



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
Programa Único de Especializaciones en Ingeniería, PUEI

Análisis de la eficiencia energética del
Alumbrado Público del Zócalo de la Ciudad de
Iguala, Guerrero.

Tesina

Que para obtener el título de
Especialista en Ahorro y Uso Eficiente de la Energía

Presenta

Ing. Juan Carlos Galeana Tungüí

Directora de Tesina

Dra. Azucena Escobedo Izquierdo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco al proyecto “Formación de recursos humanos para la sustentabilidad energética en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Proyecto Conacyt No. 246077)” y sus coordinadores, por su dedicación y las facilidades económicas otorgadas durante mi formación como especialista. A la planta docente de la Especialización en Ahorro y Uso Eficiente de la Energía, por su disposición y labor enérgica en la enseñanza, y al laboratorio de Proyectos de Ahorro de Energía por darme la oportunidad de aplicar los conocimientos aprendidos en el aula.

Todo mi reconocimiento y amor, a Rosario y Juan José, mis padres, quienes saben más que nadie, lo difícil que es ver a los hijos volar con las alas que ellos mismos construyeron; agradezco su valentía y su confianza incondicional que han puesto en mí y en cada una de mis decisiones; por los buenos y malos momentos, que, sin dudarlo, han derivado en aprendizajes y gratas memorias que nos han hecho ser una mejor terna.

A mi tía María Elena, quien ha forjado mi formación personal en el día a día, demostrándome que en el “ser madre”, las razones biológicas se pueden omitir. A Paula, por su entrañable amor de abuelita y el sabor que le ha dado a mi vida. A mi primo Fernando, por sus invaluable muestras de cariño.

La personalidad se nutre de la colectividad y de la familia que uno va haciendo en su caminar: A Fátima, Carina, Mario, Christian, Romualdo, Carolina, Servín y todos mis amigos.

A mis primos y familiares de mi Michoacán querido.

Contenido

Introducción	1
Objetivo	1
Objetivos particulares	1
1. Antecedentes	3
1.1 La carrera hacia la eficiencia energética	3
1.2 Eficiencia energética en Municipios	4
1.3 Programa Pueblos Mágicos (PPM)	7
2. Marco teórico	9
2.1 Aspectos de diseño y eficiencia energética en Sistemas de alumbrado público.	9
2.2 Luminarias para alumbrado público	13
2.3 Normatividad Nacional e Internacional aplicada al Alumbrado Público	15
2.4 Método de diagnóstico energético para sistemas de alumbrado público	18
3. Caso base	21
3.1 Zócalo de Iguala.....	21
3.2 Facturación eléctrica.....	23
3.3 Descripción del sistema de iluminación.....	24
3.4 Obtención y análisis de las mediciones luminotécnicas	32
3.5 Indicadores.....	33
4. Diseño de propuestas y su evaluación.....	34
4.1 Evaluación técnica de las alternativas	34
4.2 Beneficios energéticos y económicos.....	45
4.3 Rentabilidad	3-47
Recomendaciones	3-49
Conclusiones	3-50
Bibliografía	3-53
Normatividad	3-54
Anexo A. Iluminancias horizontales y verticales para diferentes espacios públicos.....	3-56
Anexo B. Facturación Eléctrica anual.....	57

Anexo C. Vista en planta, Zócalo de Iguala	58
Anexo D. Zonas de interés de alumbrado general.	59
Anexo E. Parámetros caso base	60
Anexo F. Protocolo de mediciones luminotécnicas para el Zócalo de Iguala .	63
Anexo G. Resultados luminotécnicos. Propuesta 1	67
Anexo H. Resultados luminotécnicos. Propuesta 2	68
Anexo I. Resultados luminotécnicos. Propuesta 3	69
Anexo J. Resultados luminotécnicos. Propuesta 4.	70
Anexo K. Resultados luminotécnicos. Propuesta 5.	71
Anexo L. Resultados luminotécnicos. Propuesta 6.....	72
Anexo M. Resultados luminotécnicos. Propuesta 7.....	73
Anexo N. Beneficios energéticos y económicos de las propuestas para los diferentes escenarios.	74
Anexo O. Cuadro resumen de evaluación económica de las propuestas.	76
Anexo Fotográfico. Condiciones de iluminación en el Zócalo de la ciudad de Iguala.	77

Introducción

El presente trabajo se realizó con el fin de conocer si el alumbrado público del zócalo de Iguala, Guerrero, ofrece un uso racional y eficiente de la energía en su operación, además de proponer algunas alternativas de mejora. La evaluación del presente, significa introducirnos en una problemática nacional de eficiencia energética, pues aproximadamente el 70% de los luminarios que componen el alumbrado público del país cuentan con tecnologías inapropiadas y obsoletas [PNEEAPM, 2016], lo cual, en conjunto con la falta de instrumentos de control y la ausencia de programas de mantenimiento, significa pérdidas cuantiosas de energía y áreas con condiciones de iluminación deplorables.

La intención de elaborar esta propuesta desde el campo de conocimiento de la ingeniería en iluminación y, en particular desde la especialización en ahorro y uso eficiente de la energía, parte del hecho de que dicho conocimiento puede contribuir a que este tipo de sistemas cubran los requerimientos de eficiencia energética, a razón de niveles de iluminación adecuados, que potencien espacios para el libre encuentro, intercambio y comunicación entre los habitantes y sus actividades. Por otra parte, el interés de tratar los sistemas de alumbrado orientados a plazas y parques, radica en su influencia sobre la seguridad pública y la opinión popular, así como en los costos de operación y mantenimiento que este representa al erario público.

Para analizar esta problemática, fue necesario definir y delimitar un método de diagnóstico energético enfocado hacia los sistemas de alumbrado público, el cual, a través de la selección de criterios nacionales e internacionales y del perfil de consumo de energía del Zócalo, se logra llegar a la generación de un caso base que servirá de parteaguas para el diseño de propuestas de mejora, las cuales se evaluarán tanto, técnica como económicamente. El caso de estudio comprende un área de 7000 metros cuadrados (*Ver Gráfico 1*), con un arreglo de 20 luminarios basados en tecnología de VSAP, de 250 [W]; 16 de ellos, distribuidos en el perímetro de la plaza y 4 al interior de ella.

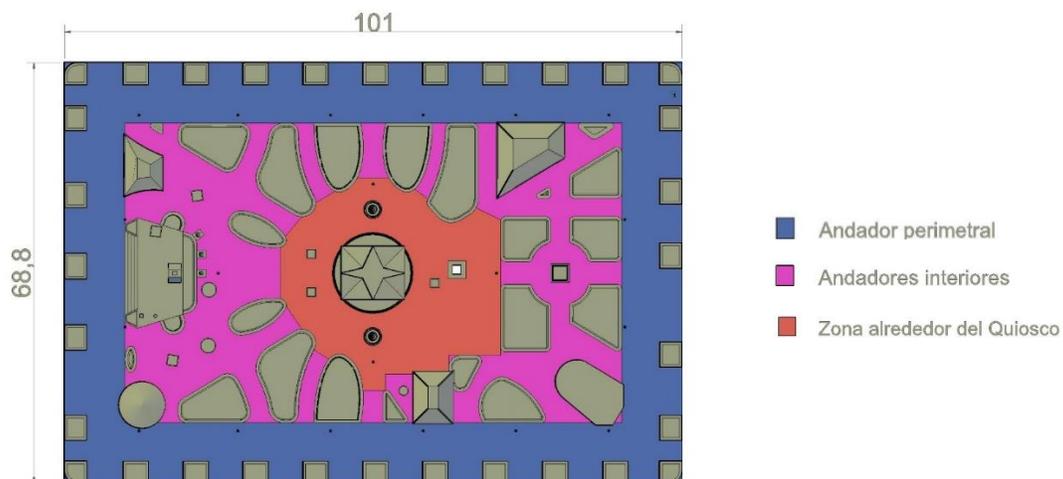


Gráfico 1. Vista de planta y zonas de interés del Zócalo de Iguala.

La dificultad de iluminar este tipo de espacios, radica en considerar dentro de las variables, el diseño bioclimático del lugar, así como la variedad de elementos arquitectónicos que se pueden encontrar en este tipo de recintos. En ese sentido, el Zócalo cuenta con una gran cantidad de árboles de follaje denso, en su mayoría tamarindos, ubicados en jardineras de concreto que fue necesario considerar en los aspectos técnicos de las propuestas; dentro de estas, la que más destaca por sus bondades técnicas y económicas, consiste el cambio a tecnología LED de 70 [W] y 97[W] con curvas de distribución adecuadas al área a iluminar, en conjunto con la reducción de sus alturas de montaje y la adición de luminarios al interior de la plaza para contribuir a la mejora integral de los niveles de iluminación y su uniformidad en andadores; lo anterior acompañado de un *dimmer* que permitirá operar al 50% de su potencia nominal en el horario de menor ocupación de la plaza. Adicionalmente, se destaca la importancia de un programa de mantenimiento para asegurar la permanencia de las propuestas.

Un espacio bien iluminado puede ser un gran soporte para la seguridad pública, la cual, es difícil de sobrellevar en el contexto social actual del país, en particular, de la ciudad de Iguala.

Objetivo

Realizar una evaluación energética en el sistema de alumbrado del Zócalo de la Ciudad de Iguala, Guerrero, a través de un método de diagnóstico energético con la finalidad de sugerir algunas alternativas de mejora.

Objetivos particulares

- i) Dar a conocer los antecedentes sobre la eficiencia energética en el contexto nacional.
- ii) Presentar los fundamentos técnicos, normativos y metodológicos necesarios para el análisis del sistema de iluminación.
- iii) Exponer las condiciones actuales del sistema de iluminación en cuestión.
- iv) Proponer algunas alternativas de mejora justificadas técnica y económicamente.

1. Antecedentes

1.1 La carrera hacia la eficiencia energética

En la actualidad, conceptos como sustentabilidad energética, ahorro de energía y eficiencia han ganado gran popularidad en los diferentes sectores económicos: industrial, comercial, residencial y de servicios públicos; esto, como una encomienda de carácter mundial a raíz del protocolo de Kioto. A través de programas como el “Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico” (PAESE, en 1989) a cargo de la CFE, y la creación de instituciones como la “Comisión Nacional para el Ahorro de Energía” (CONAE) y el “Fideicomiso para el Ahorro de Energía” (FIDE en 1990), México comienza su participación en la carrera hacia la eficiencia energética.

La década de los 90’s fue muy importante para nuestro país en este ámbito, pues se definieron las primeras bases normativas de eficiencia en equipos y sistemas, así como las buenas prácticas y hábitos de operación de estos. La siguiente tabla muestra las normas de eficiencia energética que se han emitido para distintos rubros en el periodo de 1995 a 2013. (Ver Tabla 1).

NORMA OFICIAL MEXICANA	EN VIGOR POR PRIMERA VEZ	1a ACUALIZACIÓN	2a ACTUALIZACIÓN	3a ACTUALIZACIÓN
Bombas verticales tipo turbina	23/12/1995	30/12/2000		
Calentadores de agua para uso doméstico y comercial	07/05/1997	28/02/2001	07/11/2011	
Bombas y conjunto motor-bomba, para bombeo de agua limpia	23/12/1995	25/09/2008		
Lavadoras de ropa electrodomésticas	11/05/1997	28/10/2000	03/06/2010	04/02/2013
Bombas para pozo profundo	09/11/1996			
Alumbrado en edificios no residenciales	01/09/1996	13/08/2005		
Envolvente de edificios no residenciales	23/08/2001			
Aislamientos térmicos industriales	08/11/1996			
Bomba sumergible tipo pozo profundo	07/01/1998	18/07/2005		
Acondicionadores de aire tipo central, paquete o dividido	08/02/1998	05/11/2002	21/08/2007	
Alumbrado en vialidades	16/05/1998	19/08/2005	12/10/2013	
Motores monofásicos	18/07/1998	19/07/2005		
Refrigeradores y congeladores electrodomésticos	01/01/1995	01/08/1997	16/05/2003	16/05/2012
Motores trifásicos	01/01/1995	18/06/1998	13/03/2003	19/12/2010
Lámparas fluorescentes compactas autobalastadas	23/06/1998	24/12/2008	10/03/2013	
Aislantes térmicos para edificaciones	24/10/1998	12/02/2012		
Máquinas tortilladoras mecanizadas	30/10/2009			
Envolvente de edificios para uso habitacional	07/12/2011			
Acondicionamiento de aire tipo cuarto	01/01/1995	24/06/2001	31/01/2009	
Aparatos de refrigeración comercial	25/06/2001	11/03/2009		
Acondicionadores de aire tipo dividido	01/09/2011			
Vidrio y sistemas vidriados para edificaciones	17/04/2013			
Estufas de cocción de alimentos	14/12/2013			
Lámparas para uso general	04/02/2011			
Lámparas de diodos emisores de luz (LED)	22/08/2012			
LED para vialidades y áreas exteriores públicas	05/05/2013			
Emisiones de bióxido de carbono para vehículos ligeros	20/08/2013			

Tabla 1. NOM de Eficiencia energética publicadas y actualizadas en el periodo 1995-2013

Los ahorros de energía que se lograron a partir de la publicación de las NOM de eficiencia energética sumaron 47,508 Gigawatts-hora hasta 2012¹, lo cual equivale al consumo total de energía eléctrica por el estado de Guerrero del año 2000 al 2016.

Así mismo, se tiene un segundo momento en noviembre de 2008 con la expedición de la Ley para el Aprovechamiento sustentable de la Energía (LASE), con esta ley los esfuerzos de mejora en el ámbito de eficiencia se acentúan:

*“Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía. Artículo 1.
La presente ley es de orden público e interés social. Tiene como objeto propiciar un aprovechamiento sustentable de la energía mediante el uso óptimo de la misma en todos sus procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo.”*

A partir de la LASE se crea la Comisión Nacional para el Ahorro y Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), quien funge como un órgano técnico que promueve el uso óptimo de la energía en todos sus procesos y actividades: explotación, producción, transformación, distribución y consumo. Además, se elabora el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE, 2009), el cual se encarga de formular y promover programas permanentes a través de dependencias y entidades correspondientes, para el aprovechamiento sustentable de la energía; por ejemplo el “Programa Luz Sustentable” (2009-2012), a cargo del FIDE, con el cual se sustituyeron de forma gratuita 47.2 millones de lámparas incandescentes por lámparas compactas fluorescentes (CFLs), logrando ahorros en el consumo de energía eléctrica de hasta 2,048 Gigawatts-hora al año².

1.2 Eficiencia energética en Municipios

El país se encuentra en un momento decisivo en materia energética, pues del año 2000 a 2011 la tasa anual de crecimiento de consumo de energía fue del 2%, y 1.8%³ para el Producto Interno Bruto (PIB), es decir, la producción de bienes y servicios no creció en la misma medida que el consumo de energía; el comportamiento normal de estos indicadores nos dice que si la demanda energética aumenta, la producción de bienes y servicios lo debe hacer en la misma proporción; escenario que actualmente no se tiene: se consume más energía para producir lo mismo. En este sentido, hacer un buen aprovechamiento de la energía en cada uno de los sectores económicos y sociales, puede aportar a la mejora de esta relación demanda energética-producción.

¹ Abril, 2014. Secretaría de Energía (SENER). “Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, PRONASE”. Consulta: Abril, 2017.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/55267/PRONASE20142018FINAL.pdf>

² Según el Sistema de Información Energética Nacional de la Secretaría de Energía, los ahorros que se lograron con el Programa Luz Sustentable son equivalentes al consumo energético anual de Aguascalientes o Zacatecas en el año 2009.

<http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true>

³ 2014. Secretaría de Energía (SENER). “Evaluación Rápida del Uso de la Energía, Acapulco de Juárez, Guerrero, México”. Consulta: Abril, 2017.

http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170877/1_Acapulco_de_Juarez.pdf

En general la tendencia del índice de independencia energética⁴ a conservarse por debajo de la unidad, es la razón de las recientes políticas tales como la vigencia de la LASE y la segunda edición del PRONASE, la apertura del mercado eléctrico o actividades como el Proyecto de Eficiencia y Sustentabilidad Energética en Municipios (PRESEM) y la reciente elaboración del Programa de Eficiencia Energética Municipal (PEEMUN).

El enfoque de políticas de eficiencia energética hacia ciudades y municipios, radica en que estos representan un porcentaje significativo dentro del consumo energético global, alrededor del 75%, [PRESEM, 2014].

En el caso del sector de servicios públicos (alumbrado y bombeo de agua potable y aguas negras), la energía eléctrica compone el consumo energético total en municipios, cuyos gastos energéticos están a cargo de los gobiernos locales. (Ver Gráfico 2).

Consumo de energía eléctrica del sector Público, Municipios

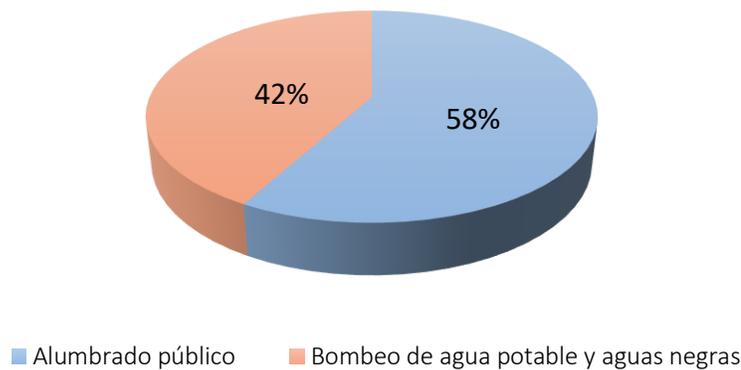


Gráfico 2. Consumo de energía eléctrica del sector público en Municipios [PRESEM, 2014].

En el caso de alumbrado público, el PAESE, aún vigente, fue uno de los primeros programas enfocados en mejorar la eficiencia en los sistemas de iluminación. A través de la evaluación de dispositivos, sistemas de control y tecnologías de luminarias, el PAESE define límites de eficiencia energética y delibera si un equipo es ahorrador de energía. Estas acciones son benéficas para los municipios en dos sentidos⁵:

- a) La tecnología en iluminación adquirida consume menos energía, por lo cual, se tiene una disminución en la facturación eléctrica.
- b) Con la constancia de uso de equipo eficiente emitida, la CFE otorga una exención de cargo por concepto de pérdidas energéticas.

⁴ Índice de independencia energética: Se refiere al grado en que un país cubre su consumo con la producción de energía.

⁵ Diciembre, 2016. Comisión Federal de Electricidad, CFE. "Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE)". Consulta: Abril, 2017. Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/Industria/PAESE/Paginas/paese.aspx>

De la misma forma, en el año 2010 se crea el Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal (Proyecto Nacional), el cual busca, a través de la sustitución de luminarios por otros de tecnologías más avanzadas y ahorradoras, disminuir el consumo energético y por ende los gastos que este rubro representa para los gobiernos municipales. Las tecnologías del parque de luminarios que se tenían antes de la entrada del Proyecto Nacional comprenden, en su mayoría, las de descarga eléctrica de alta intensidad:

- a) *Vapor de mercurio* de 400 [W], índice de reproducción cromática (CRI) de 50 y una vida útil promedio de 24 mil horas.
- b) *Vapor de sodio a alta presión* 400 [W], CRI de 22, flujo luminoso monocromático de color amarillo y una vida útil promedio de 24 mil horas.
- c) *Vapor de sodio a alta presión* de 250, 150 y 100[W] con reflector claro de vidrio termotemplado.
- d) *Vapor de sodio a baja presión* 180 [W], luz naranja-rojiza, pésimo índice de reproducción cromática, y vida útil promedio de 18 mil horas.

La siguiente gráfica muestra las tecnologías de alumbrado público instaladas en los Municipios de México⁶. (Ver Gráfico 3).

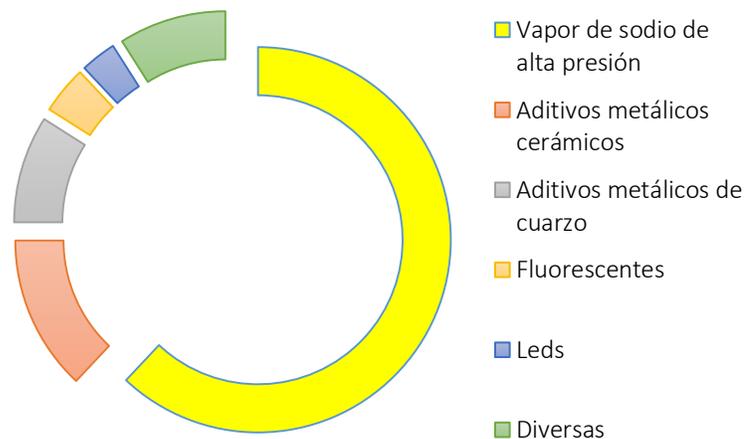


Gráfico 3. Tecnologías de alumbrado público instaladas en los Municipios de México. [CONUEE, 2016].

⁶ Noviembre, 2016. Comisión Nacional para el Ahorro y Uso Eficiente de la Energía, CONUEE. “*Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, Balance 2010-2016*”. Consulta: Abril, 2017. Disponible en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/179572/161202_Informe_de_Labores_Proyecto_Nacional.pdf

Es cierto que México está trabajando arduamente para un manejo más eficiente de la energía, sin embargo, es necesario crear cultura energética en los diferentes sectores. De las recientes políticas diseñadas para la difusión de los programas de eficiencia a nivel municipal se encuentra el PPENUM, el cual en colaboración con la CONUEE y financiado por la Embajada Británica en México, dota de las herramientas a los gobiernos locales para identificar e implementar medidas de eficiencia energética.

A continuación, se muestra el panorama de consumo eléctrico en los diferentes sectores tarifarios. (Ver gráfico 4.)

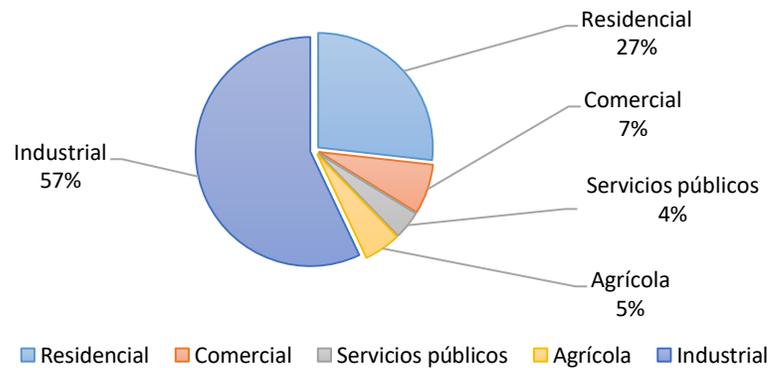


Gráfico 4. Ventas internas de energía eléctrica por sector tarifario, 2017. [Sistema de Información energética, Secretaría de Energía].

De la gráfica se observa que el sector público representa apenas el 4% de las ventas de energía eléctrica nacionales, sin embargo, actualmente, muchas de las políticas de eficiencia energética nacional están siendo orientadas a municipios, pues los consumos de electricidad en este sector representan costos significativos para los gobiernos locales.

A su vez, es importante mencionar que el sector industrial representa alrededor del 0.07% de los usuarios del total de la estructura tarifaria, pero significó el 57% de las ventas de energía eléctrica en 2016 [Sistema de Información Energética, SENER]. De modo que, el sector industrial ofrece un área de oportunidad cuantiosa, con la cual se podrían conseguir grandes beneficios e incrementar significativamente la eficiencia energética nacional, si es que se orientan políticas y programas hacia este sector.

1.3 Programa Pueblos Mágicos (PPM)

Se trata de una política turística que se formuló para resaltar las bondades históricas, culturales y naturales, de localidades destacadas por su autenticidad o singularidad, y ofrecer a los visitantes una experiencia única. Los interesados deben cumplir una serie de requisitos organizacionales, culturales, humanos y de infraestructura urbana para ser acreedores a este distintivo, con el cual podrán expandir sus horizontes de promoción turística tanto en el país como a nivel internacional. Los beneficios para localidades comprenden la cohesión y el desarrollo social, el incremento del empleo, el fortalecimiento de la economía del lugar, entre otras.

Una de las actividades que es necesario destacar para que el PPM cumpla con sus objetivos, es la inversión pública orientada a la infraestructura, obra pública y mejora de la imagen urbana, de esta forma el alumbrado público adquiere un carácter decisivo en el sentido de garantizar espacios seguros para la libre convivencia.

2. Marco teórico

2.1 Aspectos de diseño y eficiencia energética en Sistemas de alumbrado público.

El alumbrado público es un servicio a cargo de los gobiernos locales de los municipios, lo compone un conjunto de elementos que engloba tanto las luminarias, como la infraestructura eléctrica y el equipo necesario para iluminar espacios públicos, con el fin de generar condiciones de iluminación que aseguren el libre tránsito de los peatones y condiciones óptimas de visibilidad para los conductores. Las aplicaciones que comprende el alumbrado público incluyen: semáforos, iluminación ornamental y de temporada, vialidades, parques, plazas, jardines públicos, entre otros.

Como se mencionó anteriormente, la encomienda del presente proyecto es ofrecer propuestas para el buen aprovechamiento de la energía eléctrica en el sistema de alumbrado de una plaza pública, en este sentido, la eficiencia energética se fundamenta en el uso óptimo de la electricidad a razón de **niveles de iluminación adecuados** para el desenvolvimiento seguro de ciertas actividades, por mencionar algunas: recreación, convivencia entre los ciudadanos, estancia y tránsito de peatones. Dentro de esta clasificación, se tienen los siguientes parámetros técnicos de interés:

- A. Iluminancia: Es el flujo luminoso emitido por una lámpara incidente en una superficie de interés.
- B. Iluminancia horizontal: Define el nivel de iluminación que se tiene en una superficie de trabajo horizontal a cierta altura sobre el nivel de piso; o como es el caso de varios espacios públicos como estacionamientos, azoteas, techos de edificios, campos al aire libre: iluminancia a nivel de piso.
- C. Iluminancia vertical: Nivel de iluminación sobre una superficie vertical a cierta altura sobre el nivel de piso, por lo general a 1.5 [m], para fines de identificación de rostros y lenguaje corporal.

Sin embargo, no basta solo con cubrir las iluminancias establecidas para cierta área, a la vez, es necesario ofrecer una buena **calidad de luz**, evitando la contaminación lumínica y dando énfasis al confort. A continuación, se exponen los parámetros y elementos de diseño vinculados con la calidad de luz, su entorno de propagación y el confort:

- I. Deslumbramiento: Sensación producida por luminancias de tal magnitud que no son tolerables para el ojo humano, puede causar molestia, incomodidad e incluso la pérdida momentánea de la visibilidad. Se tienen dos tipos de deslumbramiento:
 - a. Incapacitante: Es atribuido a luminarios del tipo *non-cutoff*, cuyo flujo luminoso es carente de una dirección definida sobre la superficie de interés.

- b. Incomodante: Es generado por la reflexión de luz sobre ciertos materiales o por elementos reflectores alrededor del ojo humano como pómulos, lentes, pestañas u otros.

Es deslumbramiento puede ser controlado a través de la correcta selección del luminario, con base en las luminancias que este presenta en ciertos ángulos de apertura (*Ver Imagen 1*), para esto es obligado consultar las curvas fotométricas que ofrecen los fabricantes y compararlas con los límites de luminancia estipulados en la normatividad aplicable.

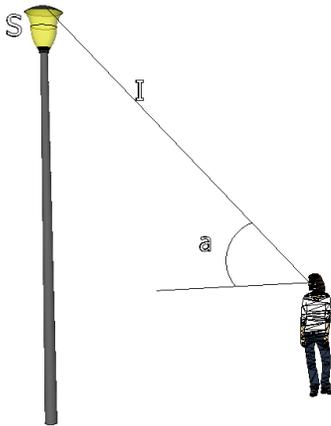


Imagen 1. Deslumbramiento de un luminario tipo *semi-cutoff*. Este parámetro se calcula con base en la intensidad luminosa I , del luminario con superficie S , en cierta dirección α .

- II. Índice de reproducción cromática (CRI): Capacidad de las fuentes luz, de permitir al observador una percepción fidedigna de los colores, en referencia a los mismos iluminados con luz natural. Se define por una escala del 1 al 100 y depende de la composición cromática de la lámpara. Por ejemplo, si quisiéramos acentuar una jardinera con plantas de ornato verdes, la fuente de luz predilecta para dicho fin deberá contener una cantidad generosa de verde dentro de su composición espectral, tal como el vapor de mercurio. (*Ver Imagen 2*).

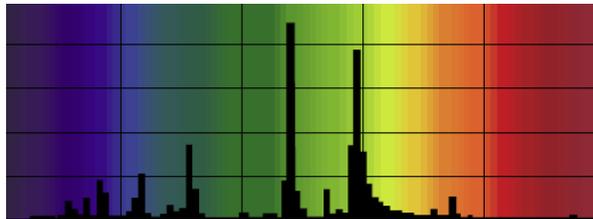


Imagen 2. Espectro de una lámpara de halogenuros metálicos. Fuente OSRAM.

- III. Temperatura de color: Se trata de la correlación del color que emite un metal al ser calentado a cierta temperatura, con el de una fuente de luz. Por su apariencia, las fuentes de luz se clasifican en “cálidas” o “frías” cuantificando este parámetro en grados Kelvin. Como fuentes de luz cálida se tienen el sodio a alta presión, las incandescentes y algunas

fluorescentes de espectro modificado las cuales rondan entre los 1800 K y 3200 K; en el caso de luz fría, se encuentran los aditivos metálicos, el vapor de mercurio y de igual forma fluorescentes, en un rango de 4000 K a 7500 K. Hablando de plazas públicas, nos importa generar ambientes agradables, confortables y de descanso, lo cual se puede lograr con temperaturas de color cálidas⁷.

- IV. Uniformidad: Es la relación de iluminancia máxima, entre la mínima en cierta zona de interés, con el fin de identificar o anticiparse a escenarios carentes o excesivos de iluminación. Por ejemplo, una uniformidad 4:1 querrá decir que el valor mínimo de iluminancia no deberá ser menor que el 25% del su valor máximo.
- V. Sombras: Es obligado que el diseño del sistema de iluminación se conjugue con las variables arquitectónicas y bioclimáticas del lugar, con el fin de lograr las iluminancias requeridas para el desempeño de las actividades visuales sin la interferencia de elementos que obstaculicen la propagación de la luz. Los árboles dentro del entorno a iluminar pueden generar sombras. (Ver Imagen 3).

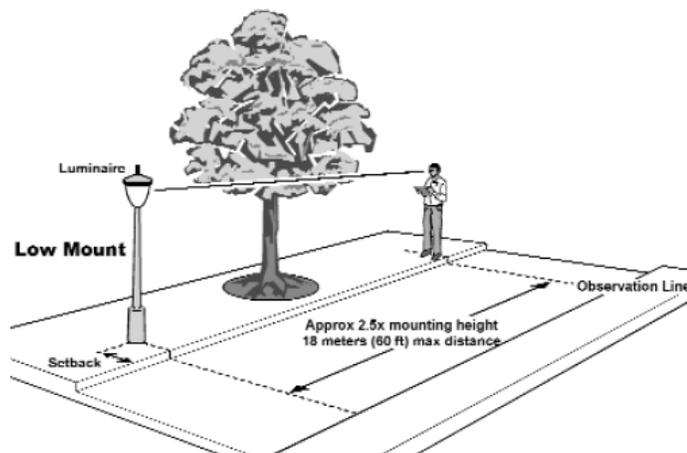


Imagen 3. El ángulo de apertura de la luminaria y su altura deben ser las adecuadas para que la distribución de la luz no sea interferida por el follaje de árboles. Fuente IESNA G-1-03

- VI. Contaminación lumínica: Se refiere a los efectos que la iluminación artificial, ocasiona sobre la atmósfera nocturna, estos son del tipo fisiológico en humanos y animales, o el impedimento de actividades nocturnas como la observación astronómica.

⁷ School of Architecture, University of Texas At Austin; Center for Sustainable Development. "Color and Visual Comfort". Cecilia Rios Velasco. Consulta: Mayo, 2017. Disponible en: https://soa.utexas.edu/sites/default/disk/urban_ecosystems/urban_ecosystems/09_03_fa_kwallek_riosvelasco_ml.pdf

Teniendo presentes lo anteriores conceptos, se podrán conseguir mejoras en los diseños de sistemas de alumbrado público y en sus aspectos técnicos y energéticos. En este tenor, existen tres rubros a cumplir para que un sistema de alumbrado público adquiera el adjetivo “eficiente”:



eficiencia del luminario relación entre el flujo luminoso emitido por el conjunto luminaria-lámpara y el emitido solo por la lámpara. [adimensional].

eficiencia de la fuente de luz relación entre el flujo luminoso emitido por la lámpara y la potencia eléctrica que demanda para lograrlo. [lm/W]



eficiencia en la difusión de la luz a través del entorno se basa en factores adimensionales menores a la unidad dependientes de aspectos constructivos y de acabados; así mismo, en la distribución óptima de los luminarios alrededor de la zona de interés.

Las medidas comúnmente utilizadas para cumplir con el buen aprovechamiento de la energía se basan en:

- a) **Sustitución tecnológica:** Ofrece ahorros cuantiosos de energía eléctrica, conservando o mejorando niveles de iluminación y calidad de luz, actualmente se tiene una tendencia hacia la sustitución de lámparas de baja eficacia como el vapor de sodio y el vapor de mercurio.
- b) **Redistribución de luminarias:** Esta medida contribuye a la eficiencia en el sentido de que, al procurar las mejores distancias interpostales y las menores alturas de montaje posibles, se logrará disminuir la cantidad de luminarias y en consecuencia la densidad de potencia eléctrica por alumbrado.
- c) **Programas de mantenimiento:** En general, cualquier proyecto de iluminación debe ir acompañado con un programa de mantenimiento que procure la permanencia de los niveles de eficiencia energética y los parámetros de iluminación lo más cercano posible a los iniciales
- d) **Elementos de control:** Optimizan los tiempos de operación de los luminarios y por tanto el consumo de energía, a través de dispositivos que apaguen, enciendan, o regulen la salida de luz con base en las necesidades de iluminancia durante el día o de cierto horario en específico. Algunos de los dispositivos que por lo general aplican al alumbrado público son las fotoceldas, los *timers*, *dimmers*, entre otros; la aplicación de uno u otro, dependerá de las características de la lámpara y de los requerimientos de iluminación.

2.2 Luminarias para alumbrado público

Una luminaria está compuesta de diversos elementos para transformar, distribuir, controlar y dirigir la luz emitida por una lámpara hacia un ambiente en específico. En el caso de luminarias para alumbrado público exterior, forman parte de este conjunto los accesorios mecánicos, ópticos y eléctricos. A continuación, se exponen las partes de un luminario genérico de esta naturaleza, *Ver Imagen 4*.

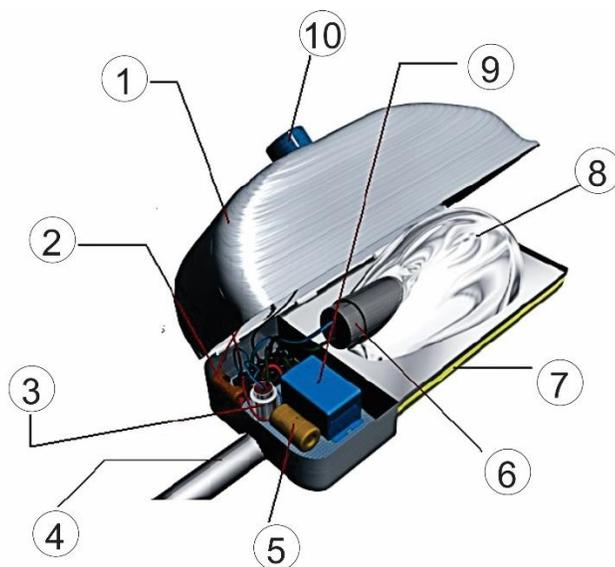


Imagen 4. Componentes de una luminaria para alumbrado público exterior. [Fuente: Reglamento Técnico de Alumbrado Iluminación y Alumbrado Público de Colombia.]

1. **Envolvente:** Proporciona soporte y protege tanto la lámpara, como el conjunto eléctrico y óptico de agentes externos y el medio ambiente. Para este elemento se tienen dos clasificaciones, basadas en el grado de protección:
 - a. **Protección IP:** Se trata de una codificación para indicar el nivel de protección de la envolvente contra el acceso a partes peligrosas por parte del personal, o contra la penetración de cuerpos sólidos extraños y agua.
 - b. **Protección IK:** Índice de protección proporcionado por la envolvente contra impactos mecánicos nocivos. El código IK se designa con un número graduado del 1 al 10, cuyo valor aumenta a medida que el luminario soporta mayores magnitudes de energía de impacto, con objetos de mayor altura y masa, sin afectar la integridad de los componentes.

Por ejemplo, con base en la norma IEC- 60598-2, la cual hace referencia a los requisitos que deben cumplir las luminarias para alumbrado público exterior, se recomienda que los luminarios LED que se utilicen en alumbrado público exterior cuenten con una protección IP 65 y un índice al impacto apropiado para la zona de instalación.

2. **Protección eléctrica:** Es utilizada para la protección de los elementos de la luminaria contra corrientes mayores a la de operación, causadas por sobrecargas de tensión o corto circuito.
3. **Arrancador:** Dispositivo necesario para el encendido de la lámpara, depende del tipo de esta; en el caso de las de descarga en gases, se utiliza para la generación altos voltajes o pulsos eléctricos que permitan la ionización del gas y den lugar a la luminiscencia.
4. **Brazo o soporte de fijación:** Proporciona la altura y resistencia mecánica necesaria a la luminaria.
5. **Capacitor auxiliar:** Es utilizado para almacenar cargas eléctricas, y limitar cambios bruscos de tensión que afecten a los componentes eléctricos. También puede servir para la descarga del circuito eléctrico o para la corrección del factor de potencia.
6. **Lámpara:** Dispositivo fundamental de la luminaria encargado de la conversión de la energía eléctrica en lumínica. Las características de la luz emitida por estas, dependen de su tecnología. *Ver Anexo D. Tabla comparativa de tecnologías en lámparas.*
7. **Pantalla, refractor o difusor:** Compuesto por un material de ciertas características ópticas, encargado de distribuir, dirigir y uniformizar la salida de luz.
8. **Reflector:** Dado que la lámpara ofrece un flujo luminoso en diferentes ángulos, el reflector es utilizado para redirigir la luz que por naturaleza no está direccionada a la salida de la luminaria.
9. **Balastro:** Dispositivo electrónico o electromagnético encargado de ofrecer las condiciones necesarias para el arranque y operación de la lámpara.
10. **Control:** Encargado del apagado, encendido o regulación de la salida de luz de la luminaria.

Lo anterior, compone los elementos y requisitos mínimos que deben cumplir los luminarios para alumbrado público, sin embargo, estos pueden diferir de uno a otro debido a la variedad de tipos de luminarios y tecnología de iluminación existente en el mercado.

2.3 Normatividad Nacional e Internacional aplicada al Alumbrado Público

Es importante que cualquier sistema de alumbrado público garantice las condiciones óptimas de iluminación a fin de crear entornos adecuados para el desarrollo de las actividades que en estos se desempeñen, en el caso de alumbrado público, y en particular plazas y parques, la identificación de rostros y atuendos de las personas, el tránsito libre y seguro de peatones y la generación de un ambiente confortable, son los parámetros a considerar, tomando en cuenta en todo momento la eficiencia energética y la calidad de alumbrado, este último parámetro, relativo al deslumbramiento o contaminación lumínica.

Desafortunadamente, el presente caso de estudio no cuenta con una normatividad nacional específica para sistemas de alumbrado de plazas y parques, sin embargo, sí se tienen referencias sobre alumbrado público para vialidades y de requisitos mínimos que deben cumplir las lámparas, dependiendo de su tecnología. De esta forma, se tratará de adaptar la normatividad nacional existente a manera de referencias no obligatorias:

a) NOM-028-ENER-2010. Eficiencia energética de lámparas para uso general, límites y métodos de prueba.

Se trata de una norma de producto que establece límites mínimos de eficacia para lámparas de uso general empleadas en la iluminación de los sectores residencial, comercial, servicios, industrial y alumbrado público, tales como, lámparas de descarga en alta intensidad, fluorescentes compactas autobalastadas, fluorescentes lineales, incandescentes, incandescentes con halógenos y luz mixta. De esta norma se tomarán los niveles mínimos de eficacia luminosa para lámparas de vapor de sodio a alta presión y aditivos metálicos.

b) NOM-031-ENER-2012. Eficiencia energética para luminarios con diodos emisores de luz (leds) destinados a vialidades y áreas exteriores públicas. Especificaciones y métodos de prueba.

Define límites mínimos de eficacia luminosa para los luminarios con diodos emisores de luz (leds), destinados a vialidades y áreas exteriores públicas, así como los métodos de prueba aplicables para verificar dichas especificaciones. La presente servirá de apoyo para la selección de los luminarios de las propuestas de mejora.

c) NOM-013-ENER. Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades y áreas exteriores públicas.

En su versión 2013, la NOM 013 ENER, es una norma de sistema que define niveles máximos de densidad de potencia eléctrica por alumbrado, así como niveles de iluminancia para diferentes tipos de vialidades. Cabe mencionar que esta norma, no aplica para áreas plazas y parques, sin embargo, se pueden tener referencias fidedignas de estos parámetros considerando a las vialidades del presente caso de estudio como vialidades *Tipo A*:

4. Definiciones.

Tipo A. Vía de tipo residencial con moderado tránsito peatonal nocturno, tránsito vehicular de bajo a moderado y con moderada existencia de comercios, (DOF 14/06/2013, 4. Definiciones)

La versión 2013 de la presente norma, sustituye y anula a la anterior, versión 2004, la cual, si establecía referencias, en cuanto eficacia luminosa, para áreas públicas exteriores:

6. Especificaciones.

Los sistemas para alumbrado de áreas exteriores públicas cubiertos por los apartados 5.3.4, 5.3.5 y 5.3.6 (Aceras, Paraderos, Plazas y Zócalos) de la presente norma oficial mexicana, el valor mínimo de eficacia de la fuente luminosa debe ser de 70 [lm/W]. (DOF 16/04/2005, 6. Especificaciones.)

La omisión de estas referencias en la última actualización de la NOM 013 ENER, se justifica con la creación de normatividad específica en eficiencia energética de lámparas de uso general, las cuales incluyen, lámparas de vapor de sodio a alta presión, aditivos metálicos y LED, tecnologías de lámparas comúnmente utilizadas en alumbrado público.

e) NOM-025-STPS-2008. Esta norma define niveles de iluminación obligatorios para las áreas de los centros de trabajo. A pesar de que no es una norma de eficiencia energética, para el presente caso de estudio, podemos tomarla como referencia en cuanto a niveles de iluminancia horizontal, la cual establece 20 [lx] promedio para áreas exteriores como patios y estacionamientos.

Si se observa, la normatividad nacional define límites de eficacia luminosa para los distintos tipos de tecnología, sin embargo, las referencias sobre niveles de iluminación o aspectos de diseño de sistemas de iluminación para parques y plazas son mínimas, por esta razón, tomaremos recomendaciones internacionales cuyo cumplimiento no está obligado dentro del territorio nacional, pero resultan efectivos para nuestro caso de estudio:

i) IESNA RP-33-99. Prácticas Recomendadas en la Iluminación de Ambientes Exteriores.

Este documento ofrece bases y recomendaciones técnicas para el diseño de sistemas de iluminación en exteriores, por mencionar algunas: deslumbramiento, brillo, agudeza visual, iluminancia, uniformidad, contaminación lumínica y mantenimiento.

ii) IESNA G-1-03. Guía para la Iluminación de Seguridad para Personas, Propiedades y Espacios Públicos.

Si bien existe una amplia variedad en las tareas que se desempeñan en los espacios públicos, el común denominador en estas es la seguridad; la presente guía ofrece recomendaciones de carácter general al momento de diseñar espacios públicos, además, establece niveles mínimos de iluminancia horizontal y vertical para el desempeño de ciertas actividades. *Consultar Anexo A. Iluminancias horizontales y verticales para diferentes espacios públicos.*

Para el presente caso de estudio (plazas y parques), se tomará como referencia de iluminancia horizontal la correspondiente a la clasificación 7.2.6 de la IESNA G-1-03. Estacionamientos y áreas para parques públicos en particular la de pasillos y andadores, la cual debe ser como mínimo 30 [lux] a nivel de piso, con un rango de uniformidad de no menor que 4:1. Ver Imagen 5.

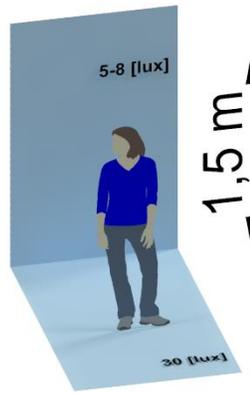


Imagen 5. Niveles de iluminancia horizontal y vertical para estacionamientos y áreas para parques públicos recomendados por la IESNA G-1-03.

Para la iluminancia vertical la IESNA G-1-03 recomienda de 5 a 8 [lux] o valores que produzcan un rango de uniformidad no mayor de 4:1 respecto de la iluminancia horizontal (es decir, 25% de la iluminancia horizontal).

iii) Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia.

Así mismo, se tomaron como referencias las prácticas de diseño de alumbrado público del *Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia*, si bien estas recomendaciones no definen límites de eficiencia, sí estipulan niveles de iluminación para diferentes escenarios de iluminación exterior. El adecuado para el presente, recae en la clasificación *plazas y plazoletas*, la cual define 30 [lx] de iluminancia horizontal a nivel de piso y una uniformidad mínima 3:1. Este nivel de iluminación coincide con lo dictado por la IESNA G-1-03, para estacionamientos y áreas para parques públicos. Ver Anexo A. *Iluminancias horizontales y verticales para diferentes espacios públicos*.

Cabe destacar que este reglamento no ofrece iluminancias verticales las cuales son de suma importancia en el alumbrado público.

2.4 Método de diagnóstico energético para sistemas de alumbrado público

En primer lugar, es necesario definir la profundidad de análisis a la que se quiere llegar, esta decisión depende de la certeza que se desee en los resultados, de la disponibilidad y acceso a la información sobre el sistema de los directivos hacia el auditor, o de la magnitud de los gastos energéticos que tiene la empresa. En nuestro caso, y con base en los factores anteriores, analizaremos el presente sistema de iluminación con base en los criterios de un **diagnóstico energético de nivel 1**. A continuación, se presentan las características que este debe cumplir en cada una de sus etapas:

FASE 1: Análisis previo

- 1) **Recabar datos generales del área.** Ubicación geográfica, identificación de las actividades principales o tareas visuales, superficie de terreno, tipo de área, antigüedad del sistema de iluminación y horario de operación.
- 2) **Solicitar información energética.** Bitácoras y registros energéticos, facturación eléctrica o método de cobranza por parte de la compañía suministradora.
- 3) **Censo de luminarias.** Conocer equipo y tipo de tecnología instalada, con el fin de tener un primer acercamiento al sistema de iluminación (equipo eléctrico en su totalidad).
- 4) **Definir alcances.** Delimitar las áreas de interés.
- 5) **Mediciones eléctricas y fotométricas.** Es importante identificar puntos representativos del sistema para la toma de mediciones, seguidamente realizar estas con base en un protocolo de medición que permita obtener lecturas lo más cercanas a las condiciones reales de operación.
- 6) **Tiempo de toma de mediciones eléctricas.** A menos de que se cuente con un control que regule la salida de luz de las lámparas con base en cierta condición, es suficiente con hacer mediciones instantáneas.
- 7) **Identificar posibles oportunidades de ahorro.**

FASE 2: Análisis energético

- 1) **Contabilidad energética.** Establece los gastos energéticos por tipo de área, o en su defecto globales, y cómo se comporta este consumo a través del tiempo (por lo general anual).
- 2) **Abastecimiento energético.** Comprende tanto el tipo de fuente de energía suministrada al sistema, como los precios y sus tendencias, y/o requerimientos legales. En este caso nuestro análisis recae directamente en el esquema tarifario de CFE, en particular, **Tarifa 5 y 5A**.
- 3) **Indicadores de desempeño energético.** Se refiere a valores cuantitativos o medidas del desempeño energético, para cuantificar valores de consumo de energía contra valores de producción, o variables que sean importantes para la empresa.

- 4) **Línea base energética.** Se trata de una referencia cuantitativa que proporciona la base de comparación del desempeño energético del sistema, frente a cualquier propuesta de mejora.

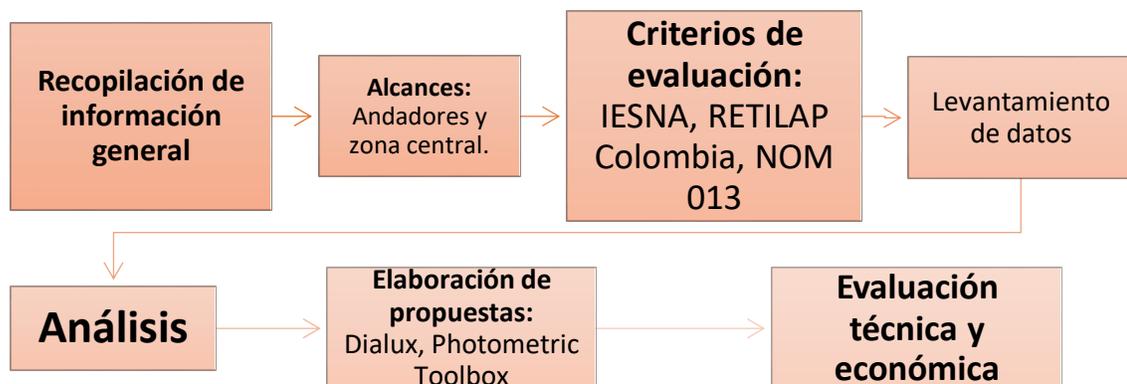
FASE 3: Evaluación de las medidas de ahorro y uso eficiente de la energía (AyUEE).

Hasta este punto se tiene totalmente caracterizado al sistema e identificados los potenciales de mejora, sin embargo, es necesario seguir un procedimiento para asegurar la viabilidad técnica y económica de las propuestas de mejora. A continuación, se enuncia los pasos para lograr este fin:

- I. **Análisis técnico del sistema o equipo.** Se valora la problemática y la posible solución.
- II. **Determinación de los potenciales de ahorro.** Valorar la factibilidad técnica de las medidas de AyUEE, a través del análisis de:
 - a) Tarifas eléctricas y de otras fuentes de suministro
 - b) Mejoras en mantenimiento
 - c) Mejoras tecnológicas
 - d) Mejoras en la operación (implementación de sistemas de control).
- III. **Análisis de rentabilidad.** Además de cumplir con el punto anterior, las medidas de AyUEE deberán pasar por una evaluación adicional para conocer los beneficios energéticos, económicos y ambientales.
- IV. **Implementación de las medidas.** Clasificar las medidas resultantes por operativas o de bajo costo, y tecnológicas o de costos mayores, para ponderar su implementación.

FASE 4: Informe de medidas de AyUEE

A manera de resumen, se presenta el siguiente mapa de proceso para ejemplificar el procedimiento utilizado en el presente trabajo. *Ver Mapa de Proceso. Procedimiento para diagnósticos energéticos en alumbrado público.*



Mapa de Proceso. Procedimiento para diagnósticos energéticos en alumbrado público.

3. Caso base

Es importante garantizar puntos de encuentro (espacios públicos) para el libre desarrollo de actividades económicas y recreativas, la seguridad, es entonces un factor crítico en el diseño de estos espacios, está comprobado que la inclusión de un sistema de iluminación diseñado con base en los requerimientos de seguridad de cierta zona, favorece la disminución de actos delictivos⁸ por dos razones:

- I. potencia la vigilancia por parte de las autoridades, sobre posibles delincuentes, e
- II. incrementa la confianza y cohesión social entre los habitantes.

En este afán, se describen las condiciones actuales del sistema de iluminación y sus elementos, para su posterior análisis.

3.1 Zócalo de Iguala

La ciudad de Iguala, por su ubicación geográfica representa un punto de enlace entre la región de Tierra Caliente (que comprende territorios de Michoacán y Guerrero) y la región Centro del País, se encuentra dentro de las tres ciudades más pobladas del Estado de Guerrero. Cabe destacar que la ciudad de Iguala es el lugar de residencia de muchos profesores, siendo el sector educativo y de servicios los principales soportes económicos del municipio. El zócalo de la ciudad de Iguala, se trata de un espacio para la recreación y el esparcimiento de los ciudadanos, ubicado en el primer cuadro de la ciudad. Ver Gráfico 5.

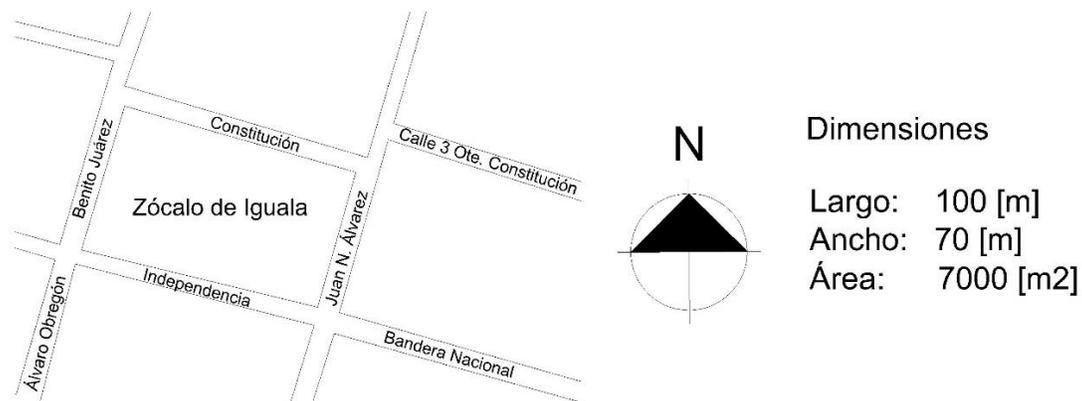


Gráfico 5. Ubicación Zócalo de la ciudad de Iguala.

⁸ Septiembre, 2008. Campbell Collaboration. "Effects of Improved Street Lighting on Crime". Welsh, Brandon P. Farrington, David C. Consulta: Marzo, 2017.

http://www.crim.cam.ac.uk/people/academic_research/david_farrington/light.pdf

Comprende un área de aproximadamente 7, 000 metros cuadrados, poblada con árboles de follaje denso, en su mayoría tamarindos, los cuales forman parte del diseño bioclimático. Cuenta con 56 jardineras con plantas ornamentales y arbustos, de las cuales 32 están localizadas en el perímetro de la plaza y 24 se encuentran al interior.



Fotografía 1. Elementos arquitectónicos y bioclimáticos del zócalo de Iguala.

El interior de la plaza consta de andadores definidos por las jardineras, los cuales conducen a un quiosco de usos múltiples ubicado al centro. El quiosco lo comprenden dos niveles, que en su conjunto alcanzan los 200 metros cuadrados de construcción. Materiales como adoquín y concreto hidráulico componen el suelo de zócalo.

Así mismo, por el contexto histórico de la ciudad de Iguala, dentro de la plaza se encuentran 3 bustos, 2 monumentos y 4 mamparas con el emblema de la ciudad, los cuales resaltan la importancia histórica de esta.



Fotografía 2. Bustos y monumentos dentro de la plaza.

Dentro del zócalo, encontramos algunos locales cuyos usos son ajenos a los de la plaza y rompen totalmente con el concepto de lugares de esparcimiento, se trata de un comedor y una papelería. En general, las condiciones de los elementos que conforman la plaza son malas, y por simple inspección visual se percibe que los servicios de mantenimiento hacia la plaza son casi nulos, o se realizan en periodos de tiempo muy largos.

3.2 Facturación eléctrica

El alumbrado público incluye la energía eléctrica para la operación de semáforos, alumbrado general y alumbrado ornamental por temporadas, de calles, plazas, parques y jardines públicos [Tarifas para alumbrado público, CFE, 2017]. Dentro de la estructura tarifaria de CFE, las tarifas 5 y 5A son las aplicables a este rubro, las cuales se definen por su ubicación:

- I. Tarifa 5, para zonas conurbadas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, y
- II. Tarifa 5A, para el resto del país.

La facturación de este servicio se puede calcular a partir de las mediciones de un monitor de energía eléctrica que la compañía suministradora proporciona al usuario, localizado en el punto de acometida, o a través de una estimación con base en la demanda contratada cuando no se cuenta con este equipo de medición⁹. En este caso, se hace un convenio entre la compañía suministradora y el gobierno local, en el cual se establecen las condiciones de uso y estimación de los consumos, por lo general, 12 horas de uso diarias, y se define la carga a contratar con base en la potencia total nominal de las lámparas más un 25% adicional por equipo auxiliar, tomando cualquier fracción de kilowatt como kilowatt entero. [Manual de disposiciones relativas al suministro y venta de energía eléctrica destinada al servicio público, Diario Oficial de la Federación, 21/02/2013]. Con base en lo anterior, la potencia considerada para efectos de facturación del *alumbrado general* del Zócalo de la ciudad de Iguala, en Tarifa 5A, será la siguiente. Ver *Tabla 4*.

Potencia Total por tipo de lámpara	$Potencia_{T_{Tipo\ 1}} = (1.25)(P_{nom\ T_{Tipo\ 1}})(\# \text{ lámparas}_{T_{Tipo\ 1}})$
Carga contratada	$Carga\ contratada = \sum_1^n Potencia_{T_{Tipo\ n}}$
Potencia Total	9 kW
Horas de uso	12

Tabla 4. Carga contratada considerada para la facturación, Tarifa 5A.

Para esta tarifa, la **facturación básica** está compuesta únicamente del cargo por consumo de energía, con base en las horas convenidas y la carga contratada, esta se realiza bimestralmente pues no cuenta con el cargo por demanda. Ver *Tabla 5*.

Consumo de energía día	$Energía_{día} = [Carga\ contratada][Horas\ convenidas]$
Facturación básica bimestral	$FB = [Energía_{día}][Días\ de\ Facturación_{bimestre}][Precio\ energía]$

Tabla 5. Facturación básica bimestral, Tarifa 5A.

⁹ Junio, 2013. Diario Oficial de la Federación. “Manual de disposiciones relativas al suministro y venta de energía eléctrica destinada al servicio público”. Disposición decimoctava, sección tercera. Consulta: Junio, 2017.

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5290625&fecha=06/03/2013

La facturación total bimestral, la componen cargos adicionales por factor de potencia, medición en baja tensión, cuando el suministro se realiza en media tensión y por el impuesto al valor agregado (IVA). En la siguiente tabla se muestra el procedimiento para el cálculo de la facturación total bimestral. *Ver Tabla 6.* Sin embargo, en el caso de que la facturación sea estimada, el cargo por medición en baja tensión y el cargo por factor de potencia son omitidos y cubiertos indirectamente dentro del 25% adicional a la potencia de lámparas instalada.

Facturación básica	Cargo MBT	Factor de potencia FP	IVA
FB	+ [2%][FB]	+ [%B][FN] - [%R][FN]	+ [16%][FNE]
Facturación básica			
Facturación normal, FN			
Facturación neta, FNE			
Facturación total, FT			

Tabla 6. Procedimiento para el cálculo de la facturación total en Tarifa 5A.

Considerando lo anterior, el estimado de la facturación anual con precios de la energía en media tensión para el mes de agosto, asciende a los **\$150,000.00** pesos anuales. *Ver Anexo B. Facturación eléctrica anual.*

3.3 Descripción del sistema de iluminación

El sistema de alumbrado público del Zócalo está constituido por tres rubros:

- Alumbrado general:** Se compone de un arreglo de 16 luminarios de tecnología de vapor de sodio a alta presión (VSAP), de 250 [W] a 220 [V], distribuidos perimetralmente, y 4 más de la misma tecnología, ubicados al interior de la plaza. Los luminarios se encuentran anclados a postes de sección hexagonal de 5m de altura, el follaje de los árboles obstruye la salida de luz de algunos de estos. *Consultar Anexo C Vista en planta, Zócalo de Iguala.*



Fotografía 3. Luminarios de alumbrado general. Potencia 250 [W], tecnología de vapor de sodio a alta presión.

Dentro del alumbrado general encontramos tres puntos de interés:

- I. Andador perimetral (Zona 1): Consiste en una acera perimetral de 10 metros de ancho, la cual contiene 32 jardineras con árboles de denso follaje y 53 bancas de metal.
 - II. Andadores interiores (Zona 2): Componen los caminos que conducen al centro de la plaza, de igual forma, su actividad principal es el tránsito de peatones.
 - III. Zona alrededor del Quiosco (Zona 3): A pesar de que también se puede considerar como una zona de tránsito peatonal, también sobresalen las actividades de recreación y estancia.
- b) **Alumbrado para bustos y monumentos.** Iluminación dedicada a resaltar aspectos estéticos de 3 bustos y 2 monumentos localizados alrededor de la plaza. Actualmente, este rubro se encuentra inactivo por falta de mantenimiento e infraestructura dañada por posibles actos vandálicos.
- c) **Iluminación Quiosco.** El quiosco localizado al centro de la plaza lo utilizan como recinto de actividades múltiples, entre ellas conciertos y ceremonias, sin embargo, solo se encuentra iluminada la planta baja con lámparas compactas fluorescentes; también cuenta con iluminación de acento para las columnas y aspectos arquitectónicos, pero su infraestructura se encuentra dañada.

A manera de resumen, la siguiente gráfica muestra la carga instalada por alumbrado público para los diferentes rubros. (Ver Gráfico 6).

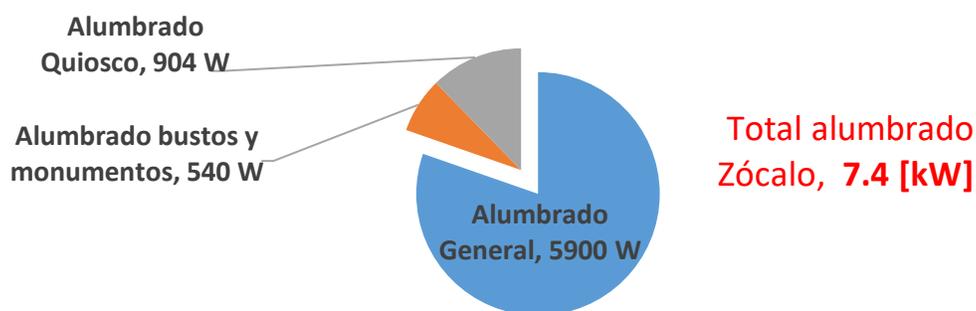


Gráfico 6. Porcentaje de carga instalada por alumbrado público del Zócalo de Iguala, para los diferentes rubros.

Como se observa en el gráfico anterior, el alumbrado general sobresale de los demás rubros con el 80% de la carga instalada; este rubro es de suma importancia en comparación a los otros pues incide directamente en la percepción que los ciudadanos tienen sobre la seguridad pública del lugar. A continuación, se muestran los costos energéticos anuales estimados con base en la política de cobranza de la compañía suministradora. Ver Gráfico 7.

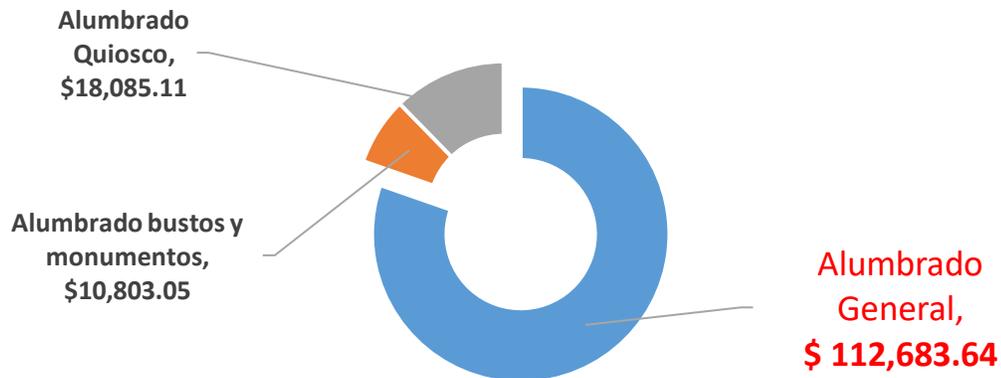


Gráfico 7. Facturación eléctrica por alumbrado público del Zócalo de Iguala, para los diferentes rubros

Con base en el gráfico anterior, podemos confirmar que el alumbrado general de la plaza representa un área de oportunidad pues además de representar el 80% de la carga instalada, sus costos energéticos anuales rondan los **\$110,000.00**.

Por lo anterior, el presente trabajo se orientará al análisis del alumbrado general de la plaza, que incluye los andadores y áreas comunes. *Ver Anexo D. Zonas de interés de alumbrado general.* En este sentido, es imprescindible establecer los parámetros técnicos que definen la situación actual del sistema de alumbrado, los cuales servirán como punto de comparación para la elaboración y selección de propuestas de mejora. A continuación, se ofrece una descripción más detallada del sistema de alumbrado actual:

I. Tecnología de iluminación

La tecnología de vapor de sodio a alta presión fue de las primeras tecnologías con altos rendimientos [lm/W] y por tanto las lámparas con la mejor relación costo-beneficio, la cual fue innovándose a través del tiempo en diferentes ámbitos, tales como la mejora del índice de reproducción cromática a través de la inclusión de fósforos y mercurio, o mejores circuitos de arranque para preservar la vida de sus electrodos principales. El presente caso de estudio, cuenta con lámparas de vapor de sodio a alta presión, de **250 [W]**, la cual alcanza eficacias luminosas nominales de **110 [lm/W]**.

Dentro de las tecnologías de lámparas de descarga de alta intensidad, como el vapor de mercurio y los aditivos metálicos, la tecnología de vapor de sodio ofrece los mejores factores de mantenimiento de lumen y horas de vida útil, **LLD $1/2 = 0.91$** , y **VUB10 = 24,000 [Hr]** respectivamente.

Ver Anexo E. Parámetros de luminaria caso base, I. Tecnología de iluminación.

II. Conjunto lámpara luminario

El luminario juega un papel decisivo en la salida real de flujo luminoso y es necesario contemplar factores adicionales que influyen en la depreciación de este. Los factores aplicados en este apartado se clasifican en recuperables y no recuperables, los cuales se refieren a la capacidad que presentan los materiales que componen el luminario para recuperar sus propiedades físicas. Así, el factor de depreciación por envejecimiento, **LLD**, será no recuperable, mientras que el factor de depreciación de lumen por polvo, **LDD**, será recuperable. Con dicha clasificación, el presente luminario proporciona únicamente el **68%** de flujo total de la lámpara, lo demás se resume en pérdidas por los factores de depreciación antes mencionados. Con este aprovechamiento de flujo luminoso, la lámpara de vapor de sodio no ofrece los rendimientos de eficacia luminosa [lm/W], alcanzando únicamente los **56 [lm/W]**. Ver Anexo D, Parámetros caso base, II) Conjunto lámpara-luminario.

Cabe mencionar que el flujo luminoso total a la salida del luminario, no es del todo aprovechable, pues depende de la distribución luminosa que genere el luminario, es decir, hacia donde dirija la luz. Las curvas de intensidad lumínica, nos ofrecen una mira rápida sobre el aprovechamiento que la luminaria ofrece hacia la zona útil, entre 0° y 90° en ángulo vertical. Ver gráfico 8.

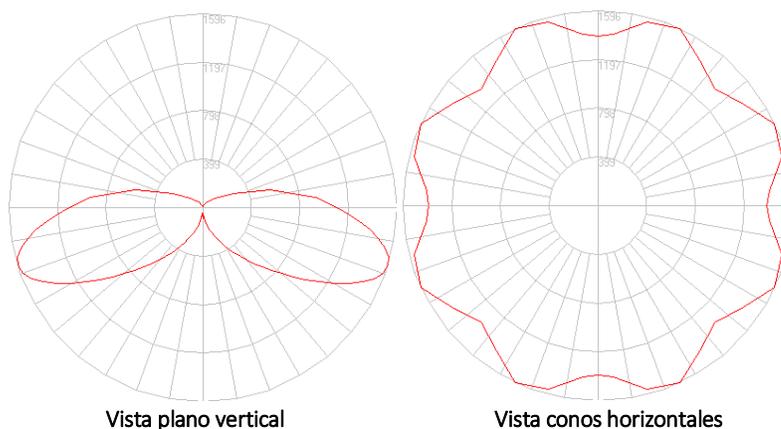


Gráfico 8. Curvas de intensidad luminosa máxima, luminario non-cutoff a base de vapor de sodio de 250 W.

Como se puede observar en la vista de plano vertical del gráfico anterior, parte del flujo luminoso se escapa hacia regiones no aprovechables, para la iluminación de vialidades entre 90° y 180° en ángulo vertical. De este modo, solo se puede llegar a aprovechar, como máximo, el **75%** del flujo luminoso a la salida del luminario. Cumplir con el máximo aprovechamiento también dependerá de las condiciones de montaje e instalación.

III. Datos de instalación y montaje

No basta con tener un buen flujo luminoso a la salida, con la mejor eficacia luminosa [lm/W]; la ubicación y el montaje son otros elementos de suma importancia en el sistema de alumbrado, pues también es de interés, la forma en la que se aprovechará este recurso para la iluminación de una zona en específico. La altura de montaje, el ancho de vía y la curva de distribución del luminario, definirán entonces, qué tanto se aprovecha el flujo luminoso en la zona de interés: **factor de utilización**. Se hará énfasis en el coeficiente de utilización de la Zona 1, pues es el que presenta las características para el cálculo de este parámetro, de modo que, con un ancho de vía de 10 [m] y una altura del punto de luz de 5.35 [m], se logra un factor de utilización del **13%**. Esto es lo esperado, pues parte del flujo luminoso de los luminarios de Zona 1, recae sobre la Zona 2, debido a la distribución luminosa propia del luminario (distribución Tipo V). Ver Anexo E. *Parámetros caso base, III) Datos de instalación y montaje.*

Como se mencionó anteriormente, el diseño bioclimático del lugar es imprescindible para lograr espacios confortables. El zócalo de la ciudad de Iguala posee una gran variedad de árboles de follaje denso, en su mayoría tamarindos, distribuidos en toda la plaza; en la visita en campo se observó que varios de estos bloquean la salida de luz de los luminarios. Para visualizar este inconveniente, Ver Imagen 6.



Imagen 6. Disminución del factor de utilización por obstrucción de árboles.

Como se observa en la imagen anterior, el denso follaje de ciertos árboles hace que el flujo luminoso que incide sobre la superficie de interés sea mucho menor, cumpliéndose la siguiente condición:

$$\tan(b) < \tan(a); \rightarrow Kb < Ka;$$

$$\therefore CUb < CUa.$$

Donde:

a , Ángulo de incidencia de flujo luminoso, [°]

b , Ángulo de incidencia de flujo luminoso debido al follaje de árboles, [1]

Ka , Cociente ancho de vía – altura del punto de luz, [1]

Kb , Cociente ancho de vía – altura del punto de luz corregido, [1]

CUa , Coeficiente de utilización, [1]

CUb , Coeficiente de utilización debido al follaje de árboles, [1]

Los coeficientes Ka y Kb , corresponden al cociente ancho de vía-altura de punto de luz necesarios para el cálculo del factor de utilización; mientras menor sea este coeficiente, menor será el factor de utilización del luminario. Esta disminución en el factor de utilización no solo depende de la relación ancho de vía-altura del punto de luz, también depende de la distribución del flujo luminoso que presente el luminario. Con base en la matriz de flujo luminoso zonal, se puede construir la gráfica del coeficiente de utilización de cierto luminario, teniendo un gráfico para el *lado calle* y otro para el *lado vialidad*. A continuación, se muestra la gráfica del coeficiente de utilización para el luminario correspondiente al caso base, donde se observa que los coeficientes de utilización mayores se logran con alturas de montaje equivalentes a la tercera parte del ancho de vía. Ver Gráfico 8.¹⁰

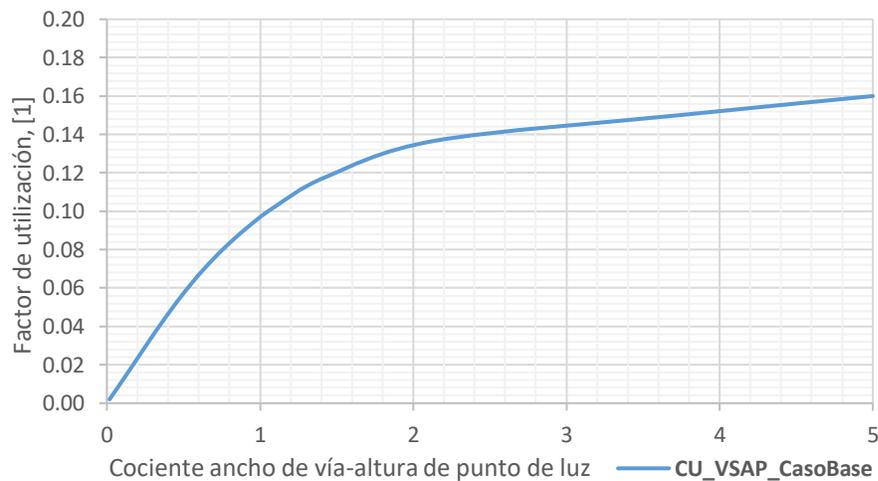


Gráfico 8. Gráfica del factor de utilización para lámpara de vapor de sodio a alta presión con distribución luminosa Tipo V, correspondiente al caso base.

En este caso, el gráfico del lado calle y lado vialidad son iguales, debido a que las curvas fotométricas de ángulo vertical son simétricas, logrado como máximo un coeficiente de utilización 0.32. Teniendo en cuenta el gráfico 8, se ajustará el factor de utilización calculado en el apartado anterior, contemplando la obstrucción de los árboles sobre el luminario. En la siguiente Tabla, se muestra este ajuste al factor de utilización de la Zona 1. Ver Tabla 11.

¹⁰ Esta gráfica se logró obtener a través de la matriz de flujo luminoso zonal que el fabricante proporciona sus archivos fotométricos.

V) Corrección del factor de utilización		VSAP Zócalo	VSAP Zócalo Ajustado
V.1) Zona 1			
Ancho de vía	ANV1 [m]	9.9	7.9
Altura del punto de luz	APL [m]	5.38	5.38
Longitud de brazo de luminario	DBL1 [m]	0.00	0.00
Cociente ancho de vía - altura de punto de luz	K1 [1]	1.84	1.47
Factor de utilización	CU1 [1]	0.1311	0.1195

Tabla 7. Corrección del factor de obstrucción de árboles en luminario

El efecto del follaje de los árboles se tomó como una disminución en el ancho de vía, teniendo así un menor cociente ancho de vía-altura del punto de luz y, por tanto, un menor factor de utilización. Este parámetro, nos ofrece un primer acercamiento del cómo se aprovecha el flujo luminoso de un luminario; un factor de utilización bajo puede ser debido al propio diseño del luminario, a la incidencia de flujo luminoso en zonas ajenas a la de interés, o como se vio anteriormente, por obstrucción de elementos en la salida de luz. Además del factor de utilización, es obligado conocer el estado de otros parámetros como la iluminancia horizontal, iluminancia vertical y uniformidad, para tener una idea clara del impacto que la tecnología de iluminación tiene sobre las superficies de trabajo y, por tanto, sobre el desempeño de las tareas visuales.

3.4 Obtención y análisis de las mediciones luminotécnicas

El análisis del sistema de iluminación de un zócalo resulta complicado en el sentido de la variedad de zonas con las que nos podemos encontrar y sus respectivas tareas visuales. En este caso, el alumbrado general de la plaza se dividió en tres zonas de interés, con base en su parecido con otro tipo de vialidades, como las definidas por la NOM 013 ENER 2014, o la IESNA G-1-03. Como se vio en el apartado 3.2 *Descripción del sistema de iluminación*, estas áreas corresponden a un andador a lo largo del perímetro de la plaza, a los andadores alrededor de las jardineras y el área de esparcimiento alrededor del quiosco. Dado que no existe un método específico para la toma de mediciones luminotécnicas en plazas y parques, se realizó un protocolo de medición personalizado (*Ver Anexo F Protocolo de mediciones fotométricas para el Zócalo de Iguala*), con el cual se logrará conocer las condiciones actuales del alumbrado de la plaza. A continuación, se muestran los resultados de las mediciones luminotécnicas y su estatus respecto a las referencias nacionales e internacionales tomadas en cuenta. *Ver Tabla 8 Cumplimiento con la normatividad y referencias nacionales e internacionales*. Esta evaluación permitirá diseñar las propuestas de mejora adecuadas, a razón de un menor consumo de energía y menores costos energéticos.

VI) Normatividad y referencias nacionales e internacionales						
Parámetro	Aplica	Unidad	Referencia	VSAP Zócalo		
Eficacia luminosa mínima	NOM-028-ENER-2010	EF [lm/W]	90.00	81		
Zona 1	IESNA G-1-03, RETILAP Colombia	IHprom1 [lx]	30.00	6.5		
		UNIH1 [1]	0.33	0.29		
Zona 2	IESNA G-1-03, RETILAP Colombia	IHprom2 [lx]	20.00	6.8		
		UNIH2 [1]	0.33	0		
Zona 3	IESNA G-1-03, RETILAP Colombia	IHprom3 [lx]	30.00	5.61		
		UNIH3 [1]	0.33	0.46		
Iluminancia vertical mínima promedio	IESNA G-1-03	IVprom [lx]	8.00	7.68		
Uniformidad iluminancia vertical mínima	IESNA G-1-03	UNIV [1]	0.25	0.68		

 Fuera de Norma  Cumple

Tabla 8. Cumplimiento de los niveles de iluminancia horizontal y vertical con las referencias nacionales e internacionales

En la tabla anterior se observa que la totalidad de las zonas requieren mejoras en los niveles de iluminancia horizontal y vertical. Como es el caso de Zona 2, la uniformidad calculada resulta nula pues se encontraron zonas totalmente oscuras. *Ver Anexo Fotográfico. Condiciones de iluminación*. Así mismo, la uniformidad de la Zona 3, resulta estar dentro los niveles apropiados, pero la razón de esto no son los buenos niveles de iluminancia, sino condiciones generales de iluminación bajas.

3.5 Indicadores

Como en toda evaluación energética, surge la necesidad de tomar indicadores que darán imagen de cómo se están utilizando los recursos energéticos para la iluminación de la plaza, esta relación recae en la **densidad de potencia eléctrica por alumbrado público, DPEA**, la cual indica la carga instalada en [W], necesaria para iluminar cierta área. Con base en la NOM 013 ENER 2014, este parámetro se calcula como sigue:

$$DPEA = \frac{\text{Potencia eléctrica por alumbrado, [W]}}{\text{Área total iluminada, [m}^2\text{]}}$$

Donde la potencia eléctrica por alumbrado pertenece a la potencia real nominal de los diferentes equipos para alumbrado considerados en la instalación. A continuación, se muestran los resultados de la evaluación de este indicador relativo al caso base.

Ver Tabla 9. Densidad de potencia eléctrica por alumbrado para cada zona de la plaza, caso base.

VII) Densidad de potencia eléctrica por alumbrado						
	Parámetro	Aplica		Unidad	Referencia	VSAP Zócalo
Zona 1	Densidad de potencia eléctrica máxima	NOM-013-ENER- 2013	DPEA1	[W/m ²]	0.59	1.88
Zona 2	Densidad de potencia eléctrica máxima	NOM-013-ENER- 2013	DPEA2	[W/m ²]	0.64	0.13
Zona 3	Densidad de potencia eléctrica máxima	NOM-013-ENER- 2013	DPEA3	[W/m ²]	0.64	1.11

 Fuera de Norma  Cumple

Ver Tabla 9. Densidad de potencia eléctrica por alumbrado para cada zona de la plaza, caso base.

La DPEA de la Zona 2 resulta cumplir con la referencia de la NOM 013 ENER 2013 para una vía Tipo A y un ancho de calle menor a 9[m], sin embargo, también es obligado cubrir los niveles de iluminación, lo cual no sucede en este caso. Con base en las mediciones del apartado anterior y el presente indicador, se tiene un gran reto, mejorar los niveles de iluminación a razón de menor potencia instalada, esto se considerará en las propuestas que se verán más adelante.

4. Diseño de propuestas y su evaluación

El diseño de propuestas de mejora será de tal modo que estas garanticen las condiciones de iluminación y eficiencia energética mínimos, pues como pudo observarse en la *Tablas 8 y 9*, tanto los valores de iluminancia, como de densidad de potencia eléctrica por alumbrado se encuentran fuera de las referencias nacionales e internacionales.

4.1 Evaluación técnica de las alternativas

El diseño de propuestas de ahorro de energía y mejora de los niveles de iluminación radica, en primera instancia, en la selección de luminarios adecuados, para esto, nos apoyaremos del *software Photometric Toolbox 1.93*, el cual ofrece una mirada rápida a las variables fotométricas de cierto luminario, por mencionar algunas: lúmenes de lámpara, eficacia luminosa, eficiencia del luminario, coeficiente de utilización máximo, tablas de flujo luminoso zonal, entre otros, así como gráficos de distribución luminosa y factor de utilización; esta herramienta permitirá decidir entre uno u otro, para su posterior análisis luminotécnico, este último a través del *software Dialux 4.13*. Seguidamente, se evaluarán los beneficios técnicos, energéticos y económicos para generar las propuestas de mejora viables.

Es importante tener una referencia del flujo luminoso aproximado que deberá mantener la lámpara, para esto emplearemos el método de cálculo del factor de utilización para áreas exteriores, con base en la siguiente ecuación:

$$E_{prom} = \frac{\Phi \cdot CU \cdot LLD}{ANV \cdot DI}$$

Donde:

Φ , Flujo luminoso mantenido por la lámpara, [lm]

CU, Coeficiente de utilización típico de cierta tecnología de iluminación, [1]

LLD, Depreciación de lumen de lámpara por envejecimiento, [1]

ANV, Ancho de vía, [m]

DI, Distancia interpostal, [m]

De lo anterior, despejado el flujo luminoso requerido por la lámpara:

$$\Phi = \frac{E_{prom} \cdot ANV \cdot DI}{CU \cdot LLD}$$

De esta forma, dos factores que definen en gran medida el flujo luminoso, corresponden al factor de utilización y la depreciación del lumen de lámpara.

Para el presente, se tomarán coeficientes de utilización y factores de depreciación de lumen de lámpara típicos de cada tecnología. En la siguiente tabla se muestra el flujo luminoso requerido, con base en la tecnología de iluminación. Ver *Tabla 10*.

Tecnología de iluminación	Flujo luminoso [lm]
Vapor de sodio	22600
Aditivos metálicos	24000
LED	6300

Tabla 10. Flujo luminoso mantenido por lámpara, con base en la tecnología de iluminación.

Como se observa en la tabla anterior, se requiere una mayor cantidad de flujo luminoso para la tecnología de vapor de sodio, pues esta presenta coeficientes de utilización muy bajos, como se vio anteriormente, menores a 0.32 [1]. No así la tecnología Led, esta, por sus propiedades ópticas, alcanza coeficientes de utilización cercanos a la unidad. La *Tabla 10*, servirá como criterio de selección entre una variedad inmensa de coeficientes de utilización de luminarios y tecnologías de lámparas.

Propuesta 1. Sustitución *uno a uno* por lámparas de la misma tecnología y potencia

Se plantea una sustitución *uno a uno* por luminarios de la misma potencia, pero con características fotométricas mejoradas hacia la zona que se requiere iluminar; así, en lugar de tener una distribución Tipo V para la zona 1, se tendrá una distribución Tipo III, logrando incrementar el factor de utilización, y por tanto el aprovechamiento de flujo luminoso, además, la propiedad *full-Cutoff* del luminario evitará pérdidas de luz en ángulos verticales no aprovechables. La lámpara de tecnología de vapor de sodio a alta presión, de 250 [W] que se propone ofrece una menor depreciación de lumen a través del tiempo, con un factor $LLD_{1/2} = 0.94$, esto es favorable pues al finalizar su vida útil las condiciones de iluminación seguirán siendo buenas. Cabe resaltar que no existe depreciación luminosa por equipo auxiliar, $BF = 1$, debido a que el balastro ofrece las condiciones ideales de corriente y voltaje de operación.

				P1
	Parámetro	Unidad	Referencia	VSAP 250 W
Zona 1	EF	[lm/W]	90.00	100.00
	DPEA1	[W/m ²]	0.59	1.80
	IHprom1	[lx]	30.00	32
	UNIH1	[1]	0.33	0.23
Zona 2	DPEA2	[W/m ²]	0.64	0.12
	IHprom2	[lx]	20.00	20.0
	UNIH2	[1]	0.33	0.193
Zona 3	DPEA3	[W/m ²]	0.50	1.06
	IHprom3	[lx]	30.00	20.00
	UNIH3	[1]	0.33	0.11
	IVprom	[lx]	8.00	27
	UNIV	[1]	0.25	0.08

 Fuera de Norma  Cumple

Tabla 11. Resultados luminotécnicos y su conformidad con las referencias. Propuesta 1.

Como se puede observar, la lámpara propuesta cumple con la eficacia luminosa, $EF > 90 \left[\frac{lm}{W} \right]$, marcado por norma, sin embargo, la densidad de potencia eléctrica por alumbrado se encuentra fuera de lo dictado por la NOM-028-ENER-2010. Ver Tabla 11. Las condiciones de instalación y altura de montaje permanecieron constantes para esta propuesta, logrando cumplir con los niveles de iluminancia horizontal para la zona 1, $IH_{prom1} > 30 [lx]$. Ver Anexo G. Resultados luminotécnicos Propuesta 1. Sin embargo, aunque mejoró notablemente el factor de utilización a partir del luminario con distribución luminosa Tipo III, pasando de un $CU1 = 0.13$, a $CU1 = 0.58$, las otras dos zonas de cálculo llegaron únicamente a los $20 [lx]$, quedando fuera de la normatividad. Así mismo, la uniformidad permanece muy por debajo de lo estipulado por la IESNA G-1-03.

Propuesta 2. Incremento del parque de luminarios de menor potencia para mejorar uniformidad

Con base en la anterior propuesta, se vio que es necesario mejorar tanto los niveles de iluminación, como la uniformidad de las zonas 2 y 3, a razón de incrementar el parque de luminarios de vapor de sodio; dado que el número de fuentes de luz será mayor, el flujo requerido por lámpara será menor, y por tanto se tendrán luminarios de menor potencia con diferentes condiciones de ubicación y montaje, procurando en todo momento la uniformidad. De tener 20 luminarios, se pasó a 33 de 150 [W], con lo cual se logró mejorar valores de iluminancia horizontal que se encontraban muy por debajo de la media, razón de los bajos índices de uniformidad.

Nuevamente se selecciona un luminario con distribución luminosa Tipo III para la zona 1, pero con una curva más amplia en sus laterales para evitar zonas de baja iluminancia en las interdistancias (Ver Imagen 7); para esto, se hizo una redistribución de luminarios logrando distancias interpostales menores, $DIP1 = 15 [m]$, además, se disminuyó la altura del punto de luz, $APL1 = 5 [m]$, para lograr las iluminancias promedio deseadas. Sin embargo, con base en los cálculos luminotécnicos, se observaron valores de baja iluminancia en los límites de la plaza y, por tanto, la uniformidad seguía sin alcanzar los valores normados.

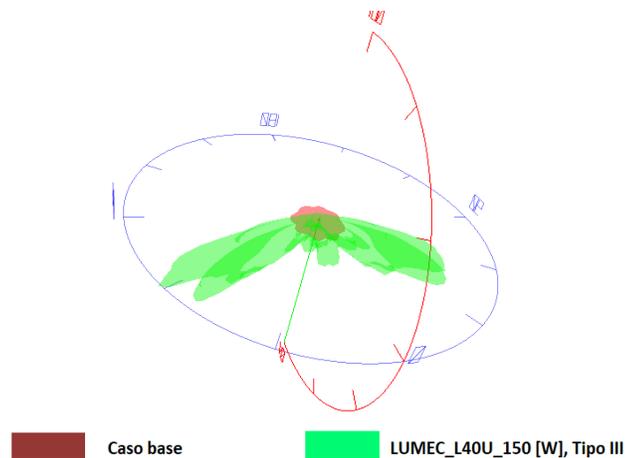


Imagen 7. Distribución luminosa del luminario de la propuesta 2, para zona 1. [En verde]

De modo que, para estar dentro de norma con los valores de uniformidad de zona 1, se acercaron los luminarios $1.75 [m]$ hacia el centro del andador, sacrificando un poco el factor de utilización en lado calle, e incrementando este en el lado acera, con un coeficiente de utilización total mejorado, $CU1 = 0.33$. Además de esta reubicación, 4 de los luminarios agregados, se ubicaron en las esquinas de la plaza, pues en esa zona se tenían valores de iluminancia horizontal muy bajos, causando bajas uniformidades. En cuanto a las zonas 2 y 3, los luminarios propuestos poseen una distribución Tipo V, la cual ofrece un flujo luminoso de forma radial, que contribuye tanto a la iluminancia horizontal y vertical promedio, como a la uniformidad. Ver Anexo H. Resultados luminotécnicos. Propuesta 2.

				P2
				VSAP 150
	Parámetro	Unidad	Referencia	W
Zona 1	EF	[lm/W]	90.00	94.00
	DPEA1	[W/m ²]	0.59	1.38
	IHprom1	[lx]	30.00	30
Zona 2	UNIH1	[1]	0.33	0.43
	DPEA2	[W/m ²]	0.64	0.60
	IHprom2	[lx]	20.00	27.0
Zona 3	UNIH2	[1]	0.33	0.41
	DPEA3	[W/m ²]	0.50	1.08
	IHprom3	[lx]	30.00	30.00
	UNIH3	[1]	0.33	0.40
	IVprom	[lx]	8.00	29
	UNIV	[1]	0.25	0.38

 Fuera de Norma  Cumple

Tabla 12. Resultados luminotécnicos y su conformidad con las referencias. Propuesta 2.

Como se puede observar en la *Tabla 12*, la mayoría de los parámetros evaluados cumple con la normatividad propuesta, a excepción de la densidad de potencia eléctrica por alumbrado, este parámetro mejoró un poco, alrededor de un 40% de la propuesta 1 a la actual, sin embargo, no es suficiente, este elemento será motivo de análisis para las siguientes propuestas.

Propuesta 3. Sustitución tecnológica a aditivos metálicos cerámicos de 175[W], con aumento del parque de luminarios.

La presente parte de elementos de diseño de la propuesta 1, esta se basa en la sustitución tecnológica migrando de vapor de sodio a alta presión, a su similar en aditivos metálicos, complementada con el incremento del parque de luminarios para las zonas 2 y 3. Este tipo de lámpara, contiene metales que acentúan el espectro de los azules, amarillos y verdes lo que resulta en un mejor rendimiento de color, $CRI = 40$. Parte del problema de los bajos índices de uniformidad con vapor de sodio, se debía a zonas de baja iluminancia en las interdistancias de los luminarios, en particular, las localizadas en los laterales de la plaza. La razón de un número menor de luminarios instalados en esta parte, tal vez se debió a aspectos estéticos en torno a un monumento localizado justo al centro de esta zona. Para la solución de esta problemática, se propone agregar un luminario sobre el andador, justo en frente del monumento, pero del lado contiguo del andador; además de aumentar la distancia interpostal de las actuales luminarias, logrando $DIP1_{lateral} = 15 [m]$, para contribuir a la uniformidad. Ver *Imagen 8*.

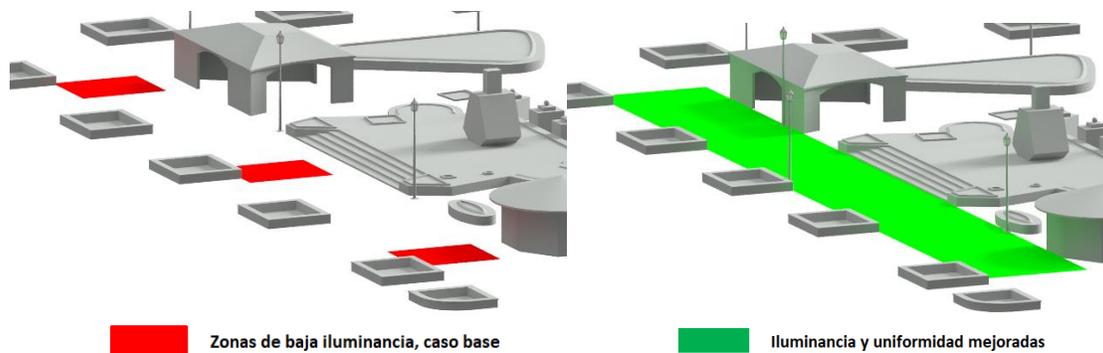


Imagen 8. Zonas de baja iluminancia en el caso base (en rojo). Distribución de luminarios propuesta para mejora de uniformidad, Propuesta 3 (en verde).

Aun con la adición de este luminario, los valores de iluminancia horizontal promedio y uniformidad para la zona 1 y 3, están fuera de norma, $I_{Hprom1} = 21 [lx]$ y $UNI_{H1} = 0.25$, respectivamente. Estas condiciones de iluminación bajas, son similares en las demás zonas de análisis. Cabe mencionar, que la zona 2, si cumplió con los $20 [lx]$ de iluminancia horizontal promedio, pero no con la uniformidad, teniendo un valor de iluminancia mínima de $2.65 [lx]$. En los gráficos de los resultados luminotécnicos, se pueden observar las condiciones bajas de uniformidad. Ver Anexo 1. Resultados luminotécnicos. Propuesta 3. Lo anterior, era esperado pues la lámpara solamente ofrece $14,000 [lm]$ iniciales, que no son suficientes para las necesidades visuales.

Propuesta 4. Tecnología de aditivos metálicos con menor depreciación de lumen, con aumento de parque de luminarios.

Esta propuesta aborda, de igual manera, la tecnología de aditivos metálicos, pero mejorada a partir de fósforos y gases adecuados que aumentan el rendimiento de color, $CRI = 66$, y evitan el deterioro paulatino de los electrodos, logrando una vida útil más larga, además de presentar un mejor factor de mantenimiento de lumen, $LLD_{1/2} = 0.82$, y una eficacia superior a los $90 [lm/W]$. Como se vio en la propuesta anterior, la necesidad de incrementar el parque de luminarios y una redistribución de estos, sigue latente. En el caso de los laterales del andador perimetral de zona 1, se tendrán 4 luminarios con distancias interpostales iguales, procurando la estética del monumento encontrado en sitio, Ver Imagen 9; estos luminarios presentan bajos factores de utilización, $CU1 = 0.36$, alrededor del 40% por debajo del máximo posible. Este es un escenario común tanto en tecnología de vapor de sodio, como en aditivos metálicos, en donde se sacrifica factor de utilización, por uniformidad.

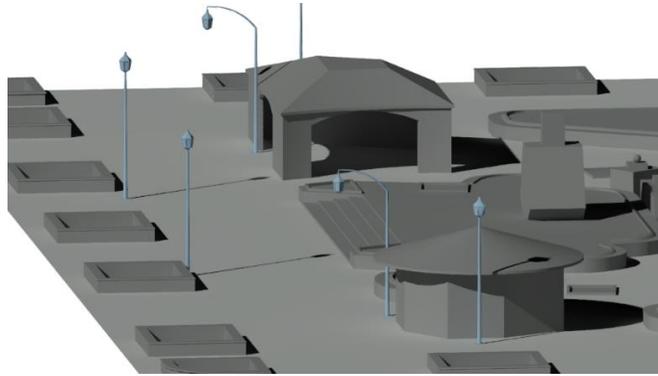


Imagen 9. Distribución de luminarios en zonas laterales del andador perimetral, Propuesta 4.

El número total de luminarios ascendió a $NUM1 = 24$, para la zona 1, y 15 luminarios más para las zonas al interior de la plaza, $NUM_{2,y,3} = 15$. Con esta nueva distribución se cumplen, en su totalidad, las iluminancias horizontales y verticales fijadas por norma. Ver Anexo J. Resultados Luminotécnicos. Propuesta 4. Cabe mencionar que para apoyar a la uniformidad de la zona 2, los luminarios de zona 1 se alternaron a lo largo del andador en una distribución *tres bolillo*, para que parte de su flujo luminoso, contribuyera a incrementar los niveles mínimos de iluminancia en la periferia de esta zona. Las alturas del punto de luz varían dependiendo de la zona, por ejemplo, en zona 1, esta se encuentra a 5 [m] sobre nivel de piso y a 3 [m] dentro del andador, $APL1 = 5 [m]$, sin embargo, la altura correspondiente a la zona 2 es mucho mayor, $APL2 = 5.85 [m]$, esto con el motivo de lograr la uniformidad deseada a razón de menos luminarios instalados. En el caso de zona 3, la altura del punto de luz es menor para lograr la iluminancia deseada, $APL3 = 4.9 [m]$. Los factores de utilización para las zonas 2 y 3, se mantienen en el máximo posible, $CU_{2,y,3} = 0.46$.

				P4
				MH_140W
	Parámetro	Unidad	Referencia	
Zona 1	EF	[lm/W]	70.00	96.00
	DPEA1	[W/m ²]	0.59	1.65
	IHprom1	[lx]	30.00	31
	UNIH1	[1]	0.33	0.35
Zona 2	DPEA2	[W/m ²]	0.64	0.67
	IHprom2	[lx]	20.00	25.0
	UNIH2	[1]	0.33	0.33
Zona 3	DPEA3	[W/m ²]	0.50	1.29
	IHprom3	[lx]	30.00	31.00
	UNIH3	[1]	0.33	0.35
	IVprom	[lx]	8.00	22
	UNIV	[1]	0.25	0.50

Fuera de Norma Cumple

Tabla 13. Resultados luminotécnicos y su conformidad con las referencias. Propuesta 4.

En la *Tabla 13*, se muestra la conformidad de los parámetros luminotécnicos con la normatividad dictada para este caso de estudio, donde se puede observar que el único inconveniente es la densidad de potencia eléctrica por alumbrado.

Propuesta 5. Migración a tecnología LED de 75 [W]

La problemática principal en la iluminación del Zócalo de Iguala apunta hacia la uniformidad, debido a que la forma de los andadores de las zonas 2 y 3 es irregular y, por tanto, más complicado de iluminar. En el caso de esta propuesta, el parque de luminarios se incrementó a razón de cumplir con los valores de uniformidad normados; la presente resulta peculiar pues, únicamente se utilizaron luminarios con curva de distribución *Tipo V Asimétrica*, la cual ofrece un flujo luminoso cuasi radial. Los requerimientos para lograr un buen factor de utilización con un luminario de este tipo, radican en su ubicación sobre el andador o vialidad a iluminar, por lo cual, para la zona 1, fue necesario introducir estos 4 metros al centro, con una altura del punto de luz baja, en relación a las anteriores propuestas, $APL1 = 3.9$, con el motivo de lograr la iluminancia horizontal promedio, $IHprom = 30 [lx]$. Lo anterior, resultó en un buen aprovechamiento del flujo luminoso sobre el área de estudio, en este caso: $CU1 = 0.60$; cabe mencionar que por la configuración de los luminarios de esta zona, el coeficiente de utilización de estos luminarios puede ser mucho mayor, pues parte de su flujo luminoso contribuye los niveles de iluminación y uniformidad en la zona 2. El luminario propuesto, ofrece de las mejores eficiencias del mercado aprovechando en su totalidad la salida luminosa hacia los ángulos verticales aprovechables.

Las alturas del punto de luz resultantes, fueron diferentes para todas las zonas, pues como se ha visto, las necesidades de iluminación también son diferentes para las tres áreas, así como la variedad de sus aspectos arquitectónicos y estéticos. Por ejemplo, la zona 2, resultó en una altura del punto de luz superior, $APL 2 = 5.5 [m]$, debido a la irregularidad de los andadores y al valor de uniformidad deseado por norma, $UNIH 2 = 0.33$. Los cálculos luminotécnicos se realizaron con un menor factor de corrección, debido a que la depreciación de lumen por envejecimiento del LED es mucho menor que en otras tecnologías, $LLD \frac{1}{2} = 0.96$. Ver Anexo K. *Resultados Luminotécnicos. Propuesta 5*. Cabe mencionar, que en tecnología LED, la influencia de la temperatura es significativa respecto a otras tecnologías, lo cual implicó considerar un factor de corrección adicional por temperatura de operación superior a la nominal, $AFT = 0.99$.

				P5
	Parámetro	Unidad	Referencia	LED_75W
Zona 1	EF	[lm/W]	70.00	93.00
	DPEA1	[W/m ²]	0.59	0.78
	IHprom1	[lx]	30.00	31
	UNIH1	[1]	0.33	0.39
Zona 2	DPEA2	[W/m ²]	0.64	0.39
	IHprom2	[lx]	20.00	25.0

Zona 3	UNIH2	[1]	0.33	0.33
	DPEA3	[W/m2]	0.64	0.56
	IHprom3	[lx]	30.00	30.00
	UNIH3	[1]	0.33	0.50
	IVprom	[lx]	8.00	29
	UNIV	[1]	0.25	0.30

Fuera de Norma
 Cumple

Tabla 14. Resultados luminotécnicos y su conformidad con las referencias. Propuesta 5.

Como se puede apreciar en la *Tabla 14*, la presente propuesta cumple con todos los parámetros de referencia, a excepción de la densidad de potencia eléctrica por alumbrado de la zona 1. Además de estas referencias, también fue necesario que el luminario seleccionado, cumpliera con la norma de producto de LEDs destinados a vialidades y áreas exteriores públicas, NOM 031 ENER 2012, la cual establece valores mínimos de eficacia luminosa para luminarios exteriores montados en poste, $EF > 70 [lm/W]$; flujo luminoso zonal, temperatura de color correlacionada, CCT ; vida nominal y mantenimiento de flujo luminoso.

Propuesta 6. Migración a tecnología LED de 97 [W] con mayor salida de flujo luminoso

A continuación, se propone un luminario que ofrece una mayor salida de flujo luminoso y un mejor aprovechamiento de este, a menores coeficientes de ancho de vía-altura del punto de luz, en este caso, $KSS1 = 1.12$, así, se pudo lograr factor de utilización total, $CU1 = 0.60 [1]$. Como se puede apreciar, este coeficiente de utilización es igual en la propuesta anterior, sin embargo, el actual se consiguió a razón de un menor coeficiente $KSS1$. La razón de que este luminario ofrezca mejores factores de utilización se debe a una curva de intensidad luminosa uniforme, Tipo III. Ver *Imagen 10*.

Como se observa en la *Imagen 10*, las curvas de los luminarios propuestos presentan una mayor salida de luz que los de la propuesta anterior, además de una mejor uniformidad en los ángulos verticales de $0^\circ-70^\circ$, lo cual se ve reflejado en buenos valores de uniformidad sobre el área a iluminar.

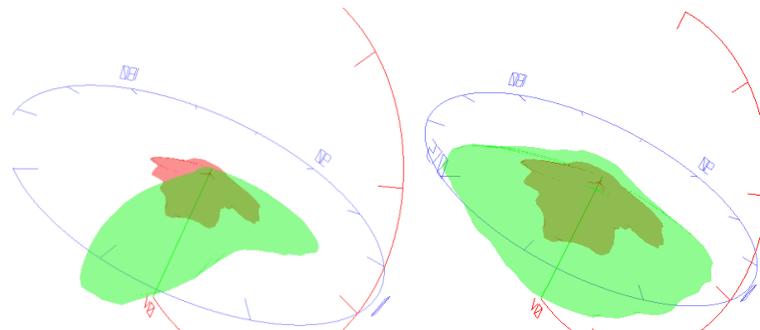


Imagen 10. Comparativa entre luminarios de Propuesta 5 [en rojo] y luminarios de Propuesta 6, [en verde].

En cuanto a desempeño a través del tiempo, se obtiene un factor de mantenimiento de lumen un poco por debajo de la propuesta anterior, $LLD \frac{1}{2} = 0.85$, con una vida útil de hasta $100,000 [hr]$, en condiciones de operación nominales, cabe mencionar que este dato es calculado con base en la norma IESNA TM-21-11 enfocada a fabricantes. Su larga vida está respaldada con un certificado UL para su operación en ambientes alrededor de los $40^{\circ}C$.

Los luminarios requieren de alturas de montaje superiores a las de propuestas anteriores debido al alto flujo luminoso que se tiene a la salida de estos, $APL1 = 5.8 [m]$. Con lo anterior, se logró cumplir en su totalidad los valores normados, a excepción de la densidad de potencia eléctrica por alumbrado de zona 1. Ver *Tabla 15*.

				P6
	Parámetro	Unidad	Referencia	LED_97W
Zona 1	EF	[lm/W]	70.00	98.00
	DPEA1	[W/m ²]	0.59	0.76
	IHprom1	[lx]	30.00	32
	UNIH1	[1]	0.33	0.34
Zona 2	DPEA2	[W/m ²]	0.64	0.37
	IHprom2	[lx]	20.00	26.0
	UNIH2	[1]	0.33	0.37
Zona 3	DPEA3	[W/m ²]	0.64	0.53
	IHprom3	[lx]	30.00	30.00
	UNIH3	[1]	0.33	0.43
	IVprom	[lx]	8.00	21
	UNIV	[1]	0.25	0.38

 Fuera de Norma  Cumple

Tabla 15. Resultados luminotécnicos y su conformidad con las referencias. Propuesta 6

Propuesta 7. Combinación de tecnología LED de 70 y 97 [W].

Esta propuesta, prácticamente es una mejora a la anterior, para poder cumplir con la densidad de potencia eléctrica de la zona 1, para esto, se proponen luminarios de mejor eficacia luminosa, $EF = 93 [lm/W]$, con distribuciones luminosas Tipo III y IV, este último, para evitar bajos niveles de iluminancia horizontal en las esquinas y con ello bajas uniformidades. La distribución luminosa Tipo III, presenta características de apertura de haz luminoso y buenos coeficientes de utilización, a razón de cocientes KSS menores, lo cual es similar a la anterior propuesta, de modo que, para lograr las iluminancias normadas, fue necesario ubicar un luminario adicional en los lados más largos de la plaza obteniendo una distancia interpostal promedio de $14.35 [m]$. Los luminarios de esta zona, se encuentran $2.7 [m]$, al centro del andador logrando uno de los mejores factores de utilización de las propuestas, $CU1 = 0.75$.

Al tener un mejor aprovechamiento luminoso, se logra cumplir con los niveles de iluminación a razón de menor potencia, $DPEA = 0.56 [W/m^2]$. Ver Anexo M, para mayor información de los parámetros luminotécnicos para esta propuesta. Se decidió dejar la distribución y número de luminarios para las zonas 2 y 3 como en la anterior propuesta, ya que estas dos zonas si cumplieron con los parámetros normados. A continuación, se muestran los resultados luminotécnicos y su conformidad con la normatividad para la presente propuesta. Ver Tabla 15.

				P7
				LED_70W, 97W
	Parámetro	Unidad	Referencia	
Zona 1	EF	[lm/W]	70.00	103.00
	DPEA1	[W/m ²]	0.59	0.56
	IHprom1	[lx]	30.00	31
	UNIH1	[1]	0.33	0.39
Zona 2	DPEA2	[W/m ²]	0.64	0.24
	IHprom2	[lx]	20.00	25.0
	UNIH2	[1]	0.33	0.36
Zona 3	DPEA3	[W/m ²]	0.64	0.35
	IHprom3	[lx]	30.00	31.00
	UNIH3	[1]	0.33	0.39
	IVprom	[lx]	8.00	22
	UNIV	[1]	0.25	0.40

Fuera de Norma

Cumple

Tabla 16. Resultados luminotécnicos y su conformidad con las referencias. Propuesta 7.

Complementarias.

Las propuestas anteriores incluyen mantenimiento semestral, el cual consiste en la limpieza de luminarios para conservar la salida de flujo luminoso de diseño, en la verificación del equipo auxiliar e instalación eléctrica, así como la poda de árboles para mantener los factores de utilización de los luminarios. Estas también contemplan, según sea el caso, el equipo de control para garantizar las 12 horas de encendido y los *dimmers* para los luminarios LED. En las propuestas en las que se plantea redistribución e incremento del parque de luminarios, se considera también el material eléctrico y material para construcción necesario para la ejecución de la obra.

4.2 Beneficios energéticos y económicos

Con base en la política de cobranza de CFE¹¹, el cálculo de la facturación en Tarifa 5A puede tener dos esquemas posibles calculados a través del consumo de energía, siendo este, medido o estimado. La facturación estimada generalmente se aplica cuando el parque de luminarios es muy amplio y se encuentra distribuido en un área muy grande dificultando su medición; en el caso del esquema de facturación a partir de la medición del consumo, este se utiliza cuando se tienen circuitos eléctricos dedicados para un conjunto de luminarios de interés no tan numeroso, como es el caso de plazas públicas. A pesar de que el presente caso de estudio, entra en el último esquema, el sistema de alumbrado del Zócalo no cuenta con instrumento de medición de consumo de energía, por lo que su actual facturación eléctrica es estimada.

Con base en lo anterior, las propuestas de mejora para el presente pueden caer en diferentes esquemas, de modo que, también se tendrán diferentes esquemas económicos de proyecto. A continuación, se presentan tres escenarios, los primeros dos corresponden a la evaluación económica del proyecto con base en los esquemas de facturación mencionados, y un tercero, con un escenario de *dimmeo* para los luminarios LED en esquema de facturación real.

a) Operación a potencia nominal con consumo estimado.

Con base en el convenio realizado entre la compañía suministradora y la administración pública de Iguala, Guerrero, se considera que los luminarios operan 12 horas diarios. En este esquema, los resultados¹² arrojan que la propuesta 1, no presenta ahorros energéticos ni económicos; la propuesta 2 ofrece un ligero ahorro energético debido a la adición de luminarios de menor potencia, así mismo ofrece beneficios económicos cercanos a los **\$12,000.00** anuales.

Las propuestas de aditivos metálicos no presentan beneficio alguno, pues la demanda contratada aumentó debido al incremento del parque de luminarios y a la política de facturación estimada¹³ que incluye, el 25% adicional aplicado a la carga instalada a razón de equipo auxiliar, y el redondeo al kilowatt entero próximo. Sin embargo, las propuestas 5, 6 y 7 correspondientes a la tecnología LED, si ofrecen beneficios energéticos que rondan el 50%, y ahorros en facturación eléctrica, por concepto de *Alumbrado General*, cercanos al 40%, lo cual representa entre **\$45,000.00 y \$50,000.00** anuales. Lo anterior se puede observar en el Anexo N.

¹¹ Junio, 2013. Diario Oficial de la Federación. “Manual de disposiciones relativas al suministro y venta de energía eléctrica destinada al servicio público”. Disposición decimoctava, sección tercera. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5290625&fecha=06/03/2013

¹² Libro de Excel “Análisis_Económico_Esquemas.xlsx”, Hoja “Resultados”.

¹³ Noviembre, 2014. Comisión Federal de Electricidad. “Instructivo para la interpretación y aplicación de tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica”. Subdirección de Distribución, Gerencia Comercial, CFE. http://www.delrealenergy.com/documentacion/Instructivo_Interpretacion_de_tarifas_NOV04.pdf

b) Operación a potencia nominal con consumo medido.

En esta modalidad el factor del 25% adicional a la demanda por concepto de equipo auxiliar y el redondeo al próximo kilowatt para fracción de kilowatt de demanda contratada ya no se aplica, pues ahora se tiene un consumo medido, que será menor respecto al esquema de consumo de energía estimado. Como se puede observar en el *Anexo M*, la disminución en el consumo de energía ocurre en la misma proporción para ambos esquemas, sin embargo, los ahorros económicos son mayores para la facturación real, de esta forma, para las propuestas de tecnología de vapor de sodio a alta presión y aditivos metálicos cerámicos, estos rondan el 15%, lo cual representa **\$20,000.00** anuales; mientras que para las propuestas de tecnología LED lo ahorros alcanzan el 60%, esto significa ahorros alrededor de los **\$65,000.00**. Ver *Anexo N. Beneficios energéticos y económicos de las propuestas para los diferentes escenarios*.

c) Operación con *dimeo* para las propuestas LED, con facturación real.

Por las características técnicas de la tecnología, este modo de operación a baja intensidad, será únicamente aplicable a LEDs. Este consiste en disminuir la salida de flujo luminoso al 50% en el periodo de total inactividad en la plaza, 12am a 5am. Lo anterior representa una disminución adicional para las propuestas 5, 6 y 7 tanto en el consumo de energía, como en la facturación eléctrica por concepto de *Alumbrado General*. Ver *Anexo N. Beneficios energéticos y económicos de las propuestas para los diferentes escenarios*. Los beneficios económicos rondan los **\$75,000.00** anuales.

4.3 Rentabilidad

La rentabilidad de las propuestas se obtuvo a partir una metodología para la evaluación económica de proyectos¹⁴ que contempla indicadores, tales como, el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), tasa interna de retorno modificada (TIRM), relación beneficio costo (RBC) y el periodo de recuperación de inversión simple (PRIs). Adicionalmente, se tienen las siguientes consideraciones:

- I. **Tasa de Incremento anual en el precio de la Tarifa 5A.** Se consideró una tasa de incremento anual del **4.08%**, obtenida a partir de la tendencia de los precios medios de la energía de 2015 a 2017¹⁵ y la tendencia de los precios por energía consumida suministrada en baja tensión de CFE.
- II. **Tasa de incremento anual en los costos de operación y mantenimiento.** Se consideró que la tasa de incremento para los costos de operación y mantenimiento se da en la misma proporción que la inflación, la cual puede obtenerse del índice nacional de precios al consumidor. En este caso se tomó la tendencia de la inflación subyacente a partir del año 2015, pues esta clasificación (la cual no considera elementos de alta volatilidad en sus precios como productos agropecuarios, energéticos y tarifas autorizadas por el gobierno) es de gran utilidad para tomar decisiones de política económica y para la elaboración de predicciones de inflación¹⁶. En ese sentido la inflación considerada para el presente estudio será de **2.55%**.
- III. **Tasa de rendimiento mínima atractiva (TREMA).** Es un criterio que el inversionista utiliza para decidir si participa o no, en cierto proyecto. En este caso, los lineamientos de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), establecen que la tasa de descuento TREMA, para evaluar proyectos de inversión en las dependencias federales deberá ser del **10%**.
- IV. Así mismo, para cada una de las propuestas se consideran costos¹⁷ de diseño e ingeniería, luminarios, equipo auxiliar, postes, cimientos para postes, registros eléctricos, material para obra eléctrica y civil, renta de herramientas y mano de obra.

¹⁴ Modelo de evaluación económica por León de los Santos G, modificado por Sánchez Liévano G y adaptado al estudio del autor.

¹⁵ Sistema de información energética. “Precios medios de la energía eléctrica por tarifa”. Secretaría de Energía (SENER). <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvequa=IIIBC02>

¹⁶ Septiembre, 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). “Índice de precios al consumidor, Inflación Subyacente 2015-2017”. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/inp/default.aspx>

¹⁷ Se diseñó una hoja de cálculo para obtener los costos de cada una de las propuestas: “Costos_AP_Iguala.xlsx”.

Con base en el cuadro resumen del *Anexo O*, para el esquema de **facturación estimada**, se tienen TIRs pésimas cercanas a cero, mucho menores que la tasa de rendimiento mínima aceptable, incluso la tecnología LED presenta periodos de retorno de inversión simple fuera de la vida útil de los luminarios. En el caso de vapor de sodio a alta presión y aditivos metálicos cerámicos, se tienen periodos de retorno de inversión (simple) indeterminados, pues las propuestas no ofrecen beneficios económicos.

En el caso de la **facturación real**, a partir de consumos medidos, las TIRs mejoran un poco, sin embargo, siguen estando por debajo de la mínima aceptable. En este esquema se observa que la propuesta 1 resulta rentable, sin embargo, esta propuesta no cumple ninguna de las normas establecidas para el caso de estudio. En el caso de la tecnología LED, el periodo de retorno de inversión de las propuestas 5 y 6 se encuentra dentro de la vida útil de los luminarios, pero presenta un VPN negativo y TIRs menores a la TREMA.

Para la **facturación real con *dimmeo***, se puede observar que las relaciones beneficio /costo son menores a la unidad, descartando cualquiera de estas propuestas. Cabe mencionar que, en este esquema, la propuesta 7 ofrece la mejor TIR, 6.03%, sin embargo, esta se encuentra por debajo de la TREMA.

Con base en lo anterior, ninguna de las propuestas resulta atractiva, sin embargo, se optará por las Propuesta 7 basada en tecnología LED con 4 horas de operación al 50% de su potencia nominal; pues además de presentar los mejores retornos de inversión, cumple totalmente con la normatividad establecida.

Recomendaciones

- i. Es importante que los encargados de mantenimiento, en este caso la división de alumbrado público del gobierno de Iguala, conozcan los criterios luminotécnicos con los que fue diseñada la propuesta elegida, para que el mantenimiento sea efectivo; así mismo es necesario que conozcan las especificaciones técnicas del equipo eléctrico y auxiliar en caso de que se presente un reemplazo.
- ii. Incluir dentro del mantenimiento, una verificación anual de los parámetros luminotécnicos y su cumplimiento con la normatividad establecida.
- iii. Sería de mucho apoyo para los encargados de mantenimiento, el diseñar un protocolo de mantenimiento, en el cual se estipulen los métodos de limpieza de luminarios y la línea de poda de árboles, lo anterior, para mantener las condiciones de diseño en la medida de lo posible.
- iv. Se recomienda llevar una bitácora de anomalías o desperfectos eléctricos tanto en el equipo de iluminación, como en la instalación eléctrica, esto permitirá la implementación de medidas preventivas, o en su defecto correctivas. En este sentido, es imprescindible contar con un programa de sustitución de lámparas.
- v. Monitorear constantemente parámetros eléctricos, tales como, variaciones de tensión, distorsión armónica total en voltaje y en corriente, para prevenir fallas en el equipo de iluminación.
- vi. Se sugiere realizar una verificación integral de las condiciones de la instalación eléctrica de alumbrado, tales como, el sistema de puesta a tierra, los elementos de protección contra sobrevoltajes y sobrecorriente, así como su coordinación; dimensionamiento de conductores eléctricos, entre otros.
- vii. Es menester de las autoridades locales, realizar una campaña de cuidado de las instalaciones al interior de la plaza para prevenir el vandalismo, así como contar con un protocolo de acción cuando este se presente.

Conclusiones

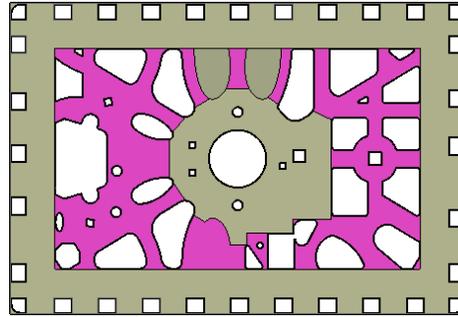
La falta de normas nacionales para la evaluación de sistemas de alumbrado en plazas y parques, derivó en una introspectiva tanto en la normatividad nacional, como en las prácticas y recomendaciones internacionales, de valores límites de parámetros técnicos referentes a eficiencia energética y a condiciones de confort en sistemas de iluminación, de las cuales, se adaptaron criterios al presente caso de estudio. En el caso de la densidad de potencia eléctrica por alumbrado (DPEA), la NOM 013 ENER 2013 ofrece referencias para diferentes tipos de vialidades; en este caso se tomaron las correspondientes a vialidades *Tipo A*, caracterizadas por tener un alto tránsito peatonal nocturno, tránsito vehicular de moderado a alto y moderada existencia de comercios, descripción que se asemeja a las condiciones del Zócalo de Iguala.

A pesar de que el Reglamento técnico de alumbrado público de Colombia [2009] también ofrece referencias sobre DPEA para vialidades¹⁸, estas presentan mayor tolerancia, de modo que se optó por tomar las correspondientes a las NOM 013 ENER 2013. Lo anterior, puede tener fundamento en que la actual normatividad nacional se inclina por medidas de eficiencia energética más rigurosas, debido al surgimiento de tecnología en iluminación más eficiente, obligando a los gobiernos locales a realizar una planificación de alumbrado público impecable con tecnologías nuevas en el mercado, tales como los LEDs; la diferencia del año de publicación podría constatar esta hipótesis.

Además de las normas de sistema, se tienen las normas de producto nacionales, si bien no forman parte de los criterios de eficiencia energética, son útiles en el diseño de las propuestas de mejora, en el momento de la selección de luminarios con mejores rendimientos [lm/W], tales como la NOM 028 ENER 2010, orientada a la eficacia luminosa de lámparas de uso general, y la NOM 031 ENER 2012, enfocada específicamente en la eficacia luminosa de luminarios de tecnología LED. Es posible que la falta de normatividad orientada hacia parques y plazas se deba a la variedad y objetivos de iluminación en relación con los elementos arquitectónicos que se puedan presentar en este tipo de recintos.

Los criterios de eficiencia energética se deben conjugar con los de diseño en un sentido jerárquico, cubriendo en primera instancia, las condiciones mínimas de iluminación; para este fin, las normas nacionales e internacionales, tales como la NOM 025 STPS 2008, la IESNA G-1-03 y el manual de alumbrado público de Colombia, coinciden en un valor de iluminancia horizontal mínima entre 20 [lx] y 30 [lx]. En un principio se pensó en utilizar un valor único de 30 [lx] para todas las zonas de la plaza, sin embargo, resultó complicado conseguir el objetivo para la Zona 2 por la irregularidad y la variedad de elementos arquitectónicos esta contiene. *Ver Imagen. Zona 2, Zócalo*. Por tanto, se decidió evaluar con un criterio de iluminancia horizontal de 20 [lx].

¹⁸ Agosto, 2009. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP. “Tabla de valores máximos de DPEA para vías vehiculares”. Apartado 510.6.1.
http://www.sic.gov.co/recursos_user/reglamentos_tecnicos/reglamento_tecnico_RETILAP.pdf



Ver Imagen. Zona 2, Zócalo

Así mismo, la especificación IESNA G-1-03 define una iluminancia vertical entre 5 [lx] y 8 [lx], valor que resultó como consecuencia de cumplir con la iluminancia horizontal en todas las propuestas. En general, los valores de iluminancia y uniformidad definidos en la normatividad, para cada una de las propuestas, se lograron con base en la combinación de tres parámetros principalmente, posición del punto de luz sobre la vialidad, cantidad de flujo luminoso y distribución luminosa, con los cuales se trató de optimizar el factor de utilización del luminario para evitar pérdidas de luz en zonas no requeridas. En algunos casos se sacrificó el flujo luminoso de ángulos verticales por arriba de los 70°, a razón de incrementar la altura de montaje para poder lograr la uniformidad deseada; en otras, se sacrificó uniformidad para aportar a la iluminancia horizontal promedio.

En el diseño, se observó que el factor de utilización máximo del luminario, no corresponde a la eficiencia total especificada por el fabricante (que resulta de considerar la pérdida de energía en el hemisferio superior) pues hay una mínima cantidad de flujo luminoso que solo se aprovecharía con coeficientes K demasiado grandes (cercaos al infinito), es decir, anchos de vía muy grandes. En un primer acercamiento a la selección de luminarios, este imprescindible que estos ofrezcan altos coeficientes de eficacia de luminario, para aprovechar, lo mejor posible, el flujo luminoso a la salida de la lámpara.

Así mismo, fue complicado cumplir con la DPEA establecida por norma, y a la vez cumplir con los niveles de iluminación, debido a la irregularidad de las zonas de interés definidas en el caso base. A pesar de que en las propuestas se logró dirigir el flujo luminoso hacia las áreas de interés, parte de este recae sobre las jardineras, es decir, se están iluminando zonas que desde un inicio no son de interés en el presente estudio.

Fue necesario plantear las propuestas con un incremento en el parque de luminarios, así como con una redistribución de estos, pues las características luminotécnicas del caso base se encontraban completamente fuera de norma, en particular la uniformidad. Lo anterior no solo por las malas condiciones de suciedad y depreciación de lumen de lámpara, sino también, por la irregularidad en la geometría de las zonas de interés. Además, parte de las condiciones bajas de iluminancia y uniformidad es debida a la interferencia de árboles en la salida del flujo luminoso de los luminarios, esto sucede porque el programa de mantenimiento actual no contempla la poda de árboles.

Hablar de vapor de sodio es remontarnos a los inicios del alumbrado público, esta tecnología ofrece una buena eficacia luminosa, cercana a los 100 [lm/W], frente a sus homólogas en aditivos

metálicos o vapor de mercurio, con un buen mantenimiento del flujo luminoso a lo largo del tiempo, alrededor de **0.85** en la mitad de su vida útil. La tecnología de vapor de sodio sigue siendo una opción para la iluminación de sitios icónicos como plazas de armas por la sensación de calidez que ofrece la temperatura de color, sin embargo, como se vio en el desarrollo del caso base, la tecnología no ofrece un buen manejo del flujo luminoso, lo cual deriva en bajos coeficientes de utilización, eficacias reales [lm/W] bajas y por tanto, bajos niveles de iluminancia y uniformidad, además del bajo rendimiento de color que es esencial en el diseño de espacios públicos seguros.

Diseñar con la mejor tecnología en iluminación no solo consiste en seleccionar las lámparas con la mejor eficacia luminosa, es obligado tomar en cuenta que la lámpara ofrezca los mejores rendimientos a través del tiempo en cuanto a la permanencia de flujo luminoso, tolerancia a variaciones de voltaje, disipación de calor, deterioro de materiales difusores y reflectores; cada uno de estos factores contribuye a la disminución de salida de flujo luminoso, lo cual se traduce en un menor aprovechamiento de la energía. Los niveles de iluminación de las propuestas se plantearon considerando el factor de depreciación de lumen de luminario (LLD) de media vida, con el fin de que los parámetros luminotécnicos permanezcan dentro de norma hasta antes de la mitad de la vida útil de las lámparas. Para el caso de aditivos metálicos cerámicos, este factor es mucho más bajo comparado con la tecnología de vapor de sodio, $LLD_{1/2} = 0.76$, teniendo que sobredimensionar el sistema un **24%**. En el caso de la tecnología LED este factor es superior al **0.9**, además de un periodo de vida útil mucho más largo.

Las propuestas de mejora ofrecen beneficios que varían con base en el esquema de facturación, en el caso de las propuestas de vapor de sodio a alta presión y aditivos metálicos en facturación estimada, los ahorros económicos son prácticamente nulos, pues al aplicar el 25% adicional a la potencia de lámparas instalada, en conjunto con el redondeo al *kilowatt* más cercano [política de facturación estimada, Tarifa 5A, CFE], los consumos estimados son similares a los del caso base. De modo que, una de las propuestas urgentes para obtener mayores beneficios es cambiar al esquema de facturación medida.

Sin embargo, aun migrando hacia el esquema de facturación medida, ninguna de las propuestas ofrece los rendimientos planteados ($TREMA = 10\%$), pues los beneficios no son suficientes para cubrir la inversión con la tasa de descuento definida. Esto se debe a que no se tiene la potencia instalada necesaria (en vapor de sodio a alta presión) para cumplir con los niveles de iluminación, por tal motivo, los costos energéticos son bajos, así como los beneficios resultantes de las propuestas.

Con los 20 años de vida considerados en el proyecto, marcados por la tecnología LED, las propuestas de vapor de sodio a alta presión y aditivos metálicos cerámicos, resultan con retornos de inversión de hasta 60 años, esto es inaudito, pues este se encuentra fuera de la vida útil de las lámparas teniendo que hacer nuevas inversiones en reemplazo. La propuesta más atractiva, con un periodo simple de recuperación de inversión, igual a 13 años resulta la más conveniente, sin embargo, su $TIR = 6\%$, no alcanza a cubrir los rendimientos mínimos del proyecto, resultando en un VPN de **\$458,701.00 negativos** al final de la vida útil del proyecto.

Bibliografía

- [1] Marzo 2003, Illuminating Engineering Society of North América (IESNA). *"IESNA G-1-03 Guideline for Security Lighting for People, Property and Public Spaces"*. Consulta: marzo de 2017. Disponible en:
<http://rageuniversity.org/PRISONESCAPE/PERIMETER%20SECURITY%20PDFS/security-lighting-guide.pdf>
- [2] Noviembre 2009, U.S. Department of Energy. *"Exterior Lighting for Energy Savings, Security and Safety"*. EE Richaman. Consulta: marzo de 2017. Disponible en:
https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/exterior_lighting_savings.pdf
- [3] Junio 2008, U.S. Department of Energy. *"LED Application Series: Outdoor Area Lighting"*. Consulta: Marzo de 2017. Disponible en:
http://www.cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/outdoor_area_lighting.pdf
- [4] 2009, The Dark Sky Society. *"Guidelines for Good Exterior Lighting Plans"*. Consulta: marzo de 2017. Disponible en:
<http://www.darkskysociety.org/handouts/LightingPlanGuidelines.pdf>
- [5] Septiembre 2008, Campbell Collaboration. *"Effects of Improved Street Lighting on Crime"*. Welsh, Brandon P. Farrington, David C. Consulta: marzo de 2017. Disponible en:
http://www.crim.cam.ac.uk/people/academic_research/david_farrington/light.pdf
- [6] Septiembre 2011, Fitch Ratings. *"Proyectos de Modernización del Sistema de Alumbrado Público"*. Reporte especial. Consulta: marzo de 2017. Disponible en:
<http://comfin.mx/comunicados/fitch/2014/julio/01alumbrado.pdf>
- [7] Abril 2014, Secretaría de Energía. *"Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018"*. Consulta: abril de 2017. Disponible en:
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/55267/PRONASE20142018FINAL.pdf>
- [8] Diciembre 2014, United States Agency International Development, USAID . *"Guía Sobre el Marco Jurídico de la Eficiencia Energética en los Municipios (alumbrado público e inmuebles públicos)"*. Consulta: abril de 2017. Disponible en:
<http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00350.pdf>
- [9] Diciembre 2012, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC. *"Estudio del impacto de medidas y políticas de eficiencia energética de los sectores de consumo, sobre el balance de energía y sobre los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero en el corto y mediano plazo"*. Consulta: abril de 2017. Disponible en:
http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_estudio_cc_mitgef13.pdf

- [10] Noviembre 2016, Comisión Nacional para el Ahorro y Uso Eficiente de la Energía, CONUEE. “Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, Balance 2016-2016”. Consulta: abril de 2017. Disponible en:
http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/179572/161202_Informe_de_Labores_Proyecto_Nacional.pdf
- [11] Febrero 2015, Gabriel Torres. Revista Constructor Eléctrico, Energy Management. Artículo “Seis décadas de evolución: el alumbrado público vial en EUA y México”. Consulta: abril de 2017. Disponible en:
<https://constructorelectrico.com/seis-decadas-de-evolucion-el-alumbrado-publico-vial-en-eua-y-mexico/>

Normatividad

- [1] Diario Oficial de la Federación. “NORMA Oficial Mexicana NOM-013-ENER-2013. Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades”. Publicada en México el 14 de Junio de 2013. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5302568&fecha=14/06/2013
- [2] Diario Oficial de la Federación. “NORMA Oficial Mexicana NOM-013-ENER-2004. Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades y áreas exteriores públicas”. Publicada en México el 14 de junio de 2013. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5302568&fecha=14/06/2013
- [3] Diario Oficial de la Federación. “NORMA Oficial Mexicana NOM-028-ENER-2010. Eficiencia energética de lámparas para uso general. Límites y métodos de prueba”. Publicada en México el 06 de diciembre de 2010. Disponible en:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5169747&fecha=06/12/2010
- [4] Diario Oficial de la Federación. “NORMA Mexicana NMX-J-510-ANCE-2011. Balastros de alta eficiencia para lámparas de descarga de alta intensidad, para utilización en alumbrado público”. Publicada en México el 07 de julio de 2011. Disponible en:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5199816&fecha=07/07/2011
- [5] Diario Oficial de la Federación. “NORMA Oficial Mexicana NOM-031-ENER-2012. Eficiencia energética para luminarios con diodos emisores de luz (leds) destinados a vialidades y áreas exteriores públicas. Especificaciones y métodos de prueba”. Publicada en México el 06 de noviembre de 2012. Disponible en:
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5276652&fecha=06/11/2012
- [6] Diario Oficial de la Federación. “NORMA Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008. Condiciones de iluminación en los centros de trabajo”. Publicada en México el 30 de diciembre de 2008. Disponible en:
<http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-025.pdf>

- [7] Diario Oficial de la Federación. *“Manual de disposiciones relativas al suministro y venta de energía eléctrica destinada al servicio público”*. Publicada en México el 06 de marzo de 2013. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5290625&fecha=06/03/2013
- [8] Año 1999. Illuminaiting Engineering Society of North America (IESNA). *“IESNA-RP-33-99, Lighting for Exterior Environments a IESNA Recomendad Practice”*.
- [9] Junio, 2013. Diario Oficial de la Federación. *“Manual de disposiciones relativas al suministro y venta de energía eléctrica destinada al servicio público”*. Disposición decimoctava, sección tercera. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5290625&fecha=06/03/2013
- [10] Noviembre, 2004. Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Distribución. *“Instructivo para la interpretación y aplicación de las tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica”*. Gerencia comercial.

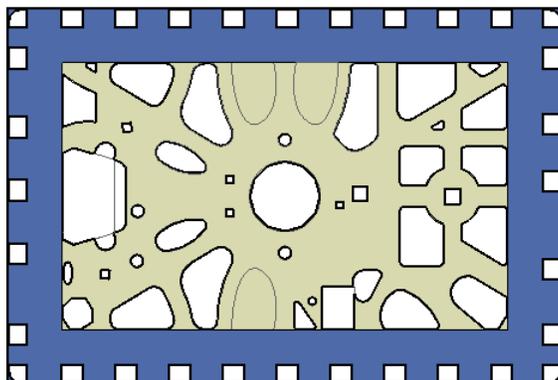
Anexo B. Facturación Eléctrica anual.

<p>Zócalo, Iguala Guerrero Calle Constitución y Juan N, Álvarez Iguala, Guerrero</p>	 Comisión Federal de Electricidad
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

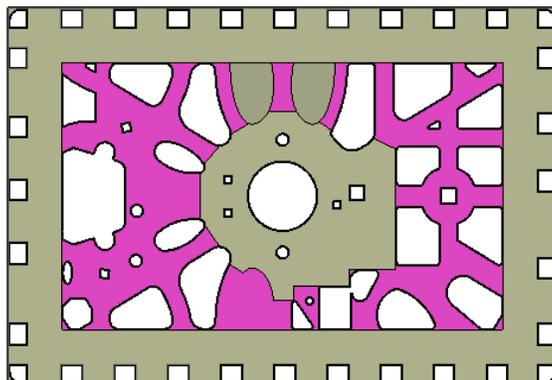
Uso	Tarifa	Fases	Hilos	Suministro
Alumbrado Público	5A	2F	3H	Baja Tensión
Estimación de consumo bimestral				
Demanda contratada		Horas de uso	Días de Facturación	Consumo anual
9 kW		12	365	39420 kWh
Facturación				
Concepto		kWh	Precio	Subtotal
Facturación base		39420 kWh	-	125,197.92
Cargo por MBT (2%)		-	\$0.00	\$0.00
Facturación Normal (MBT)		-	-	125,197.92
Cargo por FP		-	-	\$0.00
Facturación Neta (FP)		-	-	125,197.92
IVA (16%)		-	-	20,031.6672
Facturación Total (impuestos)				145,229.59

Cargos aplicables en Tarifa 5A, para el Zócalo de Iguala. [Se tomaron precios mensuales de la energía en baja tensión a partir del mes de diciembre de 2016]

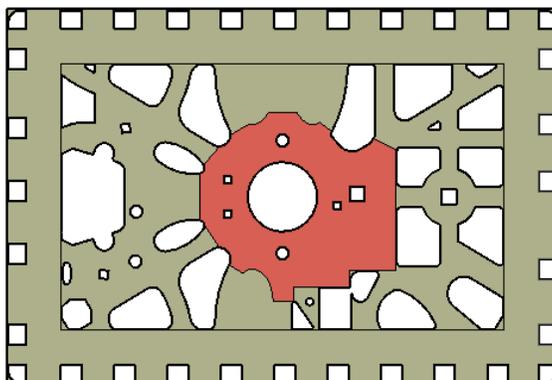
Anexo D. Zonas de interés de alumbrado general.



Alumbrado general, Zona 1. [azul]



Alumbrado general, Zona 2. [magenta]



Alumbrado general, Zona 3. [rojo]

Anexo E. Parámetros caso base

I) Tecnología de iluminación		VSAP Zócalo
Potencia de lámpara	P [W]	250.00
Potencia de línea	PI [W]	295.00
Corriente	I [A]	1.50
Tensión	V [V]	220.00
Índice de reproducción cromática	CRI [1]	20.00
Temperatura de color	TC [K]	2,000.00
Eficacia luminosa lámpara	EF [lm/W]	110.00
Flujo luminoso nominal	PHIn [lm]	28,000.00
Factor de Mantenimiento 6,000 [Hr]	LLD _{1/4} [1]	0.96
Factor de Mantenimiento 12,000 [Hr]	LLD _{1/2} [1]	0.91
Factor de Mantenimiento 24,000 [Hr]	LLD _{1/1} [1]	0.82
Vida útil B5	VU B5 [Hr]	20,000.00
Vida útil B10	VU B10 [Hr]	24,000.00
Vida útil B50	VU B50 [Hr]	36,000.00
Imagen	- -	

Variables lámpara, caso base.

II) Conjunto Lámpara-Luminario ¹⁹		VSAP Zócalo
Tipo	- -	Non-Cutoff
Categoría de distribución luminosa	- -	V
Factor de pérdida luminosa por equipo auxiliar	BF [1]	0.93
Factor de pérdida luminosa por variaciones de tensión	SVV [1]	1
Factor de pérdida luminosa por temperatura ambiente	- -	1
	- -	1
Depreciación lumen por envejecimiento	LLD _{1/2} [1]	0.91
Flujo luminoso lámpara corregido	PHI _c [lm]	23,700.00
Eficacia corregida (salida lámpara)	EF _{real} [lm/W]	81
Eficiencia de luminario	LEF [1]	0.51
Razón de flujo luminoso no aprovechable	UWLR [1]	0.25
Eficiencia total	DWTE [1]	0.38
Depreciación lumen por polvo	LDD [1]	0.84
Factor de pérdida luminosa por degradación de materiales	FSD [1]	1
Flujo luminoso lámpara-luminario corregido	PHI _c [lm]	10,200.00
Eficacia real (salida luminario)	EF _{real} [lm/W]	34.58
Montaje	- -	Punta de poste
Altura de montaje	AM [m]	5.00
Altura del punto de luz	APL [m]	5.38
Índice de protección IP	- -	IP32
Índice de protección IK	- -	IK 00
Material	- -	Acero al carbón
Reflector	- -	Óptica simple de aluminio
Pantalla, refractor o difusor	- -	Difusor de policarbonato
Imagen	- -	

Tabla 9. Variables conjunto lámpara-luminario

¹⁹ Se adaptó la clasificación de factores de pérdida de luz del Light Research Center de Philips para el presente caso de estudio. "Lighting Resource Center, Philips. Light Loss Factors ".
<http://www.lightsearch.com/resources/lightguides/lightloss.html>

III) Datos de Instalación y montaje		VSAP Zócalo
III.a) Zona 1		
Área	AR1 [m2]	2500
Numero de luminarios	NUM1 -	16
Tipo de distribución de luminarios	DISL1 -	Unilateral
Distancia interpostal promedio	DIZ1 [m]	16.10
Tipo de vía	- -	Andador
Ancho de vía	ANV1 [m]	9.9
Altura del punto de luz	APL [m]	5.38
Longitud de brazo de luminario	DBL1 -	0.00
Cociente ancho de vía - altura de punto de luz	K1 [1]	1.84
Factor de utilización	CU1 [1]	0.16
III.b) Zona 2		
Área	AR2 [m2]	2300
Número de luminarios	NUM2 -	0
Tipo de distribución de luminarios	DISL2 -	SIN DISTRIBUCIÓN
Distancia interpostal promedio	DIZ2 [m]	N/A
Tipo de vía	- -	Andador
Ancho de vía	ANV2 [m]	3
Altura del punto de luz	APL [m]	5.38
Longitud de brazo de luminario	DBL2 -	0.00
Cociente ancho de vía - altura de punto de luz	K2 [1]	0.56
Factor de utilización	CU2 [1]	-
III.c) Zona 3		
Área	AR3 [m2]	800
Numero de luminarios	NUM3 -	4
Tipo de distribución de luminarios	DISL3 -	SIN DISTRIBUCIÓN
Distancia interpostal promedio	DIZ3 [m]	N/A
Tipo de área	- -	Área común
Ancho de vía	ANV3 [m]	N/A
Altura del punto de luz	APL [m]	5.38
Longitud de brazo de luminario	DBL3 -	0.00
Cociente ancho de vía - altura de punto de luz	K3 [1]	N/A
Factor de utilización	CU3 [1]	0.38

Tabla 10. Parámetros de montaje y posición

Anexo F. Protocolo de mediciones luminotécnicas para el Zócalo de Iguala

Debido a la variedad de tareas visuales que encontramos dentro de nuestro caso de estudio, es obligado definir los diferentes procedimientos que utilizaremos para la toma de mediciones en campo. Es de nuestro interés el alumbrado general (definido en el capítulo 3), el cual compone: a) un andador perimetral a la plaza, b) andadores que conducen al centro de la plaza y c) áreas comunes alrededor del quiosco. El presente protocolo tiene fundamento en lo siguiente:

- I. *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público de Colombia RETILAP*; de este reglamento, el cual está basado en criterios de la IESNA, se tomaron los métodos de medición para el cálculo de iluminancia horizontal promedio de las diferentes zonas de interés de la plaza.
- II. *IESNA G-1-03 Guideline for Security Lighting for People, Property and Public Spaces*. Metodología para la toma de mediciones de iluminancia vertical.
- III. *IESNA G-1-03 Guideline for Security Lighting for People, Property and Public Spaces* y *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público de Colombia RETILAP*. Referencias utilizadas para la definición y delimitación de zonas y tareas visuales.
- IV. *IESA RP 33 99 Lighting for Exterior Environments* y *IESNA G-1-03 Guideline for Security Lighting for People, Property and Public Spaces* y *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público de Colombia RETILAP*. Recomendaciones generales y buenas prácticas para la toma de mediciones de iluminancia horizontal y vertical.

Indicaciones generales

Diferentes factores son lo que podrían afectar en la toma de lecturas fotométricas confiables, algunos de ellos, el color de la ropa del encargado, alturas diferentes a las estipuladas por el protocolo, interferencia de sombras ajenas al entorno en cuestión, la calibración del equipo, entre otras. A continuación, se enumeran algunas recomendaciones de carácter general:

1. **Calibrar el medidor:** El instrumento de medición deberá estar calibrado con base en las recomendaciones del fabricante para aspirar exactitud en las lecturas. Se sugiere que este cuente con una regleta que permita definir alturas de medición constantes, así mismo, que cuente con un nivel para que las mediciones tomadas estén en función de la inclinación de la superficie de interés.
2. **Identificar el peor escenario posible:** Diferentes condiciones ambientales, atmosféricas u astronómicas, por mencionar algunas: nubosidad, luna llena, lluvia o pérdida del follaje de elementos arbóreos, podrían influir en la toma de lecturas fiables. Es importante que las mediciones sean lo más cercanas a las condiciones reales y representativas del área en cuestión.

3. **Capacitar al encargado de tomar las lecturas:** Elementos como el color de la ropa o la generación de sombras hacia el sensor fotosensible por parte del personal, podrían alterar la medición, se recomienda alejarse del sensor en la medida de lo posible.
4. **Generar un *Layout*.** Es obligado conocer en primera instancia, el tipo de espacio público y las actividades que en este se desempeñen con el fin de planear procedimientos y establecer métodos para la definición de puntos importantes de medición.

A continuación, se presentan los métodos utilizados para la toma de mediciones en los diferentes escenarios encontrados en el zócalo de Iguala, con **planos de trabajo horizontales**:

- a) **Andador perimetral:** Los puntos de medición para este rubro, se tomarán con base en el *Método Europeo*, utilizado para encontrar la iluminancia promedio sobre una vía en una instalación de alumbrado público. De esta forma, para una configuración unilateral, como la presentada en las luminarias ubicadas en el andador perimetral, se tendrán nueve puntos ubicados en un rectángulo de largo igual a la mitad de la distancia interpostal, de ancho igual al del andador y ubicado en el lado de una de las dos luminarias, como se muestra en la siguiente imagen. *Imagen Anex-1*.

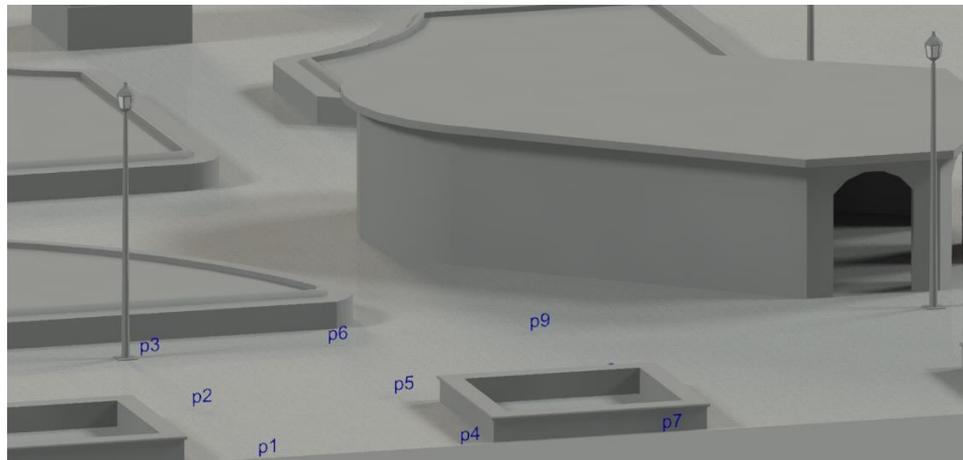


Imagen Anex-1. Ubicación de los puntos de medición con base en el Método Europeo, para los luminarios del andador perimetral en configuración unilateral.

Como se observa, algunos de los puntos de medición caen sobre las jardineras, en este caso, se omitirán dichas lecturas y se ajustará la ecuación de iluminancia promedio siguiente, según sea el caso:

$$E_{prom} = \frac{1}{16} [(E_1 + E_3 + E_7 + E_9) + 2(E_2 + E_4 + E_6 + E_8) + 4E_5]$$

Cabe mencionar que no todas las muestras tienen la misma influencia, por lo que el número de datos variará en función de el o los puntos que se omitan.

- b) **Andadores interiores:** Los andadores que conducen al centro de la plaza presentan formas irregulares definidas por las jardineras, para definir los puntos de medición nos basaremos en lo siguiente:

530.3.4 Áreas de forma irregular.

Los puntos de cálculo deben incluir áreas aplicables y estar sobre una malla con un espaciado entre puntos no mayor de 5 [m]. Para áreas de un interés o una importancia en particular, se debe considerar un espaciado de alrededor de 1 [m]. (Colombia, Marzo, 2010. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, pág. 158.)

A continuación, se presentan algunos puntos de medición referentes a este escenario. Ver Imagen Anex-2.

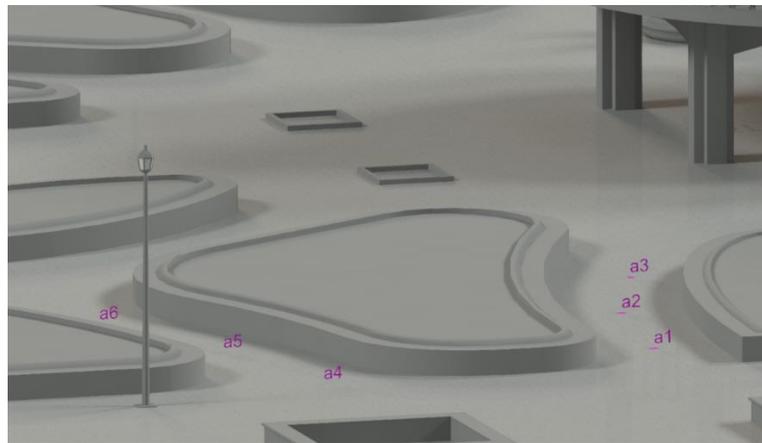


Imagen Anex-2. Puntos de medición de iluminancia para áreas irregulares en espacios públicos al aire libre.

- c) **Zona alrededor del Quiosco:** Para esta área se tomó el mismo criterio que en el inciso anterior: se proyectó una malla en el área en cuestión con espaciados entre puntos no mayores a 5[m]. Ver Imagen Anex-3.

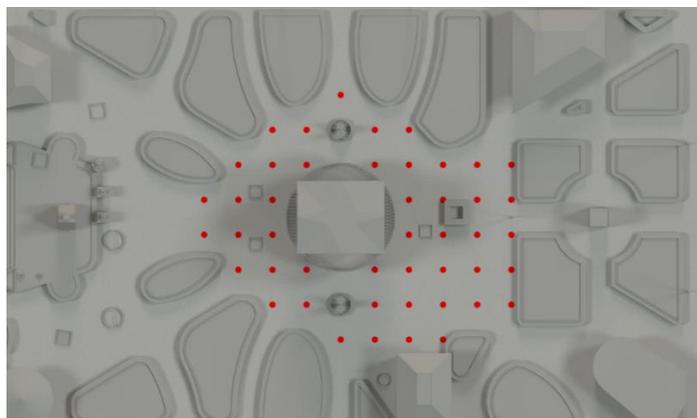


Imagen Anex-3. Puntos de medición en la zona central de la plaza, con base en el 530.3.4 del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público de Colombia.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las tareas visuales de más importancia en alumbrado público es la identificación de rostros, el cual, su evaluación, a diferencia de los escenarios anteriores, se hace sobre un **plano de trabajo vertical**, a continuación, se enuncian algunas recomendaciones para la toma de mediciones en este entorno de trabajo:

1. **Posicionar el instrumento de medición:** Este deberá estar en posición vertical a una altura promedio de 1.5 [m] sobre el nivel de piso.
2. **Orientar el instrumento de medición:** La orientación del medidor depende de la tarea visual, por ejemplo, en puntos de revisión, este deberá estar orientado hacia el responsable del área en cuestión (personal de vigilancia), o hacia una cámara de video de circuito cerrado. En el caso de áreas a cielo abierto, en donde no se tiene una dirección visual concreta, la toma de mediciones se torna más elaborada, pues estas deberán ser tomadas en los diferentes puntos cardinales, cumpliendo con la condición de que los valores no sean menores al 25% del promedio.
3. **Considerar la iluminancia del fondo:** Además de la orientación, se debe considerar la iluminancia del fondo para que se pueda tener un contraste tal, que permita la fácil identificación de rostros. En este caso, la iluminancia en el plano vertical de interés no deberá ser menor que el 25% de la iluminancia del fondo.

Para tener una idea general de la toma de mediciones para los diferentes planos de trabajo *Ver Imagen Anex-4.*

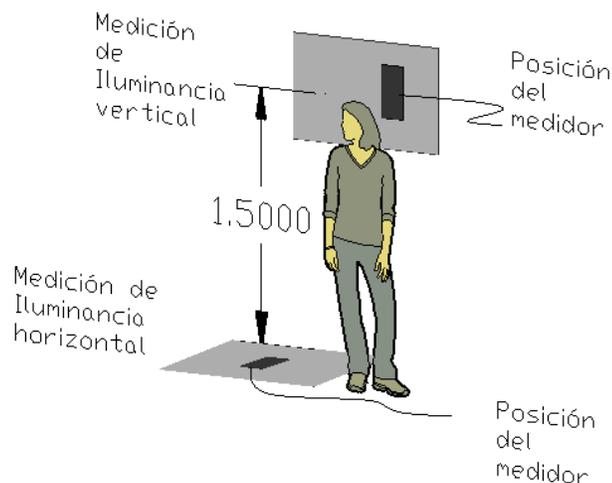


Imagen Anex-4. Posición del instrumento de medición para la toma de mediciones en planos de trabajo horizontal y vertical.

Con estas recomendaciones se podrán tener mediciones confiables y representativas del Zócalo de la ciudad de Iguala.

Anexo G. Resultados luminotécnicos. Propuesta 1

Gráfico curvas isolux, Zona 1.

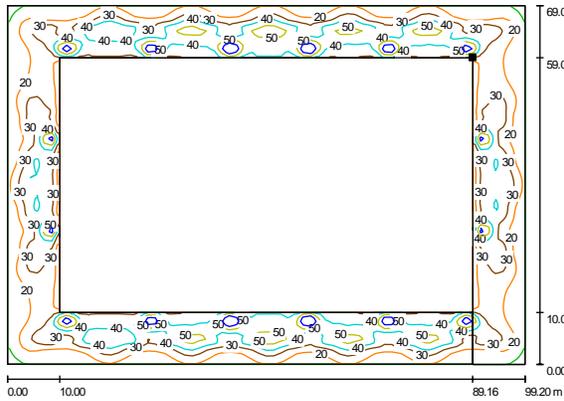


Gráfico colores falsos, Zona 2.

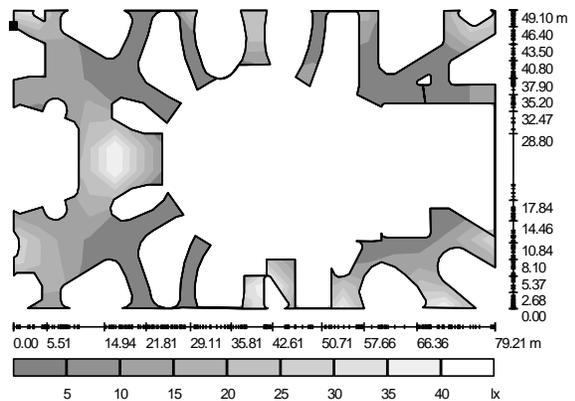
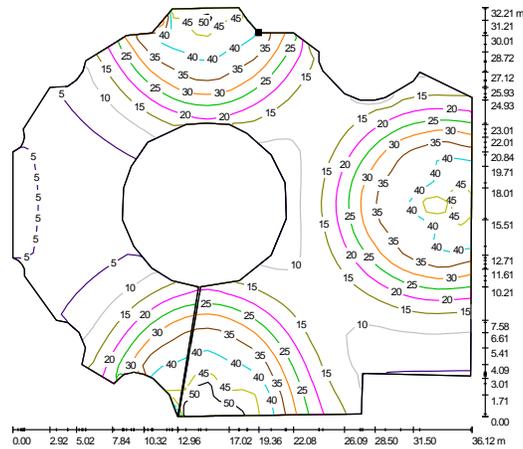


Gráfico curvas isolux, Zona 3.



Iluminancia vertical

N°	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Zona 1	perpendicular	100 x 70	31	6.29	92	0.201	0.068
2	Zona 2	perpendicular	100 x 70	20	3.80	69	0.187	0.055
3	Zona 3	perpendicular	40 x 40	20	2.15	60	0.105	0.036

Iluminancia vertical

Tipo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
perpendicular	3	27	2.15	89	0.08	0.02

Anexo H. Resultados luminotécnicos. Propuesta 2

Gráfico curvas isolux, Zona 1.

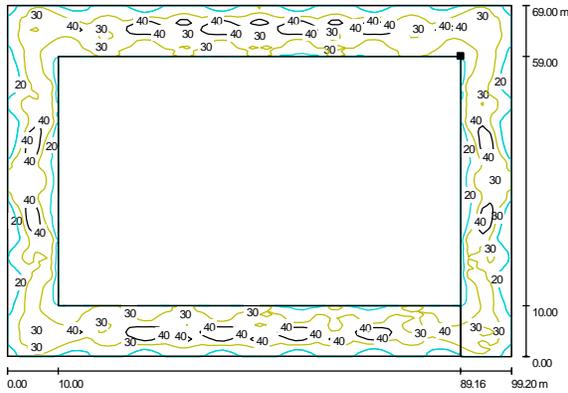


Gráfico colores falsos, Zona 2.

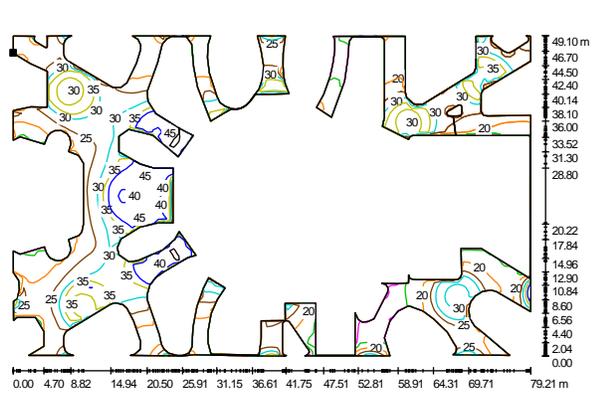
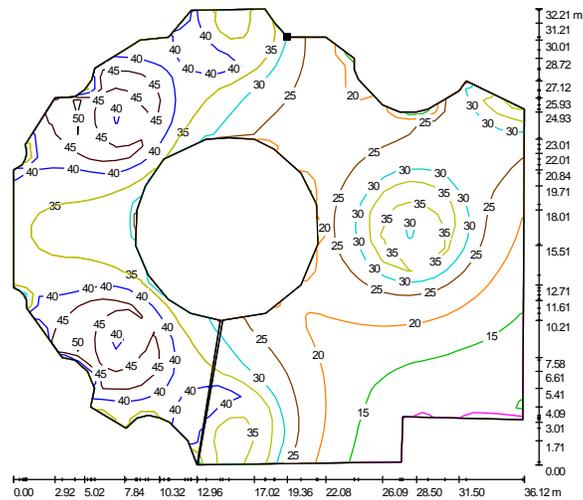


Gráfico curvas isolux, Zona 3.



Iluminancia vertical

N°	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	100 x 70	30	13	65	0.428	0.197
2	Superficie de cálculo 2	perpendicular	100 x 70	27	11	55	0.400	0.201
3	Superficie de cálculo 3	perpendicular	40 x 40	30	12	53	0.396	0.224

Iluminancia vertical

Tipo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
perpendicular	3	29	11	63	0.39	0.18

Anexo I. Resultados luminotécnicos. Propuesta 3

Gráfico curvas isolux, Zona 1.

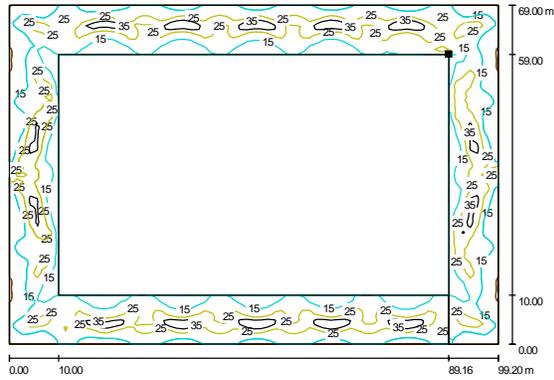


Gráfico colores falsos, Zona 2.

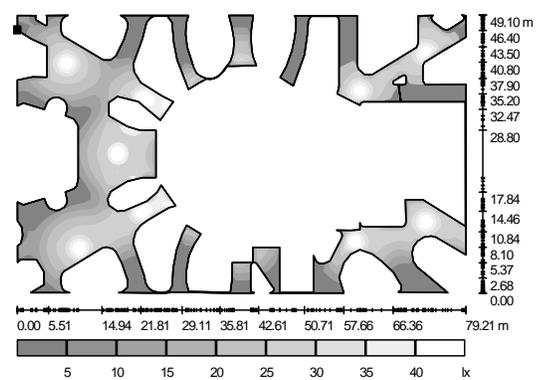
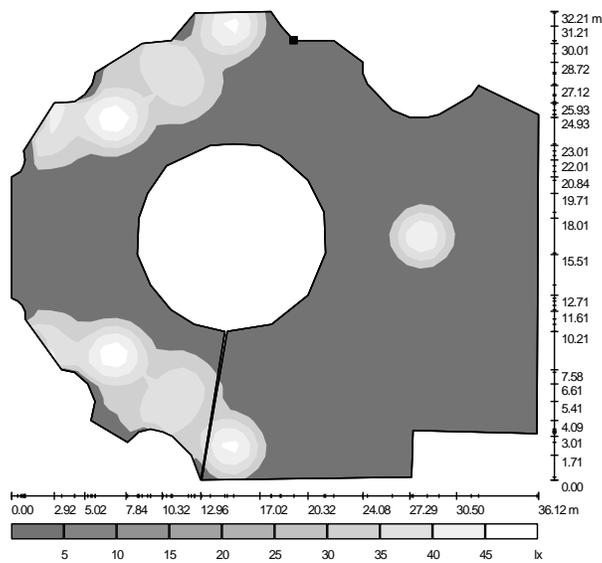


Gráfico colores falsos, Zona 3.



Iluminancia vertical

N°	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	100 x 70	21	4.95	51	0.241	0.098
2	Superficie de cálculo 2	perpendicular	80 x 50	20	2.65	53	0.131	0.050
3	Superficie de cálculo 3	perpendicular	40 x 40	21	3.50	52	0.163	0.067

Iluminancia vertical

Tipos de punto de cálculo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
Vertical, cil.	51	17	5.13	41	0.30	0.12

Anexo J. Resultados luminotécnicos. Propuesta 4.

Gráfico colores falsos, Zona 1.

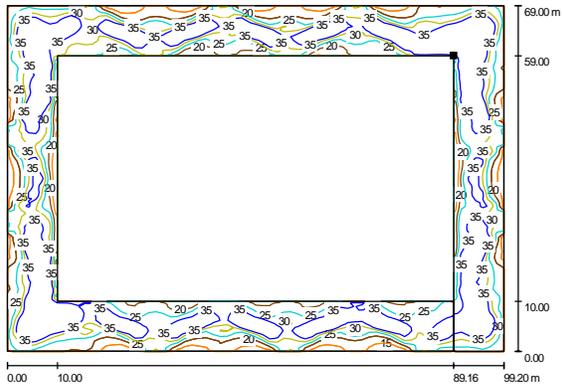


Gráfico colores falsos, Zona 2.

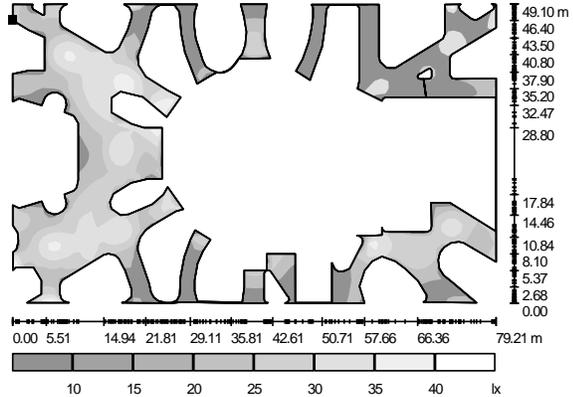
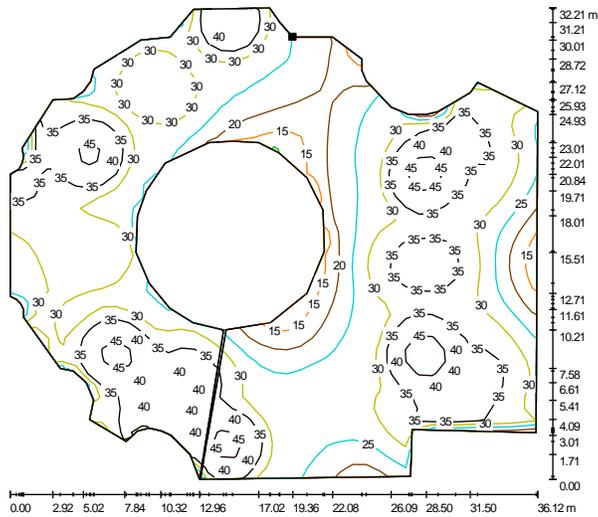


Gráfico curvas isolux, Zona 3.



Iluminancia vertical

N°	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	100 x 70	31	11	65	0.358	0.170
2	Superficie de cálculo 2	perpendicular	80 x 50	25	8.05	47	0.319	0.170
3	Superficie de cálculo 3	perpendicular	40 x 40	31	11	54	0.355	0.201

Iluminancia vertical

Tipos de punto de cálculo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
Vertical, cil.	51	22	11	43	0.48	0.25

Anexo K. Resultados luminotécnicos. Propuesta 5.

Gráfico colores falsos, Zona 1.

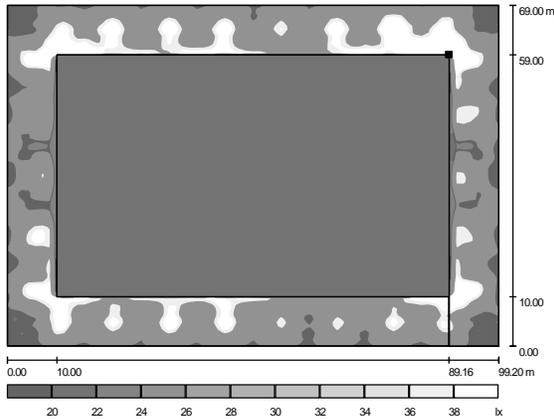


Gráfico colores falsos, Zona 2.

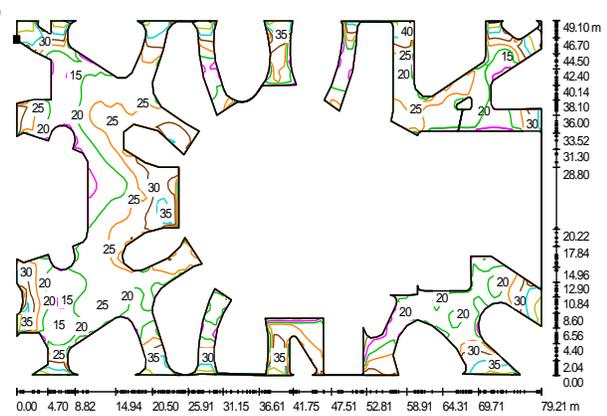
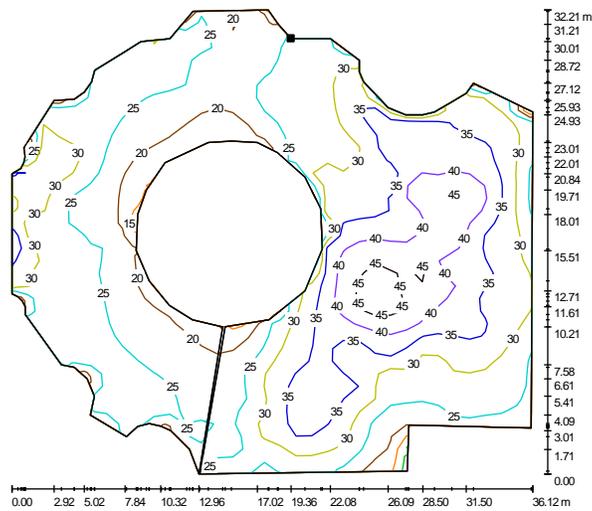


Gráfico curvas isolux, Zona 3.



Iluminancia vertical

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	100 x 70	31	12	50	0.375	0.236
2	Superficie de cálculo 2	perpendicular	100 x 70	25	8.29	49	0.332	0.171
3	Superficie de cálculo 3	perpendicular	37 x 33	30	15	48	0.493	0.306

Iluminancia vertical

Tipos de punto de cálculo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
Vertical, cil.	51	20	9.08	34	0.46	0.27

Anexo L. Resultados luminotécnicos. Propuesta 6.

Gráfico curvas isolux, Zona 1.

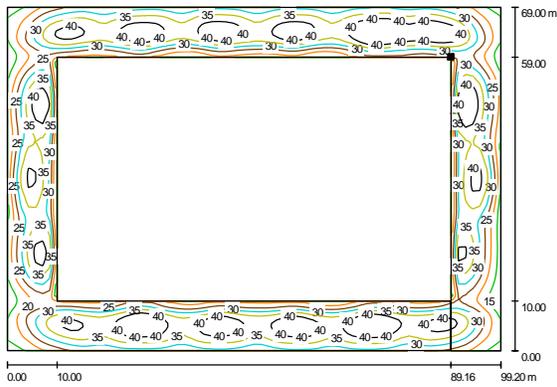
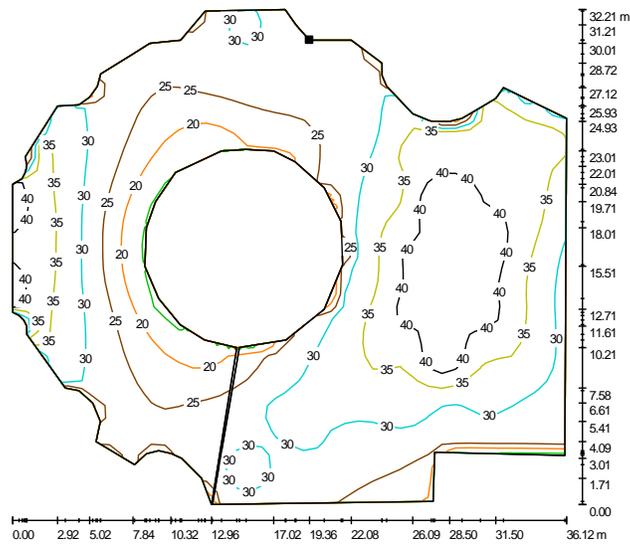


Gráfico curvas isolux, Zona 2.



Gráfico curvas isolux, Zona 3.



Iluminancia vertical

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	100 x 70	32	11	48	0.349	0.230
2	Superficie de cálculo 2	perpendicular	40 x 25	26	9.64	49	0.371	0.197
3	Superficie de cálculo 3	perpendicular	40 x 40	30	13	47	0.437	0.282

Iluminancia vertical

Tipos de punto de cálculo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
Vertical, cil.	51	21	8.08	33	0.38	0.24

Anexo M. Resultados luminotécnicos. Propuesta 7.

Gráfico curvas isolux, Zona 1.

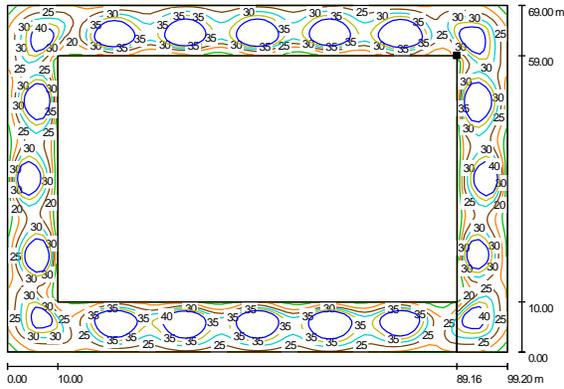
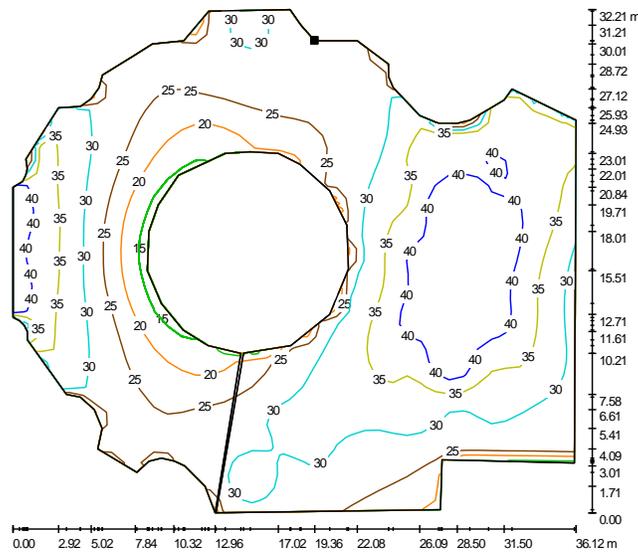


Gráfico curvas isolux, Zona 2.



Gráfico curvas isolux, Zona 3.



Iluminancia vertical

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	100 x 70	31	12	66	0.395	0.187
2	Superficie de cálculo 2	perpendicular	40 x 25	25	8.92	50	0.352	0.178
3	Superficie de cálculo 3	perpendicular	40 x 40	31	12	48	0.401	0.256

Iluminancia vertical

Tipos de punto de cálculo	Cantidad	Media [lx]	Min [lx]	Max [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
Vertical, cil.	48	22	8.7	34	0.4	0.26

Anexo N. Beneficios energéticos y económicos de las propuestas para los diferentes escenarios.

Esquema de facturación estimada		Concepto: Alumbrado General						
Propuesta	Descripción	Demanda ponderada [kW]	Consumo ponderado [kWh]	Ahorros energéticos [kWh]	Ahorros energéticos [1]	Nueva Facturación [\$]	Beneficios Económicos [\$]	Ahorro Facturación [1]
0	Caso base	6.98	30,587	0	0.00%	\$112,685.90	\$0.00	0.00%
1	Sustitución uno a uno VSAP_250[W]	6.98	30,587	1,139	4.41%	\$112,685.90	\$0.00	0.00%
2	VASAP_150[W], con aumento del parque de luminarios	6.19	27,127	981	3.80%	\$99,939.03	\$12,746.87	11.31%
3	MH_175[W], con aumento del parque de luminarios	7.16	31,339	-985	-3.81%	\$115,457.93	-\$2,772.03	-2.46%
4	MH_175[W], con menor LLD	7.12	31,175	-2,685	-10.39%	\$114,854.22	-\$2,168.32	-1.92%
5	Migración a tecnología LED de 75 [W]	4.17	18,281	11,388	44.07%	\$67,349.30	\$45,336.60	40.23%
6	Migración a tecnología LED de 97 [W]	4.01	17,564	12,045	46.61%	\$66,003.75	\$46,682.15	41.43%
7	Combinación de tecnología LED de 70 y 97 [W]	3.84	16,812	14,612	56.54%	\$61,937.57	\$50,748.33	45.04%

Beneficios energéticos y económicos de las propuestas para el esquema de Facturación estimada, Tarifa 5A.

Esquema de Facturación Real		Alumbrado General						
Propuesta	Descripción	Demanda real [kW]	Consumo real [kWh]	Ahorros energéticos [kWh]	Ahorros energéticos [1]	Nueva Facturación [\$]	Beneficios Económicos [\$]	Ahorro Facturación [1]
0	Caso base	5.90	25,842	0	0.00%	\$95,206.06	17,479.84	15.51%
1	Sustitución uno a uno VSAP_250[W]	5.64	24,703	1,139	4.41%	\$91,010.54	21,675.36	19.24%
2	VASAP_150[W], con aumento del parque de luminarios	5.68	24,861	981	3.80%	\$91,591.46	21,094.44	18.72%
3	MH_175[W], con aumento del parque de luminarios	6.12	26,827	-985	-3.81%	\$98,833.58	13,852.32	12.29%
4	MH_175[W], con menor LLD	6.51	28,527	-2,685	-10.39%	\$105,097.81	7,588.09	6.73%
5	Migración a tecnología LED de 75 [W]	3.30	14,454	11,388	44.07%	\$53,250.85	59,435.05	52.74%
6	Migración a tecnología LED de 97 [W]	3.15	13,797	12,045	46.61%	\$51,846.96	60,838.94	53.99%
7	Combinación de tecnología LED de 70 y 97 [W]	2.56	11,231	14,612	56.54%	\$41,374.30	71,311.60	63.28%

Beneficios energéticos y económicos de las propuestas para el esquema de Facturación Real, Tarifa 5A.

Esquema de Facturación Real con <i>dimmeo</i> de la Tecnología LED		Alumbrado General						
Propuesta	Descripción	Demanda real [kW]	Consumo real [kWh]	Ahorros energéticos [kWh]	Ahorros energéticos [%]	Nueva Facturación [\$]	Beneficios Económicos [\$]	Ahorro Facturación [%]
0	Caso base	5.90	25,842	0	0.00%	\$95,206.06	17,479.84	15.51%
1	Sustitución uno a uno VSAP_250[W]	5.64	24,703	1,139	4.41%	\$91,010.54	21,675.36	19.24%
2	VASAP_150[W], con aumento del parque de luminarios	5.68	24,861	981	3.80%	\$91,591.46	21,094.44	18.72%
3	MH_175[W], con aumento del parque de luminarios	6.12	26,827	-985	-3.81%	\$98,833.58	13,852.32	12.29%
4	MH_175[W], con menor LLD	6.51	28,527	-2,685	-10.39%	\$105,097.81	7,588.09	6.73%
5	Migración a tecnología LED de 75 [W]	3.30	14,454	11,388	44.07%	\$53,250.85	59,435.05	52.74%
6	Migración a tecnología LED de 97 [W]	3.15	13,797	12,045	46.61%	\$51,846.96	60,838.94	53.99%
7	Combinación de tecnología LED de 70 y 97 [W]	2.56	11,231	14,612	56.54%	\$41,374.30	71,311.60	63.28%

Beneficios energéticos y económicos de las propuestas para el esquema de Facturación Real con *dimeo* de la Tecnología LED, Tarifa 5A.

Anexo O. Cuadro resumen de evaluación económica de las propuestas.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Facturación estimada							
TREMA	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
VPN	-\$137,244	-\$347,988	-\$513,025	-\$600,254	-\$1,092,515	-\$768,356	-\$786,360
B/C	0.00	0.29	-0.06	-0.04	0.29	0.38	0.39
TIR	-	-1.42%	-	-	-1.33%	0.83%	1.24%
TIRM	-	0.77%	-	-	0.78%	2.54%	2.86%
PRIs	-	30.54	-	-	30.58	23.69	22.60
Facturación real							
TREMA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
VPN	\$103,469	-\$255,285	-\$328,405	-\$491,905	-\$924,271	-\$599,417	-\$540,969
B/C	1.75	0.48	0.32	0.15	0.40	0.51	0.58
TIR	20.24%	2.98%	-0.62%	-6.45%	1.35%	3.68%	4.95%
TIRM	13.63%	4.21%	1.43%	-3.71%	2.96%	4.69%	5.59%
PRIs	5.34	18.60	27.71	60.01	22.27	17.42	15.36
Facturación real, <i>dimmeo</i>							
TREMA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
VPN	\$103,466	-\$255,285	-\$328,427	-\$491,917	-\$818,372	-\$664,589	-\$458,701
B/C	1.75	0.48	0.32	0.15	0.47	0.46	0.65
TIR	20.24%	2.98%	-0.62%	-6.45%	2.80%	2.52%	6.03%
TIRM	13.63%	4.21%	1.43%	-3.71%	4.06%	3.97%	6.32%
PRIs	5.34	18.60	27.72	60.02	19.03	19.61	13.88

Cuadro resumen de la evaluación económica de las propuestas.

Anexo Fotográfico. Condiciones de iluminación en el Zócalo de la ciudad de Iguala.



Imagen 1 Anexo Fotográfico. Zonas en condiciones de penumbra por follaje de árboles.

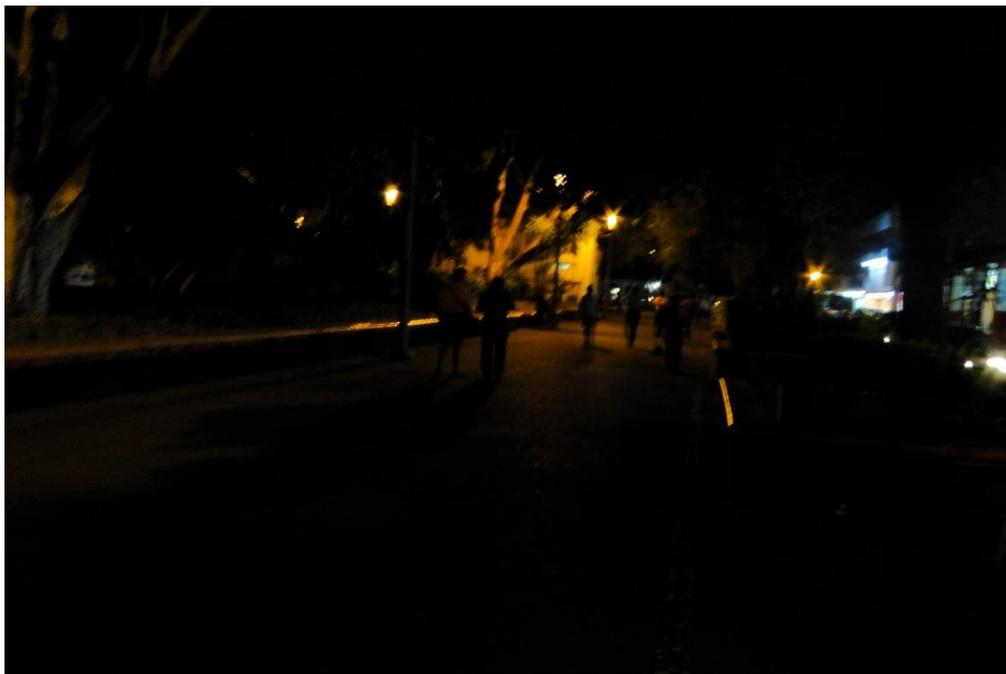


Imagen 2 Anexo Fotográfico. Luminario fuera de servicio.