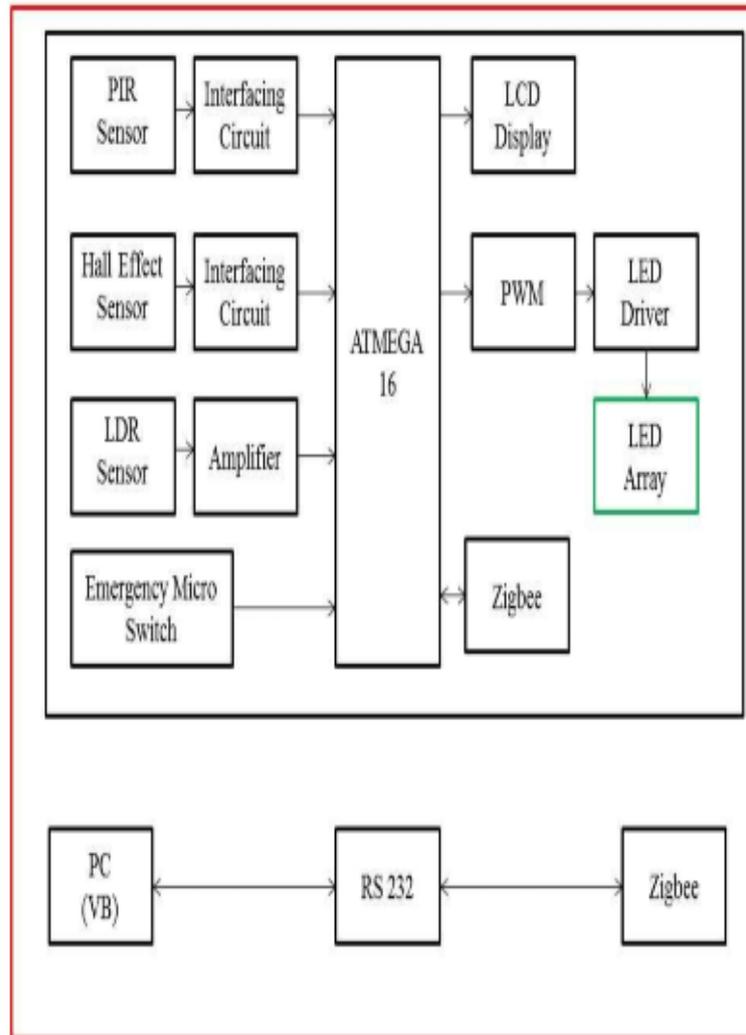


Figura 2.18: Diagrama de bloques del sistema de iluminación [24].

En resumen, existen muchas experiencias que indican que la implementación de sistemas inteligentes de control de la iluminación en calles, vías y autopistas es un tema de especial interés.

En los siguientes apartados, se describen los aspectos más importantes, experiencias existentes y las últimas innovaciones tecnológicas en las autopistas, sistemas renovables de iluminación y en los sistemas de control de iluminación.

2.2. Fundamentación teórica

El presente trabajo de investigación se centrará en el desarrollo e implementación de un novedoso prototipo de control inteligente de iluminación para su posterior testeo y realización de pruebas en calles, vías y, preferentemente, en autopistas. Asimismo, el proyecto aborda la elaboración de una metodología de evaluación de la viabilidad económica de la integración de sistemas renovables en iluminación pública y su aplicación práctica a los sistemas de alumbrado público en el Ecuador.

2.2.1. Autopistas inteligentes

En este apartado, se describe el concepto de autopista y las principales funcionalidades que caracterizan a las novedosas autopistas inteligentes. Asimismo, se presentaran las experiencias reales de implementación práctica de autopistas inteligentes en el mundo.

2.2.1.1. Definición y funcionalidades

La Real Academia Española, RAE, define a una autopista como “una carretera que tiene calzadas separadas, con dos sentidos de circulación los cuales pueden tener dos o más carriles sin cruces a desnivel” [25]. En Ecuador, desde hace varios años, se ejecutan proyectos viales con las mencionadas características. En la figura 2.19, se observa el tramo de autopista Jambelí – Latacunga – Ambato [26].



Figura 2.19: Tramo de la autopista Jambelí – Latacunga – Ambato [26].

Una autopista es inteligente cuando contiene numerosas aplicaciones que interactúan con los usuarios al detectar la presencia de vehículos.

En Inglaterra, en el año 2008, Mouchel, Empresa de Mantenimiento y Servicios de Autopistas, presentó un sistema inteligente de tráfico para una autopista doble de 4 carriles de 40 kilómetros de longitud. Se estimó un consumo eléctrico por cada portal proporcional a 20 kW de potencia instalada. El sistema de iluminación asociado a cada tramo de 800 metros sería equivalente a una potencia instalada de 18 kW, figura 2.20 [27]. En cada tramo de la autopista propuestas, en Inglaterra, exigiría una potencia instalada total de 38 kW.

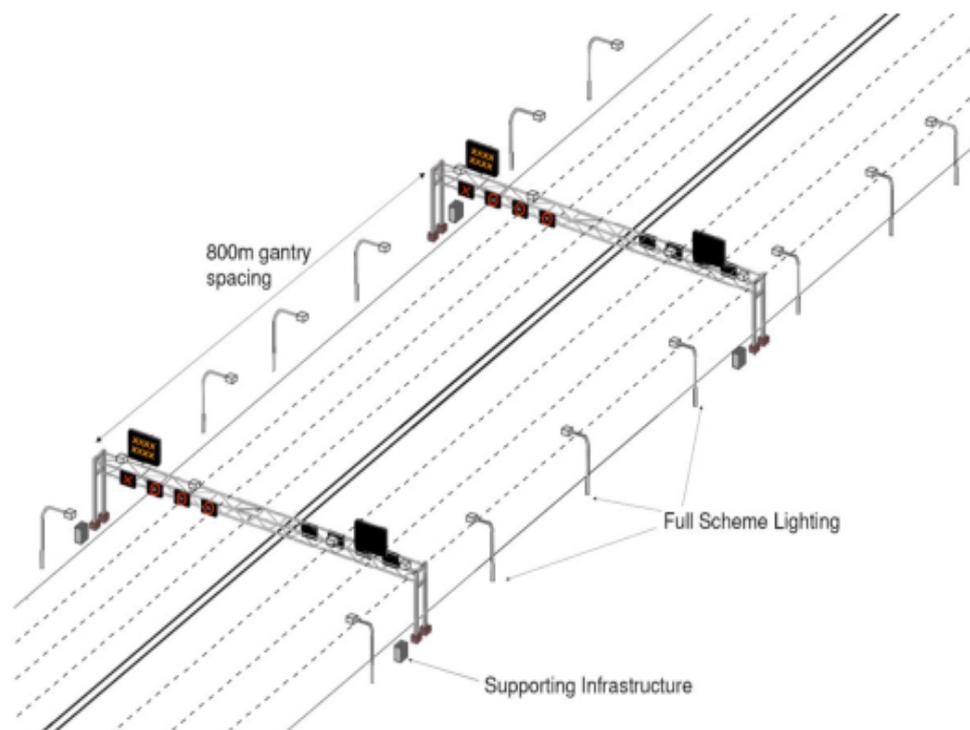


Figura 2.20: Autopista doble de 4 carriles [27].

Se calculó que un sistema de generación fotovoltaico formado por paneles solares con una potencia de 125 W, instalados en una superficie de 160 m^2 , sería suficiente para satisfacer la demanda de energía eléctrica correspondiente a los 20 kW de potencia instalada de cada portal totalmente equipado, indicado en el párrafo anterior [27].

Por otra parte, las novedosas autopistas inteligentes a nivel internacional proporcionan una serie de funcionalidades e innovaciones tecnológicas. En Holanda, la infraestructura vial se transforma en una estructura más sostenible e interactiva

tanto para los usuarios de las autopistas como para las brigadas de operación y mantenimiento [28]. En los siguientes párrafos se detallan las principales funcionalidades que se desarrollan en las autopistas.

- En el año 2011, en Alemania, la autopista A9 implementó sistemas inteligentes, obteniendo una importante reducción de accidentes de tránsito y un ahorro del 20 % en el tiempo de circulación, puesto que reducen los congestionamientos, figura 2.21 [29].

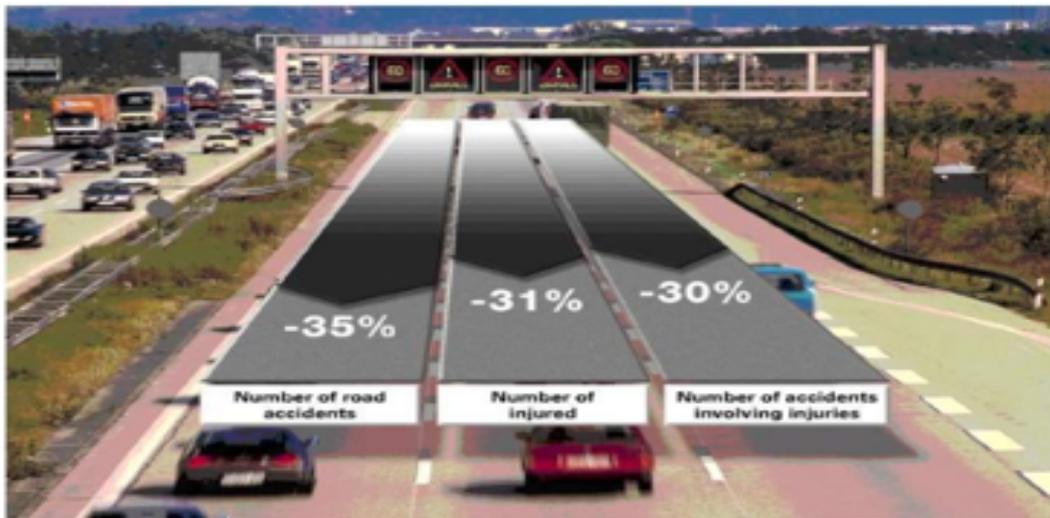


Figura 2.21: Indicadores de tráfico por carril en la autopista A9 [29].

- Asimismo, en Holanda, en la autopista Vlakte, se diseñó un eficiente control en la iluminación de túneles que permite incrementar el nivel de seguridad de los usuarios y brinda un mejor entorno medioambiental al reducir las emisiones de gases contaminantes en las infraestructuras anteriormente mencionadas, figura 2.22 [29].



Figura 2.22: Iluminación eficiente en túneles [29].

En Holanda, en diciembre del 2014, la constructora Heijmans y el diseñador Daan Roosgarde presentaron novedosas propuestas para la transformación de las modernas autopistas en autopistas inteligentes. Entre las innovadoras propuestas se detallan a continuación las siguientes [28]:

- Sistemas inteligentes de iluminación que se encienden al detectar la presencia de vehículos y se apagan o reducen al mínimo su potencia de operación cuando no existe circulación de vehículos.
- Calzadas que contienen líneas con pinturas especiales que se recargan con la luz solar y que brillan en la noche.
- Asfalto recubierto de pintura dinámica que alerta al conductor cuando la superficie de la autopista se encuentra cubierta por hielo o presenta elevadas temperaturas, figura 2.23 [28].

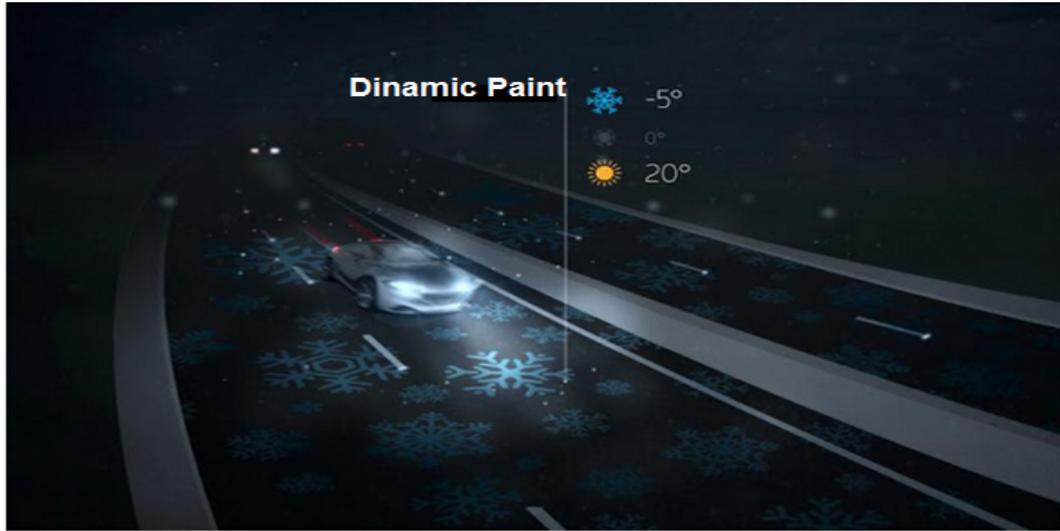


Figura 2.23: Asfalto recubierto por pintura dinámica con información de la vía [28].

- Pequeños generadores eólicos que operan por medio de la ráfaga de aire que producen los vehículos al circular por las autopistas, figura 2.24 [28].



Figura 2.24: Turbinas eólicas accionadas por el movimiento de vehículos [28].

En la tabla 2.2, se muestra un resumen de las funcionalidades adicionales, proporcionadas por las autopistas inteligentes e implementadas en países industrializados como Polonia, Alemania, Grecia, Austria, Turquía, Hongkong, Holanda [29]. Entre las que destacan los sistemas de monitoreo, sistemas de operación y gestión, estaciones de visualización con sistemas GIS.

Tabla 2.2: Funcionalidades de las Autopistas Inteligentes [29].

<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>

2.2.1.2. Experiencias internacionales

Actualmente, diversos países del mundo han iniciado un proceso acelerado de construcción e implementación de autopistas inteligentes. En el año 2009, en Estados Unidos, el Departamento de Transporte de Oregon, ODT, implementó un sistema renovable de iluminación en las autopistas. Se instalaron 594 paneles solares que producen alrededor de 112.000 KWh al año, figura 2.25 [30].



Figura 2.25: Sistema fotovoltaico en Oregon [30].

En el año 2011, Holanda equipó la autopista A44 con sistemas de iluminación inteligentes basados en tecnologías LEDs. El empleo de luminarias LED, en la autopista A44, representa un ahorro de 180.000 kWh al variar la intensidad de luz en sus luminarias. De esta manera, Holanda pretende tener la primera autopista con iluminación LED en un futuro no muy lejano. Se indica que el 60% del consumo de energía en las autopistas está asociado al alumbrado público y para reducir el mencionado consumo es imprescindible reemplazar las luminarias convencionales por soluciones LED más sostenibles, figura 2.26 [31].

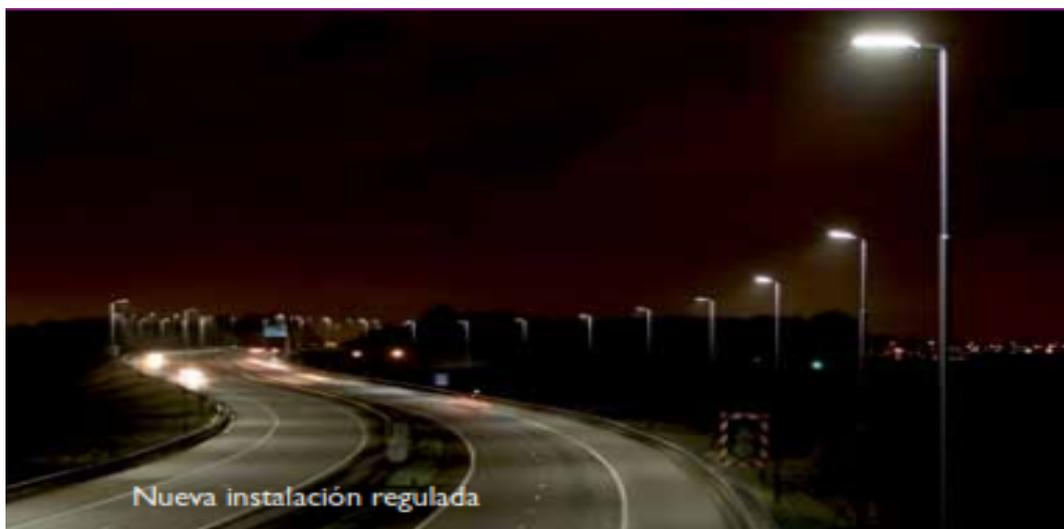


Figura 2.26: Iluminación LED en la autopista A44 [31].

En Corea del Sur, en el año 2013, se presentó un reporte donde se proyecta la construcción de las autopistas más inteligentes del mundo [32]. Con un presupuesto de 80 millones de dólares, se construirán importantes infraestructuras amigables con el medio ambiente que garantizaran la seguridad y comodidad para los usuarios de las modernas autopistas inteligentes.

Las nuevas autopistas inteligentes de Corea del Sur incluyen sistemas inteligentes de gestión de tráfico con ayuda de protocolos de comunicación entre los usuarios y entre una estación multiusuarios, figura 2.27.



Figura 2.27: Autopistas proyectadas en Corea del Sur [32].

Además, desde el año 2014, en Europa, Japón y en los Estados Unidos, se desarrollan e implementan novedosas técnicas para transformar las autopistas convencionales en autopistas inteligentes.

Por ejemplo, en Holanda, el proyecto Smart Highway - autopista inteligente - consiste en iluminar un tramo de la autopista holandesa N-329 empleando pinturas dinámicas, figura 2.28 [28]. Los proyectos que se desarrollan en Holanda integran novedosos sistemas de control, gestión y operación del control vehicular y en iluminación pública que garanticen un servicio de calidad y con altas prestaciones.



Figura 2.28: Pinturas dinámicas [28].

Asimismo, el Proyecto SolaRoad, un proyecto experimental en el noreste de Holanda ejecutado por un consorcio público - privado consiste en la realización de la pavimentación de cada 100 metros de autopista con módulos de hormigón de 2,5 y 3,5 metros, en los que se integran células fotovoltaicas protegidas por una capa de vidrio templado de un centímetro de espesor. Los carriles de las autopistas se transformarían en sistemas renovables de generación eléctrica.

Además, en los Estados Unidos, un proyecto similar al proyecto holandés Solar Roadways pretende agrupar y coordinar el funcionamiento de una red de carreteras construidas, que disponen de sistemas solares fotovoltaicos [28].

En la tabla 2.3, se muestran una lista de experiencias emblemáticas de autopistas que incluyen sistemas inteligentes. Además, se muestra el país y el año en que se desarrollaron los sistemas inteligente, cada proyecto tiene una pequeña descripción a cerca de la estructura e impacto que produce en una autopista.

Tabla 2.3: Autopistas con sistemas inteligentes [28, 29].

Autopistas con sistemas inteligentes			
País	Año	Proyecto	Descripción
India	2005	Bangalore	Sistema remoto de encendido/apagado sistema de iluminación, control de intensidad y reportes diarios sobre las condiciones de la red.
Alemania	2007	Berlín	Sistema de control de tráfico moderno integrado por 22 ordenadores, 2.000 semáforos, 7 sistemas de guiado y 100 videocámaras.
Alemania	2007	Ruhr	Centros urbanos extensos, aparcamientos multi-storey y trayectos de autobuses y ferrocarril.
Estados Unidos de América	2007	Harbor Drive	Autopista de 4 carriles, su reubicación permitió que el tráfico vehicular se reduzca.
Inglaterra	2007	Londres Tower bridge y Hyde Park	Monitorización de vehículos con 850 cámaras.
Noruega	2007	Oslo	Sistema de control de iluminación en base a condiciones atmosféricas.
Dinamarca	2008	Philips Lys A/S	Sustitución de 30.000 luminarias de 400 W por luminarias eficientes de 100 W.
Estados Unidos de América	2008	Oregon solar highway	Iluminación pública de autopistas con 594 paneles solares.

2.2.1.3. Autopistas en Ecuador

En el Ecuador, un conjunto de carreteras y caminos integran la red vial nacional. La entidad responsable del manejo y control de la red vial es el Ministerio de Transporte y Obras Públicas. En este sentido, la red vial está integrada por vías primarias y secundarias que registran un mayor flujo vehicular al enlazar las capitales provinciales, cabeceras cantonales, fronteras internacionales.

Las vías primarias poseen nivel alto de movilidad, acceso controlado y estándares geométricos. Las vías primarias pueden ser consideradas como troncales si van de norte - sur y son transversales si tienen dirección este - oeste [33]. En la tabla 2.4, se aprecia las vías primarias.

Tabla 2.4: Vías primarias del Ecuador [33].

Vías primarias del Ecuador		
Código	Nombre	Símbolo
	Troncal Insular	Tortuga
	Troncal del Pacífico	Delfín
	Troncal de la Costa	Mariposa
	Troncal de la Costa alterna	N/D
	Troncal de la Sierra	Cóndor
	Troncal Amazónica	Tucán
	Troncal Amazónica alterna	N/D
	Transversal Fronteriza	Jaguar
	Transversal Norte	Mono
	Transversal Central	Papagayo
	Transversal Austral	Colibrí
	Transversal Sur	Oso hormiguero

La inversión realizada por el Estado ecuatoriano permitirá el desarrollo de importantes proyectos de infraestructura vial. Se prevé que más de 1000 kilómetros de vías se conviertan en super-autopistas con grandes funcionalidades. Los proyectos viales estarán compuestos por viaductos y túneles que contarán con alta movilidad y gran seguridad [1]. Por tanto, la iluminación de las mencionadas infraestructuras es un importante aspecto a tener en consideración en el proceso de gestión inteligente de consumo de energía.

En la tabla 2.5, se muestra una lista de los proyectos más emblemáticos de infraestructura vial proyectados y en ejecución en el Ecuador.

Tabla 2.5: Proyectos emblemáticos en infraestructura vial [1].

Proyectos emblemáticos desarrollados en el país.		
Proyectos emblemáticos a nivel nacional desde el 2007 hasta el 2012	Inversión (dólares)	Dimensión del proyecto
Ruta del Spondylus	802.133.063,30	1042,25 Km
Troncal Amazónica	363.337.735,28	1057,44 Km
Proyecto Multimodal Manta - Manaos	187.740.623,74	578,00 Km
Troncal Sierra E-35	396.983501,89	1076,55 Km
Tramo: Santo Domingo - Quinendé	78.064.574,68	170 Km
Tramo Santo Domingo - Huaquillas	126.262.833,47	575,5 Km
Autopista Sto. Domingo - Esmeraldas	806'234.241,19.	178 Km

Por otra parte, el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, establece en su reglamento técnico bajo resolución N° 162-2010, las definiciones y condiciones necesarias para la señalización de las vías. En el reglamento se plantea las dimensiones del ancho de los carriles de una vía, tabla 2.6 [34].

Tabla 2.6: Ancho de vía de los carriles [34].

Dimensiones de los carriles	
Velocidad máxima de vía (Km/h)	Ancho del carril (m)
Menor a 50 (urbana)	Mínimo 3,00
De 50 a 90 (rural)	Entre 3,00 y 3,50
Mayor a 90 (rural)	Entre 3,50 y 3,80

2.2.2. Sistemas renovables de iluminación

El empleo de sistemas de generación eléctrica en base a energías renovables promueve el desarrollo sostenible y respetuoso con el medio ambiente [35].

En los siguientes apartados se presenta una descripción de los sistemas renovables de iluminación pública para autopistas y de las experiencias actualmente existentes en el mundo.

2.2.2.1. Descripción de los sistemas renovables de iluminación

La iluminación pública es un servicio fundamental para el normal desarrollo de las actividades del ser humano. En este sentido, varios países han considerado la integración de nuevas fuentes de generación eléctrica en los sistemas de iluminación de autopistas con el objetivo de reducir el consumo de energía eléctrica y los costes económicos y medioambientales asociados, además, la integración de sistemas renovables en los sistemas de iluminación permiten aprovechar los importantes recursos solares y eólicos disponibles en diferentes regiones del mundo.

Los principales sistemas renovables de iluminación están conformados por sistemas de generación fotovoltaica, eólicos y sistemas híbridos que combinan los dos anteriores, figura 2.29.



Figura 2.29: Sistemas renovables de iluminación [35].

En los siguientes párrafos se presenta una descripción de los sistemas fotovoltaicos que se implementan en la iluminación de autopistas.

Sistemas Fotovoltaicos

Un sistema de generación solar fotovoltaico está conformado por uno o más módulos fotovoltaicos. Las células fotovoltaicas se interconectan formando arreglos fotovoltaicos hasta conseguir la potencia exigida. La radiación solar es captada por los módulos fotovoltaicos que generan intensidad eléctrica de corriente continua. La intensidad generada por los arreglos fotovoltaicos se puede aprovechar en iluminación.

Para optimizar el recurso solar, los sistemas de generación fotovoltaicos emplean varios dispositivos electrónicos. Estos dispositivos en conjunto integran los siguientes subsistemas:

- **El subsistema de captación:** Está constituido por módulos fotovoltaicos capaces de convertir la radiación solar en electricidad. La celda fotovoltaica es la unidad básica del sistema solar fotovoltaico. En forma individual, las celdas fotovoltaicas producen un valor que oscila entre 1 y 2 W de potencia. Una celda solar fotovoltaica de silicio que cubre una superficie de $10 \times 10 \text{ cm}^2$, suministra un valor de 1,5 Wp de potencia con una diferencia de potencial típica de 0,6 V y un valor de intensidad de 3,5 A [36]. En la figura 2.30, se muestra ejemplos de celdas solares fotovoltaicas.



Figura 2.30: Celda solar fotovoltaica [36].

- **El subsistema de regulación:** Es el enlace entre los módulos fotovoltaicos, las baterías y la carga. Su función es salvaguardar el estado de las baterías ante posibles sobrecargas o excesivas descargas, figura 2.31. [36].

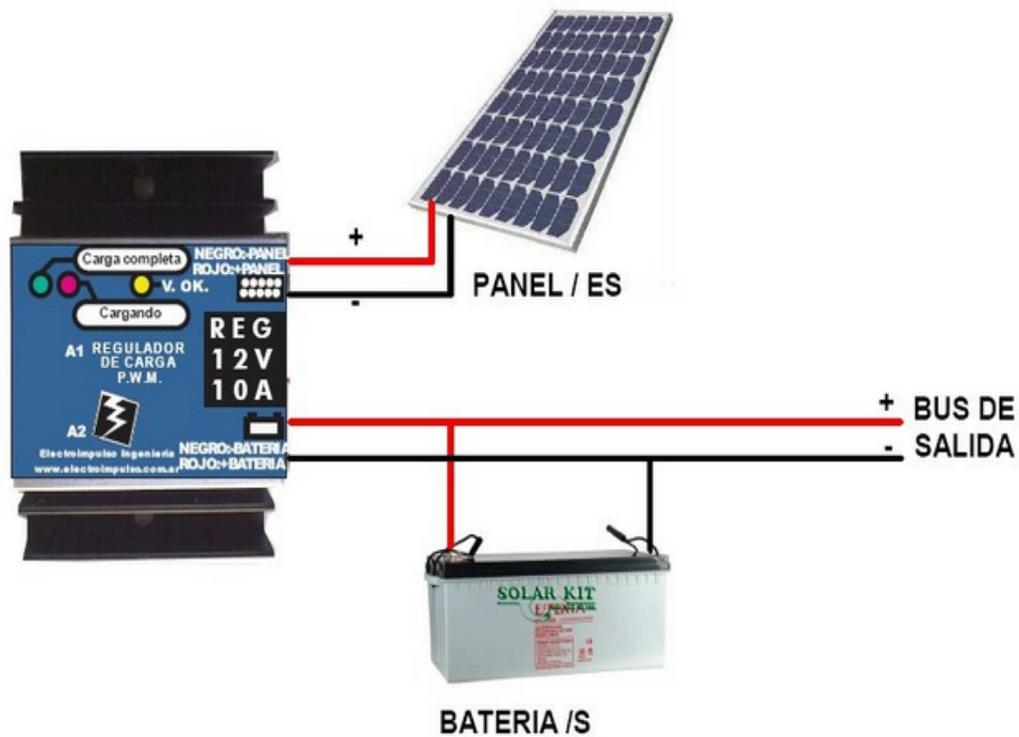


Figura 2.31: Regulador de carga y descarga de un sistema solar fotovoltaico [36].

- **El subsistema convertidor de corriente:** Está formado por un inversor, que tiene como función principal la transformación de la electricidad de corriente continua en electricidad de corriente alterna. Además, el inversor regula el nivel efectivo de tensión de salida y la forma correcta de la onda senoidal en corriente alterna, proporcionando así niveles constantes de tensión e intensidad [37], figura 2.32.

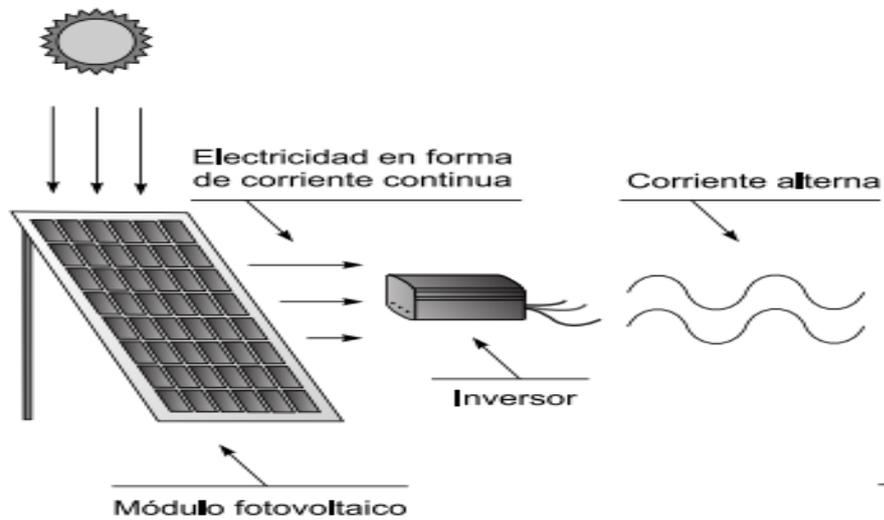


Figura 2.32: Inversor de corriente continua en corriente alterna [37].

Subsistema de acumulación: Formado por baterías recargables que almacenan la energía producida por los módulos fotovoltaicos. Por esta razón, se deben elegir baterías con altas prestaciones en función del entorno de trabajo [36], figura 2.33.



Figura 2.33: Baterías usadas en los sistemas fotovoltaicos [36].

En [36], se resumen importantes parámetros para la elección de baterías en aplicaciones fotovoltaicas:

- Rango de la temperatura de operación debe estar entre: $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- La tasa de descarga automática
- El porcentaje de descargas profundas para el horizonte de vida útil.
- La capacidad de carga medida en Amperios hora con un valor promedio de 10 Ah y una tasa de 100 Ah.
- La frecuencia de recuperación en la reposición del electrolito.
- La solidez al momento de transportar la batería.
- Resistencia ante sobrecargas.
- El costo de adquisición.

La conexión general de los subsistemas que integran el sistema de generación solar fotovoltaico se muestra en la figura 2.34 [37].

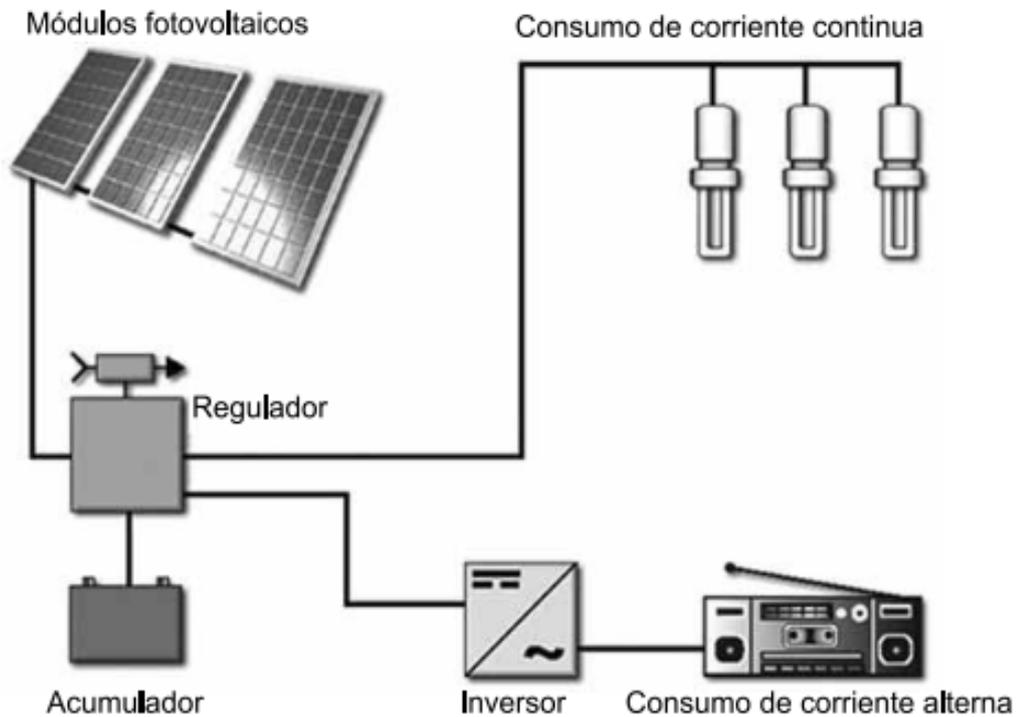


Figura 2.34: Esquema de una instalación solar fotovoltaica [37].

Generalmente, los módulos fotovoltaicos tienen un alto estándar y eficiencia que garantizan su operación en ambientes externos. Para el caso de Ecuador, los módulos fotovoltaicos deben estar certificados de acuerdo a la norma técnica

ecuatoriana INEN-IEC 61215, que permitan garantizar una fiabilidad estándar en la cualificación y homologación [38]. Los sistemas fotovoltaicos permiten obtener una elevada cantidad de energía eléctrica, además, se clasifican en sistemas conectados a la red y sistemas autónomos o aislados.

Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Los sistemas fotovoltaicos de generación eléctrica se conectan a la red de distribución de electricidad a través de dispositivos inversores de corriente. Estos sistemas no requieren de módulos de acumulación de energía, ya que la red eléctrica admite toda la electricidad suministrada por los módulos fotovoltaicos [36]. En la figura 2.35, se muestra el diagrama de conexiones de una instalación conectada a la red eléctrica.

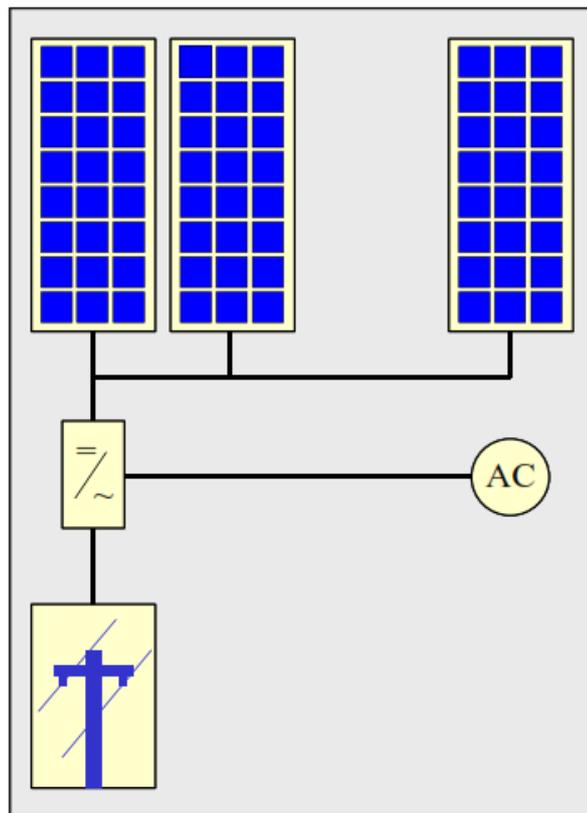


Figura 2.35: Diagrama de conexiones de los sistemas conectados a la red [36].

Sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados

Los sistemas de generación eléctrica aislados se conforman por paneles fotovoltaicos, reguladores, baterías, inversores y carga de consumo. La energía generada por los módulos fotovoltaicos es almacenada en baterías recargables. Además, los sistemas aislados tienen una movilidad amplia estableciendo conexiones en lugares donde no es posible tener acceso a la red de distribución de electricidad [37]. Las conexiones de los módulos de almacenamiento incluyen dispositivos reguladores de energía y en algunos casos inversores de corriente. En la figura 2.36, se muestra el esquema de conexión de un sistema fotovoltaico aislado.

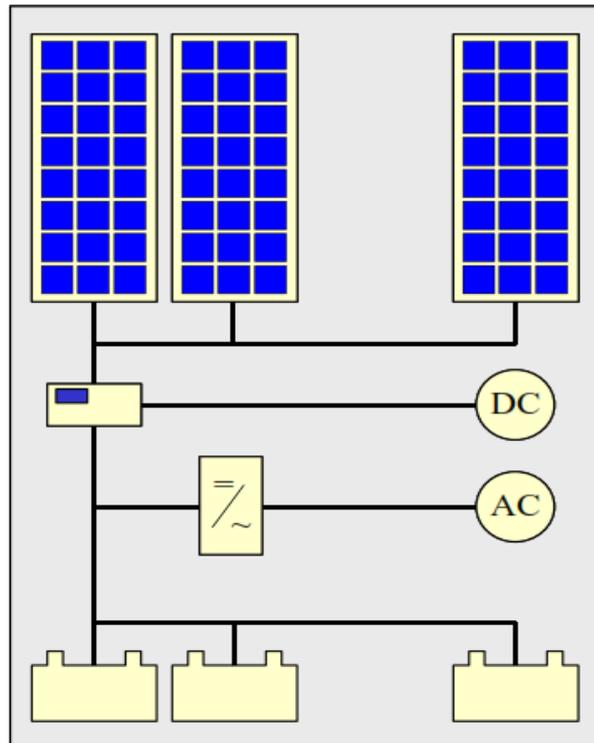


Figura 2.36: Diagrama de conexiones de un sistema fotovoltaico aislado [36]

Los reguladores son dispositivos que actúan como interruptores desconectando el suministro de energía generada por los módulos fotovoltaicos cuando las baterías están completamente cargadas. Asimismo, desconectan la demanda energética cuando las baterías alcanzan el nivel crítico en el proceso de descarga [36]. En la figura 2.37, se muestra un sistema fotovoltaico de iluminación configurado de manera aislada.

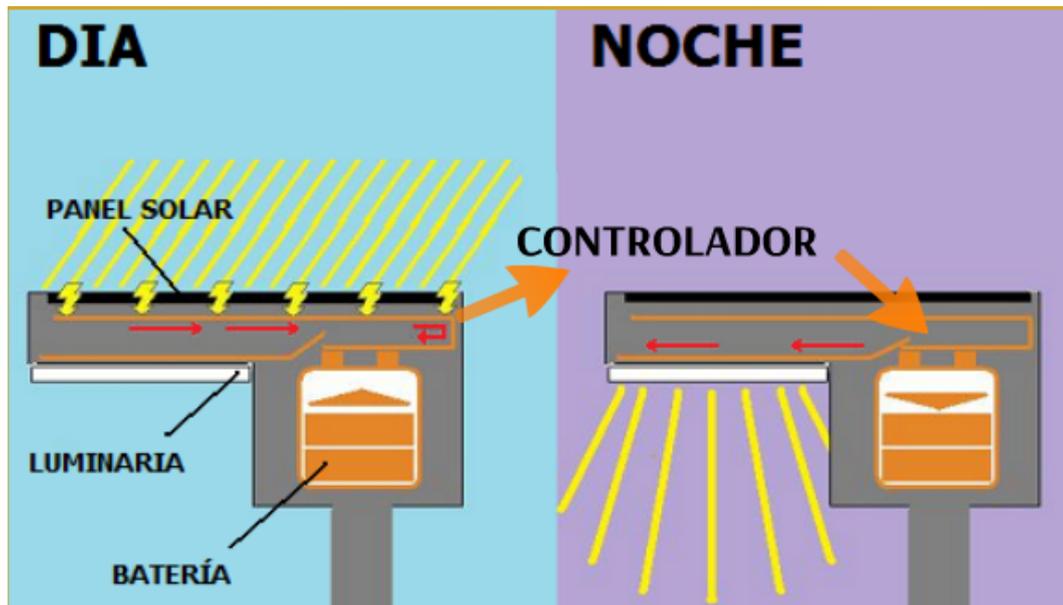


Figura 2.37: Sistemas fotovoltaicos de iluminación [investigador basado en 36]

Acumuladores

Los acumuladores de energía son muy importantes en el diseño de los sistemas fotovoltaicos de iluminación. El empleo de baterías en conjunto con las fuentes de energía renovable permiten mejorar el flujo de energía eléctrica en lugares apartados.

De esa manera, las baterías deben cumplir unas funciones importantes: energía siempre disponible, ajustes de potencia y estabilidad en la red. Los materiales que se emplean en la elaboración de baterías son variados, presentando en muchas ocasiones aleaciones químicas que mejoran el rendimiento de las baterías. Sin embargo, existen baterías que al terminar su vida útil emanan líquidos contaminantes.

En la tabla 2.7 se presentan los distintos tipos de baterías y sus principales componentes que se integran con los sistemas fotovoltaicos de iluminación. Actualmente, se están desarrollando baterías biodegradables compuestas en un 90 % por celulosa y en un 10 % por nano tubos de carbono [39].

Tabla 2.7: Materiales para la fabricación de los distintos tipos de baterías [38].

Tipos y materiales en la construcción de baterías	
Tipo	Materiales
Plomo - ácido	Electrodos de plomo, Matriz de plomo metálico, Disolución de Ácido Sulfúrico, Caja de polipropileno
Níquel-Hierro (NiFe)	Cátodos de Níquel; Ánodos Cajas delgadas perforadas de acero niquelado que contienen polvo de óxido ferroso y óxido de bario; Potasa Cáustica diluida en agua destilada
Pila Alcalina	Cloruro de Sodio y Dióxido de Manganeso
Alcalinas de Manganeso (Mn)	Mercurio; Recipiente de Acero Hidróxido de Potasio
Níquel-Cadmio (NiCd)	Cátodo de hidróxido de Níquel, ánodo de Cadmio y electrolito es hidróxido de Potasio
Níquel-Hidruro metálico (Ni-MH)	Ánodo de hidróxido de Níquel Cátodo de Aleación de hidruro Metálico
Iones de Litio (Liion)	Ánodo de grafito; Cátodo de óxido de cobalto trifilina (LiFePO ₄) u óxido de Manganeso
Polímero de Litio	Similares a las de Li-ion
Pilas de Combustible	No es un acumulador, pero convierte energía química en eléctrica y se puede recargar.
Pila Oxido de Mercurio	Cátodo es una mezcla de óxido de Mercurio y grafito; Envase de Acero; El electrolito es una solución de Hidróxido de potasio y óxido de Zinc
Pila de Óxido de Plata	Pila Botón; Cátodo óxido de Plata Ánodo es polvo de Zinc
Pila Zinc-Aire	Cátodo O ₂ del aire

2.2.2.2. Radiación solar en Ecuador

En el Ecuador se dispone de una gran radiación solar, que permite el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas para diversas aplicaciones. En los siguientes párrafos se realiza una pequeña descripción de los valores de radiación solar que inciden en el Ecuador.

La energía fotovoltaica puede ser empleada para alimentar sistemas de iluminación compuestos por luminarias de alta eficiencia. El promedio de horas de sol pico se lo conoce como HSP. Asimismo, la radiación del sol puede ser medida en $\text{Kwh}/\text{m}^2/\text{día}$ [40]. En la figura 2.38, se ilustra la radiación solar en Sudamérica y su correspondiente escala en $\text{Kwh}/\text{m}^2/\text{día}$.

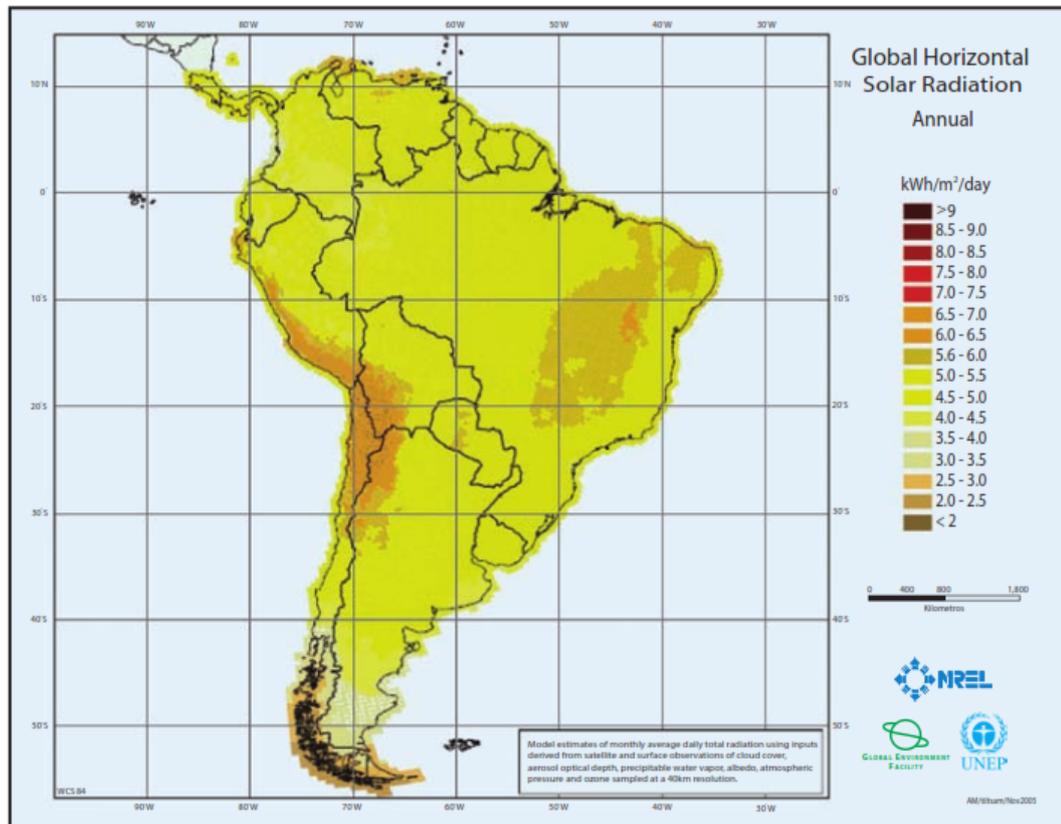


Figura 2.38: Insolación Global Horizontal en Sudamérica [39].

La localización del Ecuador le permite tener la perpendicularidad del ángulo de incidencia de la radiación solar prácticamente en los 365 días del año. A diferencia de otros países de otras latitudes donde el ángulo de incidencia cambia en relación a las estaciones del año.

En agosto del año 2008, el CONELEC juntamente con la Corporación para la Investigación Energética CIE, publicaron un documento titulado “Atlas Solar del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica”. Este documento contiene información directa, global y difusa sobre la radiación solar que existe en el Ecuador [40], figura 2.39.

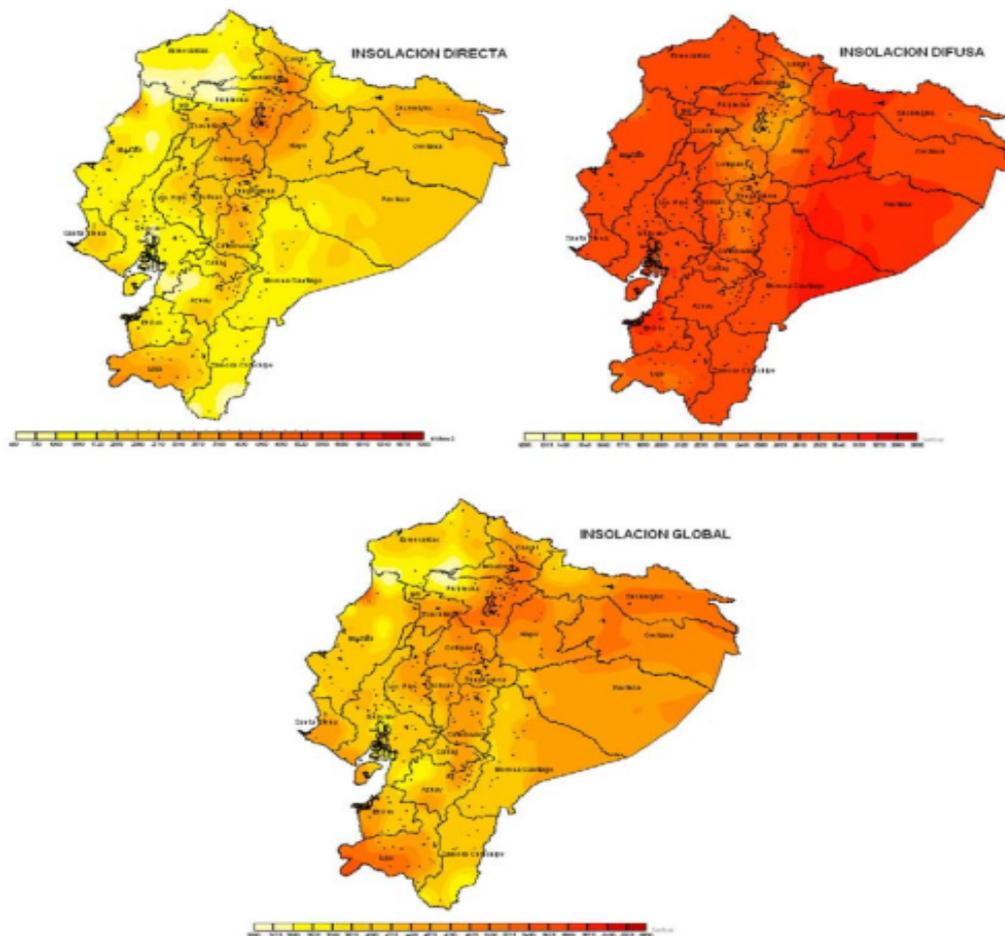
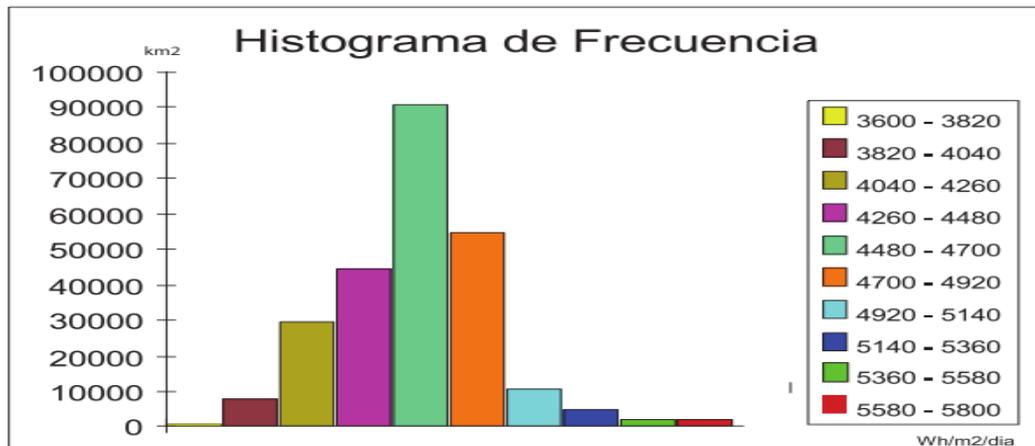


Figura 2.39: Insolación Directa, Difusa, Global del Ecuador [39].

El atlas solar del Ecuador cuenta con varios mapas que detallan la radiación solar durante todo el año sobre el territorio continental.

En la figura 2.40, se observa los valores promedios y la frecuencia que tienen sobre la superficie del país. Los valores representados corresponden a la energía que se produce a diario sobre una superficie de un metro cuadrado.



Valor Máximo: 5 748 Wh/m2/dia
 Valor Mínimo: 3634 Wh/m2/dia
 Valor Promedio: 4574,99 Wh/m2/dia
 Desviación Estándar: 301,4093 Wh/m2/dia

Figura 2.40: Insolación global promedio sobre el territorio ecuatoriano [39].

De la figura anterior se deduce que en el territorio ecuatoriano recibe un promedio de 4,5 Kwh/m²/día de irradiación solar. En función de la irradiación H(Kwh/m²) se calcula:

$$H \left[\frac{Kwh}{m^2} \right] = I \left[\frac{Kw}{m^2} \right] * HPS$$

$$HPS = \frac{4,5Kwh/m^2}{Kw/m^2}$$

$$HPS = 4.5h$$

Con estos datos se puede estimar que para la configuración de los sistemas fotovoltaicos se tenga un valor promedio cerrado de 4 horas solar pico para la carga de los sistemas de acumulación.

2.2.2.3. Tipos de luminarias

El servicio de iluminación de autopistas es posible gracias al empleo de fuentes luminosas conocidas también como luminarias. En los siguientes párrafos se presenta una breve descripción de los diferentes tipos de luminarias.

Fluorescentes: Estas luminarias se emplean en la iluminación doméstica e industrial. Los fluorescentes, están recubiertos por un tubo de vidrio fino que en su interior aloja pequeños porcentajes de vapor de mercurio y un gas inerte que puede ser argón o neón. Su eficiencia es alta con un tiempo de vida útil estimado de 10 000 horas [41]. En la figura 2.41, se muestra un tubo fluorescente que es conectado en lámparas.



Figura 2.41: Lámpara Fluorescente [40].

Luminaria de vapor de mercurio: Las luminarias están formadas por vapor de mercurio que produce una elevada radiación ultravioleta, perjudicando así al medio ambiente. El tiempo que tardan en calentar el vapor de mercurio es reducido en relación a las luminarias fluorescentes, pero no es instantáneo lo que afecta la eficiencia de estas luminarias. Además, el mantenimiento y tratamiento de los desechos de estas luminarias demanda de mucho esfuerzo físico y económico [41].

En la Figura 2.42 se observa una bombilla de vapor de mercurio.



Figura 2.42: Lámpara de mercurio [40].

Luminarias vapor de sodio de alta presión: Estas luminarias integran un tubo de cerámica para su descarga. El tubo contiene dos electrodos en sus extremos, los mismos que suministran la tensión eléctrica que se transforma en luz [41]. Las luminarias de sodio de alta presión son las más usadas en el servicio de alumbrado público. En la figura 2.43, se muestra una luminaria de vapor de sodio de alta presión.



Figura 2.43: Lámpara Sodio de alta presión [40].

Luminarias LED: Están compuestas por diodos emisores de luz que no generan flujos de radiación ultravioleta. Las luminarias LED, son fáciles de controlar y modular en forma electrónica. Las luminarias LED poseen una gran ventaja, pueden operar en sistemas eléctricos de corriente continua y de corriente alterna a través de transformadores eléctricos. Esta importante ventaja permite acoplar las luminarias LED a los sistemas fotovoltaicos [41]. En la figura 2.44, se muestra un ejemplo de luminaria LED para alumbrado público.



Figura 2.44: Lámpara LED [40].

Luminarias de inducción: Las luminarias de inducción son una tecnología nueva que poco a poco comienza a introducirse en los sistemas de iluminación. Su eficiencia es intermedia logrando ahorro del 20 % con respecto a las luminarias de vapor de sodio y un 50 % con respecto al vapor de mercurio.

Por otra parte, estas luminarias requieren de una fuente de energía constante para su óptimo desempeño, lo que las convierte vulnerables al momento de integrarse a un sistema fotovoltaico [41].

En la figura 2.45 se observa una luminaria de inducción que se emplea en el servicio de alumbrado público.



Figura 2.45: Lámpara de Inducción [40].

En la tabla 2.8, se presenta un análisis comparativo entre las luminarias que se emplean en el servicio de alumbrado público en función de sus características principales [42].

Los parámetros de base en la comparación de las luminarias son la eficiencia luminosa con una relación de lm/W , el rendimiento del color de la luz emitida por las lámparas, el horizonte de tiempo de la vida útil de cada lámpara y algunas observaciones.

Las observaciones señaladas se basaron en una comparación del rendimiento de las luminarias por parte de los fabricantes de las mencionadas luminarias. Los diferentes tipos de luminarias permiten que el usuario las seleccione en función de sus necesidades.

Tabla 2.8: Análisis comparativo de las características técnicas de las luminarias [41].

Type of Lamp	Luminous Efficacy (lm/W)	Color Rendering Properties	Lamp life in hrs	Remarks
High Pressure Mercury Vapor (MV)	35-65 lm/W	Fair	10,000-15,000	High energy use, poor lamp life
Metal Halide (MH)	70-130 lm/W	Excellent	8,000-12,000	High luminous efficacy, poor lamp life
High Pressure Sodium Vapor (HPSV)	50-150 lm/W	Fair	15,000- 24,000	Energy-efficient, poor color rendering
Low Pressure Sodium Vapor	100-190 lm/W	Very Poor	18,000-24,000	Energy-efficient, very poor color rendering
Low Pressure Mercury Fluorescent Tubular Lamp (T12 & T8)	30-90 lm/W	Good	5,000-10,000	Poor lamp life, medium energy use, only available in low wattages
Energy-efficient Fluorescent Tubular Lamp (T5)	100-120 lm/W	Very Good	15,000-20,000	Energy-efficient, long lamp life, only available in low wattages
Light Emitting Diode (LED)	70-160 lm/W	Good	40,000- 90,000	High energy savings, low maintenance, long life, no mercury. High investment cost, nascent technology

De la tabla 2.8, se aprecia que las luminarias LED tienen una mayor eficiencia en comparación con las luminarias tradicionales empleadas en el servicio de alumbrado público.

En la figura 2.46, se muestra la escala evolutiva de las luminarias hasta el año 2012. En el año 1879, las primeras lámparas incandescentes patentadas por Thomas Edison, tenían un nivel de luminosidad por debajo de los 20 lm/W. Las lámparas de vapor de mercurio inician aproximadamente en el año 1904 y al año 2000 su eficiencia luminosa sobrepasó los 50 lm/W. Desde el año 1938 las luminarias fluorescentes incrementaron su eficiencia luminosa hasta el año 2000 donde su nivel fue de 80 lm/W.

En el año 1951 se desarrollaron las luminarias de haluros metálicos con una eficiencia superior a los 50 lm/W y en el año 2012 alcanzó un valor máximo de luminosidad que supera los 100 lm/W. Desde el año 1996 arrancó la nueva tecnología de luminarias LED, que incrementa su eficiencia luminosa año a año. En el año 2012, la tecnología LED superó los 100 lm/W [43].

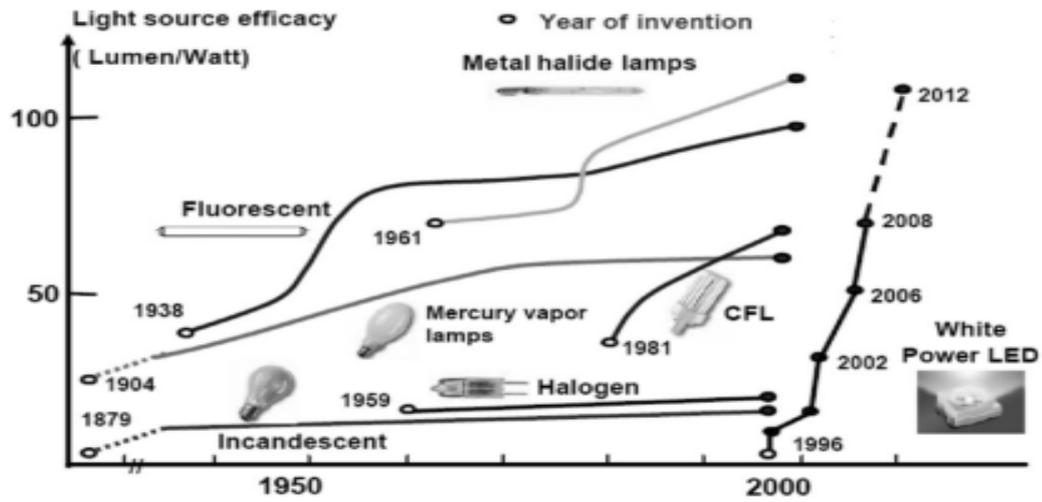


Figura 2.46: Escala evolutiva de las luminarias en alumbrado público [42].

En la iluminación de autopistas se emplearán luminarias de alta eficiencia que cumplen con los parámetros fotométricos requeridos. En [7], se empleó el software DIALux para escoger la luminaria adecuada. Las luminarias se escogen en dependencia de la propagación, el control y dispersión de la luz. Los sistemas de iluminación adoptan diferentes distribuciones de las luminarias en base a las características propias de una autopista, manteniendo así condiciones simétricas de propagación, centro y dispersión de la luz, figura 2.47.

Lighting Class	Single row	Double row, with offset	Double row, opposing
Road information	$W \leq 6m$ $N \leq 2$	$W \geq 8m$ $N \geq 2$	$W \geq 16m$ $N \geq 4$
Uniformity	0.4~0.5	0.5~0.8	0.5~0.8
Figure			

Figura 2.47: Distribución de las luminarias [7].

2.2.2.4. Casos reales de iluminación renovable

Los sistemas de iluminación renovable presentan grandes ventajas ante los sistemas convencionales.

En Líbano, en el año 2011, en [44], se estimó que el 90 % de la energía producida se basa en combustibles fósiles, además, la demanda de energía de ese país se incrementa año a año. El sistema de iluminación público consume 180 MWh/año, el 35 % se destina a la iluminación de las autopistas internacionales. Según el Departamento de Energía de Líbano, el consumo de energía del sistema de iluminación público se reduciría en un 50 % si se sustituyesen las luminarias de sodio de alta presión por luminarias LED. Adicionalmente, si se empleasen sistemas de generación híbridos, basados en energía solar y eólica, el ahorro de energía sería muy considerable e implicaría una importante reducción de emisiones de CO₂. En la figura 2.48, se observa un diagrama de bloques de un sistema de generación híbrido para su implementación en el servicio de alumbrado público. La inversión inicial para iluminar 285 kilómetros de autopistas alcanza un valor de 24 millones de dólares. El Departamento de Energía de Líbano estima que ese valor se recuperará en 12 años.

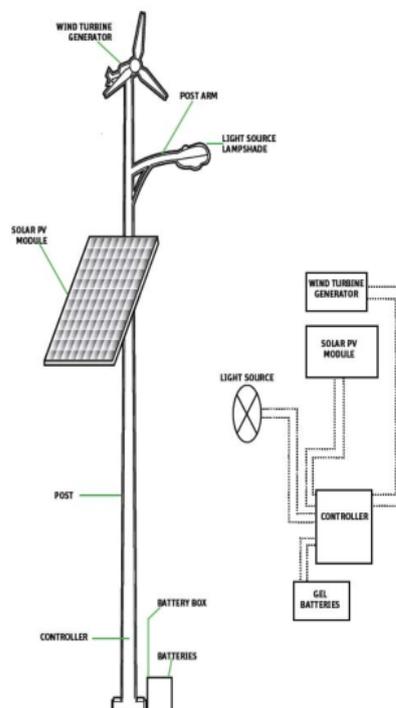


Figura 2.48: Diagrama de bloques de un sistema de generación híbrido [43].

En Estados Unidos, en el año 2011, en [35], se presentó un estudio de un sistema de generación híbrido, controlado en función de una micro red, para la iluminación de autopistas, carreteras, vías. La energía que suministra un generador eólico de potencia instalada de 1 kW podría generar más de 2200 kWh al año en las condiciones evaluadas.

Se estima que la implementación de una micro-red en las vías de la ciudad de Lincoln, podría generar un ahorro de 1.5 millones de dólares y reducir así las emisiones contaminantes en más de 12.000 toneladas de CO₂, proyectado a un horizonte de tiempo de 15 años. En la figura 2.49, se muestra el esquema general de la micro-red descrita. Cada poste del servicio de alumbrado público estaría integrado por un generador eólico de 1 kW, complementado con paneles solares con una potencia de 200 W, calculado en función de los datos registrados para la generación de energía en la zona de ubicación del sistema renovable de generación eléctrica.

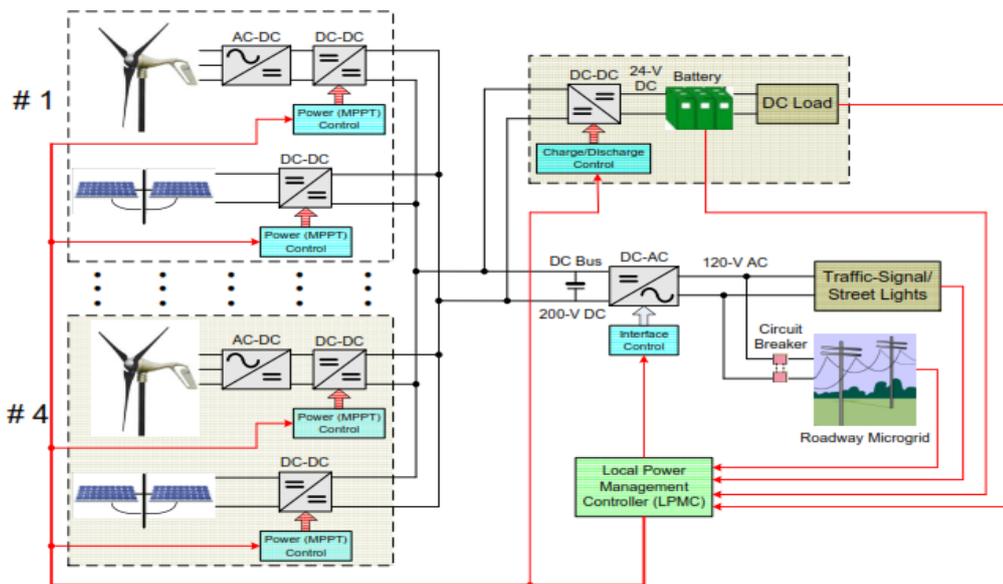


Figura 2.49: Diagrama de la micro-red del sistema de iluminación en Lincoln [35]

En Indonesia, Bandung, en julio del 2011, se desarrolló un prototipo de data logger de bajo costo basado en un sistema renovable de iluminación pública. El prototipo emplea un microcontrolador que establece la comunicación con un ordenador. El microcontrolador fue configurado para que tome muestras cada segundo, con la capacidad de almacenar los datos de tensión e intensidad para enviarlos hacia el ordenador cuando el usuario lo requiera. En la figura 2.50, se presenta el diagrama de instalación del data logger con el sistema renovable de iluminación [45].

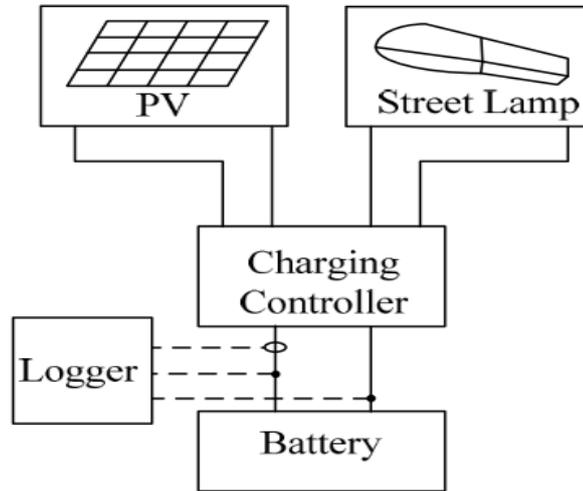


Figura 2.50: Diagrama de conexiones del datalogger [44]

La implementación del prototipo permite conocer la potencia que entrega el sistema renovable de iluminación en función de la tensión e intensidad que captura el microcontrolador. Los resultados capturados por el microcontrolador y procesados por el ordenador son completos, mostrando el estado de operación de los componentes del sistema de iluminación fotovoltaico. En la figura 2.51, se muestra un gráfico que relaciona la potencia con el tiempo. Los datos presentados en el gráfico corresponden a mediciones tomadas entre las 12pm a 6am [45].

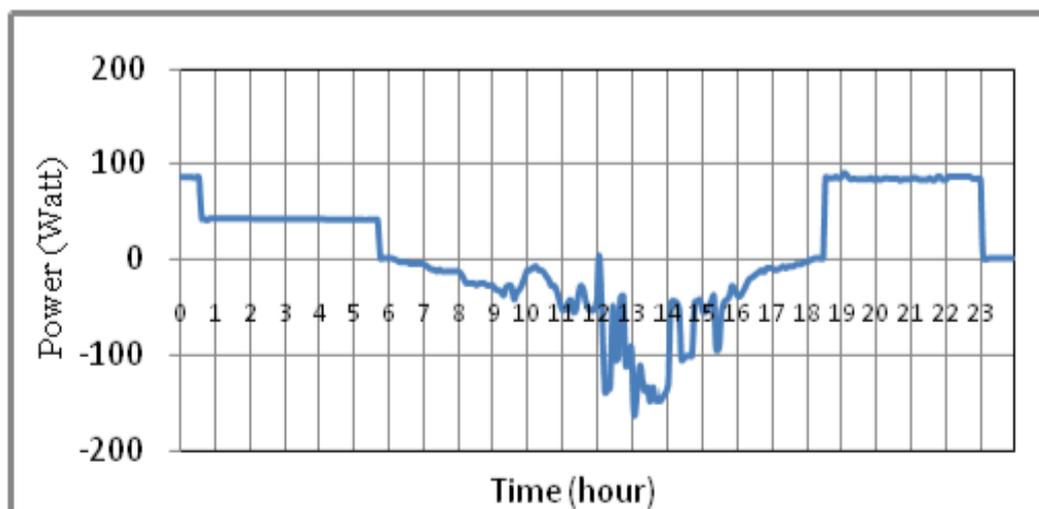


Figura 2.51: Medición de potencia [44]

En diciembre del año 2011, el departamento de ingeniería electrónica, de la Universidad Nacional de Taiwan de Ciencia y Tecnología, presentó un sistema de iluminación con energía solar fotovoltaica. En la figura 2.52, se presentan dos escenarios a y b. En el escenario a, se muestra que durante el día la radiación solar es transformada en energía eléctrica que es almacenada en las baterías. En el escenario b, se indica que por la noche la energía acumulada en las baterías es liberada hacia las luminarias. Las luminarias empleadas son del alta intensidad de descarga, porque estas presentan un alto nivel de luminosidad, buena reproducción del color y un amplio tiempo de vida útil. El control de las luminarias se realizó a través un dispositivo conocido como balasto donde se aplica el punto de máxima transferencia de potencia, [46].

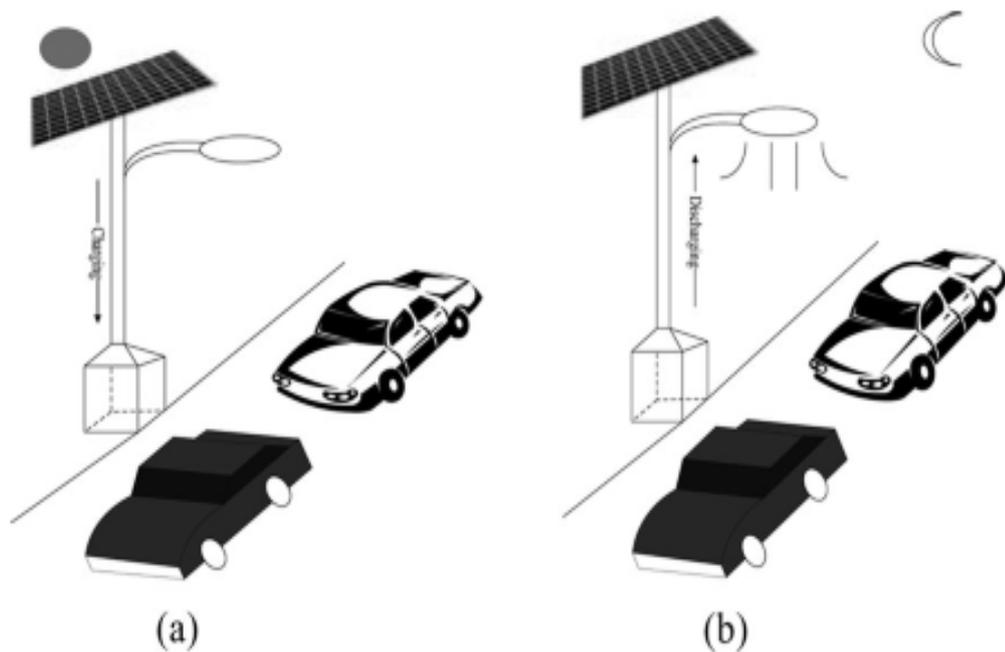


Figura 2.52: Escenarios de operación el sistema de iluminación [45]

En Copenhague, Dinamarca, en el año 2013, existía 45000 puntos de iluminación. Se resalta que 42000 correspondían al alumbrado público de la ciudad, representando un elevado consumo de energía eléctrica. En la tabla 2.9, se muestra el porcentaje, número y tecnología de luminarias del sistema de alumbrado público en Copenhague [47].

Tabla 2.9: Tecnología de las luminarias en Copenhagen [46].

Tecnología	Número de luminarias	Porcentaje de luminarias
Sodio de alta presión	12960	30,5 %
Fluorescente	10945	25,8 %
Mercurio	9138	21,5 %
Haluros metálicos	7790	18,3 %
Inducción	628	1,5 %
Halógenos	381	0,9 %
LED	300	0,7 %
Incandescente	33	0,1 %

El 96 % de las luminarias del servicio de alumbrado público lo componen luminarias de sodio de alta presión, fluorescente, mercurio y haluros metálicos, estas tecnologías no son muy eficientes. La sustitución de las mencionadas tecnologías por luminarias de alto rendimiento LED provocaría un importante ahorro energético. En la figura 2.53, se muestra la proyección del consumo energético al sustituir 34300 artefactos de iluminación, en un horizonte de 12 años representaría el 76,2 % de los puntos de iluminación de la ciudad.

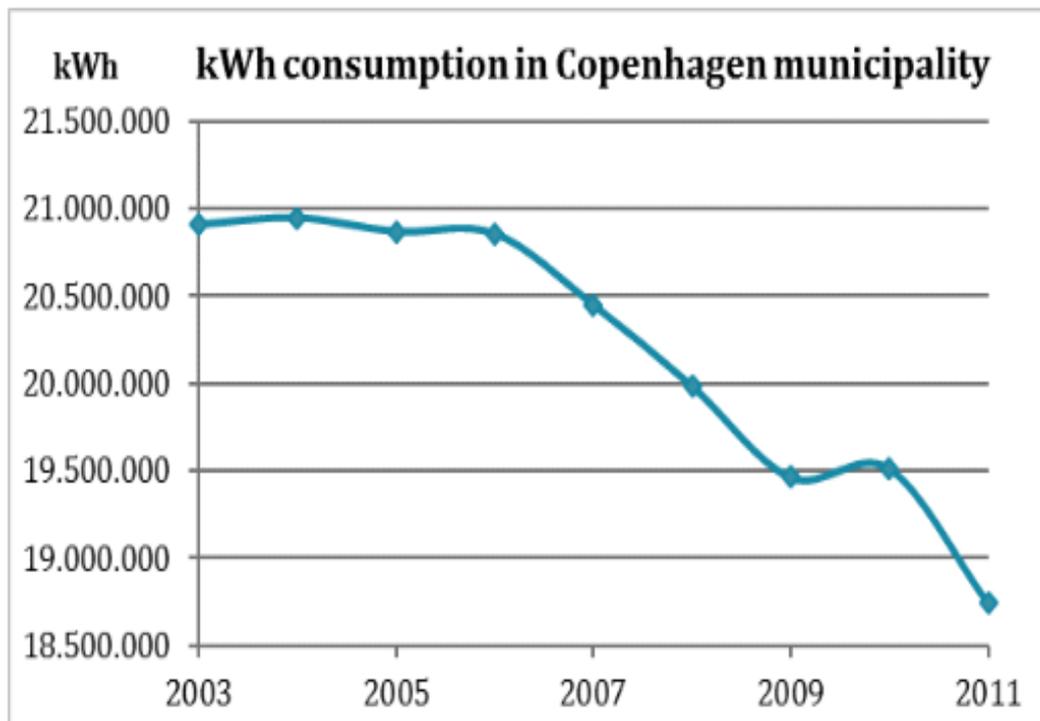


Figura 2.53: Proyección del consumo energético en Copenhagen [46]

Además, se plantea la integración de las luminarias de alto rendimiento con tecnología solar fotovoltaica y sistemas eólicos como generadores de energía eléctrica. Estos sistemas permitirán que en la ciudad de Copenhagen exista una soberanía energética para el servicio de iluminación pública, figura 2.54 [47].



Figura 2.54: Sistemas Renovables de generación eléctrica para Copenhagen [46]

En Bangladesh, en el año 2014, se realizó el estudio de un sistema de iluminación solar para hogares. El estudio revela un importante ahorro energético relacionado con los sistemas de iluminación principalmente en las zonas rurales. El sistema de iluminación almacena la energía captada por los módulos solares en baterías selladas. Además, las pruebas realizadas demuestran que para luminarias fluorescentes compactas es necesario un inversor de corriente continua a corriente alterna, mientras que los LED son dispositivos que se pueden conectar de forma directa en corriente continua. El sistema de iluminación está integrado por módulos fotovoltaicos controlados por una unidad central de procesamiento, que regula el máximo nivel de luminosidad en función de sensores de presencia [48], figura 2.55. En este sentido, el sistema implementado alcanza un importante ahorro energético. Una luminaria fluorescente compacta consume 767 kWh al año, mientras que una luminaria LED consume 329 kWh al año con el mismo nivel de luminosidad.

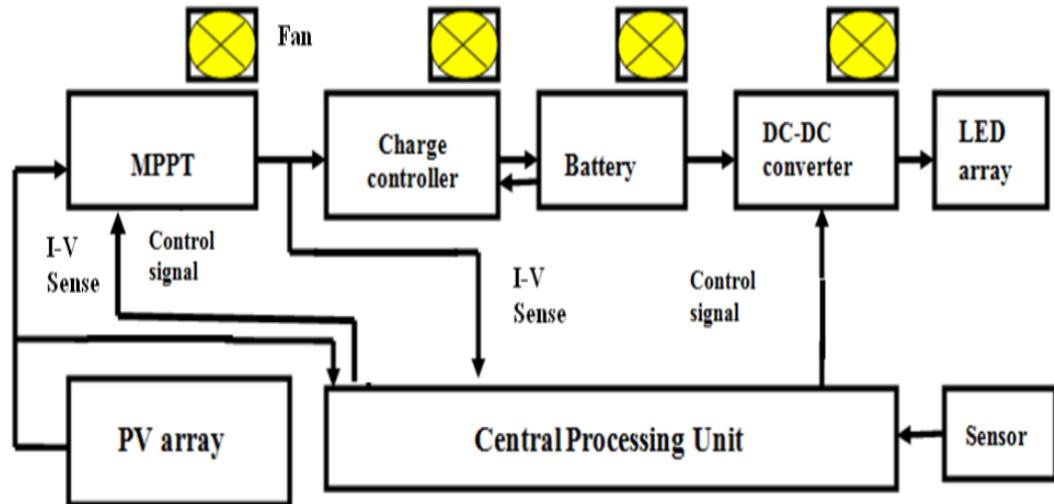


Figura 2.55: Sistema de iluminación propuesto en Bangladesh [47].

Además, en la capital de Bangladesh, el Instituto Militar de Ciencia y Tecnología integró un concentrador de radiación solar para el sistema de iluminación pública en la ciudad de Dhaka. El concentrador solar está formado por espejos que mejoran el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Si se emplea el concentrador de radiación solar, la eficiencia de los módulos fotovoltaicos se incrementa en un 12-14% , figura 2.56 [49].



Figura 2.56: Concentrador solar en la ciudad de Dhaka [48]

En [50], se presenta un programa de educación y eficiencia energética desarrollado por la universidad de Houston. El programa muestra la implementación de luminarias de alta eficiencia LED, instaladas en áreas de estacionamiento y calles del campus universitario. Un equipo de investigación integrado por estudiantes y maestros evaluaron los sitios potenciales para la implementación de novedosas tecnologías en sistemas de iluminación. Se propuso que el sistema de iluminación incluya fuentes de energías renovables como paneles fotovoltaicos y turbinas de viento. La principal propuesta estima el empleo de un sistema híbrido compuesto por energías solar fotovoltaica y eólica, se mencionó que el sistema cumplirá con las necesidades de iluminación, figura 2.57.



Figura 2.57: Sistema híbrido propuesto en la universidad de Houston [49].

El diseño del mencionado sistema fue realizado por estudiantes de diseño industrial y gestión en la construcción. El diseño comprende el sistema híbrido y la construcción de una casa de máquinas con una dimensión de 12 x 8 x10 pies, que aloja a todo el equipo. La sustitución de 1.428 luminarias de baja eficiencia permitió un ahorro que oscila entre \$14.000 y \$23.000. En la implementación del sistema se emplearon estructuras de lámparas tradicionales para acoplar las novedosas luminarias LED, figura 2.58.



Figura 2.58: Luminarias LED en estructuras tradicionales de iluminación [49].

En la Sultan Qaboos University se presenta un caso de estudio del sistema de alumbrado público empleando tecnología LED en conjunto con paneles solares. Se han elegido luminarias LED, ya que su tiempo de vida es 10 veces superior a las luminarias de sodio de alta presión. Además, se estima un ahorro de energía entre el 50 y 60 % y una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero del 40 %.

A noviembre del 2014, la Universidad de Southampton, desarrolló un sistema de iluminación pública basado en un algoritmo predictivo y adaptativo. La estructura del sistema integra un sistema multisensorial que permite detectar el flujo vehicular, permitiendo un ahorro del 40 %. El sistema procesa la información capturada de los sensores para incrementar o disminuir la intensidad luminosa. En este sentido, el sistema permite ser administrado a través de una red.

En la figura 2.59, se muestra el esquema de bloques del sistema de iluminación denominado “TALiSMaN” [51]. El sistema agrupa varios dispositivos electrónicos, se destaca la presencia de un sistema de generación de energía eléctrica. El algoritmo de predicción permite modular el nivel de iluminación de las luminarias, que a través de un medidor del uso energético el algoritmo reconoce y procesa la información del sistema TALiSMaN.

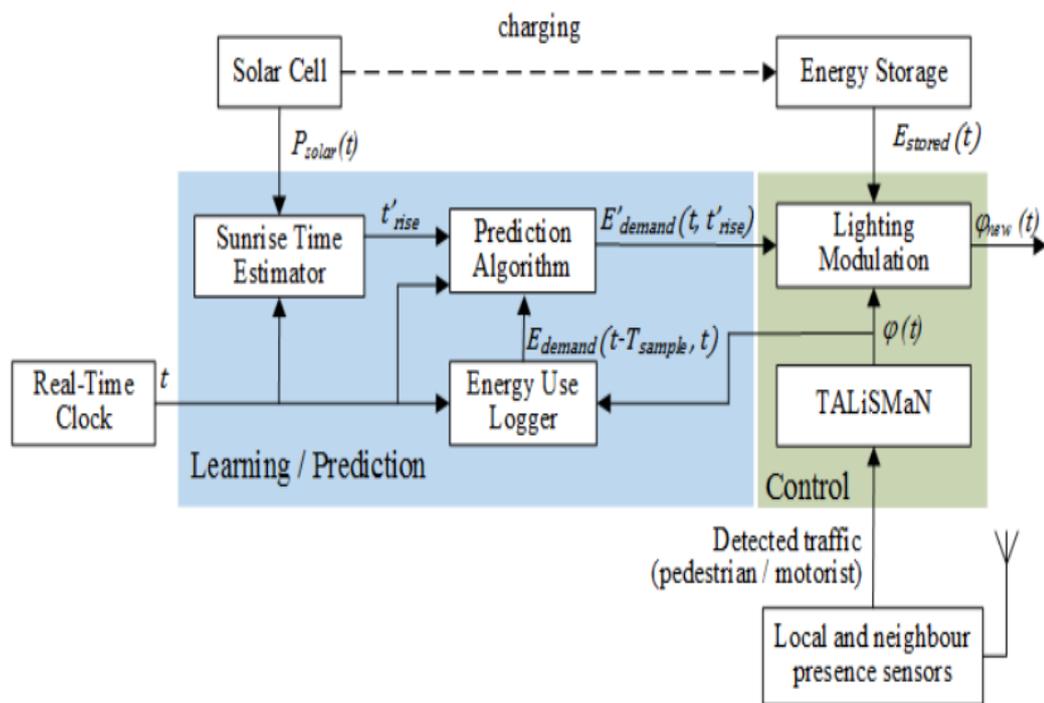


Figura 2.59: Arquitectura del sistema TALiSMaN [50]

2.2.2.5. Aspectos generales de Iluminación.

En el Ecuador el Ministerio de Industrias y Productividad aprobó, notificó y oficializó el Reglamento Técnico Ecuatoriano 069 Alumbrado Público. En el mencionado reglamento definió una clasificación de iluminación pública en base a las características viales en cinco grupos como autopistas y carreteras, vías de acceso controlado y vías rápida, vías principales y ejes viales, vías primarias o colectores y vías secundarias [52].

La iluminación de las autopistas forma parte del servicio de alumbrado público. La iluminación de las autopistas se eleva el nivel de seguridad y confort de quienes transitan por los entornos viales. El nivel de iluminación en las autopistas está sujeto a la velocidad de circulación de los vehículos. De esta manera, el reglamento de eficiencia energética de España en instalaciones de alumbrado exterior definió una clasificación de vías, tabla 2.10, [53]. La clasificación española presenta cinco grupos de vías con características similares a la clasificación ecuatoriana definida en el Reglamento Técnico Ecuatoriano 069.

Tabla 2.10: Clasificación de las vías en función de la velocidad [51]

Clasificación	Tipo de vía	Velocidad del tráfico rodado en Km/h
A	De alta velocidad	$V > 60$
B	De velocidad moderada	$30 < V \leq 60$
C	Carriles de bicicletas	-
D	De baja velocidad	$5 < V \leq 30$
E	Vías peatonales	$V \leq 5$

Asimismo, junto a la clasificación de las vías, se han determinado los diferentes niveles de iluminación propios de cada vía que corresponden a los diferentes rangos de velocidad antes mencionados. En la tabla 2.11, se describen los parámetros fotométricos de iluminancia y luminancia media característicos de las vías [54].

Tabla 2.11: Clasificación del nivel de iluminancia media para diferentes autovías [52]

Tipo de vía	Iluminancia media (lx)	Luminancia media (cd/m^2)
A	35	2
B	35	2
C	30	1.9
D	28	1.7
E	25	1.4

En función de los parámetros citados en la tabla 2.11, se define la altura de montaje de las luminarias para cubrir las necesidades de iluminación en relación al flujo luminoso, tabla 2.12 [54].

Tabla 2.12: Relación del flujo luminoso de las lámparas y su altura de montaje [52]

Flujo de la lámpara (lm)	Altura (m)
$3000 \leq \phi L \leq 10000$	$6 \leq H \leq 8$
$10000 \leq \phi L \leq 20000$	$8 \leq H \leq 10$
$20000 \leq \phi L \leq 40000$	$10 \leq H \leq 12$
≥ 40000	≥ 12

2.2.3. Iluminación pública en Ecuador

2.2.3.1. Regulación del sistema de alumbrado público

El servicio de iluminación pública, también conocido como alumbrado público, es un servicio destinado a la iluminación de vías públicas, parques públicos y demás espacios de libre circulación.

El Consejo Nacional de Electricidad - CONELEC, resuelve en su regulación 008/11 que el servicio de alumbrado público debe operar 12 horas continuas, brindando así un elevado nivel en calidad del servicio, alta eficiencia de las luminarias y con el precio adecuado correspondiente al consumo energético [3].

El objetivo es crear un ambiente visual nocturno agradable para sus usuarios y evitar así los posibles accidentes. Con el diseño de un sistema eficiente de iluminación se espera altos estándares en calidad y eficiencia luminosa tal como lo expresa la Regulación 008/11 del CONELEC [3]. Para ello, se han definido los parámetros fotométricos necesarios para la iluminación de las infraestructuras viales en Ecuador:

- **Sistema de alumbrado público general:** Es aquel sistema que comprende el conjunto de luminarias, redes y equipos necesarios para la prestación del servicio de iluminación pública, que no formen parte del sistema de distribución.
- **Tarifa del servicio de alumbrado público general:** Es aquella que el CONELEC determina como retribución de los gastos realizados por el prestador del servicio y que debe ser recuperado de los consumidores del servicio eléctrico.
- **Usuarios de Servicio de Alumbrado Público, SAP:** Son todas las personas que hacen uso del servicio de alumbrado público general, para su movilidad dentro del territorio nacional.
- **Pago de Servicio de Alumbrado Público General, SAPG:** Los consumidores del servicio eléctrico, personas naturales o jurídicas, serán los responsables del pago del sistema de alumbrado público general - SAPG, a través de una tarifa que cubra los costos para la prestación de este servicio.
- **Flujo luminoso:** Se define el flujo luminoso como la potencia en vatios emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su símbolo es φ y su unidad es el lumen (lm).

- **Iluminancia (E):** Se define iluminancia como el flujo luminoso recibido por una superficie. Su símbolo es E y su unidad el lux (lx) que es un lm/m^2 .
- **Intensidad luminosa (I):** Se conoce como intensidad luminosa, al flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta. Su símbolo es I y su unidad la candela (cd).
- **Luminancia (L):** Se llama luminancia a la relación entre la intensidad luminosa y la superficie terrestre vista por el ojo humano en una dirección determinada. Su símbolo es L y su unidad es la cd/m^2 .
- **Deslumbramiento:** Es la condición de visión en la cual existe incomodidad o disminución de la capacidad para distinguir objetos, debido a una inadecuada distribución o escalonamiento de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos en el espacio o en el tiempo. La excesiva luminancia de lámparas y de superficies iluminadas puede generar deslumbramiento y reducir el contraste de los objetos.
- **Zonas de Conflicto:** Lugares en los cuales los criterios de iluminación son de difícil aplicación tales como cruce de vías, redondeles, o vías diseñadas especialmente para aplicaciones particulares como ciclo rutas, paseos de parque, entre otros.

2.2.3.2. Situación de la iluminación pública en el Ecuador

La iluminación pública es un servicio necesario para los ecuatorianos. Este servicio consiste en la iluminación de vías, parques y demás espacios de libre circulación. El objetivo del servicio de alumbrado público es proporcionar una visibilidad apropiada. El gobierno del Ecuador ha elaborado e impulsado el Plan Estratégico de Movilidad, que se desarrolla en los últimos años por parte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP. Entre los años 2007 y 2012 la inversión en infraestructura vial es tres veces mayor, tabla 2.13 [2].

Tabla 2.13: Inversión realizada en infraestructura vial [2]

PERÍODO	INVERSIÓN
Enero 2000 – Diciembre 2002	475'196.046
Enero 2003 – Diciembre 2004	459'797.186
Enero 2005 – Diciembre 2006	570'710.913
Enero 2007 – Diciembre 2012	7,592'317.489

Desde el año 2013 se ejecuta y proyecta la construcción de un importante número de autopistas y super-autopistas en el territorio continental. Se prevé que en total se construirá 979 Kilómetros que unirán varias provincias del país y donde la iluminación pública se considera un servicio necesario. El Instituto de Eficiencia Energética y Energías Renovables INER publicó, en un taller de eficiencia energética, la potencia instalada para el servicio de alumbrado público a diciembre del 2012. La potencia instalada fue de 176 MW correspondientes a 1 millón 104 mil 72 luminarias de diferentes tecnologías.

El consumo facturado en ese período fue de 913 GWh, que corresponden al 5 % del total de la energía eléctrica generada en el país. Esto representa un costo económico superior de 100 millones de dólares en el año 2012. En la Figura 2.60, se muestra la evolución de la facturación eléctrica en el alumbrado público entre los años 2006 y 2012 en el Ecuador [55].

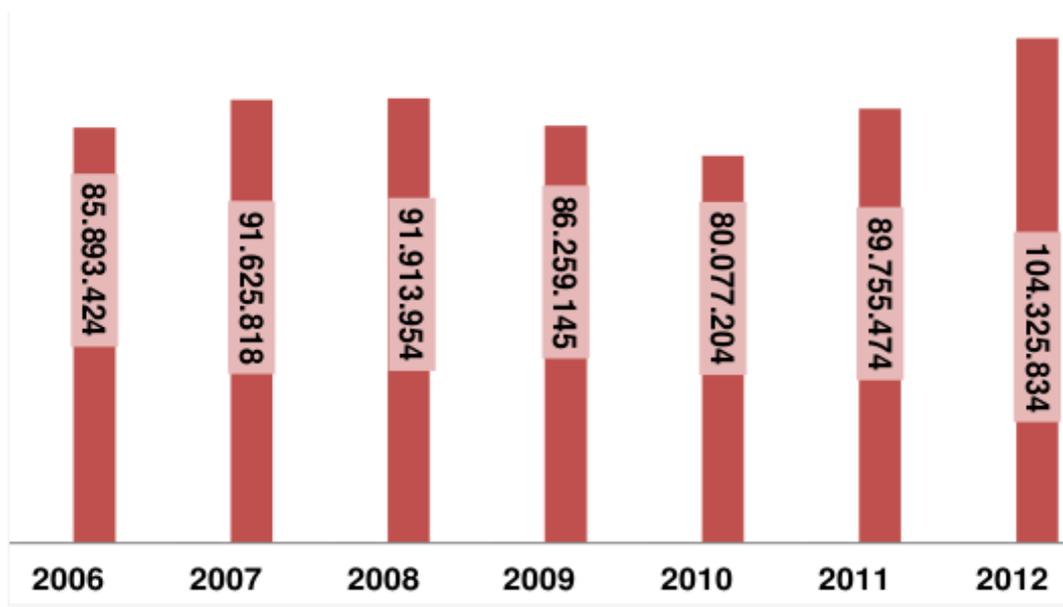


Figura 2.60: Facturación del servicio de alumbrado público entre 2006 y 2012 [53]

La tasa de crecimiento de alumbrado público entre los años 2006 y 2012 fue del 3%. Se prevé que para el período entre 2012 y 2021 el porcentaje de crecimiento sea del 7%, lo que implica que el consumo de energía en alumbrado público supere los 1678 GWh [55]. Ese valor es equivalente a la producción de energía eléctrica correspondiente a una central hidroeléctrica de 280 MW de potencia instalada operando 6000 horas al año.

Se estima que en el año 2021, el coste económico de la energía destinada para el servicio de alumbrado público alcanzaría los 190 millones de dólares. El consumo energético de alumbrado público entre 2012 y 2021, superará los 1435 millones de dólares. Un valor equivalente a la construcción por parte del Estado ecuatoriano de 48 nuevas escuelas del milenio entre 2012 y 2021.

A diciembre de 2012, el servicio de alumbrado público se encontraba compuesto por un 86 % de luminarias de sodio de alta presión, mientras que el 10 % correspondía a luminarias de vapor de mercurio. El restante 4 % se conformaba por luminarias de inducción, incandescentes, mixtas, LED y luminarias reflectantes.

2.2.3.3. Criterios de optimización del alumbrado público

El servicio de alumbrado público puede ser optimizado mediante el empleo de las nuevas tecnologías de iluminación.

En este sentido, se puede emplear sistemas compactos de iluminación pública compuestos por sistemas fotovoltaicos y luminarias LED. Además, se mencionó que las luminarias LED son de excelentes características para la iluminación de las autopistas en Ecuador. Los sistemas de iluminación LED son más eficientes que las luminarias de vapor de sodio [12].

El servicio de iluminación pública de cualquier país puede presentar luminarias en mal estado - apagadas, rotas, centellantes, etc. -, figura 2.61, causando incomodidades a los usuarios. Un sistema de gestión automatizado de la iluminación pública que permita disponer de la información del estado de las luminarias en cualquier instante minimizará la existencia de luminarias fuera de servicio y por tanto, evitará incomodidades a los usuarios.



Figura 2.61: Luminarias deficientes en el alumbrado público [fuente propia]

Asimismo, el diseño de las luminarias de sodio de alta presión permite la acumulación de suciedad, polvo y humedad que propicia la aparición de hongos. El escaso mantenimiento pone en riesgo el servicio de iluminación, impidiendo una emisión uniforme de luz hacia la superficie, figura 2.62.

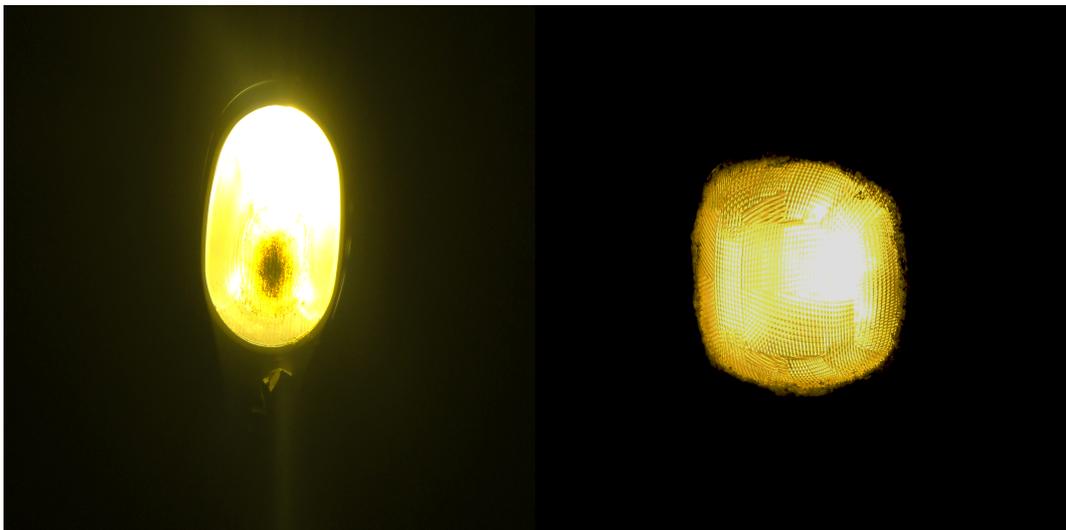


Figura 2.62: Luminarias con escaso mantenimiento [fuente propia]

Los sistemas de iluminación ofrecen un elevado nivel de eficiencia que garantiza la seguridad de sus usuarios. Por tal razón, se debe tomar en consideración la distribución de las luminarias. Así, el servicio de iluminación operará indistintamente del sitio geográfico donde se encuentre la instalación [56]. Las diferentes formas de disposición de las luminarias se muestran en la figura 2.63.

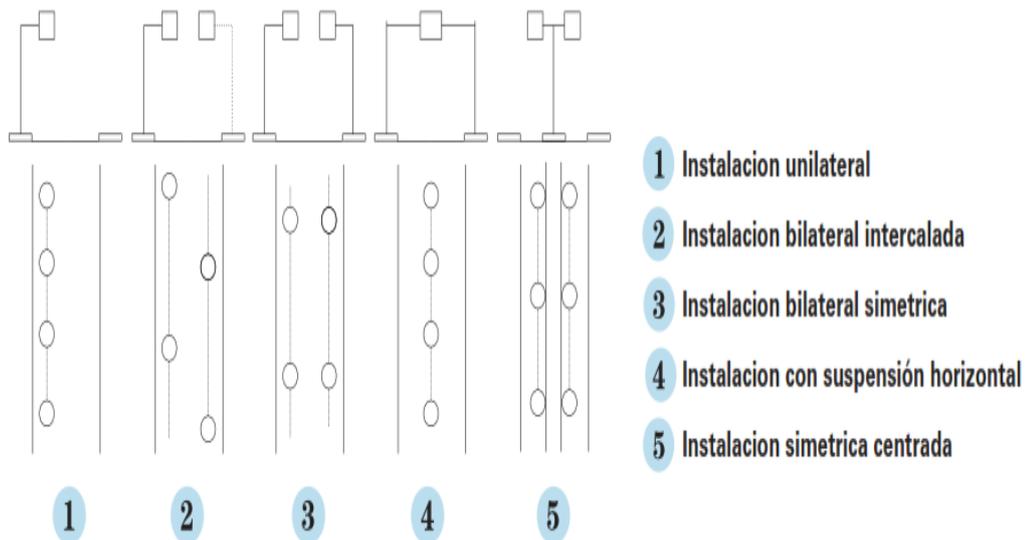


Figura 2.63: Disposición de luminarias para alumbrado público [54].

En el presente trabajo, se evalúa el impacto en el ahorro energético del sistema de iluminación, que emplee sistemas fotovoltaicos aislados como fuente de energía. Además, se prevé que la comunicación entre luminarias sea inalámbrica y se propone que el diseño del control de iluminación se implemente en una instalación simétrica centrada.

El Estado ecuatoriano debería considerar seriamente la implementación de los innovadores sistemas fotovoltaicos de iluminación en las futuras infraestructuras viales. Las experiencias de países industrializados como Japón, Inglaterra, Holanda, Alemania, Noruega, China y Brasil indican que los sistemas fotovoltaicos poseen un gran desempeño en la iluminación de autopistas. Los sistemas de iluminación compuestos por luminarias LED tienen la capacidad de integrarse fácilmente a sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos permiten una rápida acoplación con las luminarias, evitando así un gran número de personal humano en las instalaciones eléctricas al no realizar acometidas, zanjas para la colocación de las tomas a tierra.

Las zanjas y excavaciones para las acometidas a tierra implican un gasto adicional en las instalaciones de alumbrado público, figura 2.64.



Figura 2.64: Excavaciones y tomas a tierra en alumbrado público [fuente propia]

En el presente trabajo, se propone un sistema de iluminación formado por luminarias LED, luminarias de alta eficiencia. Un sistema de control inteligente de iluminación fotovoltaica permitirá reducir el coste económico del consumo energético del servicio de alumbrado público gracias al control de las luminarias de alta tecnología LED.

Las luminarias LED deberán cumplir un valor mínimo de 25 lx a una altura mínima de 6 metros. En el Ecuador, la instalación de las luminarias se realiza a mayor altura, generando polución lumínica. Esto produce una ineficiente iluminación debido a que la luz de las luminarias se dispersa en gran parte hacia la atmósfera. En la figura 2.65, se observa que a una altura de montaje de 6 metros, las luminarias LED iluminan una superficie de 160 m^2 [56].

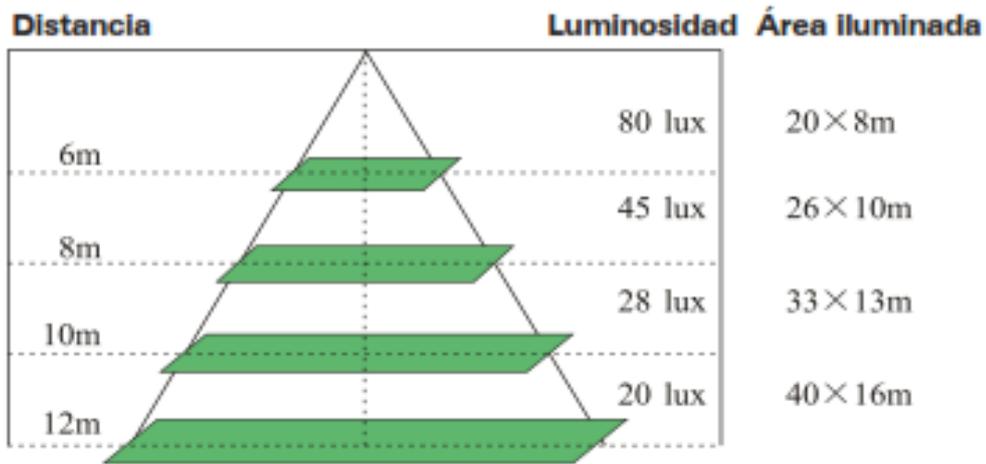


Figura 2.65: Flujo luminoso de las luminarias LED a diferentes alturas [54]

De la figura 2.65, se deduce que el máximo flujo luminoso producido por las luminarias LED se obtiene a una altura de 6 metros. Además, la superficie iluminada cumple con el ancho de los carriles de circulación de las autopistas, 8 metros.

En la figura 2.66, se observa el área de iluminación de las luminarias LED para un tramo urbano y rural con un ancho de carriles establecidos en el Ecuador, igual a 3 y 3,8 metros, respectivamente. En este sentido, si la luminaria se ubica a una altura de 6 metros, entonces el área iluminada abarcaría 3 carriles para un ancho de carril de 3 metros y 2 carriles para un ancho de carril de 3,8 metros, respectivamente.

El flujo luminoso a una altura de 6 metros proporciona un nivel de iluminación óptima para diferentes escenarios viales.

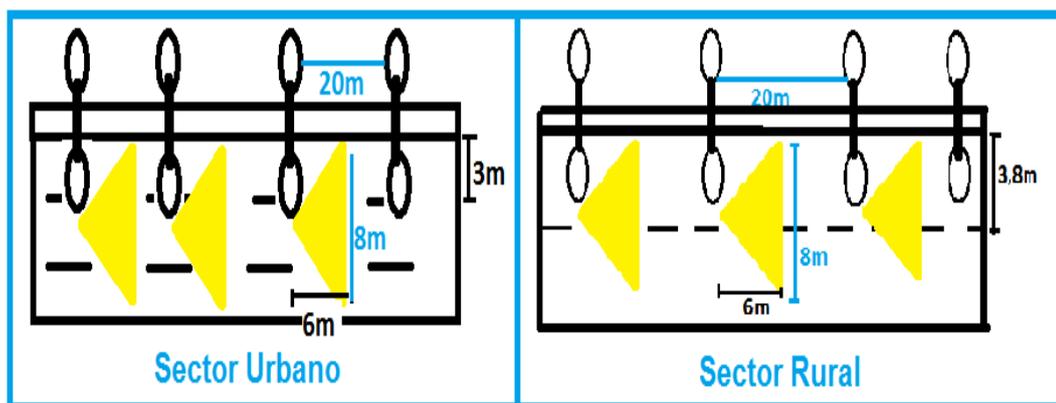


Figura 2.66: Iluminación LED a superficies de diferentes dimensiones [fuente propia]

En España, durante el año 2011, el coste económico del consumo energético de las autopistas, valorado en 25 millones de dólares, se redujo a la mitad. Para ello se emplearon medidas de control que consistieron en la desconexión de luminarias en tramos de autopistas con reducido flujo vehicular.

Asimismo, en Holanda, se ha desarrollado e implementado un control de iluminación LED en un tramo de 8 Km de autopista. El control de iluminación permitirá un ahorro de 180 mil KWh anuales. El ahorro de energía obtenido es posible mediante el control de la intensidad luminosa en las luminarias.

La intensidad luminosa de las luminarias que operan al 100% en las horas de mayor congestión vehicular y se reduce al 20% en las horas de bajo flujo vehicular.

2.2.4. Control de sistemas de iluminación

Un sistema de iluminación público se puede clasificar en función del área de instalación, funcionamiento y su utilización. La iluminación de las autopistas, carreteras secundarias, centros urbanos y zonas de esparcimiento público son ejemplos de alumbrado público. Asimismo, la tecnología de iluminación de las calles se pueden clasificar en relación al tipo de lámparas que se emplean en los sistemas de iluminación.

Los sistemas de iluminación en su inicio fueron controlados de manera manual empleando interruptores individuales en cada luminaria, a éste tipo de control se lo conoció con el nombre de control de primera generación. En la actualidad, las farolas de iluminación son manipuladas a través de un control óptico, que opera en función de la variación de resistencia de un dispositivo sensible a la luz que enciende las luminarias al anochecer y las apaga automáticamente al amanecer.

Un sistema de control inteligente de iluminación en autopistas se puede definir como un control moderno de iluminación, que emplea tecnologías informáticas, sistemas de comunicaciones, sistemas de automatización y electrónica de potencia. Un control inteligente activa y desactiva el sistema de iluminación, variando la intensidad de la luz en cada luminaria en tiempo real basado en las condiciones del entorno y en función del flujo de vehículos.

El propósito principal de un sistema de control inteligente de iluminación en autopistas es ahorrar costos de electricidad y mantenimiento, sin afectar la seguridad del tráfico vehicular.

En la figura 2.67, se muestra el esquema básico de un control inteligente de iluminación [57]. El esquema está compuesto por un sistema de detección vehicular, una central de telegestión del sistema de iluminación y una plataforma de visualización.

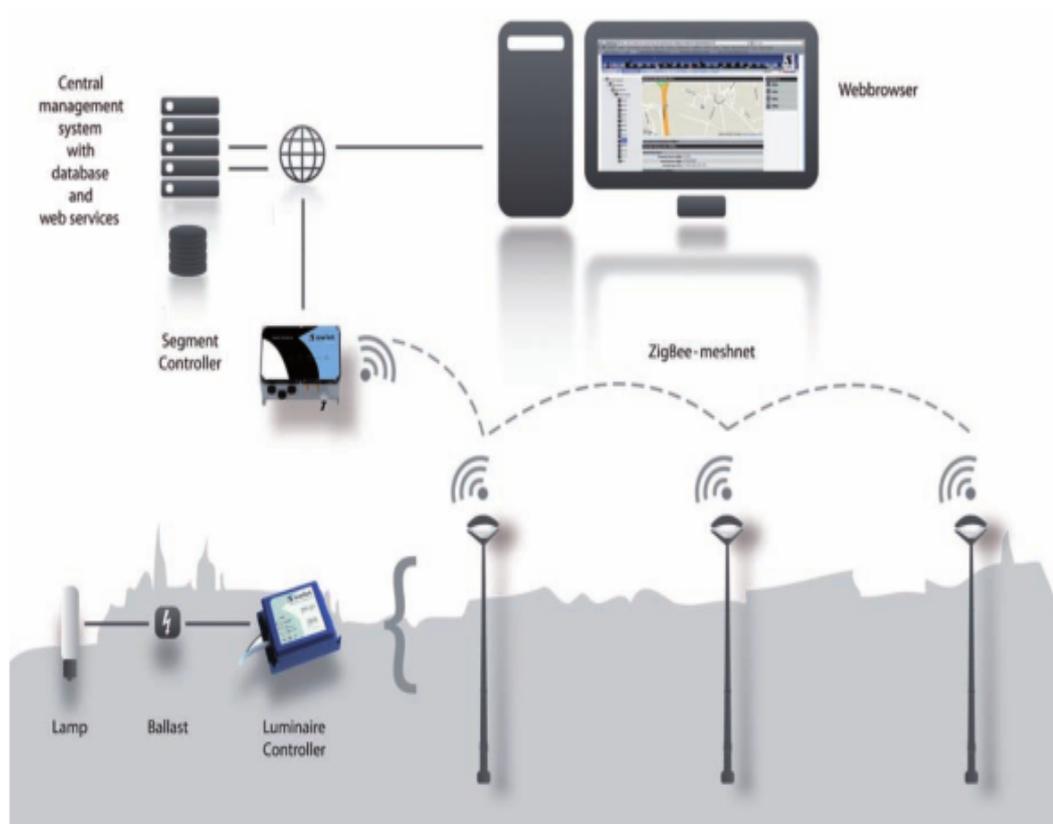


Figura 2.67: Esquema básico de un sistema inteligente de iluminación [55]

En el presente trabajo, se propone el desarrollo de un prototipo de control inteligente de las luminarias, operado por un microcontrolador de la familia Arduino. El Arduino permitirá expandir la funcionalidad del control inteligente de forma sencilla en un futuro, integrando innovadoras tecnologías y algoritmos de control.

2.2.4.1. Sistemas de Detección de vehículos

La detección es un proceso de localización de objetos de manera indirecta a través de aparatos o métodos físicos y químicos. En base a sensores se desarrollan algoritmos que detectan el movimiento de vehículos. Se define a la detección de vehículos como el conjunto de dispositivos electrónicos empleados para su localización. Varios de estos algoritmos emplean sensores, cámaras, que se colocan a lo largo de la autopista. La información captada por estos dispositivos muestra información sobre congestiones viales, condiciones meteorológicas en la vía y accidentes.

Existen varios métodos y técnicas para la detección de vehículos.

El enfoque más común está basado en el empleo de sensores activos como son el láser, lidar y radares de ondas milimétricas. Por otro lado, la detección de vehículos basada en la operación de sensores ópticos implica un modo de operación muy complejo. Esto se debe a la excesiva cantidad y diversidad de vehículos. Por ejemplo, los vehículos pueden variar en forma, tamaño, color y en horas nocturnas el número de los faros de los vehículos no se detecta, figura 2.68 [58].



Figura 2.68: Errores en la identificación de vehículos [56]

Asimismo, se han desarrollado novedosos y diversos sistemas de apoyo en la conducción de vehículos. Para ello, se emplea la detección de obstáculos y de otros vehículos que se encuentran en las vías. Estas técnicas integran diversos sensores y visión artificial por computador [58].

Sistemas de detección vehicular

En los siguientes párrafos, se presenta una descripción de los principales sistemas empleados en la detección de vehículos.

- **Detección de vehículos por dispositivos ópticos:** La operación de dispositivos ópticos se realiza a través del procesamiento digital de imágenes, detectando las características generales que presentan los vehículos.

Los mencionados dispositivos están conformados por lentes ópticos capaces de capturar y transmitir imágenes en tiempo real. Las imágenes transmitidas deberán ser de gran resolución y nitidez. Por otra parte, el proceso de adquisición de las imágenes se ve afectado por las variaciones de luz, los diferentes colores de los objetos, las propiedades de reflectancia de los mismos, la simetría con objetos en el fondo de las imágenes y los parámetros propios de cada dispositivo.

Asimismo, el sistema de iluminación de los vehículos representa una característica visual que impide detectar sombras, bordes verticales y horizontales en superficies de tamaños considerables en el proceso de detección vehicular [59]. Además, las condiciones meteorológicas son parámetros influyentes en los fenómenos visuales que pueden suscitarse en las diferentes horas del día en el escenario de visualización. Por este motivo, la detección de vehículos por dispositivos ópticos presenta grandes desventajas en escenarios de iluminación variable.

- **Sistemas comerciales:** Actualmente, el empleo de sensores a nivel de la calzada o introducidos en el pavimento se han convertido en las novedosas técnicas utilizadas en el conteo y clasificación de vehículos. Entre las principales técnicas se encuentran:
 - **Manguera neumática:** Es un sistema conformado por sensores que captan las variaciones de presión en la manguera neumática generadas por la circulación de los vehículos. Las mangueras neumáticas son capaces de contar y clasificar los vehículos en relación al número de ejes propio de cada vehículo.

El tiempo de operación de este sistema es limitado y sólo es eficiente cuando el flujo vehicular es constante. Para lograr un correcto funcionamiento es indispensable una excesiva vigilancia en la protección y fijación de la manguera a la calzada, figura 2.69 [60].



Figura 2.69: Manguera Neumática en Carretera [58]

- **Lazos inductivos:** Son sistemas que operan en forma temporal o permanente. El sistema de lazo inductivo inicia su operación cuando existe una variación de la masa magnética. Es un sistema económico capaz de clasificar los vehículos sin precisar el número de ejes que posee el mismo. En la figura 2.70, se observa la instalación de un lazo inductivo.



Figura 2.70: Instalación de un lazo de inducción [fuente propia]

- **Sensores piezoeléctricos:** Es un sistema integrado con sensores de ejes vehiculares. Los sensores tienen la capacidad de clasificar los vehículos y calcular su velocidad de circulación con gran precisión. El sistema trabaja en conjunto con un lazo inductivo, formando dos estructuras, la primera estructura está compuesta por un lazo inductivo ubicado

en el centro de dos sensores piezoeléctricos. La estructura se conoce como configuración piezo-lazo-piezo. La segunda estructura integra dos lazos inductivos a los extremos de un sensor piezoeléctrico, formando la configuración lazo-piezo-lazo. La carga eléctrica se produce cuando las ruedas de los vehículos pasan sobre los sensores piezoeléctricos. En este sentido, se detectan vehículos con velocidades que van de 1 a 180 Km/h.

- **Sensores en base a cables de fibra óptica:** El sistema detecta la circulación de vehículos cuando las ruedas pasan sobre los cables de fibra óptica, lo que produce variaciones en la conductividad de los cables de fibra óptica. La operación del sistema es análogo al sistema de sensores piezoeléctricos. Además, este sistema tiene la capacidad de detectar diferentes situaciones de circulación.
- **Sistema RFID:** El sistema de identificación por radio frecuencia es un método de identificación automática de manera remota, que emplea tarjetas de identificación. La información de las tarjetas se obtiene a través de ondas de radio frecuencia. El sistema está formado por un transmisor que es un radar que almacena la información de las tarjetas, figura 2.71 [61].



Figura 2.71: Sistema RFID en la detección de vehículos [59]

Este sistema opera con línea de vista directa entre el emisor y el receptor, presentando una gran desventaja en casos de existir obstáculos en la transmisión.

- **Radar de ondas milimétricas:** Es un sistema propio de los vehículos. Este sistema, está formado un radar que emite microondas que rebotan en las carrocerías de los demás vehículos y señales de tránsito. Las microondas que retornan son captadas por antenas ubicadas en el vehículo, a través del patrón de radiación de las antenas se conoce el tamaño y la distancia de los objetos detectados [62], figura 2.72.

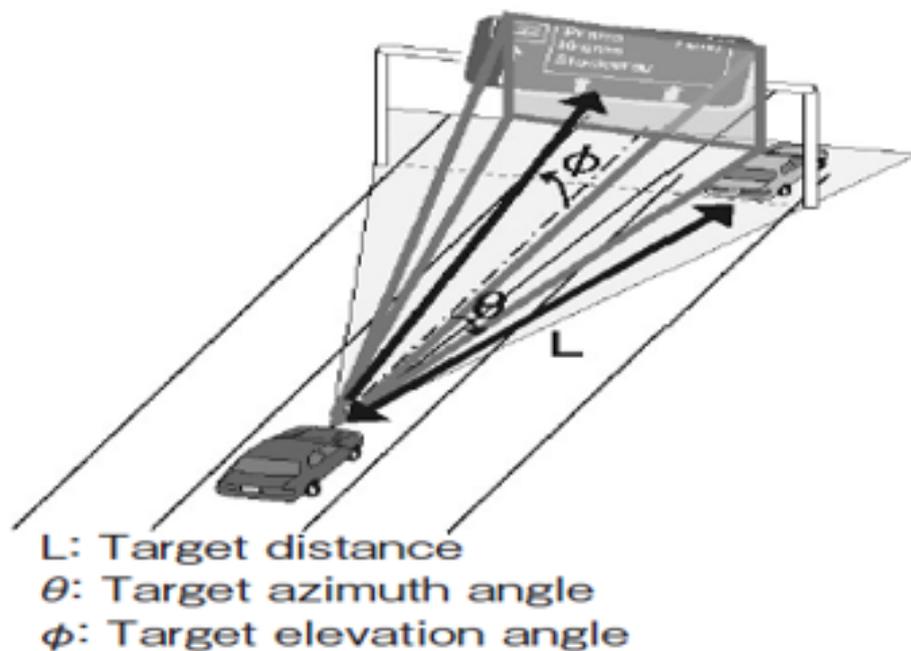


Figura 2.72: Detección de vehículos por Radar de ondas milimétricas [60]

El sistema puede detectar vehículos que se aproximan a un lugar específico y determinar la distancia y su velocidad. Además, este sistema no requiere de obra civil para su instalación como es el caso de la mayoría de los sistemas antes mencionados. En la presente propuesta, se tomará en consideración, al radar de ondas milimétricas como el sistema de detección de vehículos. Las características que posee el radar lo convierten en un poderoso sistema para la detección vehicular para autopistas.

2.2.4.2. Sistemas de inalámbricos de comunicación

La comunicación del sistema es un parámetro fundamental, una excelente comunicación facilitará el control de manera remota del sistema de iluminación. En la presente propuesta, se plantea minimizar el número de conectores físicos, ya que cada luminaria integrará su propio sistema de generación eléctrica.

En tal virtud, se plantea el empleo de dispositivos inalámbricos para la comunicación entre el sistema de iluminación y el sistema de control de las luminarias. El entorno de las comunicaciones inalámbricas es muy diverso, permitiendo que los usuarios tengan acceso a redes de área personal - PAN -, redes de área local - LAN - y redes de área amplia - WAN - . En la tabla 2.14, se muestra las características de las principales tecnologías de comunicación inalámbrica [63]. Se observa que la tecnología ZigBee aproximadamente consume 10 veces menos corriente que la tecnología Wi-Fi, extendiendo así el tiempo de duración de la batería en años. Además, la tecnología ZigBee cuenta con un número de 255 nodos de red como valor mínimo para la comunicación entre sus dispositivos.

Tabla 2.14: Comparación entre tecnologías de comunicación inalámbrica [61]





	Wi-Fi	Bluetooth	Zigbee
Velocidad	<50 Mbps	1 Mbps	<250 kbps
Núm. nodos	32	8	255 / 65535
Duración batería	Horas	Días	Años
Consumo trans.	400 mA	40 mA	30 mA
Consumo reposo	20 mA	0.2 mA	3 uA
Precio	Caro	Medio	Barato
Configuración	Compleja	Compleja	Simple
Aplicaciones	Internet en edificios	Informática y móviles	Domótica y monitorización

2.2.4.3. Descripción de las tecnologías Zigbee

- **Estándar Inalámbrico ZigBee.**

Es un protocolo de comunicación regulado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, IEEE, donde está definido el nivel físico y el control de acceso al medio de las redes inalámbricas de área personal.

- **Alianza ZigBee:** Es un consorcio formado por más de 70 compañías, que desarrollan dispositivos de comunicación inalámbrica para aplicaciones diferentes a Wi-Fi y Bluetooth. Estos dispositivos son más rentables, fáciles de operar, poseen gran confiabilidad y un nivel alto de seguridad.
- **Estándar IEEE 802.15.4:** Define el nivel físico y el control de acceso al medio de las redes inalámbricas de área personal. Asimismo, se caracteriza por su flexibilidad de la red, su bajo costo económico y mínimo consumo de energía. Los dispositivos son multifuncionales con aplicaciones para el hogar y las industrias.

ZigBee se describe como un protocolo de comunicación inalámbrico que permite la interoperatividad de diversos dispositivos fabricados por compañías distintas y para diferentes aplicaciones industriales [64], figura 2.73.

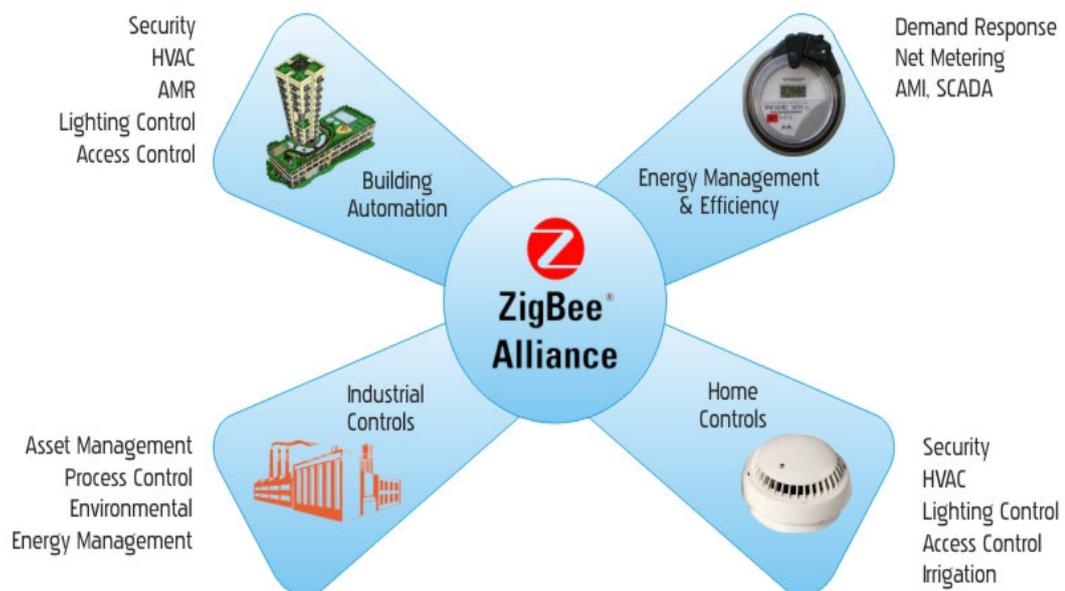


Figura 2.73: ZigBee Aliance [62]

Además, ZigBee posee importantes características para su óptimo desempeño, esas características se detallan en la tabla 2.15.

Tabla 2.15: Características ZigBee [fuente propia]

Característica	Rango
Bandas de frecuencia	868 - 868.8 MHz (Europa) 902 - 928 MHz (Norte América) 2400 -2483.5MHz (Todo el mundo)
Alcance	30 - 40 m en espacios cerrados 100 - 120 m en espacios abiertos
Retardo	Inferior a 15 ms
Número de canales	868 - 868.8 /902 - 928 MHz 11Ch 2400 -2483.5MHz Ch
Rango de transmisión de datos	868 - 868.8 MHz: 20Kbps 902 - 928 MHz: 40Kbps 2400 -2483.5MHz: 250Kbps
Direccionamiento	64 bits Adicional: Corto de 16 bits
Nodos por red	Hasta 65536 Hasta 255 por subred
Canal de acceso	CSMA-CA CSMA- CA Rasurado
Temperatura	Rango de temperatura industrial 40°C a 85°C

- Módulos XBee:** Son módulos de transmisión inalámbrica de forma bidireccional. Operan con el protocolo ZigBee en el estándar 802.15. La tecnología XBee surge como un complemento de las comunicaciones inalámbricas Wifi y Bluetooth. El hardware desarrollado posee un bajo consumo de energía y en su mayoría esta formado por circuitos digitales, permitiendo que sus costos de fabricación sean muy reducidos y presentan una configuración sencilla. En este sentido se tendrá una fácil integración con varios dispositivos electrónicos, además son ideales para trabajar con Arduino, figura 2.74. En el mercado existen varios módulos compatibles con los microcontroladores de la plataforma Arduino, permitiendo una comunicación rápida, constante, fácil de usar y segura.

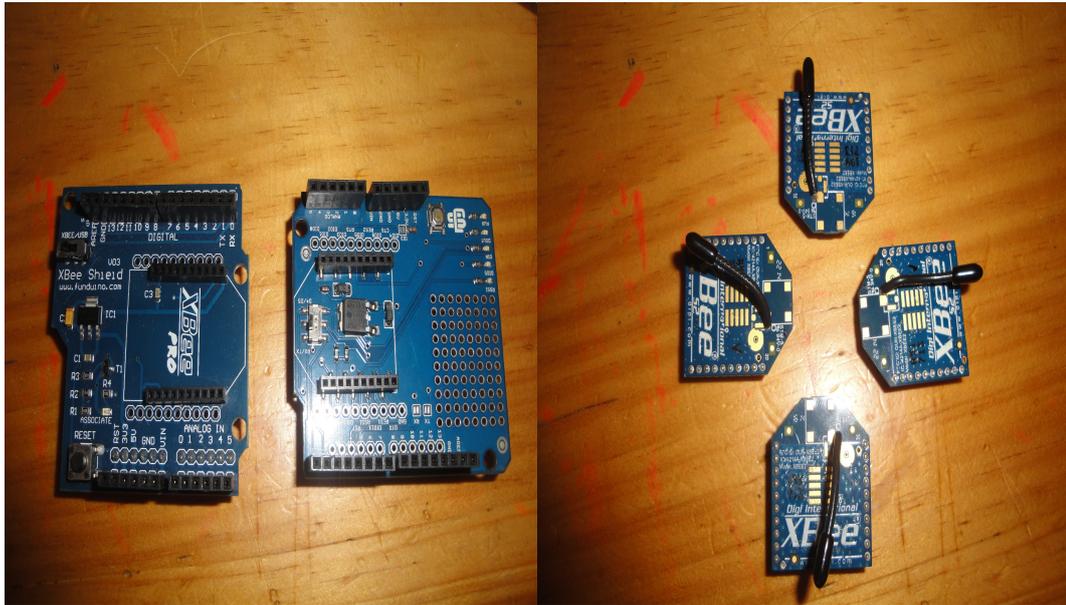


Figura 2.74: Módulos XBee y sus placas compatibles para Arduino [fuente propia].

Los módulos XBee cuentan con dos series de firmware interno, permitiendo que sean más funcionales y versátiles.

Los módulos XBee de la serie 1 disponen de conexiones punto a punto y punto multipunto. Mientras que los novedosos módulos XBee de la serie 2 pueden ser configurados para trabajar en diferentes topologías como lo es la topología malla. Por tal razón, se propone que la comunicación de la presente propuesta se realice con los módulos XBee de la serie 2, configurados en topología malla. Así el sistema contará con una comunicación eficiente y de alta calidad.

Para establecer comunicaciones entre los módulos XBee se debe configurar según la función que desempeñen en la red. Así se tiene: Coordinador ZigBee, Router ZigBee y Dispositivo final [64].

- **Coordinador ZigBee (ZC)**

Es la configuración más completa que alcanzan los módulos XBee, actuando como director de la red en topologías del tipo árbol. Existe un coordinador por cada red y es el coordinador del área personal - PAN [64].

- **Router ZigBee (ZR)**

Es un nodo capaz de crear y mantener la conexión de la red. Su función es determinar la mejor ruta para transmitir un paquete de información. Los routers integrados a una red ZigBee retransmiten los paquetes de información de otros routers o dispositivos finales [64].

■ Dispositivos finales - ZigBee End Device, ZED

Los ZED tienen la capacidad para establecer comunicación de manera única con su nodo padre, por tanto, un módulo XBee debe ser configurado como router o coordinador. Los ZED pasan gran parte del tiempo en modo de ahorro de energía, extendiendo así el tiempo de vida de sus baterías [64].

En la figura 2.75, se muestra las diferentes topologías de red con módulos XBee.

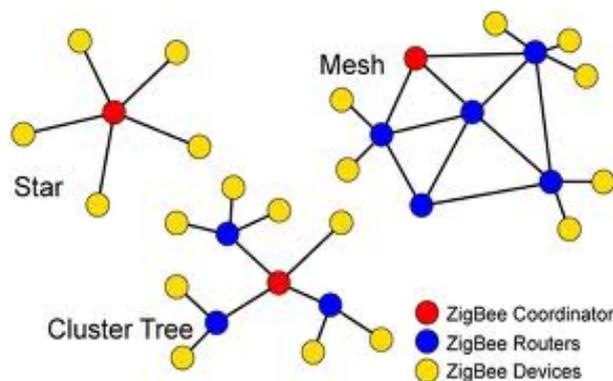


Figura 2.75: Topologías de red con XBee [62]

2.2.4.4. Control de luminosidad

El control de luminosidad se aplica en cualquier fuente luminosa, pero las luminarias LED presentan grandes ventajas y facilidad en el control de la intensidad de luz que irradian sobre la superficie terrestre.

Un eficiente control de la intensidad luminosa de las luminarias LED implicará un gran ahorro en la facturación de energía eléctrica, correspondiente al servicio de alumbrado público. En [65], se muestra el empleo de un algoritmo de programación, donde se detallan varias capas de comunicación entre usuarios y clientes. El algoritmo procesa la información captada por una red de sensores que miden la temperatura y humedad del ambiente. La información se almacena en una base de datos disponible para un servidor local. La intensidad de las farolas LED será regulada en función de la información captada por los sensores, alcanzando así un importante ahorro energético. Asimismo, la intensidad se incrementará cuando los sensores detectan la presencia de personas, figura 2.76.

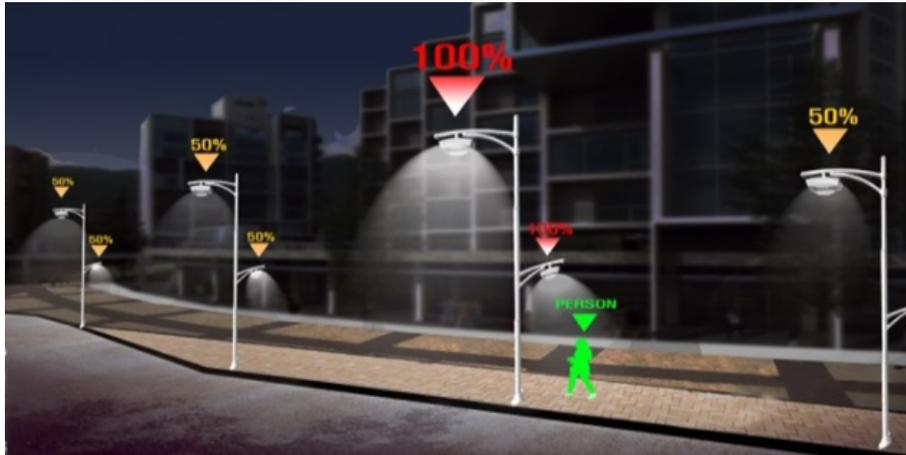


Figura 2.76: Control de la intensidad luminosa de luminarias LED [63]

El control de iluminación es de particular importancia puesto que brinda seguridad a los conductores y vigila el consumo de energía. En este sentido, en [66], se presenta el control de luminosidad en túneles de varias autopistas en China. El control se realizó con lámparas LED, demostrando un ahorro entre el 35 y 80 % superior a las tradicionales lámparas de sodio de alta presión. En la figura 2.77, se observa un esquema de la arquitectura del control MPPT [67].

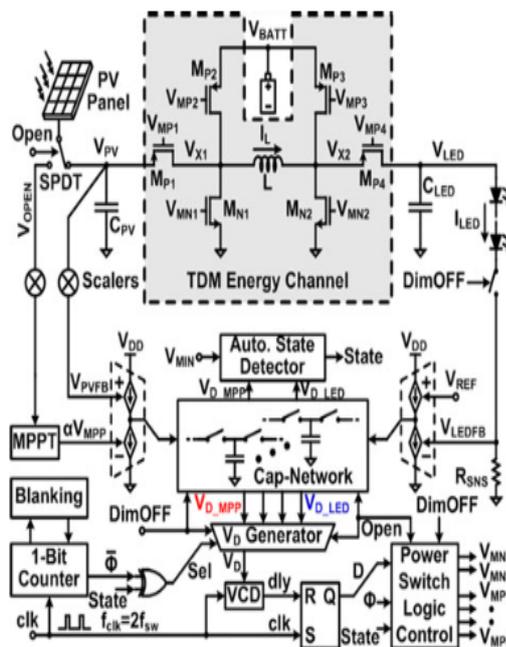


Figura 2.77: Arquitectura del control MPPT [65]

2.2.4.5. Plataformas de monitorización

Un sistema de control de iluminación almacena información que deberá ser procesada, analizada y visualizada. En [8], se realizó un control de iluminación basado en una red inalámbrica de sensores, la información del control se puede visualizar a través de una interfaz gráfica, GUI. La interfaz gráfica está integrada por cinco botones que actúan de interruptores. Los cuatro primeros interruptores permiten controlar de forma individual el encendido de las luminarias. El último botón es un interruptor que enciende o apaga todas las luminarias en conjunto. El control a través de la interfaz gráfica se realiza en base a una comunicación serial, figura 2.78.



Figura 2.78: Interfaz gráfica del control de iluminación [8]

El empleo de la interfaz gráfica permite controlar el encendido/apagado de las luminarias en forma individual o en conjunto. En este sentido, se tendrá un control y visualización del estado del sistema de iluminación.

Un control con mayores prestaciones se obtiene gracias a la innovadora tecnología de la información denominado “el Internet de las cosas”. En [68], se presenta un control de iluminación que permite establecer una conexión a través de Internet y mostrando visualizar el estado del tráfico vehicular y las condiciones meteorológicas en la autopista. El control regula los sistemas de semaforización dentro del perímetro urbano. En la actualidad, existen varias ciudades europeas en las que se ha implementado este novedoso concepto en sus sistemas de iluminación como Munich, Vienna y Frankfurt on Main.

En estas ciudades se implementó varios sistemas de monitorización presentando información variada de los sistemas de alumbrado público, figura 2.79.



Figura 2.79: Control y monitorización de información variada [66]

Por otra parte, en Chennai India, se presentó un estudio de una plataforma cloud para el monitoreo del sistema de iluminación pública. El estudio indica que un micro controlador Arduino procesará la información captada por un sensor infrarrojo y la enviará en forma inalámbrica a través de ZigBee hacia un servidor Cloud. Asimismo, la información recibida del sensor permitirá monitorizar el nivel de luminosidad de las luminarias desde varios dispositivos, figura 2.80 [23].

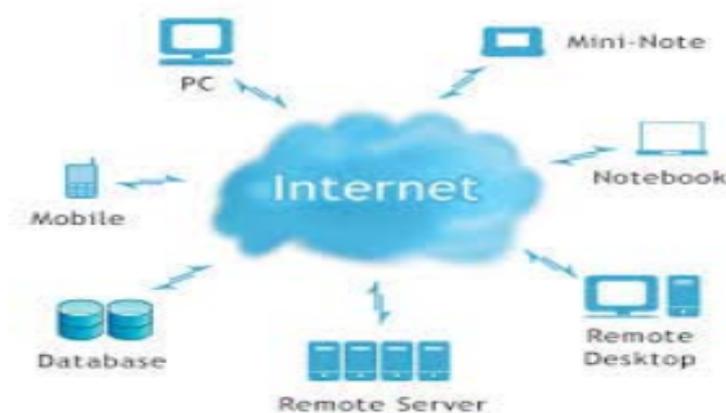


Figura 2.80: Diagrama de acceso a la plataforma cloud [23]

Asimismo, en [65], se implementó una base de datos que almacena información de la red inalámbrica del sistema de iluminación. La red se configuró en base a nodos y grupos de sectores de control. La configuración de la red permite la conexión con una base de datos alojada en un servidor web. La información de la base de datos se visualiza desde una terminal remota, host, figura 2.81.

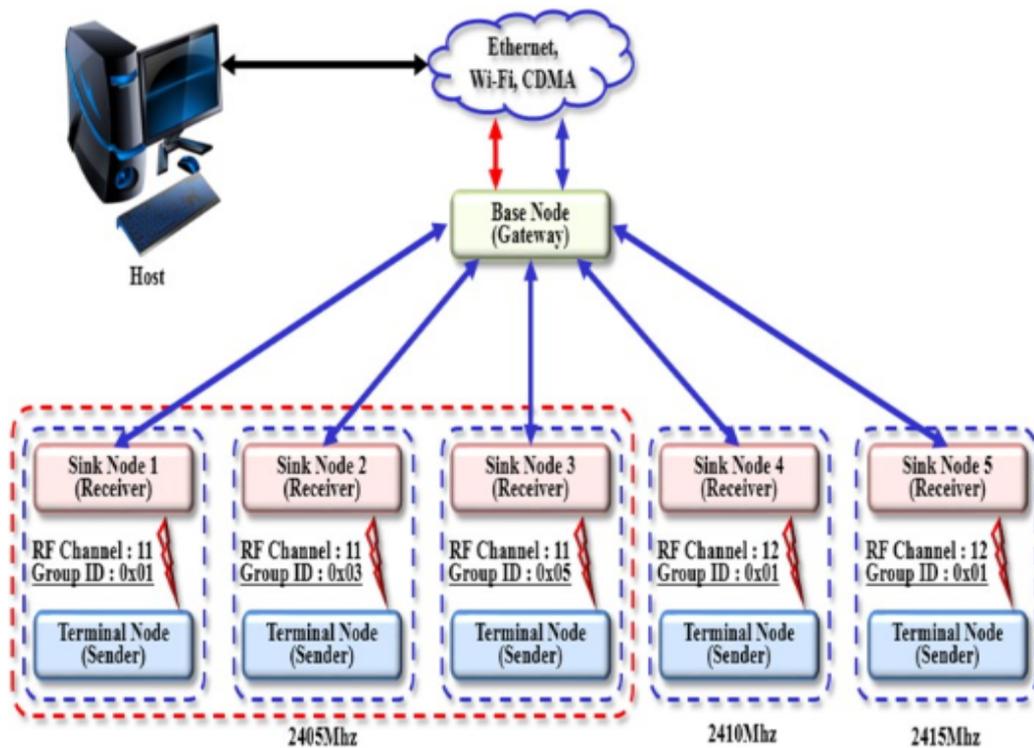


Figura 2.81: Configuración de la red de sensores [63]

2.3. Propuesta de Solución

Se propone el diseño de un control inteligente de iluminación fotovoltaica para el sistema de alumbrado de autopistas del Ecuador con el objetivo de alcanzar un importante ahorro energético. El sistema de alumbrado se alimentará desde una fuente renovable basado en el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1. Modalidad básica de la investigación

El presente proyecto refleja investigación aplicada, que se desarrollará utilizando:

- **Investigación bibliográfica:** porque la explicación científica de los contenidos del tema de investigación se realizará consultando en libros de electrónica, revistas y publicaciones de Internet referentes a la programación de microcontroladores y sus aplicaciones, así como también las técnicas y herramientas desarrolladas en la detección de vehículos y el monitoreo del estado de un sistema de control inteligente de iluminación fotovoltaica. Es el proceso más adecuado para obtener información.
- **Investigación de campo:** para lo cual se realizará un estudio sistemático de los hechos en el lugar en que se producen los acontecimientos. Con esta modalidad se dará contacto en forma directa con la realidad, para tener información de acuerdo con los objetivos del proyecto, planteando un caso real y un ejemplo virtual para conocer los datos obtenidos.

3.2. Recolección de información

Para el presente proyecto se recopilará información de libros, Internet, revistas científicas, trabajos de investigación, papers, patentes, guía del tutor para el desarrollo del proyecto, etc.

3.3. Procesamiento y análisis de datos

Una vez que se ha obtenido la información apropiada de la investigación, ésta formará parte de un proceso estadístico que consiste en la tabulación de los datos de forma ordenada y sistemática.

El análisis de los resultados se presentará en cuadros estadísticos pastel destacando las tendencias o relaciones fundamentadas de acuerdo a los objetivos.

La revisión y la codificación de los resultados permitirán detectar los errores, omisiones y eliminar respuestas que sean contradictorias y poder así discriminar la información para facilitar la tabulación de la misma.

3.4. Desarrollo de la propuesta

Para el desarrollo del prototipo dentro de la presente investigación se abordarán los siguientes puntos:

1. Descripción general del control inteligente de iluminación.
2. Selección de la mejor alternativa para la detección de vehículos en tiempo real.
3. Diseño y programación del sistema electrónico de iluminación integrado con el sistema de detección.
4. Análisis de las posibles fallas del sistema electrónico propuesto en la detección de vehículos y en el control de la iluminación.
5. Elaboración e Implementación práctica de una metodología de ahorro energético en los sistemas de alumbrado de las autopistas.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1. Datos Informativos.

4.1.1. Tema de la propuesta

“Control Inteligente de Iluminación Fotovoltaica para Autopistas en Ecuador.”

4.1.2. Beneficiarios.

- La ciudadanía ecuatoriana en general y usuarios de las autopistas, en particular.
- El Estado ecuatoriano que ahorrará gran cantidad de energía y disminuirá la emisión de gases de efecto invernadero.

4.2. Objetivos.

4.2.1. General.

Diseñar un control inteligente de iluminación fotovoltaica para autopistas del Ecuador.

4.2.2. Específicos.

- Analizar los sistemas de detección vehicular.
- Analizar los sistemas de iluminación fotovoltaica para autopistas inteligentes.
- Determinar los requerimientos técnicos para el diseño de un control inteligente de iluminación fotovoltaica para autopistas en Ecuador.

- Calcular el ahorro energético del sistema de alumbrado gracias a la implementación de un sistema de control inteligente de iluminación fotovoltaica para autopistas en Ecuador.

4.2.3. Análisis de factibilidad.

El estudio de factibilidad permitirá conocer si la presente propuesta cuenta con los recursos necesarios para alcanzar los objetivos mencionados.

La presente propuesta tendrá un estudio de factibilidad:

- Técnica.
- Operativa.
- Económica.

4.2.3.1. Factibilidad Técnica.

La implementación práctica del prototipo a desarrollar en el presente trabajo de investigación es un importante punto a considerar. Es factible técnicamente, puesto que el Ecuador es un país con una ubicación geográfica privilegiada. El recurso solar existente se puede aprovechar como una fuente de energía eléctrica. Además, se prevé que la presente propuesta sea de fácil integración para las nuevas tecnologías de información y telecomunicación. Por tal razón, se prevé que el presente proyecto es una alternativa técnica que coadyuvará el cambio de la matriz energética y económica del país. El desarrollo tecnológico del proyecto tiene un bajo impacto medioambiental, puesto que se emplean dispositivos con reducido consumo energético. Además, la tecnología fotovoltaica es una fuente generadora de energía limpia y, por tanto, amigable con el medio ambiente.

4.2.3.2. Factibilidad Operativa.

El proyecto es factible, ya que el actual gobierno del Ecuador tiene como uno de sus ejes principales de desarrollo la transformación de la matriz energética. En el Plan del Buen Vivir, en el numeral 7.7, dentro de las políticas y lineamientos estratégicos asociado a la promoción de la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles como medida de prevención de la contaminación ambiental se establecen las siguientes acciones:

- Implementar tecnologías, infraestructuras y esquemas tarifarios, para promover el ahorro y la eficiencia energética en los diferentes sectores de la economía.

- Promover investigaciones para el uso y la generación de energías alternativas renovables, bajo parámetros de sustentabilidad en su aprovechamiento.

De esta manera la presente investigación se ajusta a las políticas y lineamientos estratégicos especificados en el Plan del Buen Vivir 2013-2017 [5]. Tomando en cuenta todo lo anterior se puede decir que el proyecto es factible para su realización y en un futuro se cuenta con su implementación práctica.

4.2.3.3. Factibilidad Económica.

La propuesta es factible ya que para el estudio y pruebas de operación se ha desarrollado un prototipo que ha sido financiado por el investigador. Además, la existencia de hardware y software libre como un recurso accesible que permite reducir los costos.

4.3. Etapas para el desarrollo de la propuesta.

El presente trabajo de investigación se desarrolla por etapas, basadas en los objetivos planteados a cumplirse. Inicialmente, se presenta una descripción general del prototipo del sistema de control inteligente de iluminación fotovoltaica a desarrollar e implementar. Posteriormente, se procede a realizar la selección de la mejor alternativa para la detección de vehículos. En tercer lugar, se realiza la selección y puesta en marcha de la red inalámbrica de comunicaciones. En este punto se analiza la situación actual del país en relación a los sistemas de iluminación existentes. En el cuarto punto, se realiza la actividad más importante del prototipo propuesto: la programación y verificación del control de luminosidad de las luminarias. Finalmente, se realiza una evaluación teórica del impacto económico de la implementación práctica del prototipo desarrollado en un tramo de autopista del Ecuador.

4.3.1. Descripción general del control inteligente de iluminación fotovoltaica

En este trabajo, se describe el diseño de un control inteligente de iluminación, basado en un sistema de detección a través de un sensor de ultrasonidos y dispositivos zigbee de transmisión de información, que activa el control de luminosidad de luminarias LED, alimentadas por una batería solar fotovoltaica.

El propósito del control propuesto es obtener un ahorro energético y económico en la iluminación pública, aplicable especialmente en las nuevas autopistas del Ecuador.

El control inteligente de iluminación fotovoltaica estará integrado por un sistema de detección vehicular, un grupo de luminarias LED, un sistemas de generación fotovoltaica, una unidad de control y módulos de comunicación inalámbrica.

La propuesta se desarrolla en dos partes. La primera parte corresponde a la implementación experimental a pequeña escala del sistema de control inteligente de iluminación fotovoltaica, diseñado y desarrollado por el autor. En la segunda parte, se realiza la evaluación teórica del ahorro energético y económico, proporcionado por el sistema de control inteligente de iluminación fotovoltaica, si se implementase en un tramo de las nueva autopista Ambato-Jambelí-Latacunga del Ecuador. El estudio teórico se realizará en función de los siguientes supuestos:

- Sustitución de luminarias ineficientes
- Integración de sistemas fotovoltaicos
- Control del nivel de luminosidad de las luminarias en función del tiempo de detección de vehículos.

El prototipo simula a pequeña escala un tramo del sistema de iluminación de una autopista convencional. En los postes del mencionado prototipo se implementará un sistema de detección, integrado por un sensor de ultrasonidos, que emitirá señales al detectar la presencia de vehículos en la autopista.

Posteriormente, estas señales serán procesadas por la unidad de control para regular la intensidad luminosa de las luminarias. Finalmente, las señales serán transmitidas en forma inalámbrica hacia las demás luminarias de la autopista.

Asimismo, se utilizará una fotocelda para activar y desactivar el sistema de control inteligente de iluminación, en las horas establecidas por el CONELEC o en caso de eventos meteorológicos que afecten la iluminación solar diaria.

En la figura 4.1, se muestra la arquitectura general del control inteligente de iluminación para autopistas. El control es operado y controlado a través de microcontroladores de la plataforma Arduino. La programación de los microcontroladores se realiza en el lenguaje de programación propio de Arduino. Para la correcta operación y puesta en marcha del sistema, la programación se realiza en función a la información que recibe el microcontrolador por parte del sensor de ultrasonidos.

El análisis del comportamiento del control de iluminación se realiza en un prototipo de autopista a pequeña escala. Se implementó un sistema de iluminación central simétrico que permite iluminar los dos sentidos de circulación de la autopista.

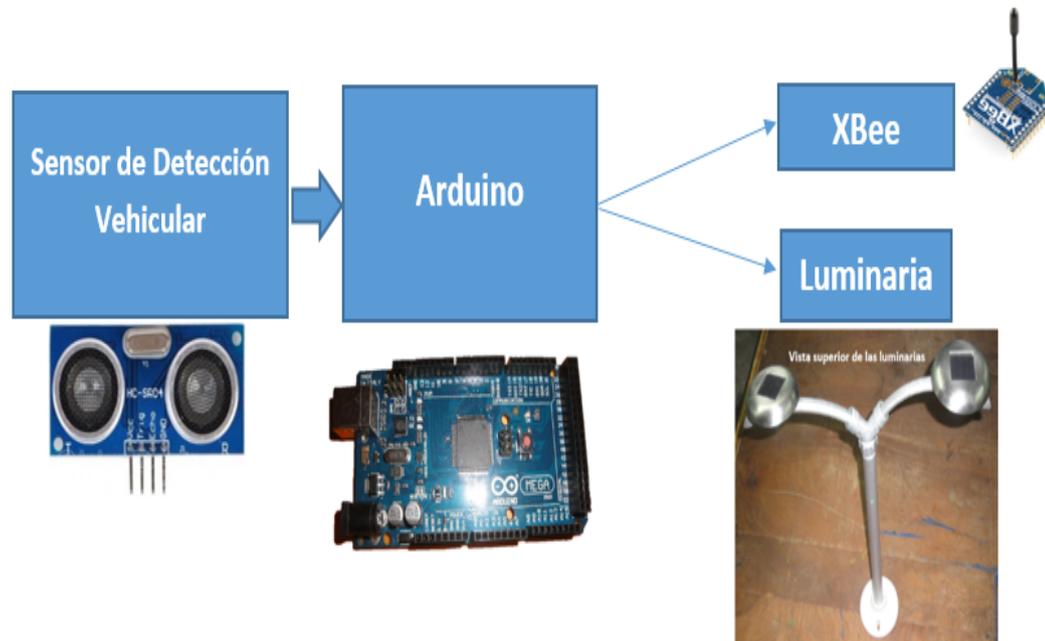


Figura 4.1: Arquitectura del control inteligente de iluminación [fuente propia]

La implementación a gran escala de sistemas de control de iluminación inteligente, permitiría proporcionar a las nuevas infraestructuras viales del Ecuador de innovadoras funcionalidades y servicios tecnológicos al alcance de todos los usuarios. Las nuevas autopistas del país se elevarían al nivel de autopistas inteligentes, pioneras en Sudamérica.

En un futuro cercano, las nuevas autopistas inteligentes dispondrán de una fácil integración con innovadores conceptos y tecnologías de la información y comunicación. El siguiente paso en la optimización de sistema de control inteligente propuesto es la gestión automatizada de la iluminación en vías públicas y autopistas en una plataforma cloud computing, que integre sistemas geográficos de referenciación e información, GIS y la implementación de tarjetas Arduino en el control del flujo de información entre la red inalámbrica de comunicación y en la regulación de las baterías en sistemas fotovoltaicos de iluminación. Además, la tarjeta Arduino permitiría la conexión a Internet con ayuda de protocolos de comunicación, Wifi o ethernet.

El desarrollo de las nuevas micro-computadoras RaspberryPi o UDOO, con bajo consumo de energía, permitirán procesar gran cantidad de información y la creación de registros de los acontecimientos importantes en entornos definidos por el usuario según sus requerimientos. El empleo de las micro-computadoras permitirá extender los servicios en las autopistas.

Los usuarios tendrán acceso a varios e importantes servicios de comunicación como el uso de internet, auxilio mecánico remoto, seguimiento a vehículos extraviados, información meteorológica, información de posibles congestiones de tráfico, alumbrado público inteligente.

En la figura 4.2, se presenta una descripción gráfica del sistema de control inteligente de iluminación y su futura integración a una plataforma de gestión y monitoreo desarrollada en la nube.

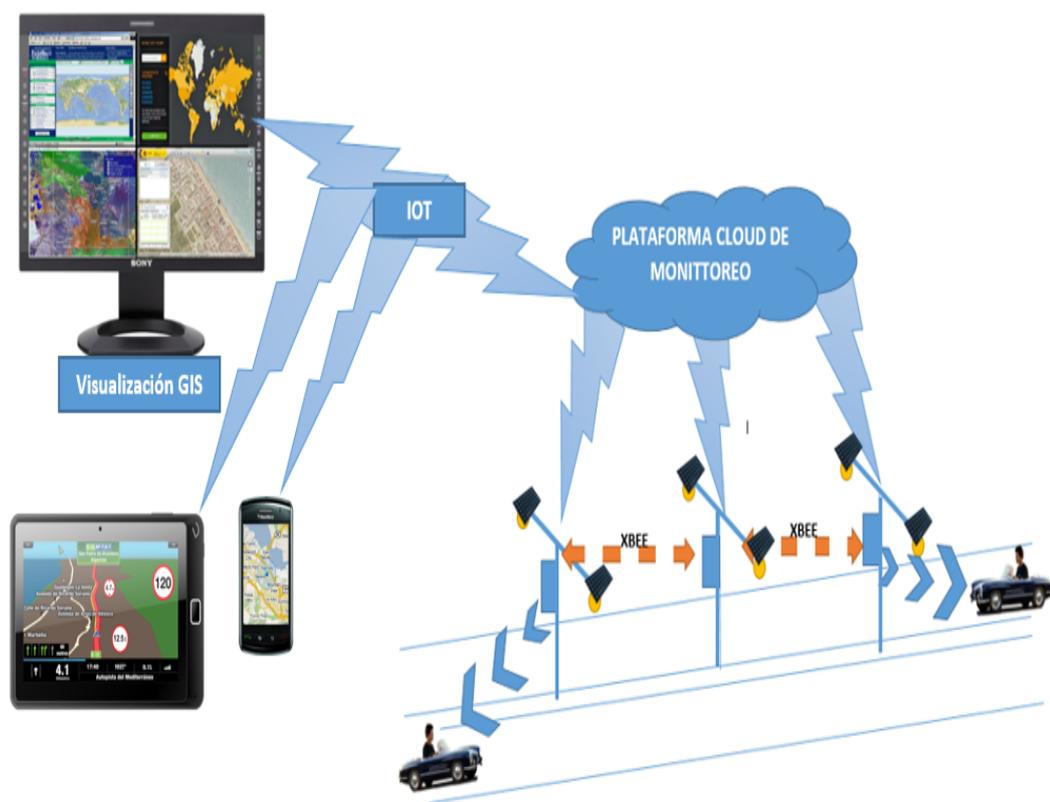


Figura 4.2: Descripción general del control de iluminación [fuente propia]

4.3.2. Selección del sistema de detección de vehículos en tiempo real

4.3.2.1. Análisis comparativo de los sistemas de detección.

En el capítulo 2, apartado 2.2.3.1, se describieron diversos sistemas y tecnologías de detección vehicular. Se estableció que el sistema con mejores características para la propuesta de investigación es el radar de ondas milimétricas. En la tabla 4.1, se presenta una comparación de los sistemas no invasivos en la detección de vehículos [9].

Tabla 4.1: Sistemas de detección vehicular [9]

Sistemas de detección vehicular		
Tecnología del Sistema	Ventajas	Desventajas
Procesamiento de imágenes y video	Sistemas probados en áreas amplias y la información captada por la cámara puede estar vinculada a otras cámaras.	Afectado por las condiciones meteorológicas, errores al procesar las sombras proyectadas por los vehículos.
Radar de microondas	Este sistema es insensible a las inclemencias del tiempo, en distancias cortas de detección.	La onda continua emitida produce el efecto doppler. No puede detectar vehículos detenidos.
Radar láser	Emite varias señales que detectan: el tamaño, posición, velocidad y clase de vehículo	Es afectado ante la presencia de neblina o cuando la visibilidad es inferior a 6m.
Ultrasonido	Este sistema mide la velocidad de los vehículos.	La sensibilidad del sensor se reduce ante inclemencias meteorológicas
Acústica pasiva	Detección pasiva, insensible a precipitaciones.	Las bajas temperaturas afectan gravemente al sensor.

El radar de microondas presenta grandes ventajas ante las condiciones meteorológicas. No obstante, tiene una desventaja al no detectar vehículos detenidos o estacionados. Por tal razón, se elige el sistema de ultrasonidos para el sistema de detección vehicular. Para un mejor estudio y análisis de la implementación y puesta en marcha del control inteligente de iluminación se realizan simulaciones con el sensor de ultrasonidos HC-SR04.

El sensor de ultrasonidos será el encargado de detectar la presencia de vehículos en circulación en base a la emisión de ultrasonidos [69]. El principio de operación del sensor de ultrasonidos es el efecto Doppler. En la figura 4.3, se muestra al sensor y sus dimensiones. Las dimensiones del sensor son apropiadas para su implementación en el prototipo de control de iluminación.

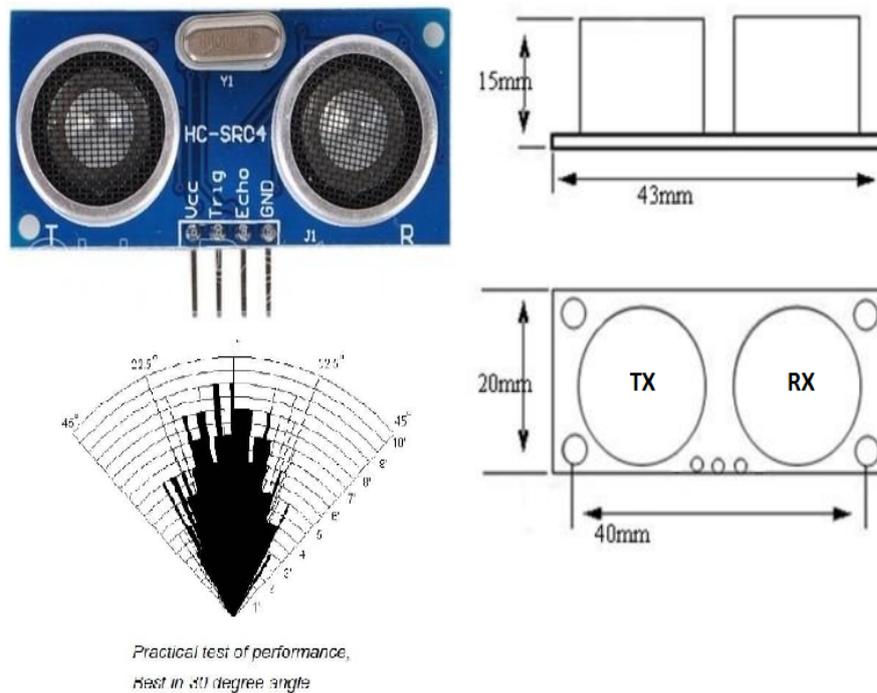


Figura 4.3: Sensor Ultrasonico HC-SR04 [67]

El sensor HC-SR04 funciona en base a ultrasonidos emitidos por el transmisor TX y que son detectados por el receptor RX. Las señales acústicas que emiten se encuentran alrededor de los 40 Khz, excediendo así el rango de frecuencias sensibles al oído humano [69]. De esa manera, se simulará un radar de ondas milimétricas a baja escala.

El sensor HC-SR04 presenta una serie de ventajas:

- No requiere de contacto físico para detectar objetos.
- Buena relación calidad - precio, lo cual eleva su eficiencia.
- El sensor es liviano y compacto en relación a otros dispositivos que emplean la misma tecnología.

Las características electrónicas del sensor HC-SR04 se mencionan en la tabla 4.2. Es importante garantizar los valores de alimentación establecidos para el óptimo desempeño del sensor. Además, la distancia del sensor puede ser controlada a través de la programación realizada en el microcontrolador. El sensor HC-SR04 es compatible con los microcontroladores de la plataforma Arduino.

Tabla 4.2: Datos técnicos del Sensor HC-SR04 [fuente propia basado en 67]

Características técnicas del sensor HC-SR04	
Voltaje de Operación	DC 5v
Corriente de Operación	15mA
Frecuencia de Operación	40 KHz
Rango Máximo de Detección	4m
Rango Mínimo de Detección	2cm
Ángulo de Medición	15°
Señal de entrada del Pin Trigger	10 uS de un pulso en alto
Señal de salida del Pin Echo	Entrada TTL en proporción al rango
Dimensiones	(45x20x15) mm

Las características del sensor, anteriormente descritas, permiten seleccionarlo para el diseño de la presente propuesta. La configuración del sensor se basa en la generación de pulsos eléctricos, que tienen una duración de 10 μs . Estos pulsos son generados por el microcontrolador de Arduino sobre el pin Trigger del sensor HC-SR04. En paralelo, el Arduino calcula la distancia de detección de objetos en función de los pulsos emitidos.

El sensor para determinar la distancia de detección emplea la fórmula:

$$D = \frac{(A*V)}{2}$$

Donde:

D: es la distancia a calcular.

A: es la duración del ancho de pulso de 10 μs

V: es la velocidad del sonido de la atmósfera 343 $\frac{m}{s}$

Es importante indicar que la distancia de detección considera la mitad del tiempo que tarda en ir y volver la señal al sensor.

En el mercado existe un importante número de sensores que realizan la misma función, por ejemplo, el sensor Maxsonar EZ1. No obstante, las pruebas a pequeña escala indican que el sensor HC-SR04 cubre las necesidades requeridas.

4.3.2.2. Descripción del sistema de detección propuesto.

El diseño del sistema electrónico de detección es un sistema integrado por el sensor de ultrasonidos HC-SR04, que representa al radar de ondas milimétricas. El dispositivo enviará información hacia un microcontrolador que procesará dicha información e indicará si existe presencia de vehículos en la autopista.

En la figura 4.4, se observa el esquema de bloques integrado por el sistema electrónico para la detección de los vehículos que circulan por las autopistas.



Figura 4.4: Esquema del sistema de detección vehicular [fuente propia]

El microcontrolador que procesa la información del sensor pertenece a la plataforma Arduino. La plataforma Arduino permite el empleo de un software multifuncional, que puede operar en las diversas distribuciones de los principales sistemas operativos como Windows, Mac o Linux. Así, se prevé que el sistema sea de fácil expansión con los nuevos conceptos y funcionalidades de las tecnologías de la información. En el presente trabajo de investigación se propone que el microcontrolador regulará el nivel de iluminación de las luminarias LED en dependencia de la detección de vehículos.

4.3.3. Sistema de Comunicación

En la presente propuesta, se plantea una red inalámbrica de comunicación para el control y gestión del sistema de iluminación. La comunicación inalámbrica prevé minimizar el empleo de medios físicos en el control del nivel de luminosidad. Los sistemas inalámbricos de comunicación son diversos, entre los que destaca ZigBee, que presenta las mejores características funcionales.

4.3.3.1. Descripción de los módulos de comunicación.

La red inalámbrica opera bajo el estándar IEEE 802.15.4 conocido como ZigBee. Este estándar emplea módulos XBee. Los módulos XBee son soluciones integradas que proporcionan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Los módulos XBee se clasifican en dos series, que son:

XBee Series 1: Son los dispositivos más fáciles para trabajar. Estos módulos permiten topologías de red del tipo punto a punto, punto multipunto, estrella.

XBee Znet 2.5 o Series 2: tienen la facilidad de operar en modo transparente, AT, o por medio de comandos API. El modo AT es muy fácil de manejar y permite introducir información de forma manual por una consola. El modo API opera con mayor complejidad, creando tramas para la transmisión de la información. Además, los módulos XBee de la serie 2 soportan la topología de red del tipo malla, creando nodos de comunicación totalmente configurables y de alta disponibilidad, figura 4.5.

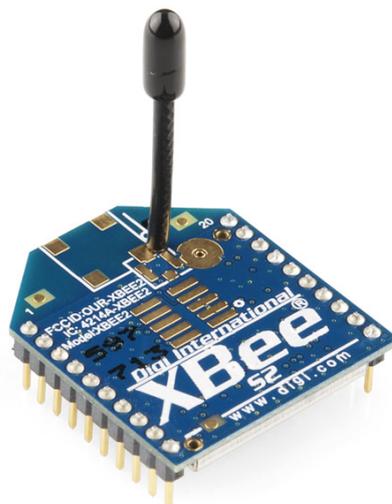


Figura 4.5: Módulo XBee serie 2 [62]

4.3.3.2. Configuración del flujo de información de los módulos XBee

Los módulos XBee requieren de una alimentación entre 2.8 y 3.4 Vdc. Se pueden emplear tarjetas reguladoras de voltaje para la alimentación de los XBee. En la figura 4.6, se muestra una tarjeta reguladora de tensión para la alimentación de los módulos XBee, el diagrama de los pines de los XBee y los pines necesarios para la comunicación de los XBee.

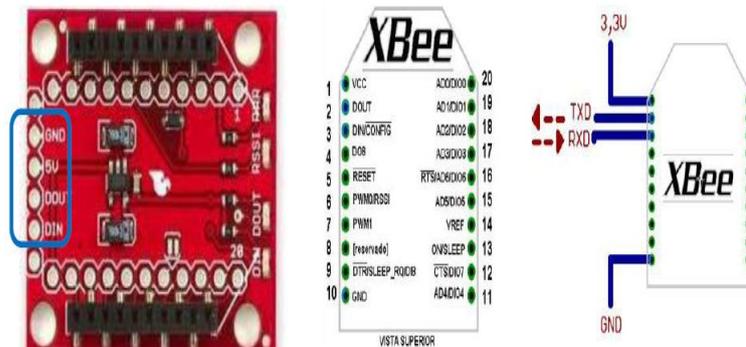


Figura 4.6: Conexión básica de un módulo XBee [62]

La configuración de los módulos XBee se realiza por computadora, empleando una tarjeta reguladora de voltaje. La tarjeta, además, permite modificar el bloque de instrucciones de máquina mediante una conexión serial USB-PC, accediendo a los pines TX/RX del XBee. El flujo de los datos que transmiten los XBee es procesado por un microcontrolador.

4.3.3.3. Programación del control de iluminación integrado con el sistema de detección

La presente etapa se ha realizado en dos etapas, la primera etapa corresponde a una implementación práctica de un prototipo para el control inteligente de iluminación fotovoltaica en las autopistas y la segunda etapa se encarga de la evaluación del impacto económico en el consumo de energía en el servicio de alumbrado público.

Para un mejor análisis del funcionamiento del control inteligente de iluminación vial se ha implementado un prototipo que realice el control de iluminación al circular un vehículo. Los materiales que se han empleado para la puesta en marcha del prototipo son:

- Arduino UNO.
- Arduino MEGA.
- 2 Módulos XBee S2.
- XBee Shield.
- LED de color blanco.

- Sensor Ultrasonido HC-SR04

El sensor enviará las señales a un microcontrolador Arduino. El microcontrolador procesa la información elevando el nivel de intensidad luminosa en caso de detectar la presencia de un vehículo. Luego, la información se transmitirá en forma inalámbrica a las demás luminarias, iluminando solamente el carril por donde circulan los vehículos.

Inicialmente, se realiza la configuración de los módulos de comunicación inalámbrica. Para realizar esta actividad, es necesario contar con una tarjeta USB board, conocido como programador Usb XBee para la conexión con un computador, figura 4.7. Además, la tarjeta antes mencionada permite la comunicación entre los módulos XBee y la interfaz gráfica de un ordenador. La tarjeta puede ser alimentada desde una fuente externa o a través de una conexión USB. Sin embargo, si se emplea una fuente externa se debe respetar el valor límite de 5Vdc.

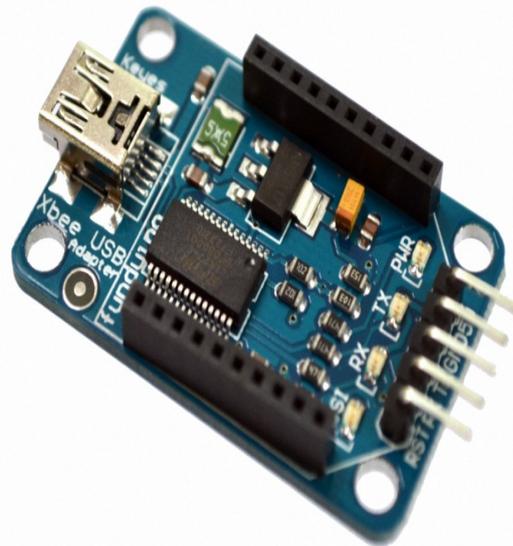


Figura 4.7: Programador Usb XBee [fuente propia]

El empleo del programador Usb XBee permite la comunicación de los módulos XBee con el computador a través del software X-CTU, propio de la empresa Digi que comercializa los módulos XBee. El software X-CTU reconoce automáticamente el puerto de comunicación serial del programador Usb XBee, figura 4.8. Además, el software permite configurar a los módulos XBee con la capacidad de tomar muestras de señales analógicas o digitales, controlando su frecuencia de muestreo. El empleo de este software permite que el módulo XBee tenga un estado de ahorro de energía por más tiempo.

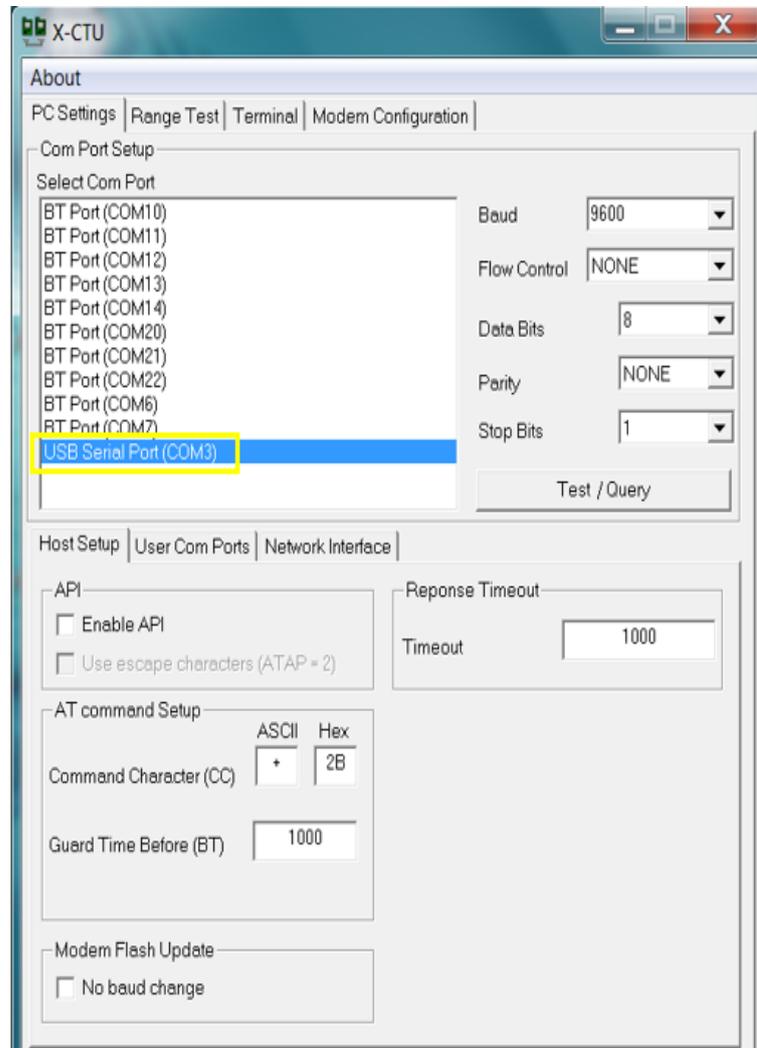


Figura 4.8: Interfaz del software X-CTU [fuente propia]

La configuración de los módulos XBee se realiza en base a una topología de tipo malla. De esa manera se configurará un módulo XBee como coordinador en modo API y los demás módulos serán configurados como routers AT. De esa manera, la red tendrá grandes funcionalidades permitiendo una rápida escalabilidad con otros módulos de comunicación o dispositivos electrónicos de medición. El módulo configurado como coordinador es el administrador de la red a implementarse, permitiendo así una rápida expansión con dispositivos electrónicos de bajo consumo.

El modo API permitirá que el coordinador se encuentre activo para la transmisión y recepción de datos, mientras que en el modo AT los routers tendrán la capacidad de ahorrar energía salvaguardando así el consumo de las baterías, figura 4.9.

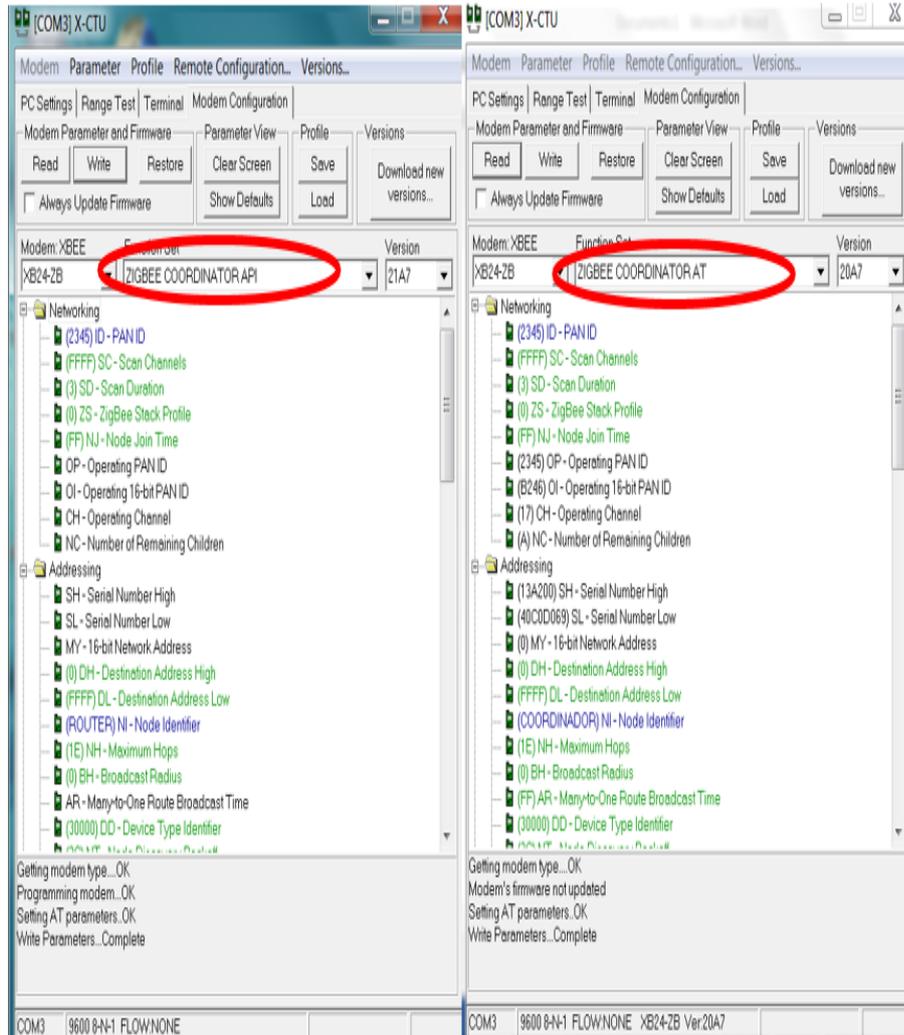


Figura 4.9: Configuración de los módulos XBee [fuente propia]

En la tabla 4.3, se visualiza los parámetros a configurar de un módulo XBee como coordinador en modo API. La configuración, presentada en la tabla 4.3, permite que todos los módulos que se encuentran dentro de la red 1991 establezcan una comunicación estable. La identificación de la red de los módulos es un número de 3 o 4 cifras que será identificado en todos los nodos de la red.

La configuración, manejo y conocimiento de los módulos XBee en modo API, permiten el diseño de redes inalámbricas de sensores, construcción de topologías. Esto facilita el diseño de un sistema de comunicaciones con gran escalabilidad, flexibilidad y confiabilidad a la hora de transmitir los datos medidos de manera inteligente, en escenarios industriales y domóticos.

Tabla 4.3: Configuración del módulo XBee como coordinador [fuente propia]

COORDINADOR API		
IDENTIFICADOR	NOMBRE	VALOR
NI	Nodo identificador	Coordinador
ID	PAN ID	1991
MY	Dirección de red	10
SD	Duración del escaneo	3
CH	Canal de operación	11
SC	Examina solo el canal elegido	40
DH	Dirección destino en alto	0
DL	Dirección destino en bajo	FFFF
SH	Número de serie en alto	13A200
SL	Número de serie en bajo	40C0D069
AP	API	1
D0	Configuración AD0/DI0	1
D5	Configuración asociada /DI05	1
P0	Configuración DIO10/PWM0	1

La red de los dispositivos XBee contiene a un sólo módulo configurado como coordinador API que conecta al microcontrolador y al sistema de detección vehicular.

La comunicación se establece con los módulos XBee configurados como router AT, tabla 4.4. En el anexo 1, se presenta una guía rápida para la configuración de los módulos XBee. La configuración de los módulos XBee en formato API establece comunicaciones en red con varios nodos y dispositivos de medición y control.

En este sentido, el usuario puede acceder a los parámetros de configuración interna de los módulos XBee. La comunicación en modo AT implica el empleo de una serie de comandos a través de una consola, convirtiéndose un ordenador como elemento fundamental de la red.

Tabla 4.4: Configuración del módulo XBee como router [fuente propia]

Router AT		
IDENTIFICADOR	NOMBRE	VALOR
NI	Nodo identificador	Router
ID	PAN ID	1991
MY	Dirección de red	10
SD	Duración del escaneo	3
CH	Canal de operación	11
SC	Examina solo el canal elegido	40
DH	Dirección destino en alto	0
DL	Dirección destino en bajo	FFFF
SH	Número de serie en alto	13A200
SL	Número de serie en bajo	40C0D09E
JV	Verificación de canal	1
D0	Configuración AD0/DIO	1
D1	Configuración AD1/DIO1	2
D2	Configuración AD2/DIO2	2
P0	Configuración DIO10/PWM0	1

Los módulos XBee se pueden instalar en forma independiente, para la propuesta se conectan sobre una tarjeta Arduino UNO. En este sentido, se garantiza una mejor funcionalidad del sistema.

Se propone que la implementación del prototipo sirva de base para investigaciones futuras y desarrollo de potentes sistemas de telegestión del alumbrado público y las condiciones atmosféricas de la autopista.

La programación del sistema electrónico de iluminación se realizó sobre el microprocesador ATMEGA 2560 de la placa electrónica Arduino MEGA. El Arduino MEGA contiene las propiedades necesarias para la rápida integración del sistema de iluminación con las estrategias de control e iluminación a desarrollarse, figura 4.10

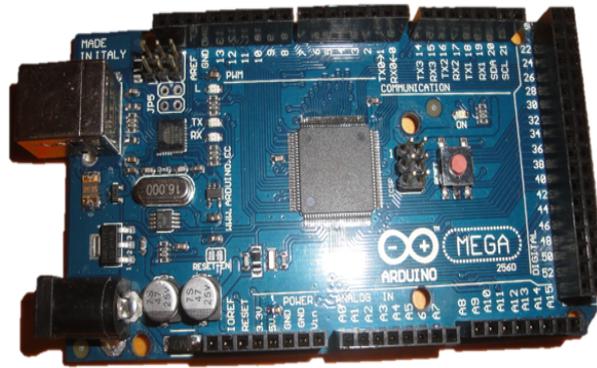


Figura 4.10: Arduino MEGA [fuente propia]

La placa Arduino MEGA posee grandes características y funcionalidades. El chip ATMEGA 16U2 permite una conversión USB a serie, además, cuenta con 4 puertos para establecer comunicación serial lo que implica una rápida integración con módulos de comunicación. En la propuesta, se empleó un Arduino MEGA para establecer la comunicación entre los módulos inalámbricos y a la vez con un servidor web. En la tabla 4.5, se muestran las principales características del Arduino MEGA 2560.

Tabla 4.5: Principales características del Arduino MEGA [fuente propia]

Características del Arduino MEGA 2560.	
Microcontrolador	ATMEGA 2560
Voltaje de operación	5 Vdc
Voltaje de entrada	(7-12) Vdc
Pines de entrada y salida de la placa electrónica	54
Pines de salida PWM	14
Pines de entrada analógica	16
Corriente de operación	(40 - 50) mA
Memoria flash	256Kb de los cuales 8Kb empleados en bootloader
SRAM	8 Kb
EEPROM	4Kb
Velocidad de reloj	16 MHz

4.3.4. Sistema de control de iluminación

4.3.4.1. Descripción del control de iluminación

Para la presente propuesta, el control de iluminación se realizará por el método de modulación por ancho de pulso PWM sobre luminarias LED. De esa manera, las luminarias alcanzarán su nivel máximo de intensidad luminosa en forma controlada, evitando que existan deslumbramientos para los conductores y garantizando un tiempo mayor del servicio de iluminación pública con energía solar fotovoltaica. El control de la intensidad luminosa implicará un ahorro en el consumo de energía que permitirá reducir los costos de facturación del alumbrado público.

Para un mejor estudio del comportamiento del control de iluminación por PWM, se realizó pruebas a pequeña escala con diodos emisores de luz de alto brillo que simulan las luminarias. Se colocaron dos luminarias por poste para iluminar dos carriles de la vía. El suministro de energía se realizó con la ayuda de pequeños paneles fotovoltaicos. En la figura 4.11, se presenta un valor de tensión medido en los pequeños paneles fotovoltaicos. El valor de tensión que generan los módulos antes mencionados oscila entre 4Vdc - 5.5 Vdc, debido a la radiación solar que incide sobre ellos.



Figura 4.11: Valor de tensión en los paneles fotovoltaicos [fuente propia]

Además, en cada poste, se prevé la instalación de una caja de control donde se alojen los dispositivos electrónicos para la correcta operación de los módulos de comunicación inalámbrica, microcontrolador, baterías, sensor ultrasónico. Estos dispositivos se encargan del control de luminosidad de las luminaria LED con ayuda del modulador PWM.

Las luminarias se encenderán en las horas establecidas por el CONELEC y en función del sistema de detección vehicular incrementan o disminuyen su intensidad luminosa, de esta manera, se alcanzará un importante ahorro energético. El sensor ultrasónico detectará si existen vehículos circulando en la autopista, en caso de cumplirse esta condición, las luminarias permanecerán encendidas a su máxima intensidad luminosa. Las luminarias pasarán a un estado bajo de intensidad luminosa cuando no exista circulación de vehículos en las autopistas, brindando un servicio constante y autónomo del servicio de iluminación. En la figura 4.12, se muestra el esquema de bloques de la integración del sistema de iluminación junto al sistema de detección vehicular de la presente propuesta.



Figura 4.12: Esquema de bloques del Sistema Integrado Detección-Iluminación [fuente propia]

El microcontrolador es programado por el software propio de la plataforma Arduino, este software es compatible con el entorno del lenguaje de programación C. Por tal razón, se presenta el diagrama de flujo para el presente proyecto, figura 4.13.

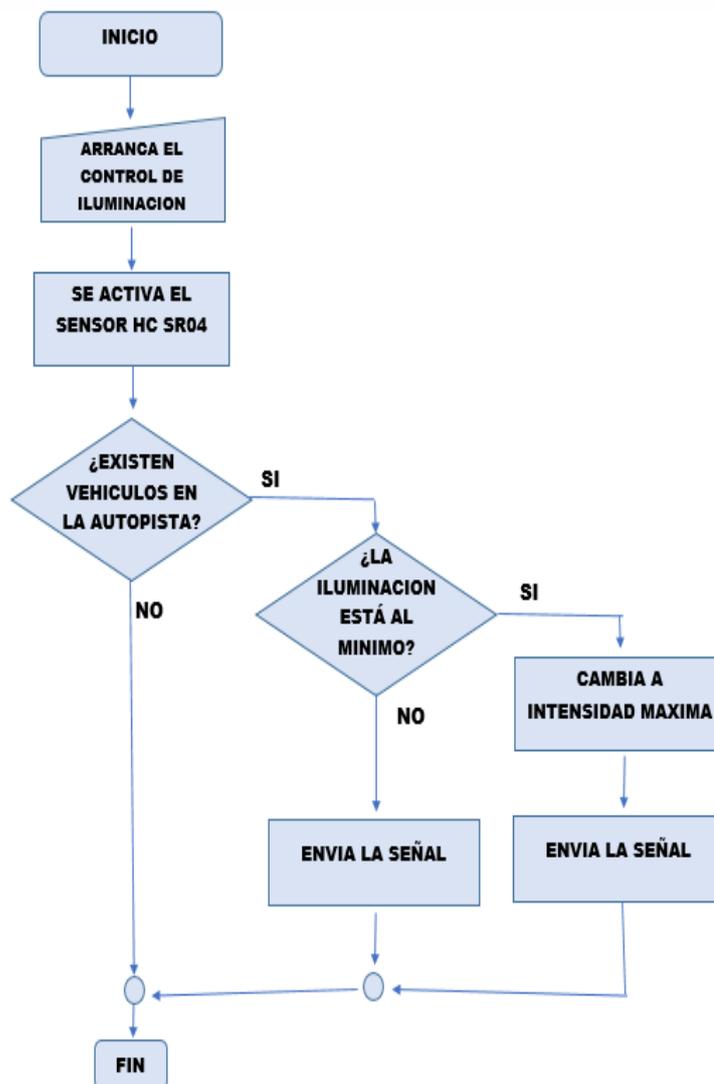


Figura 4.13: Diagrama de flujo para el control inteligente de iluminación [fuente propia]

El software que se emplea es software libre y fácil de utilizar. Asimismo, permite la integración de diferentes librerías para la comunicación con sensores lo que permitirá una rápida escalabilidad con otros dispositivos a fin de brindar mayores servicios con alta fiabilidad.

En el mercado existen varios sistemas que controlan luminarias, pero el trabajo propuesto establece una arquitectura de hardware libre y autónoma en el servicio de iluminación pública. Por tanto, se estima que en un futuro todo el sistema tendrá capacidad de operar desde la nube, formando así un nuevo y eficiente sistema de telegestión visible desde cualquier parte del mundo.

4.3.4.2. Análisis de las posibles fallas del sistema electrónico de detección de vehículos.

A escala mundial todos los sistemas electrónicos llegan a tener fallas en su proceso de operación y mantenimiento. Por lo tanto se deben tomar muchas precauciones para un correcto funcionamiento de la presente propuesta de investigación. Las posibles fallas que podría llegar a tener el sistema en la detección de vehículos es la presencia de neblina, fuerte lluvia, que pertenecen a condiciones atmosféricas que produce la naturaleza y donde el ser humano no podría evitar dichas condiciones.

Se pretende que en un futuro la presente propuesta sirva de base para la implementación de una red de sensores de humedad y temperatura, lo que permitiría extender las funciones del control inteligente de iluminación en autopistas para las condiciones atmosféricas adversas anteriormente mencionadas.

Por otra parte, los posibles accidentes de tránsito afectarían la operación del sistema de detección vehicular, asimismo, la integridad de todo el sistema se vería afectada. En este caso, se propone crear una red en topología malla entre los módulos XBee para informar el estado de cada luminaria.

4.3.4.3. Fallas del sistema electrónico asociado a topologías de los paneles fotovoltaicos.

El control de iluminación estará afectado en el transcurso del tiempo por la variación de temperatura que existe en el Ecuador. En la figura 4.14 se visualiza la presencia de hongos en módulos fotovoltaicos.



Figura 4.14: Paneles fotovoltaicos con hongos [fuente propia]

La presencia de hongos en los módulos fotovoltaicos evita el drenado de agua, lo que ocasiona deterioro en la infraestructura de los paneles. El agua acumulada en los paneles fotovoltaicos y la radiación solar ocasionan una pérdida del color de la superficie cristalina del panel, reduciendo así la potencia eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos.

Asimismo, el polvo generado por ambientes abiertos ocasiona problemas en las conexiones y puede tener efectos térmicos para los dispositivos semiconductores.

Las actividades de operación y mantenimiento son muy importantes para el correcto funcionamiento de los sistemas de iluminación, en este sentido, a través de la presente propuesta de control inteligente se prevé minimizarlas.

Además, está previsto el desarrollo de una interfaz gráfica para usuarios a través del software de programación Microsoft Visual C#. Esta interfaz será utilizada en situaciones donde el sensor de ultrasonidos no pueda detectar a los vehículos que circulan por la autopista.

En la figura 4.15, se presenta el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario. La interfaz establece la comunicación a través de los puertos seriales que tiene un ordenador. La interfaz está programada para que el usuario pueda seleccionar el puerto donde está conectado el dispositivo. Se puede conectar el microcontrolador Arduino MEGA o un módulo XBee a través de su placa USB board. El usuario operará siempre que se haya establecido la comunicación serial y elegido el puerto correspondiente al dispositivo conectado, en caso contrario, mostrará un mensaje indicando que debe elegir un puerto para la comunicación. Asimismo, el usuario podrá notar si el sistema ha sido activado cuando, en la pantalla, la imagen cambie de color. La programación de la interfaz se presenta en el anexo 2.

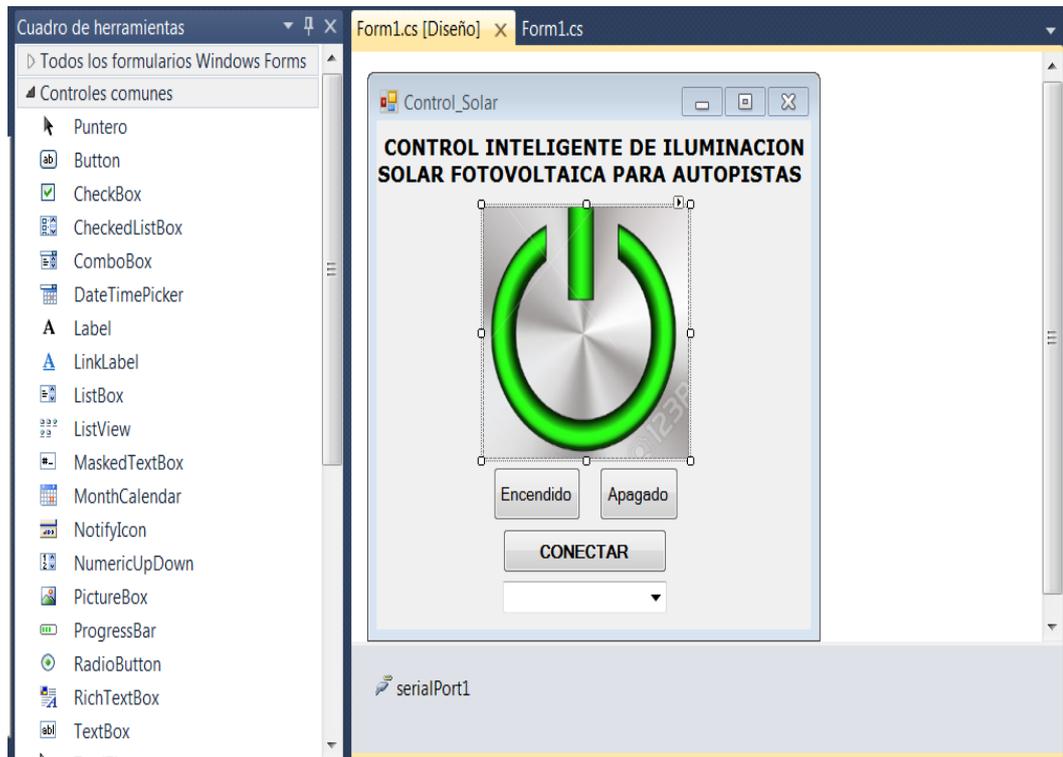


Figura 4.15: Interfaz de usuario [fuente propia]

4.3.5. Plataformas de monitorización del control de iluminación.

El servicio cloud computing es uno de los nuevos conceptos que se desarrolla en las comunicaciones. Actualmente, muchas empresas promocionan el servicio de hosting, permitiendo crear una cuenta a los diferentes usuarios para almacenar datos, imágenes, vídeo, o cualquier contenido accesible vía web. El servicio de días de alojamiento de páginas web que contiene correo electrónico, archivos etc. Hostinger es una empresa que suministra este servicio y sus aplicaciones son varias y su uso gratuito, figura 4.16.

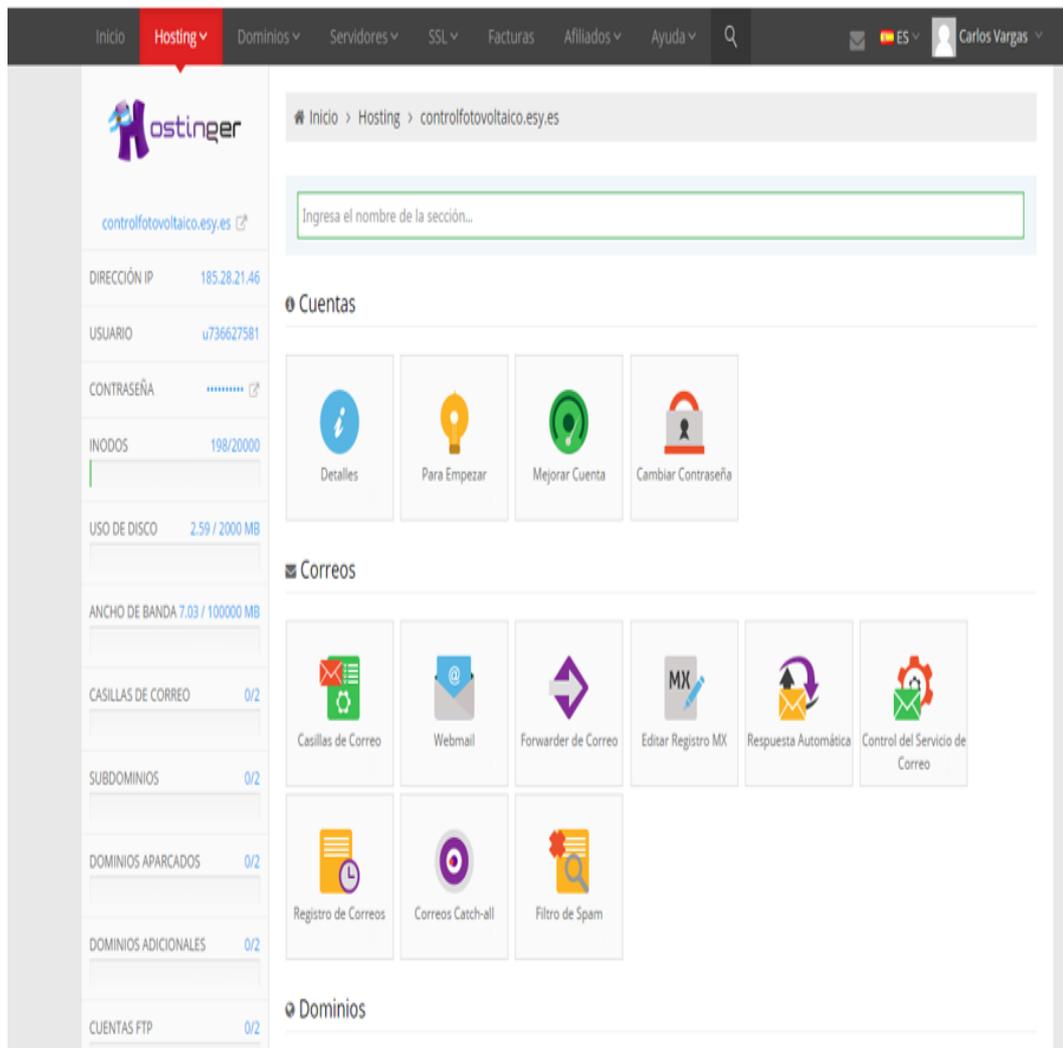


Figura 4.16: Tablero de servicios en hostinger [fuente propia]

Para una mejor visualización de los datos se ha establecido un enlace vía web hacia un servidor en Internet, figura 4.17.



Figura 4.17: Página web en hostinger [fuente propia]

La figura 4.15 muestra una página elaborada en código html, alojada en el dominio www.controlfotovoltaico.esy.es, perteneciente a hostinger. Adicionalmente se realiza la conexión con una base de datos alojada en el servidor. La base de datos se creará mediante phpMyAdmin. En esta base de datos se creó una tabla con el nombre de valores con tres columnas que indican el número de dato, el nivel de potencia de las luminarias y la fecha del dato, figura 4.18.

id	potencia	fecha
15	0	2015-03-17
16	0	2015-03-17
17	33	2015-03-17
18	12	2015-03-17
19	11	2015-03-17
20	99	2015-03-18
21	98	2015-03-18
22	55	2015-03-18

Figura 4.18: Tabla de valores en la base de datos del servidor web [fuente propia]

4.3.6. Simulaciones del control de iluminación.

El control de iluminación propuesto integra como fuente de generación eléctrica a la energía solar fotovoltaica. En este sentido, se plantea que en cada poste se realizará el montaje de paneles fotovoltaicos para el suministro de energía eléctrica. Para el desarrollo de la propuesta se montaron pequeños paneles fotovoltaicos sobre cada luminaria. La conexión de estos paneles se realizó en serie para incrementar el voltaje de la fuente, almacenando la energía en pequeñas baterías recargables. En el desarrollo del prototipo se emplearon baterías recicladas de teléfonos celulares. Además, en cada poste de iluminación se montó una caja con un conjunto de dispositivos electrónicos. El dispositivo principal es un microcontrolador Arduino, este microcontrolador controla el sistema de iluminación al detectar vehículos a través del sensor de ultrasonidos HC-SR04. Además, la iluminación se realizará en horas donde exista poca visibilidad o ausencia del sol. Esto se logra colocando una fotoresistencia que detecta el nivel luminosidad del ambiente, figura 4.19.

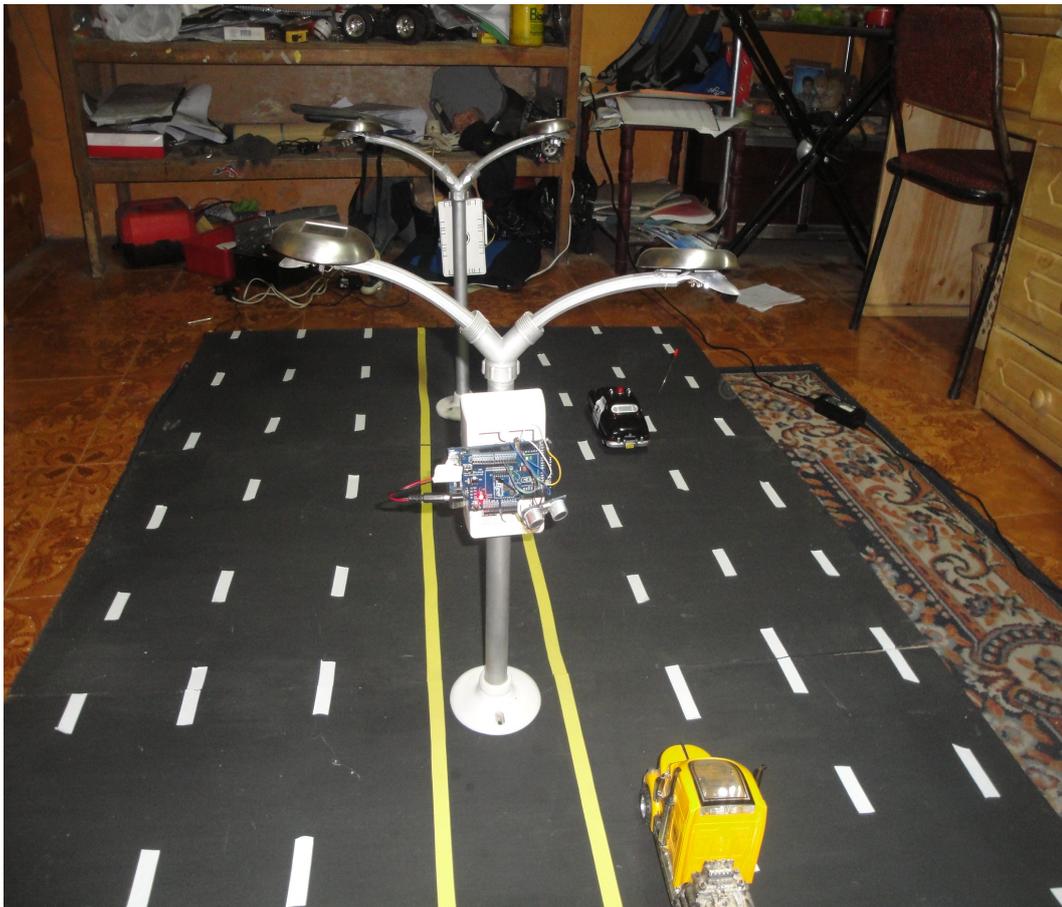


Figura 4.19: Postes de iluminación propuestos [fuente propia]

La implementación de un prototipo permite analizar el comportamiento del sistema en función del flujo vehicular que se presenta en una autopista. En primer lugar, se simula un flujo vehicular en un solo sentido de la autopista, figura 4.20. La iluminación solo se realiza sobre el carril donde existe el flujo vehicular, causando así un ahorro de energía eléctrica en la autopista.

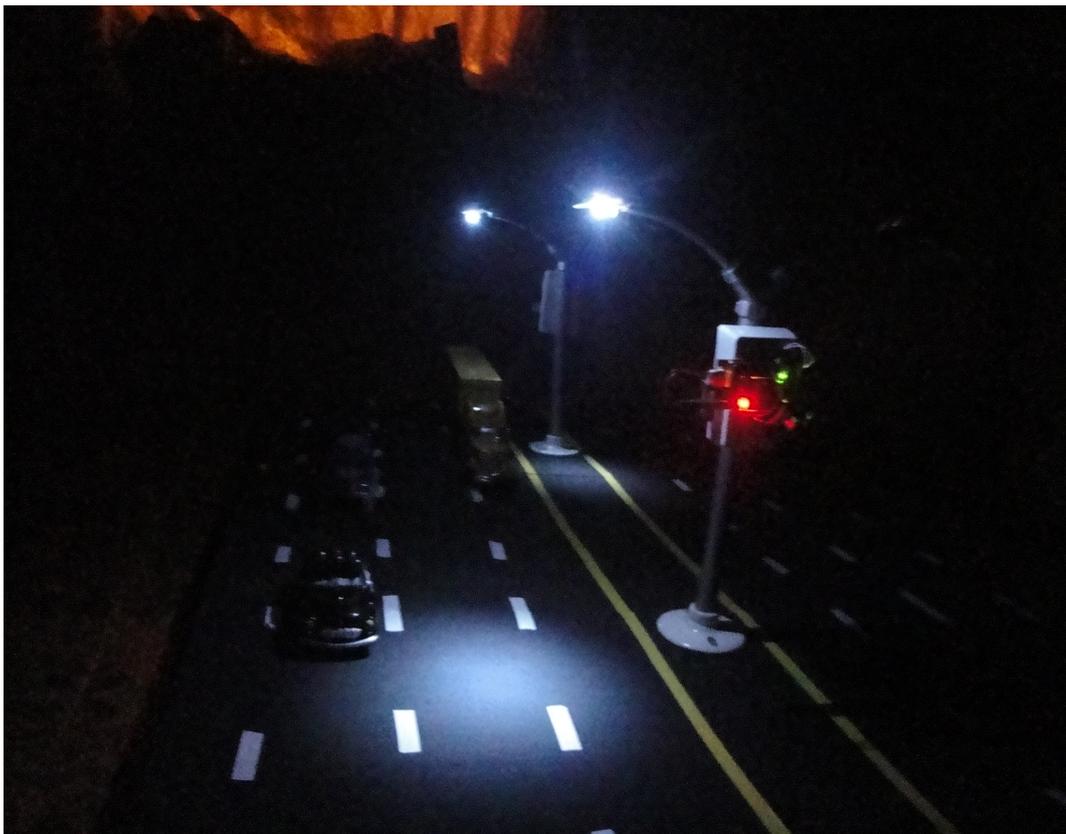


Figura 4.20: Simulación del flujo vehicular en un solo sentido de la autopista [fuente propia]

En la figura 4.21, se observa las luminarias encendidas en función a la detección de los vehículos que circulan por la autopista. El proceso de detección vehicular permite que las luminarias se activen e incrementen su flujo luminoso.

Así en una autopista en cuanto detecta un vehículo, se incrementa el nivel luminoso se incrementará al 100%. En horas de escaso flujo vehicular, las luminarias brillarán al 20% de su capacidad máxima. El control de luminarias LED transforma un conjunto de luminarias en dispositivos inteligentes individuales.

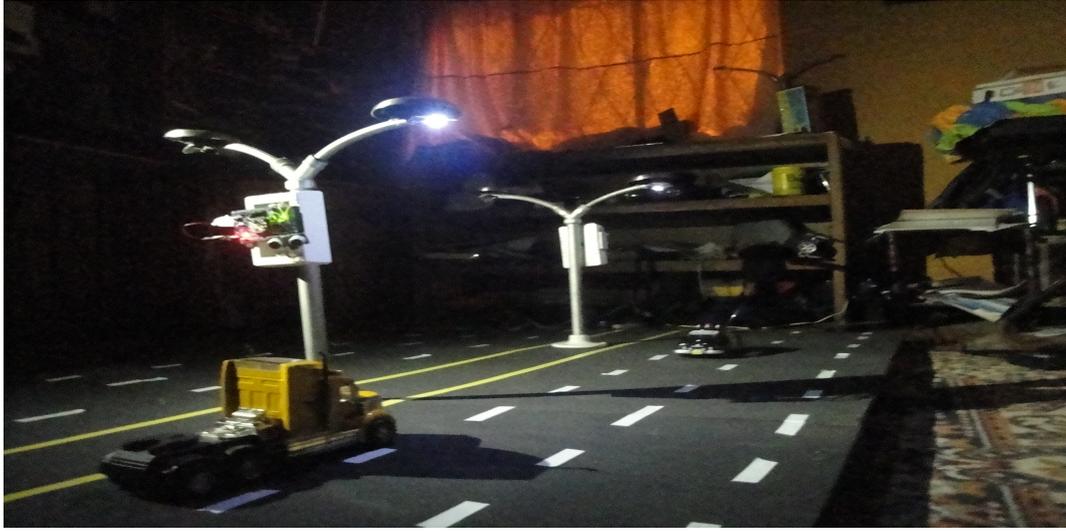


Figura 4.21: Luminarias encendidas en función del flujo vehicular [fuente propia]

Asimismo, se simula el flujo vehicular en ambos sentidos de la autopista donde las luminarias están encendidas a una potencia mínima. Las luminarias permanecerán encendidas a esa potencia mientras no exista flujo vehicular. Asimismo, el sistema quedará enclavado siempre que existan vehículos en circulación, figura 4.22.



Figura 4.22: Iluminación en ambos sentidos de circulación de la autopista [fuente propia]

La programación del comportamiento del control de iluminación propuesto se muestra en el anexo 3.

4.4. Metodología de evaluación del impacto de la integración de un control inteligente en los sistemas de iluminación pública.

4.4.1. Consideraciones básicas de la propuesta metodológica.

Las luminarias LED presentan gran rendimiento en iluminación pública frente a las luminarias tradicionales de sodio de alta presión, vapor de mercurio, incandescentes. En apartados anteriores, se mencionó que las luminarias LED presentan mejores características que las tecnologías tradicionales. En los siguientes párrafos, se presenta un análisis comparativo de los parámetros fotométricos entre las principales tecnologías de iluminación.

En la tabla 2.12, se presentó la relación del flujo luminoso con la altura de montaje de las luminarias. En donde se muestra que con una altura mínima de montaje de las luminarias de 6 metros se requieren 3000 Lm de flujo luminoso [56].

En el país, las instalaciones de las luminarias de alumbrado público van desde los 6 metros hacia los 12 metros. En este sentido, se tiene que a mayor altura de montaje de las luminarias la superficie iluminada es mayor, sin embargo, el flujo luminoso disminuye considerablemente. Además, las luminarias de sodio de alta presión no poseen un buen rendimiento en la conversión de electricidad a luz. Asimismo, parte de la iluminación que proviene de luminarias de sodio de alta presión es dispersada a la atmósfera provocando la polución lumínica.

Actualmente, las principales empresas de producción de luminarias para autopistas desarrollan luminarias de alta eficiencia, luminarias con tecnología LED que no contienen gases contaminantes para el medioambiente, reduciendo así el porcentaje de contaminación. Asimismo, las luminarias LED tienen mejor emisión de flujo luminoso evitando así que la luz sea dispersada en la atmósfera.

En la tabla 4.6, se presenta una comparación entre las luminarias LED y las luminarias de sodio de alta presión. Las luminarias que se presentan tienen un rendimiento de 80 Lm/W, este rendimiento luminoso está en constante aumento. Se prevé que para los próximos años las luminarias LED superen los 200 Lm/W. Las características de las luminarias se detallan en el Anexo 4. En el mencionado anexo se detallan las características del kit de iluminación renovable con características óptimas para la iluminación de autopistas con una altura de montaje de 9 metros, indicando además que la distancia entre postes deberá ser igual a 30 metros. El flujo luminoso que emiten las luminarias permiten identificar la altura de montaje necesaria para iluminar vías peatonales, de baja velocidad, velocidad media, autopistas y superautopistas.

Tabla 4.6: Rendimiento entre luminarias de sodio de alta presión y LED [fuente propia]

Flujo luminoso de luminarias a diferentes alturas				
Altura de Montaje Tipo de Luminaria	6m Superficie 160m ²	8m Superficie 260m ²	10m Superficie 429m ²	12m Superficie 640m ²
HPS 250W $\eta = 55$	200Lx	123Lx	75Lx	50Lx
HPS 150W $\eta = 55$	103Lx	63Lx	38Lx	26Lx
LED 168W $\eta = 70$	79Lx	48Lx	29Lx	20Lx
LED 112W $\eta = 70$	53Lx	32Lx	20Lx	13Lx
LED 90W $\eta = 85$	78Lx	48Lx	29Lx	20Lx
LED 60W $\eta = 85$	53Lx	33Lx	20Lx	13Lx

En la figura 4.23, se presenta la relación del flujo luminoso entre luminarias de sodio de alta presión y luminarias LED, en los diferentes escenarios viales antes mencionados.

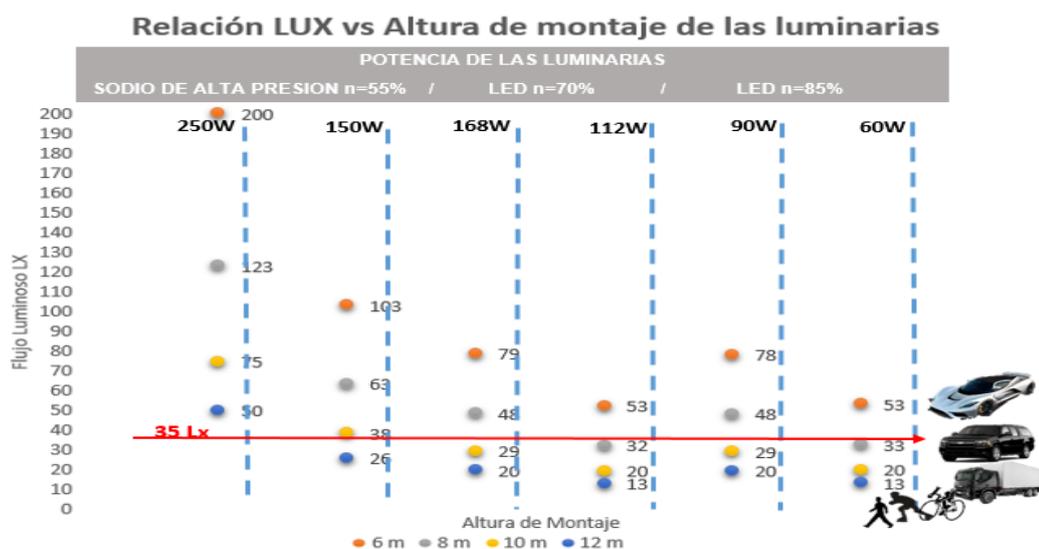


Figura 4.23: Relación entre el flujo luminoso y la altura de montaje de las luminarias [fuente propia]

La relación entre el flujo luminoso y la altura de las luminarias en los diferentes escenarios viales indica una medida óptima de 6 metros de altura. A esa altura se garantiza un buen servicio de iluminación. Además, el impacto visual para los usuarios del servicio de iluminación pública no se vería afectado, ya que se propone un novedoso control de iluminación.

Asimismo, se establece un límite de 35 Lx como valor requerido para la iluminación de autopistas y superautopistas de España y en el Ecuador el Reglamento Técnico Ecuatoriano establece un valor de 30 Lx para autopistas ubicadas en zonas de conflicto. En este sentido, la luminaria LED de 112 W de potencia es la adecuada para el estudio de la metodología de cálculo del ahorro energético en el presente trabajo de investigación.

4.4.2. Evaluación energética del alumbrado público en 100Km de autopista.

El presente trabajo de investigación prevé el diseño de un control inteligente de iluminación fotovoltaica para Autopistas en Ecuador. Por tal razón, se plantea una metodología de evaluación del impacto económico de las luminarias convencionales (sodio de alta presión - Na y vapor de Mercurio - Hg) y de las luminarias LED con un consumo de 112 W, que las podrían sustituir. Adicionalmente, el rendimiento de las luminarias LED aumenta cada año.

En el año 2010, los sistemas de iluminación LED alcanzaron un rendimiento del 50% es decir luminarias LED con un consumo de 170 W. Para el año 2014, el rendimiento de estos sistemas fue del 85%, con luminarias LED de 112 W que sustituyen a las luminarias de sodio de alta presión con 250 W de potencia.

4.4.2.1. Sustitución de luminarias HPS por LED.

Para una mejor comprensión de la presente propuesta se ha considerado un tramo de 100Km de autopista. Cada kilómetro de autopista esta formado por al menos 50 postes con dos luminarias por poste, separados una distancia de 30 metros. Esta distancia corresponde a los 9 metros de la altura de montaje de las luminarias.

En la tabla 4.7, se ha calculado el costo económico de alumbrado convencional en 100 Km de autopista y la reducción que se podría obtener al emplear un control inteligente de iluminación. El cálculo se realiza con dos luminarias por poste y la evaluación económica se extiende un horizonte de 25 años. En ese tiempo se podría sustituir al sistema convencional por modernos e innovadores sistemas de iluminación fotovoltaicos. Adicionalmente, se presentan valores máximos y mínimos al utilizar un control inteligente de iluminación LED. En los siguientes párrafos se describe el

ahorro energético y económico que podrían proporcionar las luminarias LED frente a luminarias tradicionales de sodio de alta presión.

Tabla 4.7: Costo económico del servicio de alumbrado público convencional de 100Km de autopista [fuente propia]

Coste Económico del alumbrado convencional en 100 Km de autopista						
Tipo de Luminaria	Potencia W	Consumo Energía GWh	Costo Económico anual iluminación pública, Millones USD	Costo de Luminarias, Millones USD	Potencia Total instalada en Luminarias MW	Costo Económico en 25 años, Millones USD
Luminaria Sodio	2 x 250	10.95	1.24	5.0	2.5	36
LED $\eta = 50\%$ 2010	2 x 170	5.21	0.58	2.9	1.19	17.6
LED $\eta = 85\%$ 2014	2 x 112	3.43	0.38	2.0	0.70	11.7
PV LED Control System 3/4	2 x 112	2.57	0.29	2.0	0.70	9.28
PV LED Control System 1/2	2 x 112	1.71	0.19	2.0	0.70	6.85
PV LED Control System 1/4	2 x 112	0.85	0.097	2.0	0.70	4.43

El costo de cada luminaria de sodio de alta presión con una potencia de 250 W se estima en 500 dólares. Para el cálculo del consumo energético anual se ha considerado las 12 horas de funcionamiento diario, establecido por el CONELEC, que actualmente es la Agencia de Regulación y Control de la Electricidad. Se calcula que en un año, el consumo energético de las luminarias mencionadas sería de 10.95 GWh por cada 100 Km de autopista según datos del INER. El gasto económico anual en iluminación será de 1.24 millones de dólares. En un horizonte de 25 años, para una autopista de 100 Km el coste económico sería de 36 millones de dólares.

El empleo de luminarias LED con un rendimiento del 50% exigiría una inversión de 580 mil dólares. En el cálculo se considera un precio de 200 dólares por luminaria LED con una potencia de 170 W, aproximadamente. Un sistema LED presentaría un consumo energético 1.5 veces inferior en comparación al sistema convencional.

Este valor representaría un consumo anual de 5.21 GWh. En un horizonte de 25 años implicaría un coste económico de 17.6 millones de dólares. El sistema de iluminación LED presenta un ahorro anual aproximado de 18 millones de dólares en relación al sistema tradicional. Asimismo, el desarrollo de la tecnología permitirá implementar luminarias solares todo en uno, reduciendo así los costos de inversión.

Los sistemas de iluminación LED con un rendimiento energético del 85 % exigiría una inversión de 11.7 millones de dólares a 25 años. Esto representa un consumo energético anual de 3.43 GWh, representando un costo económico anual de 550 mil dólares. El rendimiento de las luminarias LED permite un ahorro de 2.3 veces menos en comparación al sistema convencional. Adicionalmente, se presentan niveles de reducción del servicio de iluminación en un 25 %, 50 % y 75 %, como valores máximo, promedio y mínimo respectivamente. Estos niveles representan un ahorro energético asociado a la implementación de un control inteligente de iluminación. En 25 años, el control de iluminación significaría un consumo energético aproximado de entre 3 a 6 veces inferior para los niveles mínimo y máximo del control de iluminación respectivamente, figura 4.24.

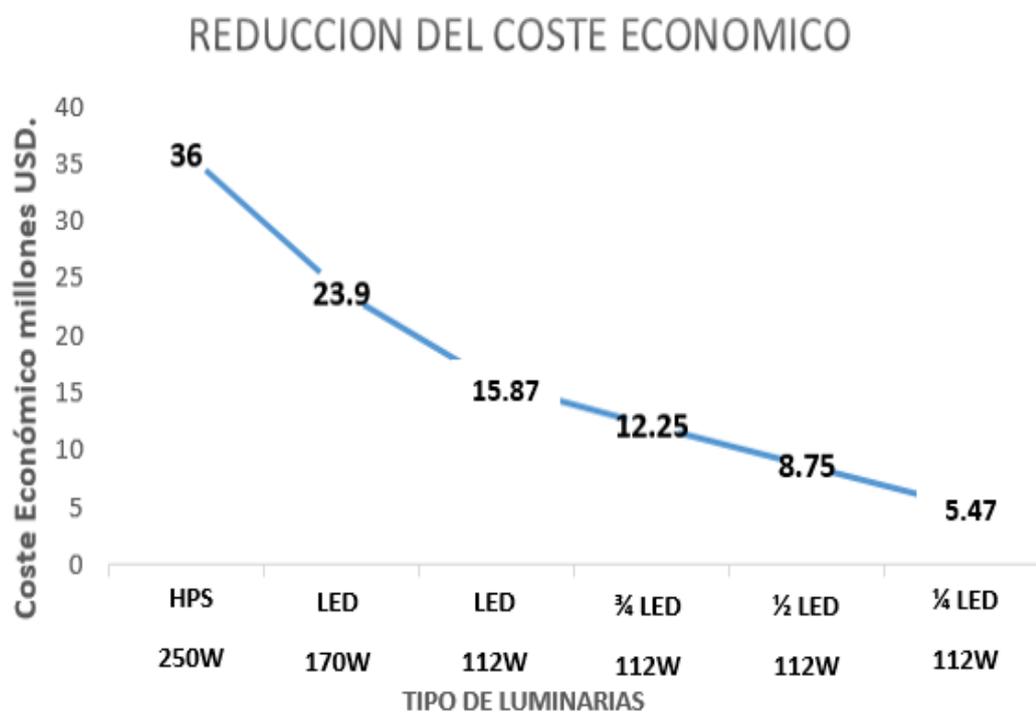


Figura 4.24: Relación del coste económico en función del tipo de luminaria [fuente propia]

La administración del Estado ecuatoriano ha propuesto construir 1000 Km de autopistas y super-autopistas hasta el año 2017. El ahorro económico asociado a la utilización del sistema de iluminación LED proporcionaría un ahorro de 300 millones de dólares en 25 años. Ese monto económico representaría un presupuesto equivalente a construir 5 escuelas del milenio al año durante 25 años.

4.4.2.2. Implementación de LED en sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos ofrecen una alta eficiencia y el costo de las instalaciones se ha reducido en forma significativa en los últimos años. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos NREL - National Renewable Energy Laboratory, indica que el costo 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. Asimismo, el coste de las instalaciones conectadas a la red, en el mismo período, ha pasado de 4.30 USD a 1.92 USD por vatio instalado según datos de la Agencia Internacional de Energía IEA.

Los sistemas de iluminación 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 4.8, se propone una evaluación económica del empleo de un sistema de iluminación fotovoltaica para un tramo de autopista de 100Km.

Tabla 4.8: Costo instalación fotovoltaica en 100 Km de autopista [fuente propia]

Costo Económico del Alumbrado Fotovoltaico en 100Km de Autopista						
Tipos de Luminarias	Potencia de Luminarias W	Potencia Solar Fotovoltaica por Poste Wp	Potencia Solar Instalada MWp	Costo Instalación Solar Millones USD.		
				2013	2016	2017
				6,0 USD/Wp	3,0 USD/Wp	2.5 USD/Wp
Luminarias Sodio	2 x 250	1500	7.5	45	22.5	18.75
LED $\eta = 50\%$ 2010	2 x 170	1020	5.1	30.6	15.3	12.75
LED $\eta = 85\%$ 2014	2 x 112	680	3.4	20.4	10.2	8.5

De la tabla 4.8, se deduce que la potencia instalada fotovoltaica corresponde entre 3500 postes con luminarias de sodio de alta presión, en un tramo de autopista de

100 Km con una separación de 30 metros aproximadamente, alcanzaría los 7.5 MWp en paneles fotovoltaicos.

Los cálculos realizados corresponden a las instalaciones fotovoltaicas en Ecuador, donde presentan un tiempo de funcionamiento, a potencia nominal equivalente, en promedio de 4 horas diarias de radiación solar. Según los cálculos realizados empleando la información proporcionada por el Atlas solar fue de 4.5 horas. En los cálculos se ha empleado el valor de 4 horas para alcanzar así una mayor autonomía en el tiempo de carga y descarga de las baterías, especulando así tres días de autonomía.

Asimismo, se realizó una estimación del coste económico de las instalaciones fotovoltaicas 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, figura 4.25.

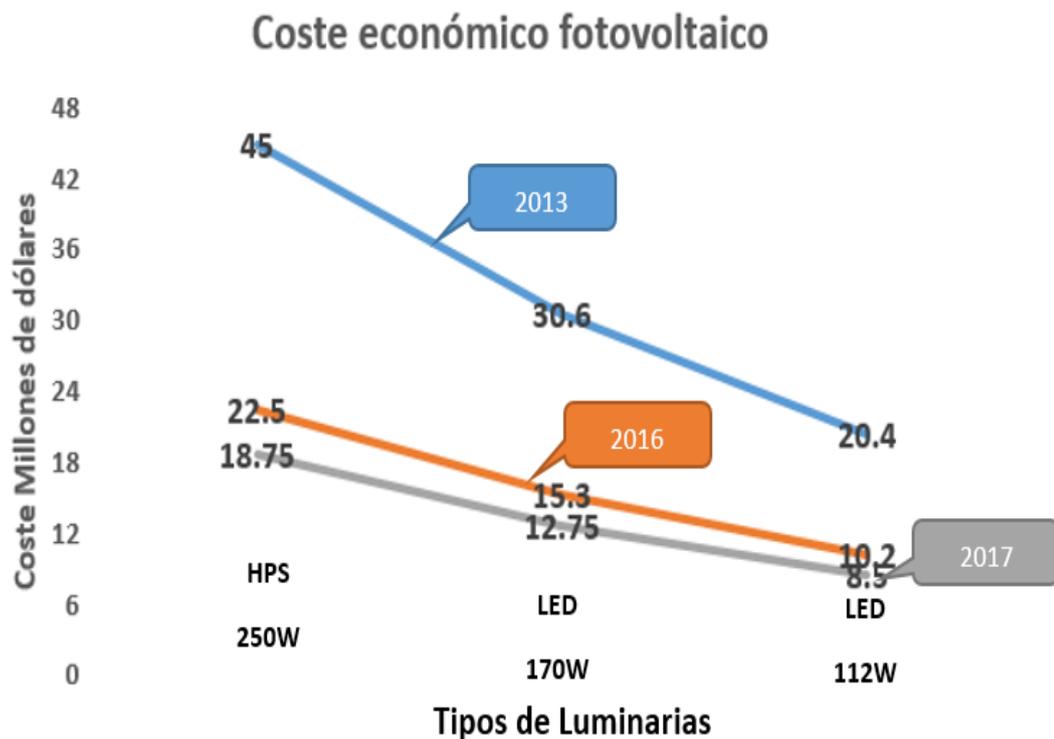


Figura 4.25: Coste económico con instalación fotovoltaica [fuente propia]

Por otra parte, el desarrollo de los sistemas de acumulación de energía solar fotovoltaica con tecnología de iluminación LED permite despreciar los costes de operación y mantenimiento de los módulos fotovoltaicos en un horizonte igual o inferior a 25 años. Además, para un estudio más detallado se deberá considerar el tiempo de vida útil de las baterías y los demás dispositivos electrónicos.

4.4.3. Evaluación energética del alumbrado público a escala nacional.

4.4.3.1. Sustitución de luminarias HPS por LED en el sistema de iluminación pública nacional.

En la tabla 4.9, se emplea la metodología de evaluación preliminar del coste económico de la instalación convencional aplicado a escala nacional. Como en el caso anterior, se evalúa un horizonte de 25 años. Los valores de las luminarias de sodio de alta presión oscilan entre 70 W y 400 W, mientras que las luminarias de vapor de mercurio están entre los valores 125 W y 250 W según datos del INER. En ese tiempo, en el Ecuador existían 1 104 072 luminarias.

Inicialmente, las luminarias convencionales se sustituyen por luminarias de tecnología LED de 170 W y 112 W correspondientes a un rendimiento del 50 % y 85 % respectivamente. Adicionalmente, se considera la implementación de un control inteligente de iluminación LED, permitiendo así una reducción del consumo energético en un 25 %, 50 % y 75 %.

Tabla 4.9: Costo económico del alumbrado público convencional en el Ecuador [fuente propia]

Costo Económico del Alumbrado Convencional en Ecuador.						
Tipos de Luminarias	Potencia de Luminarias W	Consumo Energético GWh	Costo Económico Anual de Iluminación Pública, Millones USD	Costo cambio de Luminarias, Millones USD	Potencia Instalada total en Luminarias MW	Costo Económico 25 año, Millones USD
Na / Hg	70-400 / 125-250	913	104.325	-	176	2608.125
LED $\eta = 50\%$ 2010	170	822.09	94	320.2	188	2670.2
LED $\eta = 85\%$ 2014	112	541.61	62	276	124	1826
PV LED Control System 3/4	112	406.21	46	221	124	1371
PV LED Control System 1/2	112	270.81	31	221	124	996
PV LED Control System 1/4	112	135.40	15	221	124	596

En la figura 4.26, se presenta la reducción del coste económico del servicio de iluminación pública a escala nacional, si se sustituyesen las luminarias convencionales por luminarias LED. Además, se presenta el ahorro económico al controlar el flujo luminoso en luminarias LED. El ahorro alcanzado supera los 80 millones de dólares por año.

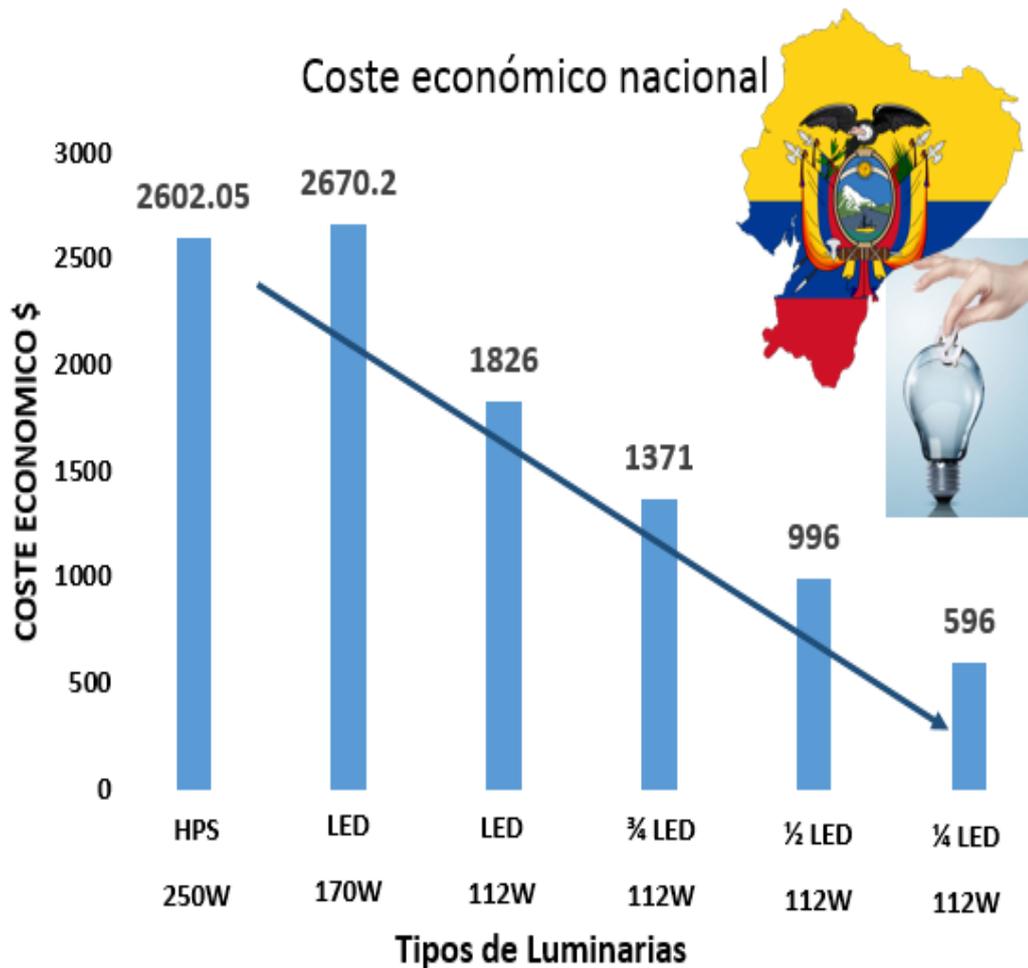


Figura 4.26: Coste económico en iluminación pública nacional [fuente propia]

4.4.3.2. Sustitución de luminarias HPS por LED integrados en sistemas fotovoltaicos.

Si en el país se empleará un sistema de iluminación fotovoltaica se deduce que el coste económico de una instalación fotovoltaica a un precio de 3 USD por vatio pico representaría un ahorro de más de 600 mil dólares anuales en un horizonte de tiempo de 25 años en relación a los sistemas de iluminación convencional.

Si el precio de instalación fotovoltaica se reduce a 2.5 USD el vatio pico esto representaría un ahorro superior a los 900 mil dólares anuales frente a la iluminación convencional. En la tabla 4.10, se observa el calculo realizado para el servicio de alumbrado fotovoltaico en el país.

La potencia de las luminarias es un valor equivalente a las 12 horas del servicio de iluminación establecidas en el país. Para instalaciones fotovoltaicas en el Ecuador el promedio de hora solar pico son 4 horas.

Tabla 4.10: Costo económico del alumbrado fotovoltaico en Ecuador [fuente propia]

Coste Económico del Alumbrado Fotovoltaico en el Ecuador.						
Tipo de Lumina- ria	Potencia Lumina- rias W	Potencia Fotovoltaica por poste Wp	Potencia Solar Instalada MWp	Coste Instalación Fotovoltaica, Millones USD		
				2013	2016	2017
				6.0 USD/Wp	3.0 USD/Wp	2.5 USD/Wp
Na / Hg	70 - 400 / 125-250	600	662.4	3974.7	1987.2	1656
LED $\eta=50\%$ 2010	170	510	563.07	3378.4	1689.2	1407.6
LED $\eta=85\%$ 2014	112	336	370.9	2225.4	1112.7	927.3

En la figura 4.27, se presenta el ahorro económico para un sistema de iluminación pública, basado en sistemas renovables de generación eléctrica. Asimismo, se presentan los valores de facturación del consumo energético para valores de instalaciones fotovoltaicas correspondientes a los años 2013, 2016 y 2017. Se prevé que el coste del vatio pico en instalaciones fotovoltaicas se reduzca cada año hasta el año 2025, según fuentes especializadas como NREL.

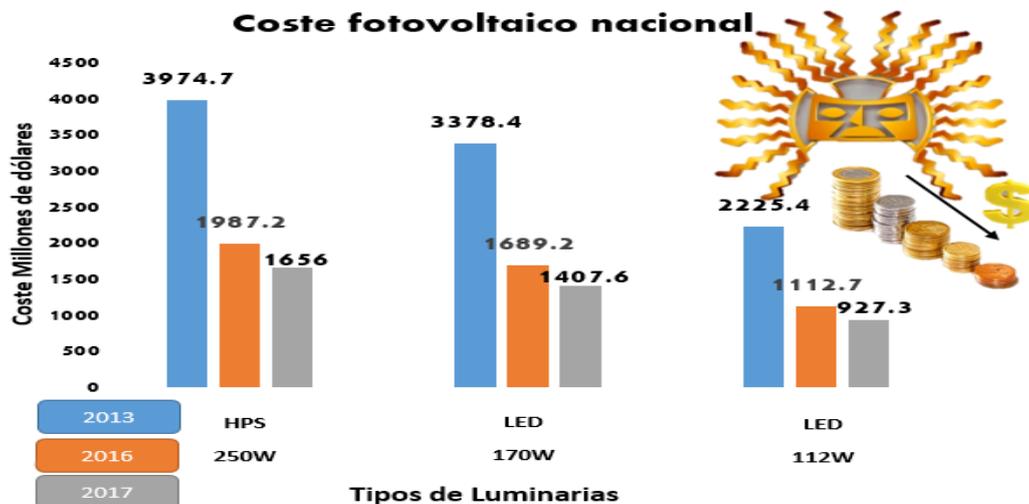


Figura 4.27: Coste económico instalación fotovoltaica en Ecuador [fuente propia]

4.4.4. Escenarios de control de iluminación

Para una mayor comprensión del control propuesto se analizan varios escenarios. Los escenarios que se plantean están en función del flujo vehicular que existe en las vías que unen las principales ciudades del país. En el presente trabajo, se establece un control de iluminación que operará 6 horas comprendidas entre las 00h00 y las 06h00. En este sentido, el control se realizará en 6 de las 12 horas establecidas por el CONELEC correspondientes al alumbrado público, figura 4.24. Se prevé que en el horario establecido el flujo vehicular es mínimo permitiendo un control de iluminación más eficiente.

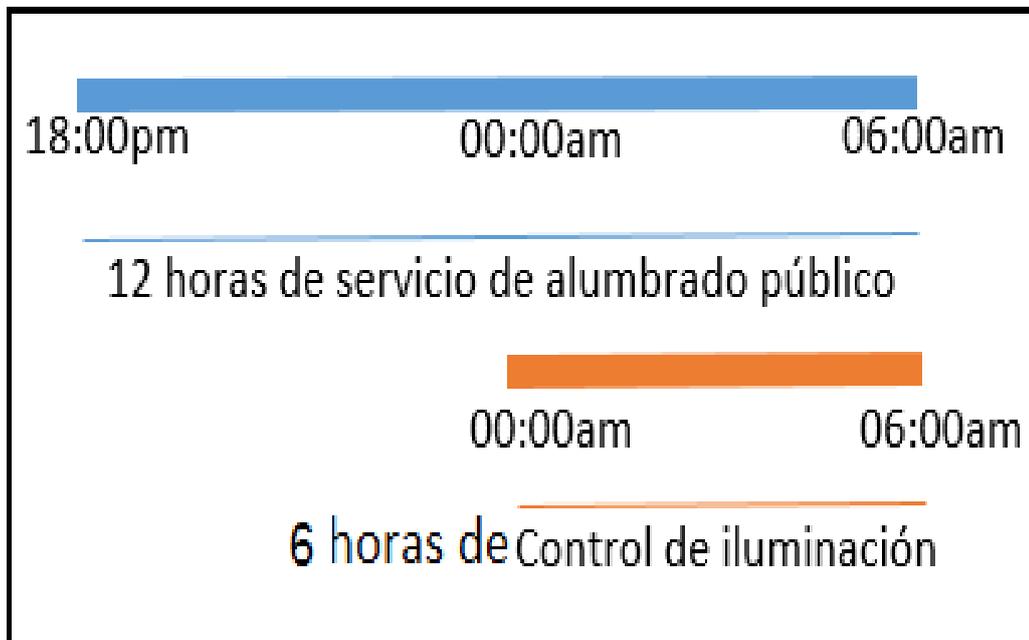


Figura 4.28: Horas del control de iluminación pública [fuente propia]

4.4.4.1. Escenario de un vehículo por hora.

Se calcula que un vehículo al circular a una velocidad mínima de 40Km/h tarda en recorrer un kilómetro de autopista en un tiempo equivalente a 90 segundos, aproximadamente. En la figura 4.25, se muestra un primer escenario de control de iluminación. Se establece la potencia de las luminarias al 100 % en un tiempo de dos minutos mientras el vehículo abandone el tramo antes mencionado. De esa manera se prevé un caso muy particular que permitirá un máximo ahorro en las horas del control de iluminación.



Figura 4.29: Escenario 1 de iluminación [fuente propia]

4.4.4.2. Escenario de dos vehículos por hora.

En este caso, se prevé que en un tramo de 1 kilómetro de autopista circule un vehículo cada 30 minutos. Esto implica, que en una hora se detectará a dos vehículos. En este sentido, el máximo flujo de iluminación durará 4 minutos por cada hora del servicio de iluminación pública, figura 4.30.



Figura 4.30: Escenario 2 de iluminación [fuente propia]

4.4.4.3. Escenario de tres vehículos por hora.

En este caso, en un kilómetro aparecerá un vehículo con una frecuencia de 20 minutos. En cada hora del servicio de iluminación las luminarias permanecerán al 100 % de su potencia durante 6 minutos, figura 4.27.



Figura 4.31: Escenario 3 de iluminación [fuente propia]

4.4.4.4. Escenario de cuatro vehículos por hora.

En este escenario, el flujo vehicular, en un tramo de 1 kilómetro, correspondería a un vehículo con una frecuencia de 15 minutos. En una hora del servicio de iluminación pública se espera la circulación de 4 vehículos, figura 4.28. El flujo luminoso de las luminarias permanecerá alrededor de 8 minutos regulado al 100 %.



Figura 4.32: Escenario 4 de iluminación [fuente propia]

4.4.4.5. Escenario de seis vehículos por hora.

El tiempo del control de iluminación regulado al 100% de la potencia de las luminarias LED alcanzará un valor de 12 minutos por cada hora en el control del servicio de iluminación pública establecido.

En este sentido, el escenario 5, indica que por cada hora del servicio de iluminación aparecerá un vehículo en circulación por la autopista con una frecuencia de 10 minutos. Lo que indica que en una hora se tendrán 6 vehículos en circulación por un kilómetro de autopista, figura 4.29.



Figura 4.33: Escenario 5 de iluminación [fuente propia]

4.4.4.6. Escenario de once vehículos por hora.

Finalmente, se presenta un escenario 6, en este escenario se detectan 11 vehículos en circulación por la autopista durante una hora en el control del servicio de iluminación pública.

El flujo máximo de iluminación operando al 100% de la potencia de las luminarias estará vigente durante 22 minutos aproximadamente, tiempo establecido para que todos los vehículos circulen por el tramo establecido. Es decir, que los vehículos circulan por un tramo de un kilómetro de autopista a una frecuencia de 5 minutos, figura 4.30.

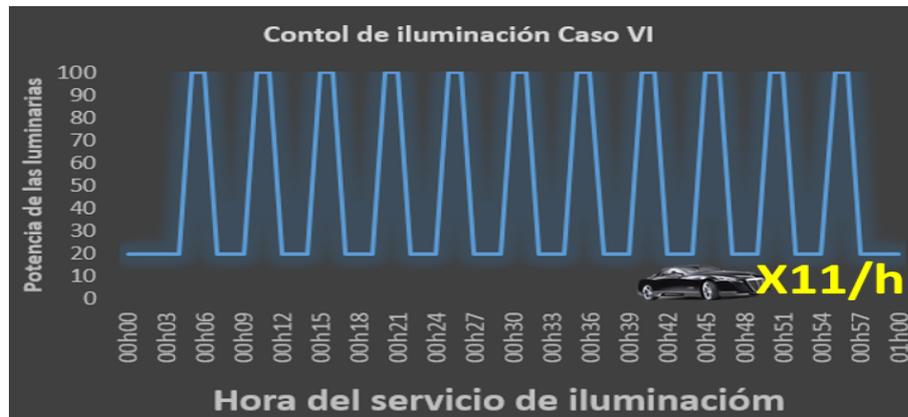


Figura 4.34: Escenario 6 de iluminación [fuente propia]

4.4.4.7. Escenarios mixtos del control de iluminación.

En los párrafos anteriores se presentó diferentes escenarios del control de iluminación. Sin embargo la circulación de vehículos por una autopista puede ser mayor o menor en dependencia de la circulación de vehículos particulares. De esa manera se pueden generar varios escenarios mixtos, combinando los escenarios anteriormente descritos. En la figura 4.35, se presenta un ejemplo de un posible escenario mixto que puede generarse en las horas del control de iluminación pública.

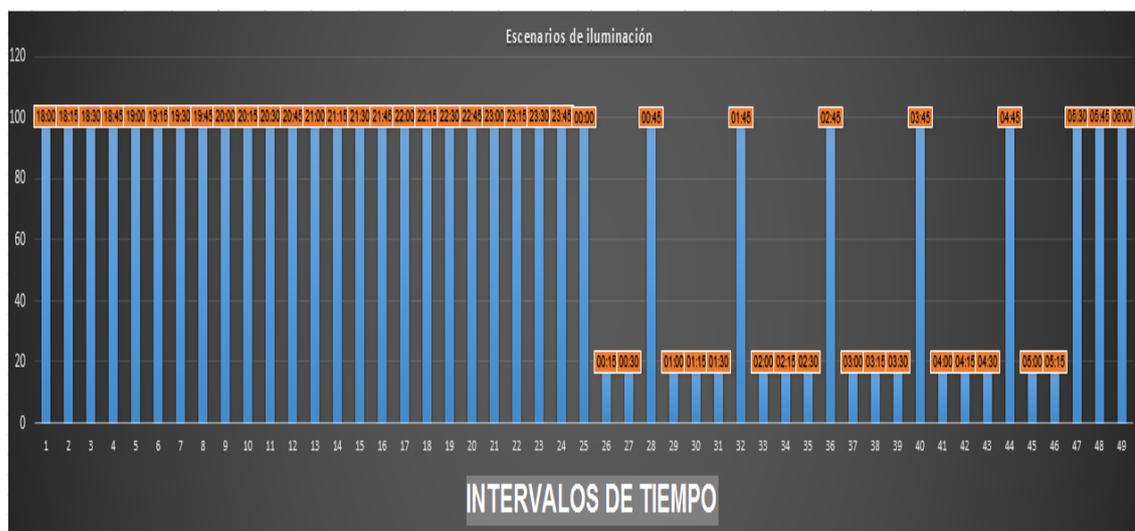


Figura 4.35: Escenario mixto del control de iluminación [fuente propia]

Se prevé que el control de iluminación sea autónomo y que reaccione ante diferentes escenarios viales, permitiendo la combinación de varios escenarios durante el tiempo

del control de iluminación. El control de iluminación variará en función del flujo vehicular que se presenta en las autopistas.

4.4.4.8. Impacto económico del control de iluminación.

Los diferentes escenarios del control de iluminación permitirán calcular un ahorro económico en la facturación del servicio de iluminación pública. En la tabla 4.11, se presenta el ahorro energético que se generará en cada escenario del control de iluminación, descrito en párrafos anteriores. El consumo energético controlado produce un ahorro económico que podría destinarse en la financiación de proyectos estratégicos como son las nuevas escuelas del milenio y otras obras emblemáticas del país.

Tabla 4.11: Ahorro energético del control de iluminación [fuente propia]

Coste económico de los escenarios del control de iluminación				
Escenarios de iluminación	Potencia de la luminaria	Consumo anual (kWh)	Gasto a escala nacional Millones USD.	Ahorro económico Millones USD
Convencional HPS	250W	1095	136.6	0
Reemplazo LED	112W	245.28	30.6	106
Escenario 1	112W	55.60	6.93	129.67
Escenario 2	112W	62.14	6.76	129.84
Escenario 3	112W	68.68	7.75	128.85
Escenario 4	112W	75.22	9.38	127.22
Escenario 5	112W	88.30	11.01	125.59
Escenario 6	112W	121	15.09	121.51

En los diferentes escenarios se realizó el cálculo en función de las horas de operación del sistema de iluminación. En primera instancia se calcula un consumo de 1095 KWh correspondientes a 12 horas del funcionamiento del servicio de alumbrado público durante los 365 días del año. Este mismo proceso se realiza para los siguientes escenarios de iluminación. En lo que corresponde al gasto a escala nacional se consideró un número de 1'104,072 luminarias según información del INER. En el primer escenario se considera un ahorro económico nulo debido a que no se emplean luminarias LED que permiten el ahorro energético, a partir de la sustitución de las luminarias se tiene un ahorro de 106 millones calculados en comparación con la facturación emitida por el INER. En el presente trabajo se utilizó información de

un informe económico presentado en febrero del 2013 por el INER, actualmente, es difícil contar con un número exacto de luminarias debido a que se han inaugurado importantes infraestructuras viales. Esto representa un incremento del número de luminarias.

Los escenarios del control de iluminación presentan un gran impacto económico en relación al sistema convencional de alumbrado público. En este sentido, se analizó que en un tramo de 1 Km de autopista, la sustitución de luminarias LED representaría un consumo energético anual 4 veces inferior al sistema convencional compuesto por luminarias de sodio de alta presión. Además, en la tabla 4.11, se presentó la comparación del ahorro económico alcanzado por cada escenario del control de iluminación. Asimismo, el presente trabajo de investigación permite que se puedan expandir los escenarios de iluminación en función del control de iluminación creando así escenarios de iluminación mixta. En el anexo 5 se presenta las características del sensor de detección de vehículos que se implementará en el control de iluminación. En el Anexo 6, se muestra el costo real del sistema de iluminación. De esta manera se tendrá un sistema confiable y que se pueda financiar a través del portal de compras públicas. Además, se realizó un estudio económico en el que se plantea el costo de pago y recuperación de la inversión inicial del sistema de iluminación pública. El estudio económico es una primera aproximación estimada en un horizonte de 25 años. En este estudio no se ha considerado el costo de instalación y transporte que se menciona en el anexo 5, sin embargo para un estudio económico más detallado se deberá considerar el porcentaje de emisiones reducidas a través del sistema fotovoltaico y el coste de pérdidas en las líneas de transmisión de un sistema convencional. Esta aproximación económica se realiza con una tasa de interés del 12% que presenta el SENPLADES. En el anexo 7, se puede visualizar el mencionado estudio de recuperación. Asimismo, se presenta un anexo 8 que corresponde al artículo científico publicado en la revista MASKANA en diciembre del año 2014. El presente proyecto tiene un gran impacto social y económico, que a través de estudios más detallados y específicos por autopistas resultará muy rentable para el Estado ecuatoriano.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

- Los radares de ondas milimétricas son la mejor alternativa para la detección de vehículos en circulación, su incesable avance tecnológico los convierte en sistemas inteligentes capaces de determinar la velocidad y el número de vehículos que circulan por las autopistas independientemente del número de carriles de circulación.
- El flujo luminoso producido por las luminarias LED es óptimo para la iluminación pública de autopistas, superando los 35 luxes requeridos en la iluminación de estos entornos a las diferentes alturas de montaje analizadas en la presente propuesta. Además, esta tecnología no genera emisiones contaminantes de CO₂.
- El desarrollo de la tecnología LED en iluminación pública permite que sus luminarias se integren a sistemas de iluminación fotovoltaica con gran facilidad. Además, las luminarias LED permiten un mejor control del flujo luminoso de las luminarias, alcanzando un importante ahorro en consumo energético que reduce el costo de facturación en iluminación pública.
- La implementación de sistemas de control inteligente en el Alumbrado Público basado en instalaciones fotovoltaicas, en el Ecuador, permite implementar nuevos conceptos y tecnologías que promueven la transformación de la matriz energética basados en el Plan Nacional del Buen Vivir.
- El control del flujo luminoso aplicado en luminarias del alumbrado público permitió el cálculo del consumo energético en un horizonte de 25 años, presentando un significativo ahorro energético y económico.

- La detección de vehículos permitió el control del flujo luminoso de las luminarias, variando su intensidad de un mínimo a un máximo en las horas establecidas del servicio de alumbrado público.
- La detección de vehículos permitió el establecimiento de escenarios de control de iluminación pública de autopistas, calculando un ahorro económico en cada hora que se aplique el control de iluminación.
- Se determinaron valores máximos, promedios y mínimos para el control de iluminación, obteniendo en un horizonte de 25 años una reducción en el consumo energético de 3 a 6 veces inferior al sistema de iluminación convencional.
- El control inteligente de iluminación aplicado con luminarias LED con un rendimiento del 85% en una autopista de 100 Km permite obtener un ahorro 6 veces inferior al sistema de iluminación convencional. Se calculó un coste económico de 5.47 millones de dólares, representando un ahorro de 30 millones de dólares en comparación al sistema convencional en un horizonte de 25 años.
- El control de iluminación propuesto permitió el desarrollo de un artículo científico que ha sido publicado en la Revista MASKANA indexada en Latindex. Además, el control de iluminación planteado permitió desarrollar notas conceptuales presentadas al banco de ideas del Senescyt, actualmente el proyecto presentado se encuentra en la segunda etapa de revisión.

5.2. Recomendaciones.

En futuros estudios, asociados a los sistemas inteligentes de control de alumbrado público:

- Se propone que la instalación de los radares se debería realizar en lugares estratégicos del servicio de alumbrado público para la detección de vehículos, además, se debe considerar el efecto Doppler que posee el sistema de detección.
- Se propone la implementación de una plataforma CLOUD/GIS para la gestión, operación y mantenimiento del servicio de iluminación en forma remota desde un centro de operación y control.
- La configuración del control inteligente de iluminación deberá permitir una rápida escalabilidad con dispositivos electrónicos que permitan adquirir información de las condiciones atmosféricas.
- Se recomienda configurar un sistema de fotomultas asociado al sistema de detección vehicular propuesto en el control inteligente de iluminación de autopistas.
- Las configuraciones de los módulos fotovoltaicos permitiría consolidar políticas para alcanzar el concepto de soberanía energética en el servicio de alumbrado público.
- Se debería desarrollar herramientas para el control, supervisión y monitoreo de las instalaciones renovables en el control de iluminación propuesto a través de dispositivos móviles (tablets, smartphones, etc.).
- En primera instancia se plantearon escenarios con un número limitado de vehículos que se realizó en función del tráfico de transporte interprovincial. Este tipo de transporte representa un flujo constante a diferentes frecuencias en el tiempo del control de la iluminación. Se recomienda que se realice un estudio más detallado del control de iluminación basado en una autopista específica. De esta manera el estudio se limitará y permitirá obtener datos más reales del flujo vehicular.
- En un futuros estudios, se recomienda tener en consideración el tráfico vehicular en diferentes horarios y días del año. Se presume que el flujo vehicular se incrementa durante días festivos y feriados.

- Si el control de iluminación fotovoltaico planteado llegara a implementarse, entonces se recomienda considerar el estudio de una planta de fabricación de módulos fotovoltaicos específicos para iluminación pública que sea expandible para su comercio en sudamérica.

Bibliografía

- [1] M. de Obras Públicas Ecuador, “82 años construyendo obras viales en el ecuador,” 2011.
- [2] M. de Obras Públicas Ecuador, “7.592 millones de dólares invertidos en vialidad hasta el 2012 para impulsar el crecimiento del ecuador,” 2012.
- [3] CONELEC, “Regulación 008/011alumbrado público,” 2011.
- [4] M. de Electricidad y Energía Renovable, “Dirección de eficiencia energética. eficiencia en el sector público.,” *Disponible en:* <http://www.energia.gob.ec/eficiencia-energetica-en-el-sector-publico/>.
- [5] SENPLADES, “Plan nacional del buen vivir,” 2013-2017.
- [6] A. Economía, “Ecuador invertirá 5 millones de dólares en la construcción de autopistas,” *Disponible en:* <http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/ecuador-invertira-us5000m-en-construccion-de-autopistas>.
- [7] A. S. and S. P.K., “Study on energy efficient street lighting system design,” in *Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012 Ieee International*, pp. 291–295, 2012.
- [8] F. Li, D. Chen, X. Song, and Y. Chen, “LEDs: A promising energy-saving light source for road lighting,” in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, pp. 1–3, 2009.
- [9] I. L’hadi, M. Rifai, and Y. Alj, “An energy-efficient WSN-based traffic safety system,” in *Information and Communication Systems (ICICS), 2014 5th International Conference on*, pp. 1–6, 2014.
- [10] S. R. O. Venkata Lakshmi, B.Nageswarao Naik, “The development of road lighting intelligent control system based on wireless network control,” *International Journal of Science and Applied Information Technology*, 2012.

- [11] H. Macias, Y. Ulianov, and Y. Ramos, "Illumination benefits using LED high brightness bulb compare to traditional illumination systems," in *Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE), 2012 IEEE International Symposium on*, pp. 1–5, 2012.
- [12] C. Rodrigues, P. Almeida, G. Soares, J. Jorge, D. Pinto, and H. Braga, "An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps," in *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 141–146, 2011.
- [13] R. Barraza Garcia, G. Velazquez Angulo, J. Romero Gonzalez, E. Flores Tavizon, and J. Huertas Cardozo, "LED street lighting as a strategy for climate change mitigation at local government level," in *Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2014 IEEE*, pp. 345–349, 2014.
- [14] C. Spinak, Chiu, "The e-street project oslo, norway," *Sustainability Innovation Inventory*, 2008.
- [15] M. Dalla Costa, L. Schuch, L. Michels, C. Rech, J. Pinheiro, and G. Costa, "Autonomous street lighting system based on solar energy and LEDs," in *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 1143–1148, 2010.
- [16] Magnetek, "Practical monitoring and control of street lighting using power line modem technology," *Magnetek the United States*, 2005.
- [17] H. Chung, N. Ho, S. Hui, and W. Mai, "Case study of a highly-reliable dimmable road lighting system with intelligent remote control," in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, 2005.
- [18] E.-S. Report., "Intelligent road and street lighting in europe," 2006.
- [19] Sofia, "Intelligent road and street lighting in europe," *Grant Agreement: EIE/05/157/SI2.419662 D 3.2: Report on small scale test projects*, 2007.
- [20] R. Pliszcak, "Street lighting management system jupiter," 2010.
- [21] G. Horvat, D. Sostaric, and D. Zagar, "Using radio irregularity for vehicle detection in adaptive roadway lighting," in *MIPRO, 2012 Proceedings of the 35th International Convention*, pp. 748–753, 2012.
- [22] F. Ramadhani, K. Bakar, and M. Shafer, "Optimization of standalone street light system with consideration of lighting control," in *Technological*

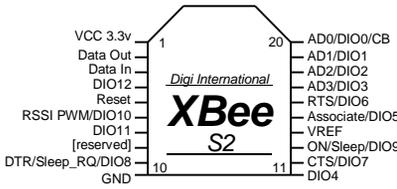
- Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), 2013 International Conference on*, pp. 583–588, 2013.
- [23] M. Karthikeyan, V. Saravanan, and S. Vijayakumar, “Cloud based automatic street light monitoring system,” in *Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014 International Conference on*, pp. 1–6, 2014.
- [24] R. N. S. Richu Sam Alex, “Energy efficient intelligent street lighting system using zigbee and sensors,” *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2014.
- [25] RAE, “Diccionario de la lengua española,” *Disponible en:* <http://lema.rae.es/drae/?val=Autopista>.
- [26] PANAVIAL, “Autovía 6 carriles, jambelí - latacunga - ambato,” *Disponible en:* <http://panavial.com/proyectos-obras-en-ejecucion-red-autopistas-vias-carreteras-panamericana-vial-ecuador.php?tablajb=proyectos&p=1&t=Autovia-a-6-carriles,-Jambeli—Latacunga—Ambato&>.
- [27] A. Holt and I. Pengelly, “Its and renewable energy,” in *Road Transport Information and Control - RTIC 2008 and ITS United Kingdom Members' Conference, IET*, pp. 1–6, 2008.
- [28] M. C. Rubio, “Carreteras que brillan con luz propia,” *Carreteras que brillan con luz propia*, 2014.
- [29] SIEMENS, “Soluciones para autopistas iinteligentes,” 2011.
- [30] H. A., “Oregon solar highway,” *Oregon Innovative Partnerships Program Oregon Department of Transportation*, 2009.
- [31] PHILIPS, “Soluciones y servicios autopistas a44,” 2011.
- [32] K. E. Corporation, “Smart highway opening the future of high-tech road transport system,” *The Blueprint of Smart Highway, Vol 10 N°2*, 2013.
- [33] S. Viabilidad, “Caminos de la red vial.,” *Registro oficial N° 254*, 2001.
- [34] INEN, “Señalización vial. parte 2. señalización horizontal,” 2011.

- [35] W. Qiao, A. Sharma, J. Hudgins, E. Jones, and L. Rilett, "Wind/solar hybrid generation-based roadway microgrids," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pp. 1–7, 2011.
- [36] M. Zeman, "Photovoltaic systems," *Chapter 9*, 2010.
- [37] J. C. R. C. A. C. M. Castro, "Centrales de energías renovables. generación eléctrica con energías renovables," 2009.
- [38] I. E. de Normalizacion INEN, "Modulos fotovoltaicos (fv) de silicio cristalino para uso terrestre. cualificacion del diseño y homologacion (iec 61215:2005 idt)," *Norma Tecnica Ecuatoriana NTE INEN-IEC 61215 Segunda Revision 2014-01*, 2014.
- [39] F. A. Padrón, *Baterías: Estado del Arte y Vigilancia Tecnológica 2013*. PhD thesis, 2014.
- [40] C. N. de Electricidad, "Atlas solar con fines de generación eléctrica.," 2008.
- [41] O. OTPC, "Guía práctica de iluminación de exteriores," *Alumbrado Eficiente y control de la contaminación lumínica oficinas de protección de la calidad del cielo de Chile y Canarias*, 2010.
- [42] U. INDIA, "Energy efficient street lighting," *Guidelines*, 2010.
- [43] T. D. M Cole, "The lighting revolution: If we were experts before, we are novices now," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 50, NO. 2, MARCH/APRIL 2014*, 2014.
- [44] G. S. and F. Slaou, "Case study of hybrid wind-solar power systems for street lighting," in *2011 21st International Conference on Systems Engineering ICSEng*, pp. 82–85, 2011.
- [45] F. Y. A. N. H. D. N. A. A. A Purwadi, Y. Haroen, "Prototype development of a low cost data logger for pv based led street lighting system," *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics 17-19 July 2011, Bandung, Indonesia*, 2011.
- [46] C. J. Y. S. C. H. Chiu, u-K. Lo, "Design and implementation of a photovoltaic high-intensity-discharge street lighting system," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 26, NO. 12, DECEMBER 2011*, 2011.

- [47] P. Boesgaard, “Udvikling af co2 neutralt byrumsarmatur,” *ELFORSK Project, Development of a carbon neutral luminaire for the urban environment, Final report*, 2013.
- [48] I. T and M. Abdul, “Efficient load and charging method for solar powered home lighting system of bangladesh,” in *2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, pp. 1–3, 2014.
- [49] C. R.R. and K. M.S., “Electrification of streets of dhaka city using solar and piezoelectric energy,” in *3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATICS, ELECTRONICS & VISION 2014*, pp. 1–4, 2014.
- [50] F. Yildiz, “Parking and street lighting with solar and wind energy powered retrofitted led lights,”
- [51] G. V. M. N. M. Sei P L, Alex S. W, “Energy neutral solar powered street lighting with predictive and adaptive behaviour,” *ENSSys November 6 2014 Memphis TN USA. ACM 978 1 4503 3189*, 2014.
- [52] M. de Industrias y Productividad Subsecretaria de la Calidad, “Reglamento tecnico ecuatoriano rte inen 069 alumbrado publico,” 2013.
- [53] C. E. de Iluminación, “Protocolo de auditoría energética de las instalaciones de alumbrado público exterior,” 2008.
- [54] K. M. B., “Modulo ucc iluminación,”
- [55] R. L. INER, “Alumbrado público en el ecuador,” *Disponible en: <http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/05/09-Indicadores-infraest-energia-INER1.pdf>*, 2013.
- [56] D. TECNOLOGIAS, “Manual de alumbrado público con leds de alta intensidad,” *Disponible en: <http://www.dmaxledlights.com/docs/Manual-Alumbrado-Publico-con-LEDs-de-Alta-Intensidad.pdf>*, 2013.
- [57] Schröder, “Control inteligente para una iluminación eficiente,” *Owlet*, 2013.
- [58] S. Perera and U. Sonnadara, “Night time detection of vehicles,” *Proceedings of the Technical Sessions 26 páginas: 33-40*, 2010.
- [59] J. Zhou, D. Gao, and D. Zhang, “Moving vehicle detection for automatic traffic monitoring,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 1, pp. 51–59, 2007.

- [60] Y.-M. Tsai, K.-Y. Huang, C.-C. Tsai, and L.-G. Chen, “Learning-based vehicle detection using up-scaling schemes and predictive frame pipeline structures,” in *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*, pp. 3101–3104, IEEE, 2010.
- [61] “Rfid based vehicle tracking system,” *Disponibile en: <http://www.hbeonlabs.com/synopsis/RFID-20PDF/RFID-20BASED-20VEHICLE-20TRACKING-20SYSTEM.pdf>*, 2012.
- [62] K. SHIRAKAWA, S. KOBASHI, Y. KURONO, M. SHONO, and O. ISAJI, “3d-scan millimeter-wave radar for automotive application,”
- [63] A. G. Fortuño, “Desarrollo e implementación de una red de sensores zigbee mediante xbee de digi,” *Universitat Rovira Virgili*, 2012.
- [64] L. T. Ojeda, “www.xbee.cl,” tech. rep., Ingeniería MCI Ltda.
- [65] S.-I. Hong, Y.-S. Kim, and C.-H. Lin, “A LED light control system design by optimal data transfer control algorithm,” in *TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1–6, 2014.
- [66] S. Fan, C. Yang, and Z. Wang, “Automatic control system for highway tunnel lighting,” in *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, pp. 116–123, Springer, 2011.
- [67] Y. Zhang and D. Ma, “A single-stage solar-powered LED display driver using power channel time multiplexing technique,” vol. 30, no. 7, pp. 3772–3780, 2015.
- [68] C. Turcu, V. Gaitan, and C. Turcu, “An internet of things-based distributed intelligent system with self-optimization for controlling traffic-light intersections,” in *Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2012 International Conference on*, pp. 1–5, 2012.
- [69] Elecfreaks, “Ultrasonic ranging module hc-sr04,”

ANEXO 1 Guía de configuración de los módulos XBee

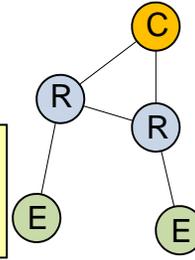


XBee S2 Quick Reference Guide

IEEE 802.15.4 = Zigbee Protocol. XBee is a microcontroller made by digi which uses the Zigbee protocol. The XBee uses 3.3V and has a smaller pin spacing than most breadboards/proto boards. Because of this, it is often useful to purchase a kit to interface the XBee with a breadboard.

Sept/2012 <http://tunnelsup.com>

Specs	Operating Voltage: 2.1 – 3.6V	Digital I/O pins: 11	RF Data Rate: 250kbps
	Operating Current: 40mA@3.3V	Analog input pins: 4	Throughput speed: 35kbps
	Indoor range: 40 Meters	Mesh routable	Frequency: ISM 2.4GHz
	Line of sight range: 120 Meters	Self Healing network	OK Temp: -40 to 85C
	Max Analog Pin Reading: 1.2V	Firmware: ZB ZigBee	



Coordinator – 1 required in every network In charge of setting up the network Can never sleep
Router – multiple may exist Can relay signals from other routers/EPs Can never sleep
End Point – multiple may exist Cannot relay signals Can sleep to save power

XBee Modes	Transparent – Communication through the XBee. If data is not generated from the XBee itself then both XBees should be set to AT. Command – Communication to the XBee. If one XBee is sensing data, that XBee should be in AT mode while the receiving one should be in API mode.
-------------------	--

Arduino Connectivity: Arduino TX connects to XBee RX (Data in) Arduino RX connects to XBee TX (Data out)

XBee Setup	Connect the XBee to a TTL Serial FTDI adapter – OR – Arduino hack: Connect RX to RX, TX to TX, RESET to ground to bypass the Arduino entirely and get serial to XBee. Use the free X-CTU software to configure the XBee. Baud: 9600 – FC: Hardware – Data Bits: 8 – Parity: None – Stop Bits: 1
-------------------	---

Arduino Integration: Data sent to Serial.print() will go out TX port of Arduino which is then connected to the RX port of XBee. If XBee is in AT mode it will transmit it wirelessly. Data received from XBee will be sent to the Serial.

Basic Settings	PAN ID – The network to communicate over. If 0, the XBee will join any. DH/DL – Destination Serial number. Used to send to a specific XBee's Serial. Set to 0 to send to just the Coordinator. Set to 0x0000000000FFFF to broadcast. JV – Router/EP should be set to 1 so it rejoins the network on startup
-----------------------	---

Arduino Example: Read an analog value using API // Remote XBee: AT, Base XBee: API if (Serial.available() >= 21) { // Make sure the frame is all there if (Serial.read() == 0x7E) { // 7E is the start byte for (int i = 1; i < 19; i++) { // Skip ahead to the analog data byte discardByte = Serial.read(); } int analogMSB = Serial.read(); // Read the first analog byte data int analogLSB = Serial.read(); // Read the second byte int analogReading = analogLSB + (analogMSB * 256); } }

Pin Settings	For pin settings to work, receiver XBee must be in API mode D0 – Set pin 0 to start sensing IR – Collect data on sensing pins every XX millisecs
---------------------	---

Arduino Example: Change the pin setting on a remote Xbee // Remote XBee: AT, Base XBee: API Serial.write(0x7E); // Sync up the start byte Serial.write((byte)0x0); // Length MSB (always 0) Serial.write(0x10); // Length LSB Serial.write(0x17); // 0x17 is the frame ID for sending an AT command Serial.write((byte)0x0); // Frame ID (no reply needed) Serial.write((byte)00); // Send the 64 bit destination address Serial.write((byte)00); // (Sending 0x000000000000FFFF (broadcast)) Serial.write((byte)00); Serial.write((byte)00); Serial.write((byte)00); Serial.write(0xFF); Serial.write(0xFF); Serial.write(0xFF); // Destination Network Serial.write(0xFE); // (Set to 0xFFFE if unknown) Serial.write(0x02); // Set to 0x02 to apply these changes Serial.write('D'); // AT Command: D1 Serial.write('1'); Serial.write(0x05); // Set D1 to be 5 (Digital Out HIGH) long chexsum = 0x17 + 0xFF + 0xFF + 0xFF + 0xFE + 0x02 + 'D' + '1' + 0x05; Serial.write(0xFF - (chexsum & 0xFF)); // Checksum

Byte	Example	Description
0	0x7e	Start byte – Indicates beginning of data frame
1	0x00	Length – Number of bytes (ChecksumByte# – 1 – 2)
2	0x10	
3	0x17	Frame type - 0x17 means this is a AT command Request
4	0x52	Frame ID – Command sequence number
5	0x00	64-bit Destination Address (Serial Number)
6	0x13	MSB is byte 5, LSB is byte 12
7	0xA2	
8	0x00	0x0000000000000000 = Coordinator
9	0x40	0x0000000000000000 = Broadcast
10	0x77	
11	0x9C	
12	0x49	
13	0xFF	Destination Network Address
14	0xFE	(Set to 0xFFFE to send a broadcast)
15	0x02	Remote command options (set to 0x02 to apply changes)
16	0x44 (D)	AT Command Name (Two ASCII characters)
17	0x02 (2)	
18	0x04	Command Parameter (queries if not present)
19	0xF5	Checksum

Byte	Example	Description
0	0x7e	Start byte – Indicates beginning of data frame
1	0x00	Length – Number of bytes (ChecksumByte# – 1 – 2)
2	0x14	
3	0x92	Frame type - 0x92 indicates this will be a data sample
4	0x00	64-bit Source Address (Serial Number)
5	0x13	MSB is byte 4, LSB is byte 11
6	0xA2	
7	0x00	
8	0x40	
9	0x77	
10	0x9C	
11	0x49	
12	0x36	Source Network Address – 16 Bit
13	0x6A	
14	0x01	Receive Opts. 01=Packet Acknowledged. 02=Broadcast packet
15	0x01	Number of sample sets. Always set to 1 due to XBEE limitations
16	0x00	Digital Channel Mask – Indicates which pins are set to DIO
17	0x20	
18	0x01	Analog Channel Mask – Indicates which pins are set to ADC
19	0x00	Digital Sample Data (if any) – Reads the same as Digital Mask
20	0x14	
21	0x04	Analog Sample data (if any)
22	0x25	There will be two bytes here for every pin set for ADC
23	0xF5	Checksum(0xFF - the 8 bit sum of the bytes from byte 3 to this byte)

Sleep Mode	Endpoints can sleep to save power. An endpoint that only wakes up every 5 minutes to send data may only be awake for 6 seconds a day. SM – 4 = Cyclic sleep SP – Sleep time (up to 28 secs) SN – Number of sleep cycles ST – Time awake
Pin I/O Options	0 – Disabled 1 – N/A 2 – ADC 3 – Digital IN 4 – Digital OUT, LOW 5 – Digital OUT, HIGH

Digital Ch Mask	First Byte n/a n/a n/a D12 D11 D10 n/a n/a Second Byte D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0 Example: 0x00 0x13 = 0000 0000 0000 1101 Pins D3, D2 and D0
------------------------	--

Analog Ch Mask	(volt) n/a n/a n/a A3 A2 A1 A0 Example: 0x05 = 0000 0101 = Pin A2 and A0
-----------------------	--

ANEXO 2 Programación de la Interfaz Gráfica en C#

En apartados anteriores, se menciona el empleo de una interfaz por computadora para dar seguridad al sistema en caso de emergencia.

La interfaz se realizó utilizando el software Microsoft Visual C# 2010, el software es de fácil programación con un entorno derivado de C y C++. En este sentido, C# es un software robusto que genera programas ejecutables sobre su plataforma, además, C# puede integrarse con QT para generar ejecutables para Windows, Mac y Linux.

En este apartado, se muestra la programación realizada en C#.

```
1 using System ;
2 using System . Collections.Generic ;
3 using System . ComponentModel ;
4 using System . Data ;
5 using System . Drawing ;
6 using System . Li nq ;
7 using System . Text ;
8 using System . Windows.Forms ;
9 using System . IO. Por t s ;
10 using Control_Solar.Properties ;
11
12 namespace Control _Solar
13 {
14 public partial class Control_Solar : Form
15 {
16 public Control_Solar ( )
17 {
18 Initialize Component ( ) ;
19 // s e r i a l P o r t 1 . PortName = comboBox1 . Text ;
20 // s e r i a l P o r t 1 . BaudRate = 9600 ;
21 // s e r i a l P o r t 1 . Open ( ) ;
22 }
23 bool conectado = f a l s e ;
24 private void Form1_FormClosing ( object sender , FormClosingEventArgs e )
25 {
26 i f ( serialPort1.IsOpen ) serialPort1.Close ( ) ;
27
28 }
29 private void EncendidoClick ( object sender , EventArgs e )
30 {
31 // i f ( conectado )
32 s e r i a l P o r t 1 . Write ( " a " ) ;
33 Encendido.Enabled = f a l s e ;
34 Apagado.Enabled = t r u e ;
35 pictureBox1.Image = Resources .ON;
36 }
37
38 private void Apagado_Click ( object sender , EventArgs e )
39 {
40 // i f ( conectado )
41 s e r i a l P o r t 1 . Write ( " a " ) ;
42 Encendido.Enabled = t r u e ;
43 Apagado.Enabled = f a l s e ;
44 pictureBox1.Image = Resources.OFF;
45
46 }
47
48 private void button1_Click_1 ( object sender , EventArgs e )
49 {
50
51 i f ( ! conectado ) // Si no e s t a conectado e l puerto , r e a l i z a r l a c o n e x i ó n
52 {
53 t r y
54 {
55 // D e f i n i r l o s p a r á m e t r o s d e l a c o m u n i c a c i ó n s e r i a l
56 serialPort1 . PortName = comboBox1 . Text ;
57 serialPort1 . BaudRate = 9600 ;
58 serialPort1 . Par i t y = Par i t y . None ;
59 serialPort1 . DataBi t s = 8 ;
60 serialPort1 . St opBi t s = St opBi t s . One ;
61 serialPort1 . Open ( ) ; // A b r i r l a c o n e x i ó n
```

```

62 Encendido.Enabled = true ;
63 Apagado.Enabled = false ;
64 button1.Text = " Cerrar conexión serie " ;
65 conectado = true ;
66 }
67 catch ( ArgumentException ex ) // Código que se ejecuta en caso de
error
68 {
69 MessageBox . Show( " Error conexión " + ex . Message ) ;
70 serial Port1 . Close ( ) ; // Cerrar la conexión
71 }
72 conectado = true ;
73 }
74 else // Cerrar conexión .
75 {
76 button1.Text = " Iniciar conexión serie " ;
77 conectado = false ;
78 if ( serial Port1 != null )
79 serial Port1.Close ( ) ;
80 }
81 }
82
83 private void Control _Sol ar_Load ( object sender , EventArgs e )
84 {
85 Encendido.Enabled = false ;
86 Apagado . Enabled = false ;
87
88 }
89
90 private void label1_Click ( object sender , EventArgs e )
91 {
92
93 }
94
95 private void label2_Click ( object sender , EventArgs e )
96 {
97
98 }
99
100 private void vScrollBar1_Scroll ( object sender , Scroll Event Args e )
101 {
102
103 serialPort1 . Write( "PWM" ) ;
104 }
105
106 private void comboBox1_SelectedIndexChanged ( object sender , EventArgs e )
107 {
108
109 }
110 }
111 }
1

```

ANEXO 3 Programación del control de iluminación en Arduino

La programación del control de iluminación se realizó en los microcontroladores de la plataforma Arduino. En la programación se consideró a dos estaciones donde se ubicarán cada uno de los microcontroladores. En el control de iluminación se empleó dos tarjetas arduino, la estación uno está conformada por un Arduino MEGA y la estación dos por un Arduino UNO.

```

1 //Se programa el Arduino MEGA como una estación base, para
2 //comunicarse por el puerto serial con el Arduino MEGA.
3 //Declaracion de variables
4 int Pin_echo = 2; //Se configura el pin 2 del arduino como el echo
5 //del sensor ultrasonico.
6 int Pin_trig = 3; //Se establece al pin 3 del arduino como el disparo
7 //del sensor ultrasonico.
8 int led=4; // Establece al pin 4 como led el cual ira aumentando su brillo.
9 int lum=5; // Establece al pin 5 como luminaria del lado opuesto de la vía.
10 int luz=10; // Establece el valor inicial de la intensidad del led
11 int luz2=10; // Establece el valor inicial de la intensidad de la luminaria del lado
12 //opuesto.
13 int i=10; //Variable que inicializa el ciclo de intensidad del led
14 int j=10; //Variable que inicializa la intensidad de las luminarias del lado
15 //contrario de la via
16 char leer;
17 void setup(){
18   Serial.begin(9600);
19   Serial1.begin(9600);
20   pinMode(Pin_trig, OUTPUT); //Configura al disparo del sensor Ultrasonico como
21   //salida conectado en el pin 12 del arduino.
22   pinMode(Pin_echo, INPUT); //Configura como entrada el echo del sensor Ultrasonico
23   //que se conecta al pin 11 del arduino
24 }
25 void loop(){
26   brillo(); //Se llama a la subrutina brillo.
27 }
28 //Empieza la subrutina brillo
29 void brillo(){
30   int m;
31   m = analogRead(A15);
32   if(m >= 532){
33     int pulso, cm; //Se declara 2 variables que permitan analizar
34     //el comportamiento del sensor Ultrasonico.
35     digitalWrite(Pin_trig, LOW); //Establece en estado bajo al disparo
36     //del sensor Ultrasonico.
37     delayMicroseconds(2); //Establece un retardo de 2 microsegundos.
38     digitalWrite(Pin_trig, HIGH); //Establece en estado alto al disparo
39     //del sensor Ultrasonico.
40     delayMicroseconds(10); //Establece un retardo de 10 microsegundos.
41     digitalWrite(Pin_trig, LOW); //Vuelve a un estado bajo al disparo del sensor
42     //Ultrasonico.
43     pulso = pulseIn(Pin_echo, HIGH); //Toma el valor del pulso recibido por el pin 11
44     cm = pulso / 29 / 2; //Convierte el valor recibido por el pin 11 en un
45     //valor
46     //de distancia en una unidad de cm.
47     if(cm <= 70){ //Pregunta si la distancia es menor o igual a un
48     //valor de 70cm
49     while(i < 255){ //Pregunta mientras i sea menor a 255 hara:

```

```

45     analogWrite(led , i);           //Valor del brillo del brillo del led que esta
        ra en aumento
46     delay(100);
47     i++;                           //Incremento del brillo del led
48     delay(100);                     //Retardo de 100 milisegundos
49 }
50 delay(100);
51 for(int x=0;x<=5000;x++){
52     luz=255;                        //Una vez que termina el ciclo y la distancia es
        menora 70cm
53                                     //se establece el brillo maximo del led
54     analogWrite(led , luz); //Valor maximo de intensidad del led.
55 }
56 Serial1.print('a');
57 }
58 else {
59     luz=10;
60     analogWrite(led , luz);
61 }                                     //el Arduino MEGA leera si recibe información por par
        tedel
62                                     //Arduino UNO para encender las luminarias del otro lado de la vía
63 leer=Serial1.read();
64 if(leer='b'){
65     while(j<255){
66         // Pregunta mientras i sea menor a 255 hara :
67         analogWrite(lum , j); //Valor del brillo del brillo del led que estara
            en aumento
68         delay(100);
69         j++; //Incremento del brillo del led
70         delay(100); //Retardo de 100 milisegundos
71     }
72     delay(100);
73     for(int y=0;y<=5000;y++){
74         luz2=255; //Una vez que termina el ciclo y la distancia es menor a 70cm
75                 //se establece el brillo maximo del led
76         analogWrite(lum , luz2); //Valor maximo de intensidad del led.
77     }
78 }
79 }
80 else {
81     analogWrite(led ,0);
82     analogWrite(lum ,0);
83 }
84 }

```

ANEXO 4: Kit Luminarias Solar



TECNOLOGÍA SOLAR APLICADA

CATÁLOGO
2014



LÁMPARAS Y LUMINARIAS SOLARES NÚCLEO LUMÍNICO LED'S

Tecnología de Punta Exclusiva de SAECSA

SAECSA Energía Solar, es líder en la fabricación de Luminarias Solares para Alumbrado Público con núcleo lumínico de Leds en sus modelos URBAN, un sistema con alto rendimiento, durabilidad, estética, ecotécnica y con garantía de encendido los 365 días del año.

Su avanzada tecnología de LED'S permite garantizar el más alto flujo lumínico todo el año, aún bajo condiciones extremas de clima adverso, debido a la integración de la tarjeta electrónica EDOCA desarrollada por SAECSA, la que permite maximizar el rendimiento de la energía almacenada mediante el sistema de modo ahorro en caso de nublados excesivos.

NOTA:

- Este modelo no incluye poste.
- Este modelo se adapta sin problema a postes ya instalados o suministrados por el cliente.
- Se recomienda utilizar poste SAECSA de 9 metros de alto con brazo curvo.





**LUMINARIA SOLAR
URBAN | AR 36 W
LSU-L36-M100-B100**

ELEQUIPO INTEGRA

- Generador fotovoltaico 100W
- Lámpara Urban SAECSA 36W 12 VCD
- Tarjeta inteligente EDOCA
- Cañón de orientación
- Gabinete metálico aislado térmico
- Centro de almacenamiento y distribución de energía 100A-h

CARACTERÍSTICAS

- Consumo: 29 W automatizado
- Intensidad luminosa: 2260 Lúmenes
- Diámetro de iluminación: 20 metros
- Distancia interpostal: 15 metros
- Batería: Ciclo profundo

OPCIONAL

Poste SAECSA con brazo curvo de 6 metros.

PRECIO MXN \$ 13,334.00 + IVA



**LUMINARIA SOLAR
URBAN | AR 58 W
LSU-L58-M120-B200**

ELEQUIPO INTEGRA

- Generador fotovoltaico 120W
- Lámpara Urban SAECSA 58W 12 VCD
- Tarjeta inteligente EDOCA
- Cañón de orientación
- Gabinete metálico aislado térmico
- Centro de almacenamiento y distribución de energía 200 A-h

CARACTERÍSTICAS

- Consumo: 58 W automatizado
- Intensidad luminosa: 4360 Lúmenes
- Diámetro de iluminación: 30 metros
- Distancia interpostal: 20 metros
- Batería: Ciclo profundo

OPCIONAL

Poste SAECSA con brazo curvo de 9 metros.

PRECIO MXN \$ 18,801.72 + IVA



LUMINARIA SOLAR URBAN | AR 78 W LSU-L78-M180-B200

ELEQUIPO INTEGRA

- Generador fotovoltaico 180W
- Lámpara Urban SAECSA 78W 12 VCD
- Tarjeta inteligente EDOCA
- Cañón de orientación
- Gabinete metálico aislado térmico
- Centro de almacenamiento y distribución de energía 200 A-h

CARACTERÍSTICAS

- Consumo: 78 W automatizado
- Intensidad luminosa: 5850 Lúmenes
- Diámetro de iluminación: 30 metros
- Distancia interpostal: 30 metros
- Batería: Ciclo profundo

OPCIONAL:

Poste SAECSA con brazo curvo de 9 metros.

PRECIO MXN \$ 22,420.68 + IVA



LUMINARIA SOLAR URBAN | AR 100 W LSU-L100-M240-B300

ELEQUIPO INTEGRA

- Generador fotovoltaico 240W
- Lámpara Urban SAECSA 100W 12 VCD
- Tarjeta inteligente EDOCA
- Cañón de orientación
- Gabinete metálico aislado térmico
- Centro de almacenamiento y distribución de energía 300 A-h

CARACTERÍSTICAS

- Consumo: 100 W automatizado
- Intensidad luminosa: 8000 Lúmenes
- Diámetro de iluminación: 35 metros
- Distancia interpostal: 30 metros
- Batería: Ciclo profundo

OPCIONAL:

Poste SAECSA con brazo curvo de 9 metros.

PRECIO MXN \$ 29,329.31 + IVA



ANEXO 5: Características del Sensor Ultrasónico para autopistas



Especificaciones Técnicas del Radar SafePace 100™.

Descripción General: El radar SafePace100™ es un radar medidor de velocidad portátil, de bajo costo e ideal para fraccionamientos, asociaciones, comunidades cerradas, caminos privados, centros comerciales, zonas escolares, campus universitarios, zonas de construcción o caminos residenciales. La pantalla que muestra la información es compacta y ligera, además emite luz intermitente de gran intensidad para alertar a los conductores que exceden el límite de velocidad programado en el radar. El letrero que muestra el mensaje de “Su Velocidad” está disponible en amarillo o blanco y también cuenta con gran cantidad de complementos y opciones alternativas de energía, así como más opciones de portabilidad. El radar puede instalarse en minutos, de igual modo su programación es sencilla y rápida.

Dimensiones: Letrero completo para mostrar la leyenda “Su Velocidad”: 58cm x 73cm

Letrero plegable para mostrar la leyenda “Su Velocidad”: 55cm x 77cm

Altura de los Dígitos: 28cm

Ancho de los Dígitos: 13cm

Profundidad del radar: 7.5cm

Peso del Radar: Modelo Eléctrico: 9.5kg

Modelo de 3 celdas: 10.5kg

Modelo de 4 celdas: 11 kg

Modelo Solar: 10.5kg

Peso de la Batería de 3 celdas: 1kg

Peso de la batería de 4 celdas: 2kg

Soporte Universal: De lado del Radar: 1kg

De lado del poste: 2.5kg

Especificaciones: Cubierta protectora de Aluminio: 0.5cm de profundidad

Radar Interno: SS300 Doppler (Aprobado por la FCC)

Vcc: 5.5 DVC a 16 DVC (Máximo 18V)

Icc@12VDC (con el radar encendido siempre): Pantalla en blanco-9.5mA
Pantalla de noche: 21Ma
Pantalla al máximo brillo: 415 mA

Radar RF apagado: 5mW máximo

Radar f-centro: 24.125GHz o 24.200GHz

Temperaturas óptimas para la operación: -14°C - 84°C

Distancia máxima a la que es visible: 105m

Ángulo de Inclinación: 38 x 45

Ángulo de Polarización: Lineal

FCC ID (Radar). TIASS300

Marca CE: Sí

Brillo de la pantalla: 11,000 nits máximo

550 nits (de noche)

Lentes Ópticos: 209 lentes

Colores aprobados por MUTCD

Interfaz amigable con el usuario

No sellado y ventilado

Aprovechamiento de Energía: -El mejor aprovechamiento de energía en aparatos de su clase

-El radar SS300 ocupa poca energía para eliminar uso innecesario del CPU

-Sensor de luz natural y control automático del brillo incluido.

-Compensador de temperatura para las luces LED

-Alta eficiencia del regulador de LED

-Si no hay circulación el radar automáticamente disminuye su consumo de energía al mínimo (1w).

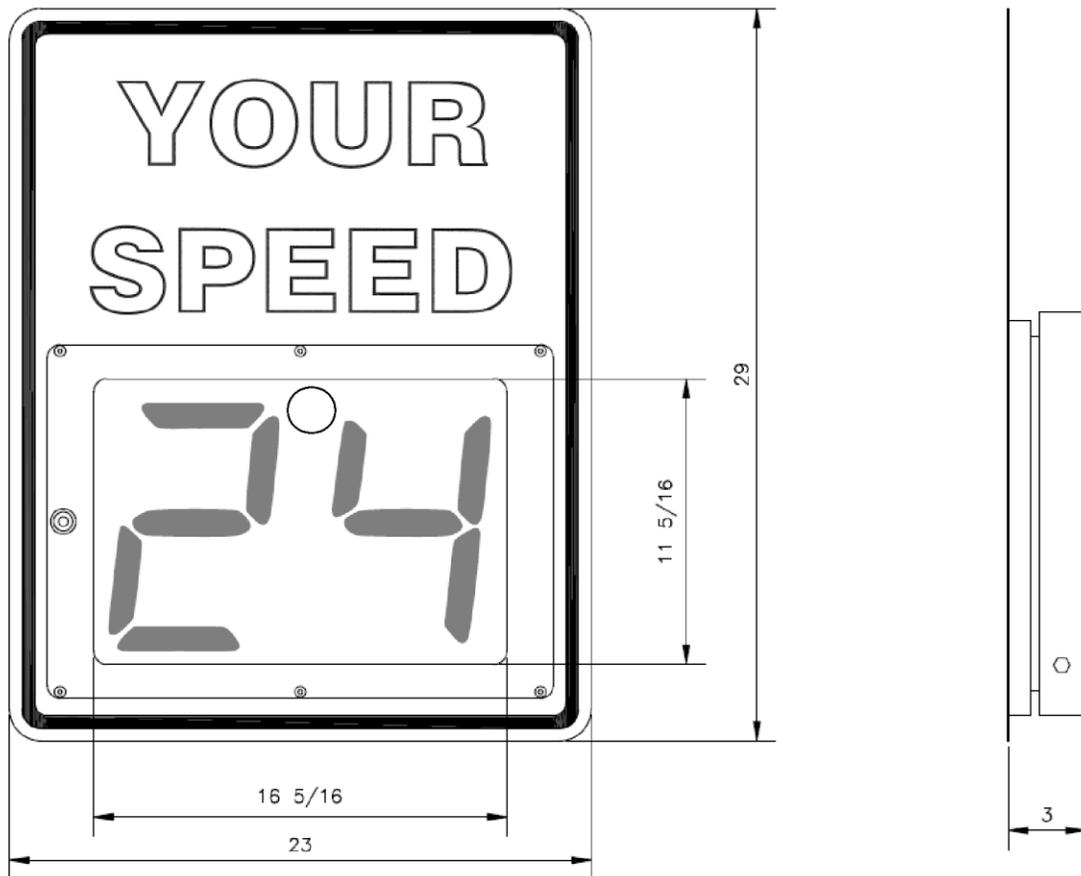
Opciones de Energía: -Corriente AC

-Las opciones de Batería ofrecen mayor rendimiento con 9.6V, la batería 10Ah es suficiente para dos semanas y con 12.8V, la batería de 15Ah es suficiente para cuatro semanas de operación ininterrumpida.

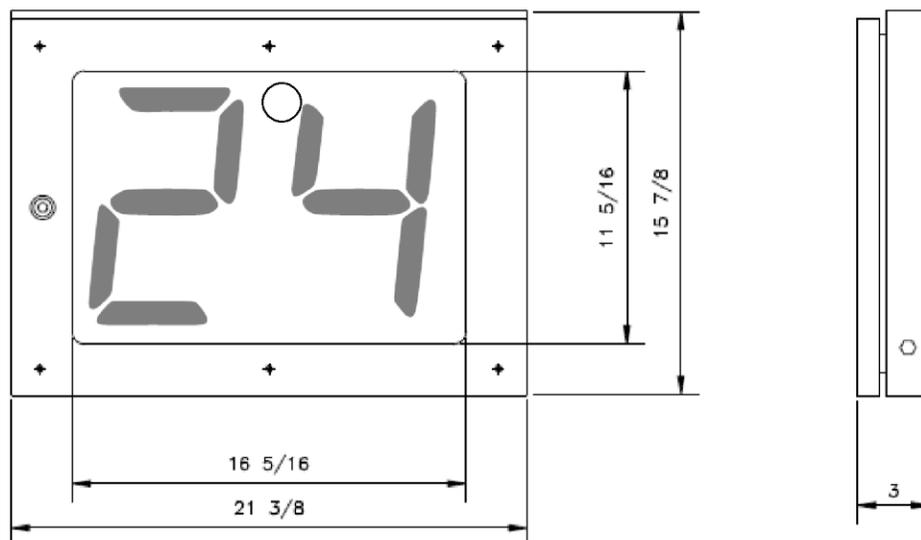
-Fuente de energía solar opcional.

Un año de garantía en las partes y funcionamiento del SafePace 100™ bajo condiciones de uso normales, exceptuando Abuso, robo o daño intencional.

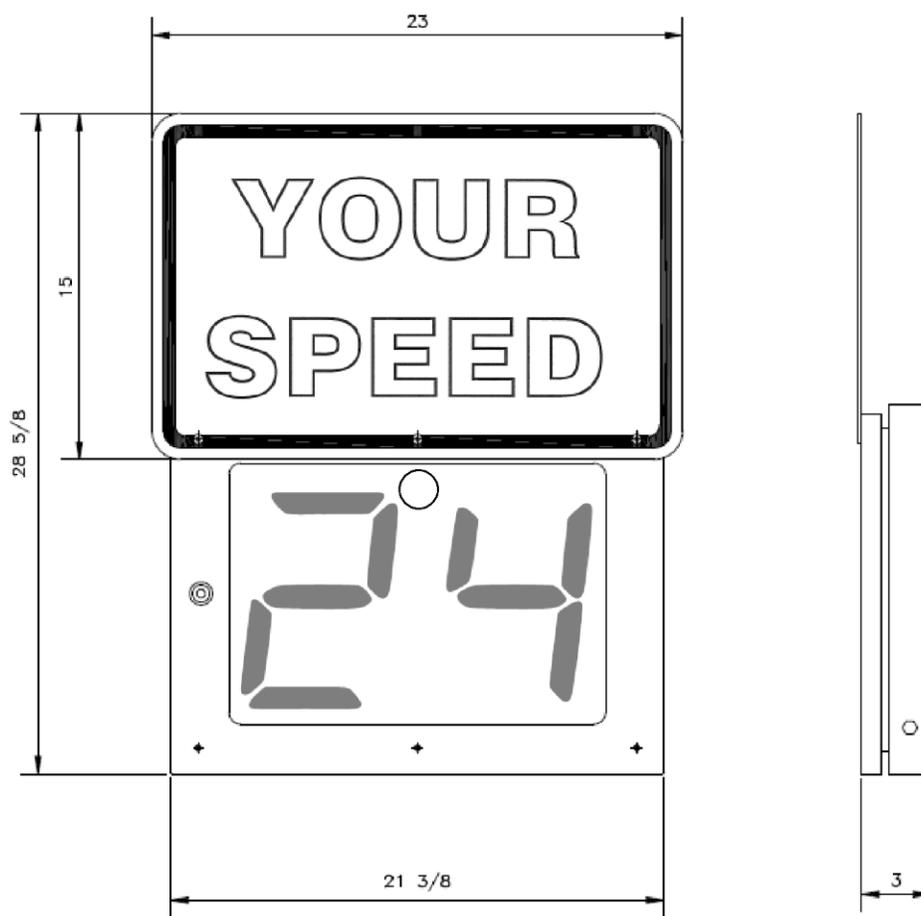
Dispositivo SP-100 con el letrero “Su Velocidad”



Dispositivo de Radar SP-100 sin el letrero



Dispositivo SP-100 con el letrero opcional plegable



Panel Solar (p/n: SP1S500)

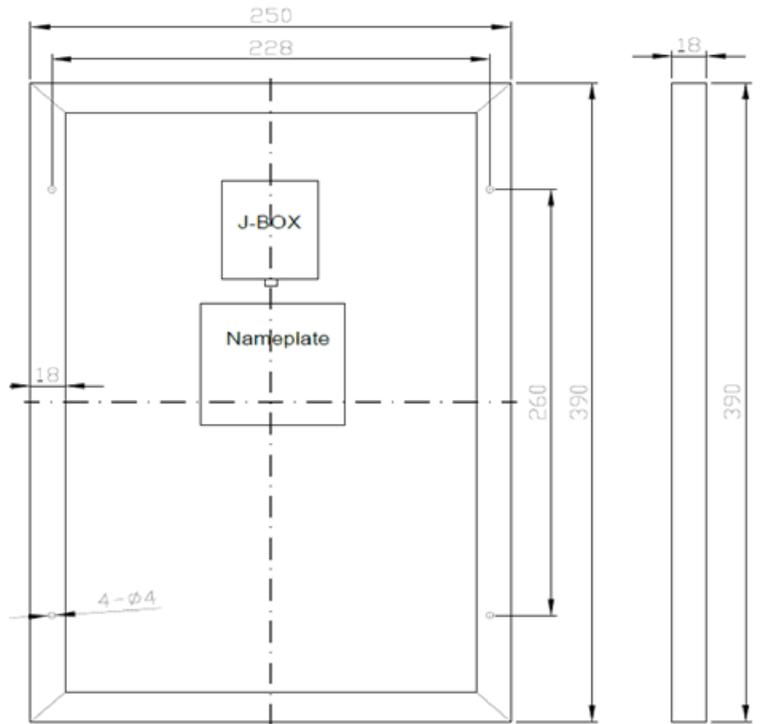
Voltaje de Salida: 10W

Rango de temperaturas en las que opera: -40°C -85°C

Construcción:

- Laminado: Vidrio/EVA / TPT (tedlar/pet/tedlar) o TPE
- Frente: vidrio templado de alta transmisión de 3.2mm
- Marco: Marco claro de aluminio anodizado
- Salida: Caja de conexiones

Dibujo Dimensional: (dimensiones en mm)



ANEXO 6 Costo Real del Sistema

Costo del sistema de iluminación Propuesto

Detalle de los Equipos	Costo Unitario
Kit Luminaria Solar Urban AR 100W	\$1792,610
Sensor Ultrasonidos Radar	\$ 730,000
Kit Módulos Xbee S2	\$ 120,000
Módulo Arduino LEONARDO	\$ 28,000
Total costo materiales	\$2670,610
*Costo Instalación y Transporte (25%)	\$ 667,653
Costo Inversión por luminaria	\$3338,263
*Costo Mantenimiento por luminaria (20%)	\$ 534,122
*Costo Cambio Baterías por luminaria (20%)	\$ 358,522

* Los costos del cambio de baterías según datos de la Agencia Internacional de Energía se reducirán anualmente conforme avance el desarrollo tecnológico, de igual manera los costos de instalación se reducirán en base a la potencia pico instalado. Asimismo, el control de iluminación propuesto prevé minimizar los costes de operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico de iluminación inteligente.

ANEXO 7: Estudio Económico del Recuperación de la Inversión

ANALISIS DEL PAGO Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Coste del sistema \$ 2670.61
 100Km de autopistas 3500 luminarias
 Inversión inicial \$9347135
 Tasa del interés 12%
 Años 25

$$Anualidad = Inversión Inicial \left(\frac{ti * (1 + ti)^{años}}{(1 + ti)^{años} - 1} \right)$$

AÑO	INTERÉS (12%)	Anualidad	Pago a Capital	Saldo
0				9347135.000
1	1121656.200	1191759.430	70103.230	9277031.770
2	1113243.812	1191759.430	78515.618	9198516.152
3	1103821.938	1191759.430	87937.492	9110578.660
4	1093269.439	1191759.430	98489.991	9012088.669
5	1081450.640	1191759.430	110308.790	8901779.878
6	1068213.585	1191759.430	123545.845	8778234.034
7	1053388.084	1191759.430	138371.346	8639862.687
8	1036783.522	1191759.430	154975.908	8484886.779
9	1018186.414	1191759.430	173573.017	8311313.763
10	997357.652	1191759.430	194401.779	8116911.984
11	974029.438	1191759.430	217729.992	7899181.992
12	947901.839	1191759.430	243857.591	7655324.400
13	918638.928	1191759.430	273120.502	7382203.898
14	885864.468	1191759.430	305894.963	7076308.935
15	849157.072	1191759.430	342602.358	6733706.577
16	808044.789	1191759.430	383714.641	6349991.936
17	761999.032	1191759.430	429760.398	5920231.538
18	710427.785	1191759.430	481331.646	5438899.893
19	652667.987	1191759.430	539091.443	4899808.450
20	587977.014	1191759.430	603782.416	4296026.033
21	515523.124	1191759.430	676236.306	3619789.727
22	434374.767	1191759.430	757384.663	2862405.064
23	343488.608	1191759.430	848270.823	2014134.241
24	241696.109	1191759.430	950063.321	1064070.920
25	127688.510	1191759.430	1064070.920	0.000

EVALUACION FINANCIERA

INDICADORES FINANCIEROS

FLUJO NETO DE EFECTIVO EN 100Km DE AUTOPISTA

Año de operación	Ingresos totales*	Inversiones para el proyecto				Valor de Rescate		Flujo Neto de Efectivo
		Egresos totales	Mantenimiento	Cambio Baterías	Coste instalacion y transporte	Valor Residual	Recup. De cap. De Trab.	
0		1,295,000.00			3,885			-1,298,885.00
1	148,821.75		4,464.65					144,357.10
2	148,821.75		4,464.65					144,357.10
3	148,821.75		4,464.65					144,357.10
4	148,821.75		4,464.65					144,357.10
5	148,821.75		4,464.65	7,000				137,357.10
6	148,821.75		4,464.65					144,357.10
7	148,821.75		4,464.65					144,357.10
8	148,821.75		4,464.65					144,357.10
9	148,821.75		4,464.65					144,357.10
10	148,821.75		4,464.65	7,000				137,357.10
11	148,821.75		4,464.65					144,357.10
12	148,821.75		4,464.65					144,357.10
13	148,821.75		4,464.65					144,357.10
14	148,821.75		4,464.65					144,357.10
15	148,821.75		4,464.65	7,000				137,357.10
16	148,821.75		4,464.65					144,357.10
17	148,821.75		4,464.65					144,357.10
18	148,821.75		4,464.65					144,357.10
19	148,821.75		4,464.65					144,357.10
20	148,821.75		4,464.65	7,000				137,357.10
21	148,821.75		4,464.65					144,357.10
22	148,821.75		4,464.65					144,357.10
23	148,821.75		4,464.65					144,357.10
24	148,821.75		4,464.65					144,357.10
25	148,821.75		4,464.65	7,000				137,357.10

CALCULO DEL VAN, R/B/C Y TIR CON UNA TASA DE DESCUENTO DEL 10%

Año de operación	Costos totales (\$)	Beneficios totales (\$)	Factor de actualización 10.0%	Costos actualizados (\$)	Beneficios actualizados (\$)	Flujo neto de efectivo act. (\$)
0	1,298,885	0	1.000	1,298,885.00	0.00	-1,298,885.00
1	4,465	148,822	0.909	4,058.78	135,292.50	131,233.73
2	4,465	148,822	0.826	3,689.80	122,993.18	119,303.39
3	4,465	148,822	0.751	3,354.36	111,811.98	108,457.62
4	4,465	148,822	0.683	3,049.42	101,647.26	98,597.84
5	11,465	148,822	0.621	7,118.65	92,406.60	85,287.95
6	4,465	148,822	0.564	2,520.18	84,006.00	81,485.82
7	4,465	148,822	0.513	2,291.07	76,369.09	74,078.02
8	4,465	148,822	0.467	2,082.79	69,426.44	67,343.65
9	4,465	148,822	0.424	1,893.45	63,114.95	61,221.50
10	11,465	148,822	0.386	4,420.12	57,377.23	52,957.11
11	4,465	148,822	0.350	1,564.83	52,161.12	50,596.28
12	4,465	148,822	0.319	1,422.58	47,419.20	45,996.62
13	4,465	148,822	0.290	1,293.25	43,108.36	41,815.11
14	4,465	148,822	0.263	1,175.68	39,189.42	38,013.74
15	11,465	148,822	0.239	2,744.55	35,626.74	32,882.20
16	4,465	148,822	0.218	971.64	32,387.95	31,416.31
17	4,465	148,822	0.198	883.31	29,443.59	28,560.28
18	4,465	148,822	0.180	803.01	26,766.90	25,963.89
19	4,465	148,822	0.164	730.01	24,333.55	23,603.54
20	11,465	148,822	0.149	1,704.15	22,121.40	20,417.26
21	4,465	148,822	0.135	603.31	20,110.37	19,507.06
22	4,465	148,822	0.123	548.46	18,282.15	17,733.69
23	4,465	148,822	0.112	498.60	16,620.14	16,121.53
24	4,465	148,822	0.102	453.28	15,109.22	14,655.94
25	11,465	148,822	0.092	1,058.14	13,735.65	12,677.51
Total	1,434,037	3,720,544		1,349,818.40	1,350,860.98	1,042.58

Los indicadores financieros que arroja el proyecto son:

VAN=	1042.58	Se acepta
TIR =	10.01%	Se acepta
B/C =	1.00	Se acepta

**ANEXO 8: Artículo publicado en la Revista MASKANA indexada en
LATINDEX**

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 (MTOP, 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 (MTOP, 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 (Roosegaard & 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.

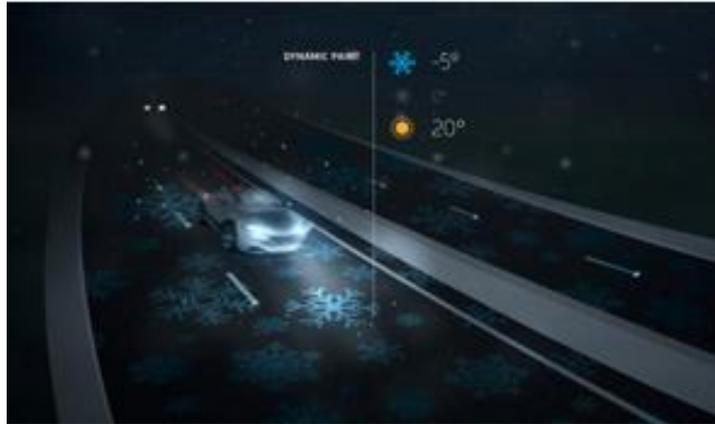


Figura 2. Paneles iterativos de información meteorológica en las vías (Roosegaard & Heijmans, 2012).

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>Min. (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	Min. (lux)	0.5	Avg. (lux)	3.02	Avg. min.	6.04	Watts	79	PF	0.98	CCT	2759
Máx. (lux)	11.2														
Min. (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>Min. (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	Min. (lux)	6.3	Avg. (lux)	11.56	Avg. min.	1.83	Watts	110	PF	0.99	CCT	6667
Máx. (lux)	27														
Min. (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>Min. (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	Min. (lux)	2.6	Avg. (lux)	9.96	Avg. min.	3.83	Watts	115	PF	0.93	CCT	2097
Máx. (lux)	24.1														
Min. (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).

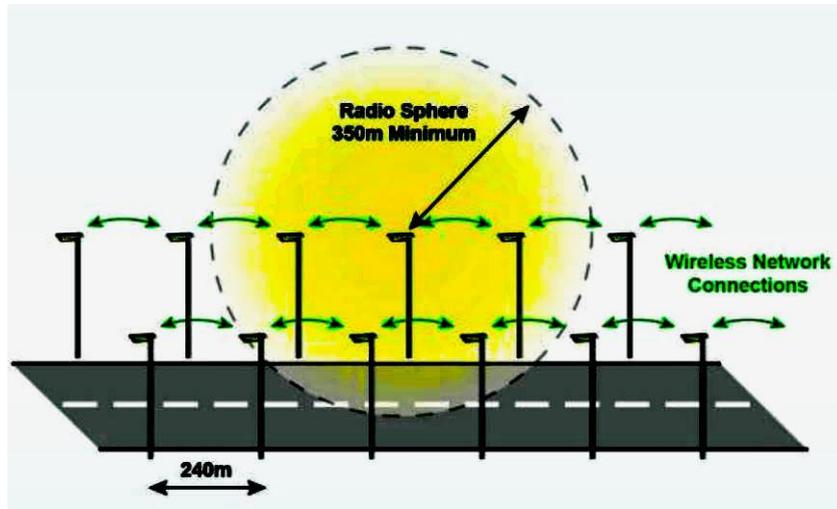


Figura 4. Sistemas inteligentes de iluminación en las autopistas (Georges & Slaoui, 2011).

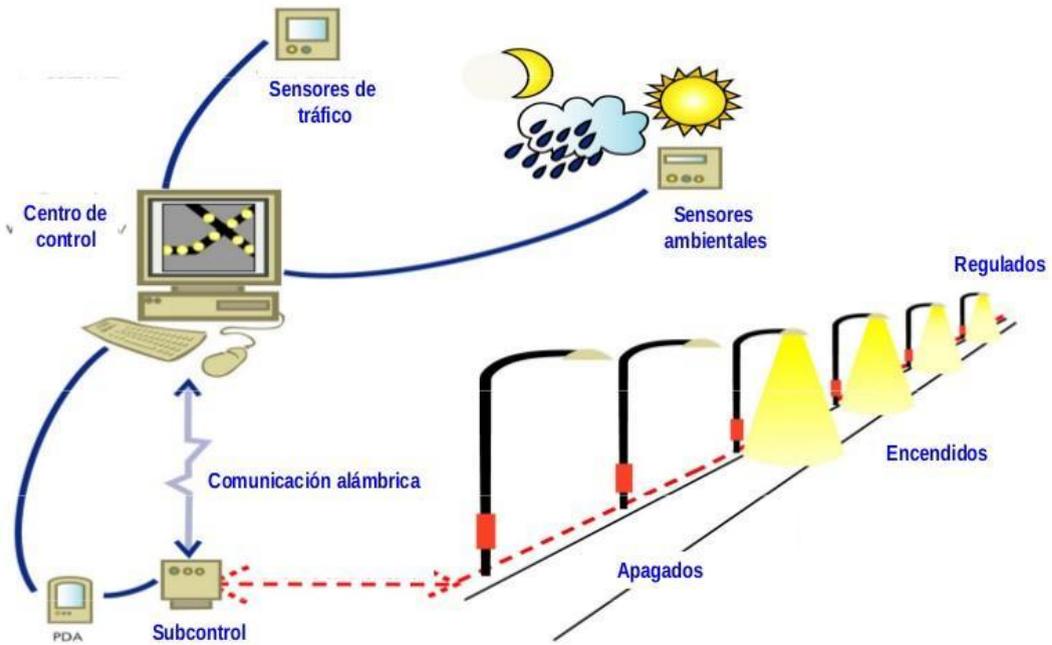


Figura 5. Sistemas de comunicación de las luminarias en autopistas inteligentes (Venkata Lakshmi *et al.*, 2012).

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 2012 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 Looor (2012) la factura eléctrica en el alumbrado público entre el año 2006 y 2012 aumentó de 85,8 a 104,3 millones de dólares 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 el 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 Wp⁻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 Wp	Potencia solar instalada MWp	Coste instalación fotovoltaica millones de dólares		
				2013 6,0 USD Wp ⁻¹	2016 3,0 USD Wp ⁻¹	2017 2,5 USD Wp ⁻¹
Na/Hg	70-400 / 1 5-250	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. Copenhybrid—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 008/011 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. Katkooi, 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_INER1.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.
- 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. Owllet. 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.