

UNIVERSIDAD CATÓLICA BOLIVIANA “SAN PABLO”

Unidad Académica Santa Cruz

Carrera de Ingeniería Industrial



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DE
TECNOLOGÍAS MÁS EFICIENTES PARA EL SISTEMA DE
ALUMBRADO PÚBLICO DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA**

Presentado por: Est. Adriana Andrea Choque Caballero

Asesor: Ing. Zorel Gómez

Santa Cruz – Bolivia

Octubre 2017

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS MÁS EFICIENTES PARA EL SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA

Adriana A. Choque Caballero^a; Zorel Gómez Vargas^b, Fernando La Torre Zurita^c

^a *Estudiante de Ingeniería Industrial,*

Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana. Email: adrianhacc@gmail.com

^b *Docente Investigador*

Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana. Email: zgomez@ucbscz.edu.bo

^c *Docente Invitado*

University College Cork. Email: fertz@gmail.com

El sostenido crecimiento económico de Santa Cruz de la Sierra, situada entre una de las ciudades con más rápido crecimiento demográfico en el mundo (novena ciudad de América Latina con un promedio del 6% por año), implica a su vez un crecimiento energético, cuyo desafío en la actualidad radica en que dicha expansión sea ambientalmente sostenible y a su vez satisfaga las necesidades a largo plazo de una ciudad en constante crecimiento. Actualmente el Sistema de Alumbrado Público Nacional representa el 4% del consumo de energía eléctrica en Bolivia. De acuerdo al Ministerio de Hidrocarburos y Energía, el Departamento de Santa Cruz (área oriental de operación del SIN) es el que demanda el 43% del total de la demanda de energía al Sistema Eléctrico Nacional.

El Alumbrado Público, actualmente emplea tecnologías de vapor de sodio a alta presión (HPS/SAP) para iluminar las calles y avenidas, sin embargo en los últimos años se han desarrollado nuevos aportes tecnológicos desde la tecnología de descarga a alta intensidad hasta inducción y LED; identificándose así que existe una capacidad de ahorro en el caso de un cambio a tecnologías más eficientes. Expertos estiman un potencial medio de ahorro del 10% que supondría también la reducción de emisiones de CO₂/año y por ende un mejor cumplimiento con la coyuntura política nacional e internacional referente a Eficiencia Energética. (IDEA & CEI, 2001, p. 7).

Hasta el mes de febrero de la gestión 2017, según el Informe de Consumo por Luminarias Instaladas por parte de la Dirección de Alumbrado Público (DAP) se conoce que el Sistema de Alumbrado Público de Santa Cruz de la Sierra trabaja con luminarias de diferentes tecnologías, entre las que se encuentran: 1) Mercurio de Alta Presión (MAP), 2) Halogenuros Metálicos (HLG), 3) Hydrargyrum Quartz Iodide (HQI)¹, 4) Fluorescente, y 5) Sodio de Alta Presión (SAP). Representando éste último más del 99% del total de luminarias en operación en la ciudad. Hasta febrero del 2017, existen aproximadamente 142.000 luminarias y se estima que hasta el mes de Marzo el consumo mensual del total de luminarias será de 5.584.903KWh lo cual representa aproximadamente 4.627.211,5 Bs/mes (DAP, 2017). Sin embargo es importante resaltar que diariamente se instalan más luminarias según la demanda de la población, y que este consumo mensual está en incremento.

El hecho de que el sistema de Alumbrado Público, de la ciudad de Santa Cruz emplee más del 99% tecnología tradicional, implica que el consumo de energía eléctrica no es eficiente. Es por esta razón que la DAP tomo la decisión de realizar el cambio tecnológico a LED. Sin embargo se debe considerar que este cambio o sustitución tecnológica no sigue un proceso de selección sistemático dentro del área de Planificación de la DAP; y que conlleva un costo de inversión inicial en razón de 1:3. Asociado a esto actualmente existen altos costos de mantenimiento y operación del Sistema de Alumbrado Público por la tecnología actual empleada.

La metodología utilizada en este proyecto combina un método multicriterio de toma de decisiones como el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) en primera instancia que permite obtener valores cuantitativos a partir de valoraciones relativas de expertos y una segunda parte en la que se valora económicamente las opciones mejor posicionadas. Considerando que este enfoque, necesita sólo un pequeño número de encuestados con experiencia y conocimiento (Kim y Kumar, 2009) se involucra a expertos tanto de la Dirección de Alumbrado Público, como de las empresas proveedoras de luminarias urbanas. Luego de obtener una lista de alternativas con mejor calificación según el grupo de expertos se procede a la evaluación económica con criterios como el Costo de Vida anualizado (CCVA) y el Costo de Energía Conservado (CEC). Finalmente se realiza una decisión basada en criterios técnico económicos operativizando varios aspectos del sector y el costo de adquisición y mantenimiento de los equipos.

Palabras Clave: Cambio tecnológico, Sistema de Alumbrado Público, Toma de Decisiones, Proceso Analítico Jerárquico (PAJ/AHP).

Introducción

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente según el Sistema Interconectado Nacional (SIN) el Alumbrado Público representa el 4% del consumo de energía eléctrica en Bolivia. Por otro lado, según el Ministerio de Hidrocarburos y Energía, el Departamento de Santa Cruz tiene un requerimiento energético que asciende a más del 43% del total de la demanda de energía del Sistema Eléctrico Nacional, lo cual incluye a los sectores industrial agropecuario, minería, hidrocarburos y transporte (Ministerios de Hidrocarburos y Energía, 2014, p.82).

Un sistema de Alumbrado Público en general tiene como función principal iluminar los entornos urbanos, reduciendo los accidentes nocturnos, facilitando el flujo de tráfico y promoviendo la seguridad ciudadana y el desarrollo de diferentes actividades nocturnas. Actualmente emplea diferentes tipos de tecnologías, entre las principales se puede mencionar: Lámparas de descarga, mismas que incluyen lámparas incandescentes, fluorescente tubular, de vapor de mercurios a alta presión, de halogenuros metálicos, lámparas de inducción y finalmente la tecnología LED, que a la fecha ha llegado a superar a las demás tecnologías en la mayoría de los parámetros técnicos y constituye en una nueva tendencia en Sistemas de Alumbrado Público (SG Automotive, 2017).

De acuerdo al Departamento de la Conservación del Medio Ambiente de Nueva York (Estados Unidos de América) la iluminación de las calles puede representar hasta el 40 por ciento de la factura de electricidad de un municipio (DEC, 2017). Sin embargo, varios casos de estudio han demostrado que los municipios pueden reducir los costos de iluminación de sus calles haya en un 65% al cambiar a las luces de calle por tecnología LED y aún más si incorporan controles avanzados de iluminación (FORBES, 2013). Estos ahorros de energía se traducen directamente en ahorros para los contribuyentes, además los municipios también pueden capturar los ahorros de costos de mantenimiento asociados con la vida útil proyectada de un alampara LED y disminuir los requerimientos de mantenimiento en comparación con las luces de calle tradicionales (DOE, 2013).

De acuerdo al Informe de Consumo por Luminarias Instaladas emitido por la Dirección de Alumbrado Público (DAP), se conoce que el Sistema de Alumbrado Público de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra al mes de Febrero del 2017 contaba con 142.000 luminarias, mismas que corresponden a diferentes tecnologías, tales como: 1) Mercurio de Alta Presión (MAP), 2) Haogenuros Metalicos (HLG), 3) Hydrargyrum Quartz Iodide (HQI), 4) Fluorescente 5) Sodio de Alta Presión (SAP), representando este último más del 99% del total de luminarias en operación. Por otro lado, se estima que hasta el mes de Marzo el consumo mensual del total de luminarias en operación era de 5.417.463 KWh lo cual representa aproximadamente 4.627.211,5 Bs./mes. Sin embargo es importante resultar que diariamente se instalan más luminarias según la demanda de la población, y que este consumo mensual esta en incremento.

1.1.Planteamiento del problema

El hecho de que el Sistema de Alumbrado Público de la ciudad de Santa Cruz emplee en más del 99% de sus lámparas tecnología convencional tradicional (SAP), implica que el consumo de energía eléctrica no es eficiente, existe un mayor consumo de potencia eléctrica,

lo cual a su vez se traduce en mayor generación de energía eléctrica mayor contaminación ambiental, por la emisión de gases de efecto invernadero, y elevados costos de mantenimiento y operación. Es así que la DAP ha tomado la decisión de reducir el consumo de energía eléctrica del Sistema de Alumbrado Público en general a través de una migración de la tecnología SAP a LED.

Sin embargo dentro de este proceso de cambio tecnológico, existen varias calidades de tecnologías LED (SG Automotive, 2017); las cuales son de difícil identificación ya que requieren de conocimiento técnico y específico y sobre todo de un proceso de selección sistemático. A la fecha, la DAP cuenta con criterios técnicos definidos para este proceso de selección, donde se remite a verificar si la tecnología propuesta cumple o no con determinados criterios. No tiene definido ningún tipo de jerarquía entre los criterios evaluados, lo cual ocasiona que se pueda seleccionar una tecnología LED por simple mayoría de cumplimiento de los criterios definidos, sin identificar el grado y/o calidad ni jerarquía de los mismos. En lo referente a los indicadores económicos, solo se selecciona la opción que sea más económica, omitiendo otro tipo de indicadores que son de vital importancia para este tipo de inversión y que brindan una mejor visión de este cambio tecnológico en el tiempo (tasa interna de retorno, costo de ciclo de vida anualizado, costo de energía conservada, etc.).

Es así, que surge la necesidad de definir un método sistemático para la selección de tecnologías que permitan realizar este cambio tecnológico de la manera más efectiva y lograr seleccionar la tecnología más eficiente considerando que los ratios de inversión en este tipo de proceso es de 1:3 y que un proceso de toma de decisiones efectivo es un factor crítico de éxito en estas implementaciones.

Para identificar una forma adecuada para seleccionar tecnologías se considera la siguiente **Pregunta de Investigación:** *¿Cuál es la metodología más efectiva para realizar un cambio tecnológico en un Sistema de Alumbrado Público?*

1.2.Objetivo General

Proponer y validar una metodología para seleccionar tecnologías eficientes en el consumo de energía eléctrica para un Sistema de Alumbrado Público.

1.3.Objetivo Específicos

1. Realizar un diagnóstico del Sistema de Alumbrado Público de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.
2. Seleccionar la metodología adecuada para la toma de decisiones multicriterio relacionada con cambios tecnológicos.
3. Diseñar una metodología para la selección de tecnologías más eficientes para un Sistema de Alumbrado Público.
4. Validar la metodología diseñada a través de un caso de estudio: Sistema de Alumbrado Público de Santa Cruz de la Sierra.

II. REVISIÓN LITERARIA

2.1. Características y magnitudes luminosas:

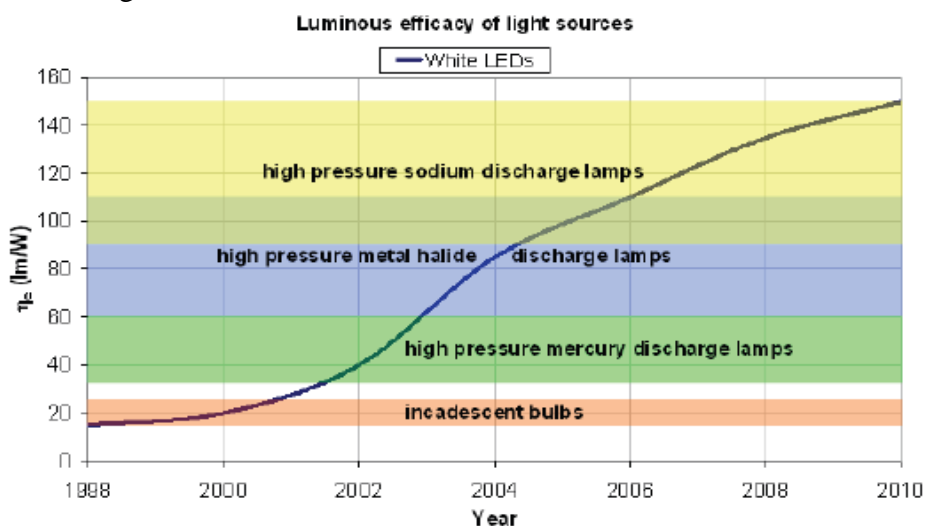
2.1.1. Flujo Luminoso

Energía luminosa o cantidad de luz radiada al espacio por unidad de tiempo que los seres humanos perciben proveniente de una fuente, y se mide en lúmenes (Lm). El flujo luminoso no se distribuye por igual en todas las direcciones del espacio, sino que depende del dispositivo empleado para la iluminación (Ramirez, 1999, p. 38).

2.1.2. Eficacia luminosa

La eficiencia energética de las fuentes de luz se mide típicamente en lúmenes por vatio (lm / W). Se conoce como eficacia luminosa a la cantidad de luz producida por cada vatio de electricidad consumida (DOE, 2009, p. 2).

Figura 1. Incremento de la eficacia luminosa desde 1998



Fuente: (Balsky & Bayer, 2010, p. 1)

2.1.3. Vida útil

Tiempo de duración de una lámpara en horas promedio, y se calcula en años según el tiempo de funcionamiento. La vida útil de algunas luminarias se define como el número de horas durante las cuales el dispositivo mantiene al menos el 70% de su salida de luz inicial.

Sin embargo una definición de vida útil que se centra en el mantenimiento del lumen es inadecuada para las luminarias. El mantenimiento del lumen es sólo un componente de la vida útil de un sistema complejo, cómo una luminaria que puede estar sujeta a otros mecanismos de fallo como cambios de color, degradación del reflector o incluso falla catastrófica. Las fallas prematuras debidas a la temperatura excesiva son todavía relativamente comunes (DOE, 2010, p.76).

Cuadro 1: Características técnicas de las diferentes tecnologías en luminarias.

| light technology | life time | lumens per watt | color temperature | CRI (color rendering index) | ignition time | considerations |
|----------------------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|---------------|---|
| incandescent light | 1.000 - 5.000 | 11 - 15 | 2.800K | 40 | instant | very inefficient, short life time |
| mercury vapour light | 12.000 - 24.000 | 13 - 48 | 4.000K | 15 - 55 | up to 15 min | very inefficient, ultraviolet radiation, contains mercury |
| metal halide light | 10.000 - 15.000 | 60 - 100 | 3.000-4.300K | 80 | up to 15 min | high maintenance UV radiation, contains mercury and lead, risk of bursting at the end of life |
| high pressure sodium light | 12.000 - 24.000 | 45 - 130 | 2.000K | 25 | up to 15 min | low CRI with yellow light, contains mercury and lead |
| low pressure sodium light | 10.000 - 18.000 | 80 - 180 | 1.800K | 0 | up to 15 min | low CRI with yellow light, contains mercury and lead |
| fluorescent light | 10.000 - 20.000 | 60 - 100 | 2.700-6.200K | 70 - 90 | up to 15 min | UV radiation, contains mercury, prone to glass breaking, diffused non-directional light |
| compact fluorescent light | 12.000 - 20.000 | 50 - 72 | 2.700-6.200K | 85 | up to 15 min | low life / burnout, dimmer in cold weather (failure to start), contains mercury |
| induction light | 60.000 - 100.000 | 70 - 90 | 2.700-6.500K | 80 | instant | higher initial cost, limited directionality, contains lead, negatively affected by heat |
| LED light | 50.000 - 100.000 | 70 - 150 | 3.200-6.400K | 85 - 90 | instant | relatively higher initial cost |

Fuente: (SG Automotive, 2017)

2.1.4. Temperatura de color (TC)

Describe el aspecto relativo del color de una fuente de luz, indicando si aparece más amarillo/oro o más azul, en términos de la gama de tono. La TC esta dado en Kelvin (unidad SI de Temperatura absoluta) y se refiere a la apariencia de un cuerpo negro calentado teóricamente a altas temperaturas. Como el cuerpo negro se pone más caliente, se vuelve rojo, anaranjado, amarillo, blanco y finalmente azul. La TC de una fuente de luz es la Temperatura (en K) en que el cuerpo negro calentado coincide con el color de la fuente de luz, y da una idea del color de la luz de una lámpara (DOE, 2008b, p. 1).

Figura 2: Temperaturas de color (expresado en grados Kelvin)



(DOE, 2008b, p. 1)

2.1.5. Índice de reproducción cromática (IRC)

El Índice de representación de color (CRI) indica qué tan bien una fuente de luz reproduce los colores, en una escala de 0 a 100, en comparación con una fuente de luz de referencia con temperatura de color similar. El procedimiento de prueba establecido por La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) consiste en medir hasta qué punto una serie de ocho muestras de color estandarizadas difieren en apariencia cuando se ilumina bajo una fuente de luz dada. El "cambio" medio en las ocho muestras de color se reportan como Ra o CRI (DOE, 2008b, p. 1).

Cuadro 2: Grupos de reproducción de color

| Light sources can be easily assigned to different colour rendering properties on the basis of the R_a index: | | | |
|--|-------------|--|--|
| Properties | R_a index | | |
| Very good | 90 – 100 | | |
| Good | 80 – 89 | | |
| Satisfactory | 70 – 79 | | |
| Satisfactory | 60 – 69 | | |
| Adequate | 40 – 59 | | |

| | Colour temperature | Colour rendering | Light colour |
|---------------------|--------------------|------------------|--------------|
| Black body radiator | 4000 K | $R_a = 100$ | Ideal value |
| Lamp A | 4000 K | $R_a \geq 90$ | 940 |
| Lamp B | 4000 K | $R_a \geq 80$ | 840 |
| Lamp C | 4000 K | $R_a \geq 60$ | 640 |

(OSRAM, 2010, p. 3)

El rendimiento de color "ideal" RC es de 100 para cada temperatura. Cuanto mayores sean las diferencias de color entre la comparación de una lámpara y el cuerpo negro a la misma temperatura de color, menor es el índice de reproducción cromática RC (OSRAM, 2010, p. 3).

2.2.Lámparas LED

Una lámpara LED, se constituye de dispositivos electrónicos que permiten que la electricidad viaje en una sola dirección, emiten luz cuando la corriente eléctrica pasa a través de ellos.

Como un diodo normal, el LED consiste en un chip de un material semiconductor impregnado con impurezas para crear una unión p-n. En estado estacionario, los portadores de signo opuestos (electrones y agujeros) no pueden penetrar la región de unión debido a un campo de carga espacial desarrollado.

Cuando la unión de un LED está polarizada hacia delante, como en otros diodos, la corriente fluye fácilmente desde el lado p, o ánodo, hasta el lado n, o cátodo, pero no en la dirección inversa. Cuando los electrones cruzan la unión desde el n- hasta el material de tipo p, el proceso de recombinación electrón-agujero produce fotones en un proceso

llamado electroluminiscencia, entonces la superficie expuesta de un semiconductor puede emitir luz (Mottier, 2009, p. 11).

Los diodos emisores de luz se están desarrollando rápidamente en la producción de luz, reproducción de color, eficiencia y confiabilidad. Esta última tecnología LED de alta calidad ya está superando todas las demás tecnologías disponibles por todos los parámetros técnicos. Para beneficiarse plenamente de ventajas sobresalientes es importante reconocer la diferencia entre las diferentes calidades de tecnologías LED de última generación (SG Automotive, 2017).

2.3.Lámpara Vapor de Sodio a Alta Presión

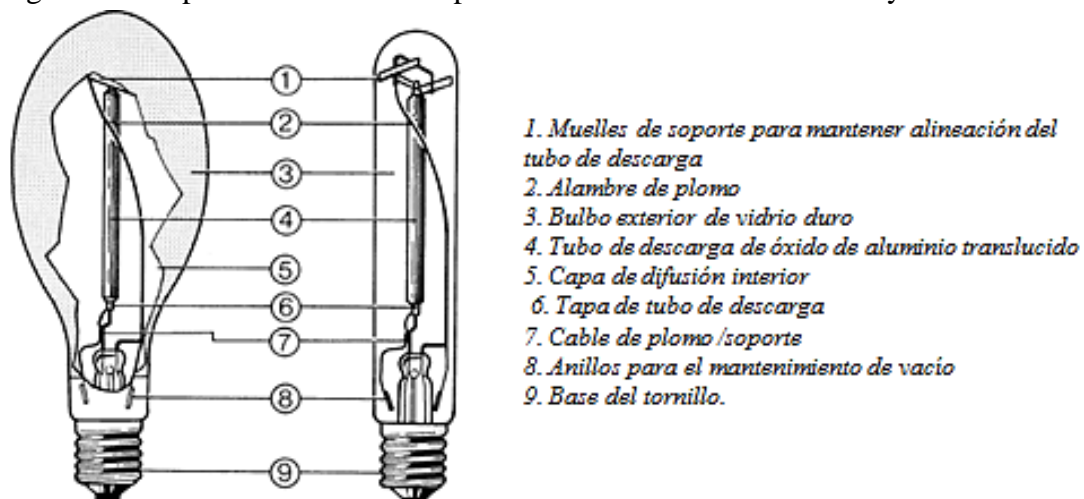
Lámparas de sodio de alta presión (SON, SON / T, SON / H, es una lámpara de descarga desarrollada más recientemente que tiene aproximadamente el doble de la eficacia de la lámpara de vapor de mercurio de alta presión (Ver Figura 8.13).

En condiciones normales de funcionamiento, el gas de la atmósfera del tubo de descarga consiste en una mezcla de sodio vaporizado y mercurio a una presión entre 13 kPa y 26 kPa, con una pequeña cantidad de gas inerte para facilitar su encendido.

La representación cromática y la apariencia de color de las lámparas de sodio de alta presión son más que adecuados para la mayoría de las aplicaciones de iluminación de carreteras; en efecto, la iluminación con estas lámparas se considera a menudo más agradable que la iluminación con mercurio.

Esta lámpara tiene mayor eficacia que la lámpara de mercurio, están disponibles con dos tipos de bombilla exterior: vidrio transparente tubular (SONjT) y ovoide (SON) (Ver Figura 8.15). La versión ovoide tiene la misma forma que la lámpara HPL-N (mercurio de alta presión). La bombilla está recubierta dentro con un polvo difusor que sirve para ampliar el área de emisión de luz, disminuyendo así la luminancia de la lámpara (Van Bommel & Boer, 1980, p. 90).

Figura 3: Lámpara de sodio de alta presión en versión: ovoide difusa y claro tubular.



Fuente: (Van Bommel & Boer, 1980, p. 90).

2.4. Implementación de Tecnología LED en el Sistema de Alumbrado Público en otros países.

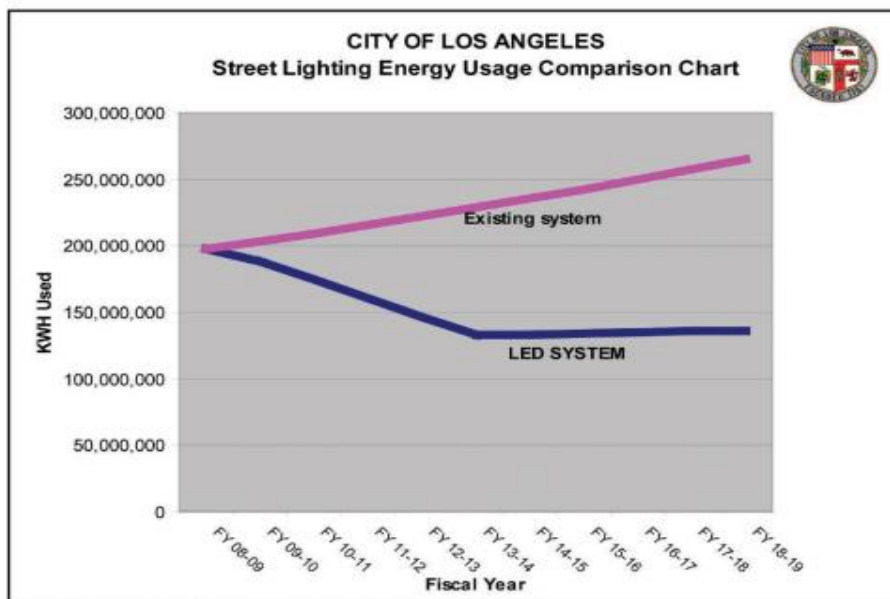
La reducción de las facturas de energía y las evitadas emisiones de gases de efecto invernadero son dos beneficios incontrovertibles de estos proyectos de iluminación pública para diferentes ciudades. Pero estos son sólo dos de los numerosos beneficios para los municipios, cuando los proyectos de iluminación pública están bien planificados y utilizan equipos adecuados. Otros beneficios incluyen: costos de mantenimiento reducidos, disminución de la contaminación lumínica y, lo que es más importante, mayor visibilidad y rendimiento (Gibbons, 2009).

Para los proyectos de adaptación del sistema de iluminación además de identificar los beneficios, es necesario también explicar cómo los municipios y las empresas de servicios públicos pueden lograrlos. Se considera el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono generado por la iluminación pública municipal. También se deben evaluar los nuevos dispositivos y tecnologías de control que hacen que los proyectos de adaptación sean rentables hoy en día, identificar los obstáculos que no permiten una selección adecuada de productos, como preocupación sobre la confiabilidad del producto y del fabricante (CCI, 2010, p. 6).

Por ejemplo, los estudios de casos demuestran que los municipios pueden reducir los costos de iluminación de sus calles hasta en un 65% al cambiar a las luces de calle LED y aún más si incorporan controles avanzados de iluminación (FORBES, 2013). Estos ahorros de energía se traducen directamente en ahorros para los contribuyentes, además los municipios también pueden capturar los ahorros de costos de mantenimiento asociados con la vida útil proyectada de una lámpara LED y disminuir los requerimientos de mantenimiento, en comparación con las luces de calle tradicionales (DOE, 2013).

El Programa de Energía y Eficiencia de Iluminación Pública LED de Los Ángeles fue lanzado en 2009, la ciudad pretende reemplazar sus 140.000 farolas durante el programa de cinco años. Hasta la fecha, ya se han instalado más de 36.000 luces LED, este programa es implementado por la Oficina de Alumbrado Público de Los Ángeles (ESMAP, 2011, p. 2).

Figura 4: Consumo anual de energía de la Iluminación Publica en Los Ángeles



Fuente: CCI, 2009, p. 11.

Figura 5: Resultados y evaluación del Proyecto de Adaptación de Iluminación Publica en Puente de la Calle 6, Río Los Ángeles

RESULTS AND EVALUATION

With over 36,500 LED lights installed, the total savings for the City as of February 2011:

Total Nominal Wattage Before: 6,244 kW
Total Nominal Wattage to Date: 2,648 kW

Estimated Energy Savings: 40%
Actual Energy Savings: 57.6%

Annual CO2 Reduction: 8,674 Metric Tons

Annual Energy Savings (MWh): 14,668 MWh

Annual Energy Savings (\$): \$1,297,173



Fuente: NYCGB, 2011, p. 4.

2.5. Modelos de Toma de Decisiones Multicriterio

2.5.1. Promethee

La metodología PROMETHEE-GAIA para MCDA considera que un problema multicriterio no puede ser tratado sin información adicional relacionada con las preferencias y las prioridades de los tomadores de decisiones. La información solicitada por PROMETHEE y GAIA es particularmente clara y fácil de definir tanto para los tomadores de decisiones como para los analistas. Consiste en una función de

preferencia asociada a cada criterio, así como pesos que describen su importancia relativa (Henggeler, et al., 2005, p. 163).

2.5.2. Electre

Este método es capaz de manejar criterios discretos de naturaleza tanto cuantitativa como cualitativa y proporciona un ordenamiento completo de las alternativas. El problema es formularlo de manera que elija alternativas preferidas a la mayoría de los criterios y que no causen un nivel inaceptable de descontento por ninguno de los criterios. La concordancia, los índices de discordancia y los valores de umbral se utilizan en esta técnica. Con base en estos índices, se desarrollan gráficos para relaciones fuertes y débiles. Estos gráficos se utilizan en un procedimiento iterativo para obtener el ranking de alternativas. Este índice se define en el rango (0-1), proporciona un juicio sobre el grado de credibilidad de cada relación de desequilibrio y representa una prueba para verificar el rendimiento de cada alternativa (Roy, 1985).

2.5.3. AHP

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP- Analytic Hierarchy Process) es una teoría de medición relativa de criterios intangibles. Con este enfoque de la medición relativa, una escala de prioridades se deriva de las mediciones de comparación de parejas sólo después de que los elementos a medir son conocidos. En la medición tradicional se tiene una escala que se aplica para medir cualquier elemento que viene a lo largo que tiene la propiedad de la escala es para, y los elementos se miden uno por uno, no por comparación entre sí. En el AHP las comparaciones por pares se hacen con juicios utilizando valores numéricos tomados de la escala fundamental absoluta AHP de 1-9 (Henggeler, et al., 2005, p. 345).

III. METODOLOGÍA

Posterior al análisis y revisión de la literatura referente a las metodologías empleadas para selección de tecnologías, se seleccionó que la metodología a utilizar es AHP considerando que para su realización sólo se necesita un pequeño número de encuestados con experiencia y conocimiento (Kim y Kumar, 2009), además de consulta a expertos, ya que ambas se ajustan al objetivo general de la presente tesis. La consulta a expertos fue considerada tomando en cuenta que se requiere necesariamente de consulta a personas con experiencia en el tema de Iluminación Pública para determinar y evaluar las diferentes alternativas en base a múltiples criterios técnicos.

La metodología AHP satisface particularmente bien el objetivo declarado de esta investigación. En realidad, al diseñar una propuesta metodológica para seleccionar tecnologías más eficientes de Alumbrado Público, se debe tener en cuenta que además de listar y clasificar los criterios o indicadores, es igualmente importante jerarquizar es decir, identificar aquellos que tienen un mayor impacto en el objetivo establecido. Además, la participación del grupo de expertos en este proceso es de suma importancia: su experiencia y conocimiento del tema es crítico en la determinación de los criterios o indicadores de medición más relevantes.

Con el objetivo de sistematizar los pasos para seleccionar una tecnología, y considerando el procedimiento básico definido por Nadja Kasperczyk and Karlheinz Knickel (2004), a

continuación se presentan los pasos a seguir para seleccionar una tecnología empleando la metodología AHP (Ver Figura). Nótese que el diseño de esta metodología permitirá la posibilidad de aplicarse a la selección de luminarias de diferentes potencias según el área a iluminar.

En la Figura 7, también es notable que los primeros dos pasos tienen el objetivo de definir tanto criterios como su ponderación o peso respectivamente. Mientras que los pasos 3 y 4 tienen la finalidad realizar una primera y posteriormente una segunda o selección final para llegar a tomar una decisión. Es de este modo, que la aplicación de esta metodología puede utilizarse sin necesidad de desarrollar el Paso 1 y 2, en otras palabras, es posible emplear la metodología para Selección de tecnologías más eficientes para Alumbrado Público a partir de los pasos 3 y 4, tomando en cuenta los criterios y ponderaciones ya obtenidos a través de esta metodología.

Figura 6 Diagrama de bloque de Metodología para Seleccionar tecnologías más eficientes para Sistemas de Alumbrado Público.



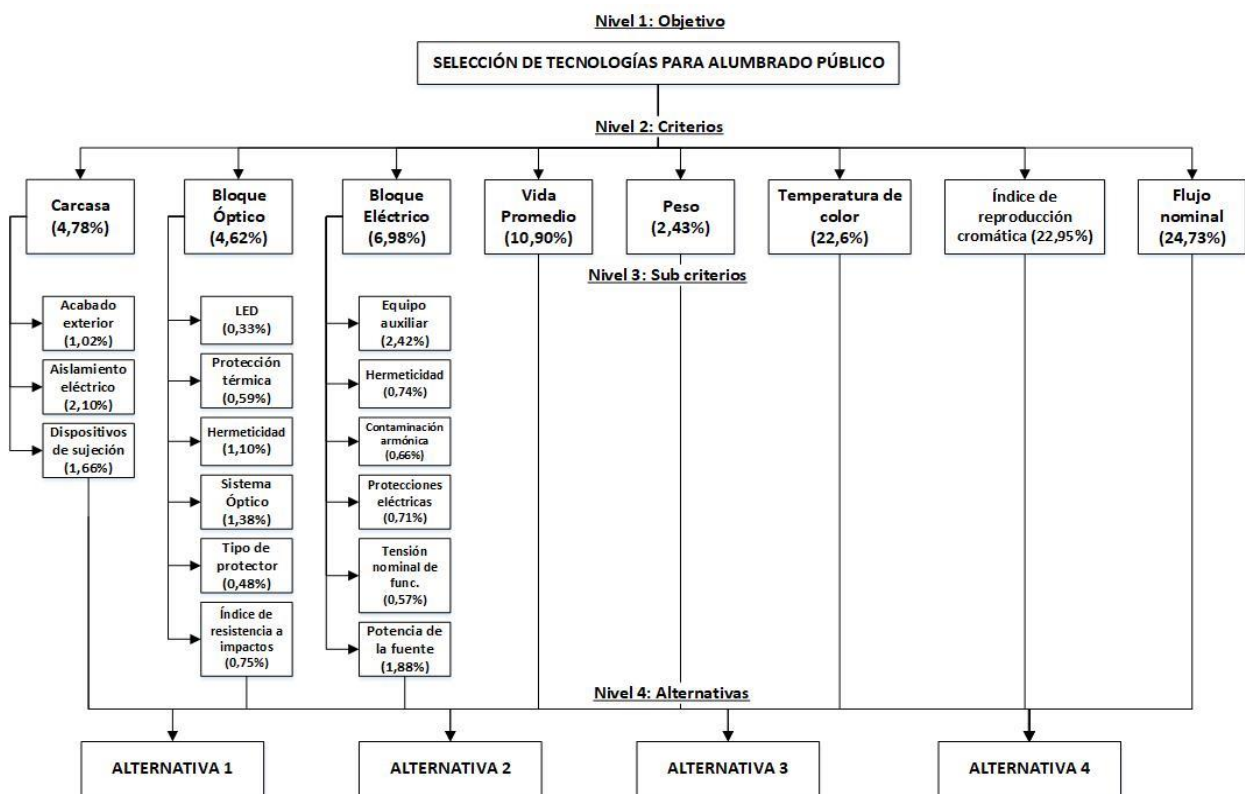
Fuente: Elaboración propia en base a metodología AHP.

IV. Resultados

Después de diseñada la metodología, se validó a través de un caso de estudio en la Dirección de Alumbrado Público del Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz, quienes tenían 4 alternativas para luminarias LED de 70 HP, estas 4 alternativas, pertenecientes a 4 proveedores diferentes, fueron evaluadas de acuerdo a los criterios definidos en este proyecto.

Primeramente, se ha definido un grupo de 4 expertos, con los cuales se ha jerarquizado 20 criterios y subcriterios técnicos pertinentes para lámparas de Tecnología LED (ver Figura 7).

Figura 7. Jerarquización de criterios y sub-criterios técnicos



Fuente: Realización propia

Posteriormente, se ha sometido a evaluación 4 alternativas tecnológicas, las cuales son: 1) Schreder; 2) Philips; 3) Benito; 4) PFM, mismas que fueron sometidas previamente a pruebas en laboratorio por la Dirección de Alumbrado Público de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, por lo que son consideradas como tecnologías con buen desempeño y habilitadas para una evaluación completa

. Los resultados finales obtenidos a través de la evaluación técnica (paso 3) se muestran a continuación en software SuperDecisions (Ver Figura 8).

Figura 8. Resultados evaluación criterios y subcriterios técnicos

Ratings for Super Decisions Main Window: AHP Tecnologías de Alumbrado Público Media Geométrica.sdmod: ratings

File Edit View Calculations Help

Super Decisions Ratings

| | Priorities | Totals | LED 0.003293 | Protección térmica 0.005937 | Sistema Óptico 0.013755 | Tipo de protector 0.004771 | Índice de resistencia 0.007459 | Contaminación ambiental 0.006647 | Equipo auxiliar (Driver) 0.024188 |
|----------|------------|----------|-----------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Schreder | 0.261060 | 0.690212 | Bueno | Adecuado | Bueno | Muy bueno | IK 08 | 20% | Excelente |
| Philips | 0.214883 | 0.568124 | Muy bueno | No adecuado | Bueno | Bueno | IK 08 | 20% | Excelente |
| Benito | 0.273871 | 0.724082 | Bueno | Adecuado | Bueno | Excelente | IK ≥09 | 20% | Excelente |
| PFM | 0.250187 | 0.661464 | Regular | No adecuado | Bueno | Bueno | IK ≥09 | 20% | Regular |

IK ≥09
 IK 08
 IK <08
 Numeric Value
 No Value
 Cancel

Como se puede ver, la columna de prioridades, indica que no hay demasiada diferencia de prioridad entre tres de las cuatro alternativas, ya que el peso o importancia de ninguna alternativa supera el 30%. Sin embargo, BENITO es la alternativa con mayor prioridad (27,4%), este resultado se obtuvo al combinar las calificaciones con los pesos de los criterios.

El siguiente paso, consiste en una evaluación desde el punto de vista económico, misma a la cual solo se sometieron las dos mejores opciones del anterior paso (SCHEREDER y BENITO). Ver cuadro 3.

Cuadro 3. Beneficios y resultados de indicadores económicos de las A1 y A2 (en base a la TC).

| Indicador | Tec eficiente - Benito: LED 35W (TEA1) | Tec eficiente - Schreder: LED 36W (TEA2) |
|---|---|---|
| Potencia instalada (KW) | 4.260 | 4.382 |
| Potencia conservada (KW) | 5.477 | 5.356 |
| Consumo energetico total (MWh/año) | 18.659,71 | 19.192,84 |
| Energia conservada (MWh/año) | 23.991,05 | 23.457,92 |
| Costo energetico total (Bs./año) | 17.720.205,02 | 18.226.496,59 |
| Ahorro energético (Bs./año) | 22.783.120,74 | 22.276.829,17 |
| Costo de mantenimiento (Bs.año) | 11.232.000,00 | 11.232.000,00 |
| Ahorro costo de mantenimiento (Bs./año) | 11.232.000,00 | 11.232.000,00 |
| PSR (años) | 3,40 | 1,45 |
| VAN (Bs.) | 93.309.811,60 | 157.266.699,26 |
| CCV (Bs.) | 445.799.130,61 | 381.842.242,95 |
| CCVA (Bs./año) | 72.551.755,55 | 62.143.066,61 |
| % Eficiencia | 17,3% | 29,2% |
| CEC (Bs./KWh) | 0,785 | 0,337 |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los indicadores calculados, se sugiere seleccionar la tecnología Schreder ya que en 1,45 años se recuperaría el capital de esta alternativa, presenta un VAN de 157 millones de bolivianos y TIR del 68,53%, la cual es superior a la tasa de descuento, por lo que se considera la mejor alternativa a seleccionar, por ser la que satisface de mejor manera tanto criterios técnicos como económicos.

Finalmente, con este cambio tecnológico se llega a tener hasta un 55,4% de ahorro energético (ver Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación Tec. Convencional con la Tec. Eficiente seleccionada

| Indicador | Tec convencional: SAP 70W (TC) | Tec eficiente - Schreder: LED 36W (TEA2) |
|--|---|---|
| Potencia instalada (KW) | 9.738 | 4.382 |
| Potencia conservada (KW) | - | 5.356 |
| Consumo energetico total (MWh/año) | 42.650,76 | 19.192,84 |
| Energia conservada (MWh/año) | - | 23.457,92 |
| Costo energetico total (Bs./año) | 40.503.325,76 | 18.226.496,59 |
| Ahorro energético (Bs./año) | - | 22.276.829,17 |
| Costo de mantenimiento (Bs.año) | 22.464.000,00 | 11.232.000,00 |
| Ahorro costo de mantenimiento (Bs./año) | - | 11.232.000,00 |
| PSR (años) | 1,45 | |
| VAN (Bs.) | 157.266.699,26 | |
| TIR (%) | 68,53% | |
| CCV (Bs.) | 332.594.145,40 | 381.842.243 |
| CCVA (Bs./año) | 87.737.497,68 | 62.143.067 |
| % Eficiencia | 29,2% | |
| CEC (Bs./KWh) | 0,337 | |
| Emisiones de CO ₂ (Tn CO ₂ /año) | 17.273,56 | 7.773,10 |

Fuente: Realización propia

V. Conclusiones

A través de este proyecto primeramente se ha realizado un diagnóstico del Sistema de Alumbrado Público de la ciudad de Santa Cruz, identificando que a marzo de 2017 el Sistema de Alumbrado Público cuenta con más de 140.000 luminarias, las cuales van incrementando constantemente y más del 99% de la tecnología en operación es tecnología convencional SAP, que es poco eficiente.

Por otro lado, se ha realizado una revisión del estado del arte acerca de metodologías la toma de decisiones, en donde se ha identificado que existen diferentes métodos como Electre, Promethe, AHP, entre otros. En el caso de decisiones de multi criterio, como es este tipo de problemas, dado que para seleccionar una tecnología de Alumbrado Público no solo se considera un solo criterio, sino más bien, se deben tomar en cuenta varios criterios técnicos y económicos. Se ha podido identificar que hay casos similares de aplicación de estos modelos de toma de como Electre, Promethe y Delphi .Se identificó que para el Sistema de Alumbrado Público de Santa Cruz de la Sierra, es más pertinente emplear la metodología AHP considerando que además de identificar una serie de criterios, es importante definir el peso de importancia de cada uno de ellos, para poder hacer una toma decisión más adecuada.

A partir de este diagnóstico realizado y del estudio literario se ha diseñado una metodología en la cual se combina tanto criterios técnicos como criterios económicos para poder realizar una toma de decisión más completa. La primera evaluación y selección de los criterios técnicos, es en base a la metodología AHP y además indicadores económicos, son los que mejor se adecuan a este tipo de proyectos de eficiencia energética y de cambios tecnológicos. Se ha seleccionado un panel de expertos con los cuales se ha podido determinar los pesos de cada criterio definido.

Para el análisis económico es fundamental considerar la relación entre el costo de inversión y los ahorros generados por la misma y no así tomar en cuenta ambas variables de forma independiente. Esto debido a que el ahorro energético mayor por el uso de una tecnología que conlleva una inversión mucho más alta con respecto a otra, no siempre es justificable. Tomando como parámetro la validación de la metodología en el caso de estudio del Sistema de Alumbrado Público de Santa Cruz de la Sierra, la selección de la tecnología Schreder de 36W para la sustitución de 115.924 luminarias, supone una inversión de Bs. 200.832.533,80, con ahorros de hasta el 55% en consumo energético, lo que equivale a 23.457,9 MWh/año traduciéndose en beneficios anuales de Bs. 33.508.829,17. Adicionalmente, y en contraste con la tecnología SAP que se encuentra en actual operación, el costo anualizado (tomando en cuenta la inversión) de esta tecnología seleccionada (eficiente) es menor en un 29,17%. Finalmente, el hecho de obtener ahorros energéticos, tiene también efecto en la emisión de CO₂, ya que el consumir menos energía eléctrica, evita la emisión de CO₂, considerado como contaminante para el medio ambiente. Según el ahorro energético mencionado, la tecnología seleccionada evitaría la emisión de 9500,45 toneladas cada año.

Finalmente con la consecución de todos estos resultados se ha podido proponer y validar una metodología para la selección de tecnologías eficientes en el consumo de energía eléctrica de un sistema de alumbrado público, la misma que es aplicable para cualquier Municipio dentro de Bolivia y que con ciertas adaptaciones puede ser aplicada en otros países.

REFERENCIAS

ACEE (2016)

The 2016 International Energy Efficiency Scorecard. ACEE American Council of Energy-Efficient Economy. Consultado de
<http://aceee.org/research-report/e1602>
<http://aceee.org/portal/national-policy/international-scorecard>

ANSI/ES (2010)

Illuminating Engineering Society of North America. ANSI American National Standard Practice for Roadway Lighting ANSI/IESNA RP-8-00 (R2005). Consultado de
<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-RoadwayEvaluation.pdf>

APPA (2012)

LED Street Lighting: A Handbook for Small Communities (Handbook). APPA American Public Power Association DEED Demonstration of Energy Efficient Developments program and The Iowa Energy Center. Consultado de
<http://archive.iamu.org/services/electric/efficiency/Street%20Lighting/StreetLightingHandbook.pdf>

Bakorous, Y. (2000)

Technology Evaluation. INNOREGIO: Dissemination of Innovation and Knowledge Management Techniques. University of Thessaly. Consultado de
http://www.adi.pt/docs/innoregio_techn_evaluation.pdf

Balsky, M. & Bayer, R (2010)

New trends in road lighting. CTUFEL, Praha, Slovakia.

Barbosa, R. (2000)

A Gestao e o uso eficiente da energia eléctrica nos Sistemas de Iluminacao Publica (Programa Interunidades de Pós-Graduacao em Energia). Instituto de Eletrotécnica e Energia, Sao Paulo.

BOLIVIA, Ministerio de Hidrocarburos y Energía (2014)

Plan Eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia 2025. Consultado de
<http://www2.hidrocarburos.gob.bo/index.php/plan-de-desarrollo-energetico/file/750-plan-electrico-del-estado-plurinacional-de-bolivia-2025.html>

BOLIVIA, Ministerio de Hidrocarburos (2014)

“Presentan Plan Estratégico de Ahorro y Eficiencia Energética de Bolivia”. Consultado de
<http://www2.hidrocarburos.gob.bo/index.php/prensa/noticias/848-presentan-plan-estrat%C3%A9gico-de-ahorro-y-eficiencia-energ%C3%A9tica-de-bolivia.html>

Bortle, J. E. (2001)

Sky & Telescope Febrero 2001 (Digital Issue). Consultado de

<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/light-pollution-and-astronomy-the-bortle-dark-sky-scale/>

CAINCO (2016)

Desafío XXI SCZ. Santa Cruz y su gente: La dimensión Geográfica. CAINCO Cámara de Industria, Comercio, Servicios y Turismo de Santa Cruz Bolivia.

CAF ; CREA (2016)

Estado de la eficiencia energética en Bolivia: identificación de oportunidades. CAF Corporación Andina Boliviana, CREA Energy Experts. Consultado de

<http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/954/Reporte%20EE%20en%20Bolivia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CCI (2009)

LED Street Lighting Case Study, City of Los Angeles. CCI Clinton Climate Initiative. Consultado de

http://www.dvrpc.org/energyclimate/eetrafficstreetlighting/pdf/CCI_Los_Angeles_LED_Streetlighting_Retrofit_Program_Report.pdf

CCI (2010)

Street Lighting Retrofit Projects: Improving Performance, while Reducing Costs and Greenhouse Gas Emission (White Paper). CCI Clinton Climate Initiative, Outdoor Lighting Program. Consultado de

http://www.dvrpc.org/energyclimate/eetrafficstreetlighting/pdf/CCI_EE_Streetlighting_White_Paper.pdf

CCIBA (2016)

"Eficiencia Energética" en *Made in Germany.* Cámara de Comercio e Industria Boliviano – Alemana, Abril –Junio 2016, La Paz. Consultado de

http://bolivien.ahk.de/fileadmin/ahk_bolivien/Publikationen/MIG_2016/mig_2_final-compressed.pdf

Contador, C. R. (1997)

Projetos sociais: avaliacao e pratica., Atlas, Sao Paulo.

DAM (2016)

"Caracterización de la contaminación lumínica en zonas protegidas y urbanas". DAM Departamento de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Barcelona. Consultado de <http://www.am.ub.edu/es/node/1195>

DEC (2017)

Reduce Utility Bills for Municipal Facilities and Operations, Local Action Overview Municipal Operations). DEC Department of Environmental Conservation. Consultado de <http://www.dec.ny.gov/energy/64089.html>

DOE (2008a)

LED Application Series: Outdoor Area Lighting. DOE U.S. Department of Energy, Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program. Consultado de

https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/outdoor_area_lighting.pdf

DOE (2008b)

Color Quality of White LEDs. DOE U.S. Department of Energy, Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program. Consultado de http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/color_quality_of_white_leds.pdf.

DOE (2009)

Energy Efficiency of White LEDs. DOE U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. Consultado de http://www.fcgov.com/utilities/img/site_specific/uploads/led-efficiency.pdf

DOE (2010)

Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan. DOE U.S. Department of Energy, Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program. Consultado de https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2010_web.pdf

DOE (2013)

Lifetime and Reliability. DOE US Department of Energy, Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program, Solid State Lighting Technology Fact Sheet. Consultado de https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/life-reliability_fact-sheet.pdf

ESMAP (2011)

Good Practices in City Energy Efficiency, Los Angeles, USA-Light Emitting Diode (LED) Street Lighting Retrofit (Case Study). ESMAP Energy Sector Management Assistance Program. Consultado de http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/LosAngeles_LED_final_edited_11-9-11.pdf

Flyvbjerg, B., Holm, M. S., Buhl, S. (2002)

Underestimating Costs in Public Works Projects, Error or Lie? APA Journal, American Planning Association, Vol. 68, No.3, Chicago, IL. Consultado de <http://flyvbjerg.plan.aau.dk/JAPAASPUBLISHED.pdf>

FORBES (2013)

“Los Angeles Completes World’s Largest LED Street Light Retrofit.” (Citing a 63 percent overall energy savings for Los Angeles’ LED Street light Project). Consultado de <http://www.forbes.com/sites/justingerdes/2013/07/31/los-angeles-completes-worlds-largest-led-street-lightretrofit/>

Flores, L., García, S. & Jiménez, R. (2008)

Propuesta de Ahorro de Energía en el Alumbrado Público de San Agustín Ohtenco, Milpa Alta. Ingeniería Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México D.F.

Gibbons, R. (2009)

Anchorage Analysis. VTTI Virginia Tech Transportation Institute. Consultado de http://www.vtti.vt.edu/PDF/TRBVS_presentations/Gibbons_Visibility%20Performance%20Under%20New%20Lighting%20Technologies.pdf

Henggeler, C., Bouyssou, D., Brans J. P. et al. (2005).

Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer's International Series, Operations Research Management Science. United States of America.

HOY BOLIVIA (2015)

“Santa Cruz supera a Bolivia en crecimiento económico”. Consultado de <http://hoybolivia.com/Noticia.php?IdNoticia=134491>

HWS (2016)

“The electric lighting source with the longest lifespan at present in the world”. HWS Hot Watt Solar. Consultado de <http://hotwattsolar.net/data/Ind-HPS-2X250W-vs-INDUCTION-200&100W.JPG>

IAC, OTPC (1992)

“Contaminación Lumínica”. (IAC) Instituto de Astrofísica de Canarias, (OTPC) Oficina Técnica para la Protección de la Calidad del Cielo. Consultado de <http://www.iac.es/servicios.php?op1=28&op2=69>

IDA (2013)

“Light Pollution”. IDA International Dark-Sky Association. Consultado de <http://www.darksky.org/light-pollution/>

IDAE ; ICEI (2001)

Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación - Alumbrado Público. IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, CEI Comité Español de Iluminación. Consultado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_GT_EE_iluminacion_Alumbrado_Publico_9a40dc27.pdf

IDAE, MIET (2014)

Inventario, consumo de energía y potencial de ahorro del alumbrado exterior municipal en España. IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Consultado el 18/04/17 de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Articulo_Alumbrado_exterior_2014_v2_a9f0ea75.pdf

IEA (2015)

World Energy Statistics, World Energy Outlook. IEA International Energy Agency.
Consultado de
www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf

Kothari, C.R. (1985)

Research Methodology- Methods and Techniques. (2da Ed.). New Delhi: New Age International Publishers.

LA BSL (2013)

Changing our Glow for Efficiency. LA BSL Bureau of Street Lighting, City of Los Angeles.
Consultado de
http://photos.state.gov/libraries/finland/788/pdfs/LED_Presentation_Final_June_2013.pdf

Lenk, Ron ; Lenk Carol (2011)

Practical Lighting Design with LED's. IEEE Press Editorial Board, United States.

Lockheed, M., Hanushek, E. (1994)

Improving Educational Efficiency in Developing Countries: What Do We Know? Vol. 18, No. 1. Consultado de
http://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/9/37779/gover_2006_03_eficacia_eficiencia.pdf

Madias, E., Doulos, L., Kontaxis, P. & Topalis ,F. (2012)

Applying Multi-criteria Decision Analysis for Selecting Street Lighting Luminaires. National Technical University of Athens, Lighting lab. Technological Educational Institute of Athens
Consultado de
https://www.researchgate.net/publication/277030285_Applying_multi-criteria_decision_analysis_for_selecting_street_lighting_luminaires

Mayhoub, M. & Carter, D. (2011)

Decision making in selecting the best matching Hybrid Lighting System. Building Physic (Daylighting). University of Liverpool, Liverpool, UK. Consultado de
http://www.cpas-egypt.com/pdf/Mohammed_Mayhoub/Research/Research/011%20%20PLEA2011_Decision%20making.pdf

Mahmood, S. (2011)

Decision Making Tools, a Comparison between Quantitative and Qualitative Tools (Research Paper). Consultado de
<https://shahzadmahmood.files.wordpress.com/2011/05/management-decision-making-tools.pdf>

Muñoz, J. P. (1996)

Uso eficiente de energia elétrica no setor de Iluminacao Pública (IP) do Equador. (Programa Interunidades de Pós-Graduacao em Energia, Mestre em Energia). Instituto de Eletrotécnica e Energia, Sao Paulo. Consultado de

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-19012012-175841/pt-br.php>

(Programa Interunidades de Pós-Graduacao em Energia, Mestre em Energia). Instituto de Eletrotécnica e Energia, Sao Paulo. Consultado

My LED Lighting Guide (2011)

“Better Vision with LED lights, Scotopic and Photopic Lumen (White Paper)”. Consultado de

<http://www.myledlightingguide.com/WhitePapers/White%20Paper%20-%20LED%20light%20and%20Scotopic%20Lumens.pdf>

Mottier, P. (2009)

LEDs for Lighting Applications. Wiley ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, United States.

NEEP (2015)

LED Street Lighting Assessment and Strategies for the Northeast and Mid –Atlantic. NEEP Northeast Energy Efficiency Partnerships. Consultado de

http://www.neep.org/sites/default/files/resources/DOE_LED%20Street%20Lighting%20Assessment%20and%20Strategies%20for%20the%20Northeast%20and%20Mid-Atlantic_1-27-15.pdf

NYCGP (2011)

Best Practice: LED Street Lighting System. NYCGP New York City Global Partners. Consultado de

http://www.nyc.gov/html/ia/gprb/downloads/pdf/LA_LEDstreetlights.pdf

OSRAM & U.T.N. (2005)

Análisis económico de la Iluminación Eficiente. U.T.N. Universidad Tecnológica Nacional.

OSRAM (2010)

“Light can be white, white, white or white. The right fluorescent lamp from OSRAM, whatever the application”. Consultado de

<https://www.osram.com/media/resource/hires/333565/light-can-be-white-en.pdf>

OSRAM (2014a)

“40% energy savings and improve of quality of light with more than 3,400 LED street luminaires in Bensheim, Germany”. ORAM Automotive. Consultado de

https://www.osram.com/osram_com/applications/case-studies/2014/energy-efficient-led-street-lighting-in-bensheim/

OSRAM (2014b)

“LED Fundamentals series, Mesopic Vision”. OSRAM Opto Semiconductors. Consultado de https://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2014/04/OSRAM-OS_LED-FUNDAMENTALS_Mesopic_Vision_v1_4-2-141.pdf

PG&E (1997)

Luminaires A Pacific Energy Center Factsheet. PG&E Pacific Gas and Electric Company. Consultado de http://www.lightingassociates.org/i/u/2127806/f/tech_sheets/Luminaires.pdf

PHILIPS (2013)

“Road Lighting Brochure”. Consultado de https://www.lighting.philips.com/b-dam/b2b-li/en_AA/Applications/masthead-pdfs/Philips-Road-Lighting-digital-brochure-Aug-2013.pdf
<http://www.lightingproducts.philips.com/our-brands/lumec/roadfocus-led-cobra-head-medium-rfm.html>

Ramírez, J. (1999)

Luminotecnía, Enciclopedia Ceac de Electricidad. Grupo Editorial Ceac, S.A. Perú.

SANTA CRUZ. Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra (2017)

Plan Operativo Anual 2017. Consultado de http://www.concejomunicipalscz.gob.bo/portal/biblioteca/_pdf/otros/POA-2017.pdf

SG AUTOMOTIVE (2017)

Street Lighting Technology Comparison. Consultado de http://www.sga.si/v2/index.php?option=com_content&view=article&id=50&itemid=59&lang=en

Stellarium (2014)

“Principales características de la versión 0.10.0”. Consultado de http://stellarium.org/features_in_0.10.0.php

Thuesen, G.J. & Fabrycky, W.J. (2001)

Engineering Economy. New Jersey: Prentice Hall.

Tähkämö, L., Ylinen, A., Marjukka, P. & Halonen, L. (2011)

Life cycle cost analysis of three renewed street lighting installations in Finland. Int J Life Cycle Assess (2012) 17:154–164. DOI 10.1007/s11367-011-0345-z. Consultado de https://www.researchgate.net/publication/257679741_Life_cycle_cost_analysis_of_three_renewed_street_lighting_installations_in_Finland

URUGUAY. MIEM (2015)

Plan Nacional de Eficiencia Energética. MIM Ministerio de Industria, Energía y Minería. Consultado de

<http://www.miem.gub.uy/documents/10192/0/Plan%20Nacional%20de%20Eficiencia%20Energetica.pdf>

U.T.N & ELI (2006)

Manual de Iluminación Eficiente. ELI Efficient Lighting Initiative. U.T.N. Universidad Tecnológica Nacional. Consultado de <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/eli.html>

Van Bommel, W.J.M; Boer, J.B (1980)

Road Lighting. Palgrave Macmillan, United Kingdom. Consultado el 10/04/17 de

Wang, J., Jing, Y., Zhang, C. & Zhao, J. (2009)

Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision making. Renewable and sustainable energy reviews, 13, 2263-2278. Consultado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001166>

Webster, M. (1986)

Webster's Third New International Dictionary of the English Language. Unabridged. Massachusetts, USA. Consultado de http://download.cnet.com/Merriam-Webster-s-Third-New-International-Dictionary-Unabridged-BlackBerry-Storm/3000-2279_4-75755738.html