



Nova Scientia

E-ISSN: 2007-0705

nova_scientia@delasalle.edu.mx

Universidad De La Salle Bajío

México

Hernández Moreno, Silverio
Análisis comparativo por ciclo de vida de tres tipos de luminarias empleadas en los
interiores de edificios
Nova Scientia, vol. 7, núm. 14, 2015, pp. 538-559
Universidad De La Salle Bajío
León, Guanajuato, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203338783028>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Revista Electrónica Nova Scientia

Análisis comparativo por ciclo de vida de tres tipos de luminarias empleadas en los interiores de edificios

Comparative life cycle analysis of three types of indoor luminaries used in buildings

Silverio Hernández Moreno

Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma del Estado de México,
Toluca

México

Silverio Hernández Moreno. E-mail: silverhm2002@yahoo.com.mx

Resumen

Este trabajo consiste en la realización de un análisis comparativo por ciclo de vida entre tres tipos de luminarias usadas comúnmente en la actualidad en proyectos arquitectónicos y de iluminación artificial para interiores de edificios; comparando sus impactos ambientales para conocer cómo contribuyen de manera cuantitativa al calentamiento global principalmente por emisiones de CO₂ a la atmósfera. El análisis se hizo a través de la información derivada de un *Software* de simulación del ciclo de vida de productos (GaBi®), usando particularmente la metodología llamada *Evaluación por Ciclo de Vida* (ECV) que se enfoca principalmente en evaluar los impactos ambientales asociados a un producto a través de toda su vida útil, en concordancia con la norma técnica internacional ISO 14040 (referente a la metodología de Análisis por Ciclo de Vida). Los resultados muestran que el consumo eléctrico de la incandescente fue de 5.55 veces más que la luminaria fluorescente y 8.10 veces más que la de LED; la producción, uso y disposición final de la luminaria incandescente (49,334.4 CO₂e) en el ejemplo del presente estudio, contribuye al calentamiento global 29.87 veces más que la fluorescente (1,651.2 Kg. CO₂e) y 146.82 veces más que la de LED (336 Kg. CO₂e). Se concluye que la luminaria LED es la mejor opción tomando en consideración todo el ciclo de vida completo del producto incluyendo el costo. Por otro lado, si solamente se valorara la fase de producción, la mejor opción sería la incandescente, pero por supuesto que sería un parámetro muy limitado porque se deben tomar en cuenta todas las fases del ciclo de vida incluyendo el análisis de costo por cada fase (de producción; de uso y mantenimiento y de fin de vida útil y disposición final). Respecto a la luminaria fluorescente podría ser la mejor opción ya que existe una amplia gama de productos en donde varian significativamente los precios y podría ser una buena opción durante la selección adecuada de equipos ahorradores en iluminación.

Palabras clave: ciclo de vida; iluminación artificial; impactos ambientales; calentamiento global; energía ecológica

Recepción: 17-11-2014

Aceptación: 24-02-2015

Abstract

This paper discusses the results of a comparative life cycle analysis of three types of luminaries commonly used today in artificial lighting of architectural and indoors buildings; comparing the environmental impacts to know how much quantitatively contribute to global warming, primarily by CO₂ emissions to the atmosphere. The analysis was done through information derived of a *Software* simulation lifecycle product (GaBi®), particularly using the evaluation methodology called Life Cycle Assessment (LCA) that focuses primarily on assessing the environmental impacts associated with a product throughout its whole life, in accordance with the international *ISO 14040* standard (concerning to methodology of Life Cycle Analysis). The results show that the power consumption of incandescent was 5.55 times the fluorescent lamp and 8 times the LED; the production phase, use and disposal phases of the incandescent lamp (49334.4 CO₂e) in the example of the present study contributes to global warming 29.87 times more than fluorescent (1651.2 Kg. CO₂e) and 146.82 times the LED (336 Kg. CO₂e). We conclude that the LED luminaire is the best choice considering the whole entire life cycle of the product including the cost. On the other hand, if only the production phase is valued, the best option would be incandescent, but of course it would be a very limited parameter that must be taken into account all phases of the life cycle including analysis of the cost for each phase (production, use and maintenance and end of service life and disposal). Regarding the fluorescent luminaire could be the best option since there is a wide range of products where prices vary significantly and could be a good option for saving the proper selection of lighting equipment.

Keywords: life cycle; active lighting; environmental impacts; global warming; ecological energy

1. Introducción

Hoy en día y debido a los recientes cambios en materia de energía e impacto ambiental ha habido nuevas disposiciones en materia de iluminación artificial en los edificios que señalan básicamente que se deben reducir de un 15 a un 40% la cantidad de energía usada en las luminarias durante toda su vida útil. Asimismo, la reducción de los impactos ambientales es parte de todo plan de desarrollo en cualquier ciudad o país, y existen estudios importantes al respecto (que se comentarán más adelante) los cuales evalúan impactos ambientales de distintas luminarias ahorradoras y no ahorradoras en donde se considera no solamente el impacto ambiental del uso de las mismas sino también el impacto desde su fase de manufactura hasta el fin de la vida útil (Welz et Al., 2011).

Las luminarias incandescentes fueron patentadas en el año de 1880 por Thomas Alva Edison (norteamericano de origen mexicano) y aunque en nuestros días, hay una gran oferta de nuevas luminarias ahorradoras entre fluorescentes y de tipo LED (*Light-Emitting Diode*), las incandescentes aún se siguen usando ya que su costo es muy bajo y aunque los nuevos lineamientos en materia de energía están limitando su uso gradualmente (Secretaría de Energía, 2010), todavía en miles de hogares en todo el mundo se continua su uso, en primer lugar por su bajo costo seguido de su calidez y que los requerimientos para su producción e implementación son menores comparados con las luminarias de tipo fluorescente y de LED. La forma en que opera una luminaria incandescente es a través del fenómeno de *incandescencia* que ocurre como resultado del calentamiento de un objeto, en este caso de un filamento metálico de tungsteno que produce radiación electromagnética y que también produce fotones de luz que crean un ambiente iluminado a través de dicha radiación visible. Por otro lado, la forma en que operan las luminarias fluorescentes es bajo el principio de fluorescencia, lo cual consta de dos principales componentes: una balaustrada electrónica y un tubo de vidrio. El tubo de vidrio encierra a un gas noble, generalmente argón o xenón, cuando se enciende la luminaria el mercurio contenido vaporiza en el gas noble formando una nube ionizada por lo que se distribuye en forma de fluido a lo largo de todo el tubo, lo que produce luz ultravioleta lo cual reactiva una capa de fosforo en las paredes internas del tubo de vidrio produciendo luz visible. La fluorescencia ocurre durante la absorción molecular de partículas de fotones de distintas longitudes de onda (las ondas

ultravioletas llegan a ser visibles al ojo humano cuando inciden con el fósforo, lo cual produce la luz fluorescente que conocemos debido a que, al ser iluminadas, transforman a estas radiaciones en otras de mayor longitud de onda). Las balaustras electrónicas proveen la corriente eléctrica para su encendido y controla el fluido a través de un circuito eléctrico integrado; estas balaustras en la mayoría de los productos de luminarias fluorescentes actuales ya vienen integradas al tubo de vidrio (se llaman luminarias compactas fluorescentes), también vienen en formas enroscadas e incluso algunas pueden proporcionar una calidez ambiental similar al de tipo incandescente. En lo referente a las luminarias *Light-Emitting Diode* (del acrónimo inglés *LED*), las luminarias de *LED* son lámparas que funcionan a través de diodos emisores de luz que consumen cantidades muy bajas de energía eléctrica y emiten grandes cantidades de luxes por lo que son las de mayor eficiencia energética entre todas las luminarias del mercado (aunque son las más caras también); y si las comparamos con las luminarias fluorescentes e incandescentes, en lo general, podríamos decir, que sus impactos ambientales son menores (durante su fase de uso y operación), pero si nos detenemos a analizar el impacto ambiental en las fases de producción y su costo económico, tal vez sería conveniente buscar otras opciones.

Si se realiza una previa comparación entre luminarias incandescente vs. fluorescente y de LED para iluminar los ambientes, la experiencia dice que la cantidad de luz (luxes) producida mediante las luminarias fluorescentes y de LED será mucho más eficiente en una razón aproximada de 1:6 para fluorescente y de 1:10 para LED (puede variar respecto a la energía utilizada, las condiciones de instalación y ambientales) que la producida a través de las luminarias incandescentes, y además que sus vidas útiles son mucho mayores que una incandescente; pero a pesar de esto, varios estudios concuerdan (Congreso Americano, 2007), (*International Association of Energy-Efficient Lighting*, 1995), (Parsons, 2006), (Ryckaert et Al., 2012), (Principi y Fioretti, 2014) que los impactos ambientales globales o totales en el ciclo de vida de una luminaria fluorescente y de LED (sobre todo en las etapas de manufactura y de disposición final) pueden ser iguales o muchas veces mayores que en las incandescentes, por tanto consideramos conveniente un estudio actualizado y desde el punto de vista del arquitecto para que se proporcionen datos de mayor certidumbre y confiabilidad y que ayuden al diseñador (a) a la toma de decisiones durante la etapa de diseño arquitectónico sustentable y durante la selección de los equipos ahorradores para iluminación artificial en edificios.

Por otro lado, la primer crisis grande de petróleo a nivel mundial se presentó en 1973, y a partir de ahí se han buscado varias soluciones de tipo tecnológico y ecológico para cubrir diversas necesidades de energía; en la industria de la iluminación, por ejemplo a mediados de la década de los 70's la empresa *General Electric®* empieza a comercializar la lámpara fluorescente (Environmental Protection Agency, 2014) y desde principios de los 80's se han venido usando de menos a más, pero solamente a mediados de los 90's como respuesta a soluciones en energía por el calentamiento global (Soneji, 2008) aumentó notablemente su uso y por tanto su producción y comercialización. El uso y aplicación de las luminarias fluorescentes y de LED en los edificios e industria de la iluminación en el mundo ha tenido un gran auge en la actualidad como respuesta al ahorro de energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que se pudiera pensar que no existe debate entre el uso de este tipo de luminarias fluorescentes y de LED vs incandescentes, sin embargo y a través de literatura revisada de varios documentos como artículos y reportes técnicos de investigación (Michaud et. Al., 2008), (Tosenstock, 2007), (Soneji, 2008), (Ryckaert et Al., 2012), (Principi y Fioretti, 2014) se puede observar que los impactos ambientales producidos por las luminarias fluorescentes y de LED varían relativamente poco alrededor de los impactos ambientales causados por las incandescentes (puntualmente en la fase de producción), por tanto, es necesario y al mismo tiempo se justifica el presente estudio que tiene por objetivo principal hacer un análisis comparativo de ciclo de vida entre estos tres tipos de luminarias mediante un *Software* especializado de *ECV* en concordancia con la norma ISO 14040 (ISO, 1997) correspondiente, para conocer los actuales impactos ambientales significativos, principalmente acerca del calentamiento global y sustancias tóxicas emitidas a la atmósfera como mercurio y arsénico, y así poder tomar decisiones en el proceso de diseño de iluminación artificial en proyectos de edificios e infraestructura urbana.

Respecto al consumo de energía eléctrica, la tendencia es reducir el uso de luminarias de alto consumo de 100-60 watts al interior de edificios por luminarias de bajo consumo como de 20-40 watts o incluso de menor consumo energético (aunque más caras) como pudieran ser las luminarias a base de LED que fluctúan alrededor de 5 a 15 watts (Principi y Fioretti, 2014). Asimismo las nuevas tecnologías en materia de generación de energía como los arreglos fotovoltaicos y/o generadores eólicos así como de otros tipos de energías alternativas pueden ser de gran ayuda trabajando en combinación tanto con equipos ahorradores como con sistemas

inteligentes de iluminación mediante el uso de *sensores* y *actuadores* que automatizan las instalaciones para fines de ahorro de energía por iluminación y otros rubros. Cabe resaltar, y a propósito de los *sistemas inteligentes* de equipos y lámparas ahorradoras y uso de energía alternativa para el consumo en los edificios, la principal y mejor manera de ahorrar recursos naturales, humanos y financieros para fines de iluminación y energía en los edificios es sin duda alguna a través del diseño bioclimático y del diseño de la iluminación natural, lo cual es el primer paso para diseñar cualquier proyecto que se diga sustentable y ecológico.

A continuación se señalan los detalles metodológicos para la ejecución de dicho análisis por ciclo de vida.

Método

Partiendo del objetivo principal que es la ejecución de un análisis comparativo por ciclo de vida entre tres tipos de productos, a continuación se muestra el diseño de la presente investigación.

1°. Etapa de recopilación de información

Objetos de estudio: luminaria fluorescente compacta (de 18 watts) para interiores, luminaria LED (de 12.5 watts) y luminaria incandescente para interiores (de 100 watts). La marca registrada de los productos no se pondrán por razones obvias de derechos comerciales pero si podemos señalar que las tres luminarias son del mismo fabricante y que proporcionan una cantidad lumínica similar (luxes en la fluorescente= 1, 200; luxes en la incandescente= 1, 200; y en la de LED= 1, 700 luxes). Nota: los productos representan a una muestra promedio de los productos similares existentes en el mercado.

Variables de entrada: Cantidad de materiales que componen a cada producto, procesos de extracción de materias primas, manufactura, transporte y otros insumos varios como: energía eléctrica, diésel o gasolina.

Variables de salida: emisiones de CO₂, Calentamiento Global y otras emisiones tóxicas como mercurio y arsénico emitidas a la atmósfera.

2º. Etapa de procesamiento y análisis de la información

Condiciones de análisis:

- Tiempo de uso para las luminarias: 30,000 hrs.
- Remplazos de luminarias: 1 luminaria LED; 3.2 luminarias fluorescentes y 32 luminarias incandescentes.
- Luminancia emitida por las luminarias: 1,200 luxes (incandescente y fluorescente); 1,700 luxes para la de LED. Debido a que hay una diferencia de 500 luxes entre la de LED y las otras dos tipos de luminarias, se realizó un ajuste porcentual en la materia prima (tabla 2) de la luminaria LED para evitar la diferencia de luxes en el análisis posterior. Se decidió mantener la luminaria LED de 1,700 luxes para el análisis porque es del mismo fabricante que las otras dos.

Método de análisis: Modelado del ciclo de vida para cada escenario (luminaria) a través del *Software* de ECV GaBi® basado en la norma ISO 14040 (figura 1); y evaluación del calentamiento global a través del método 100a (Hartmann, 1996) para convertir diversos gases de efecto invernadero como el CO₂ a unidades de medida CO₂e (di-oxido de carbono equivalentes). La estimación está basada en el impacto global que un gas de efecto invernadero causaría al calentamiento global a lo largo de 100 años sobre una escala normalizada a partir del impacto de un átomo de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Estas unidades son llamadas equivalentes de CO₂e.

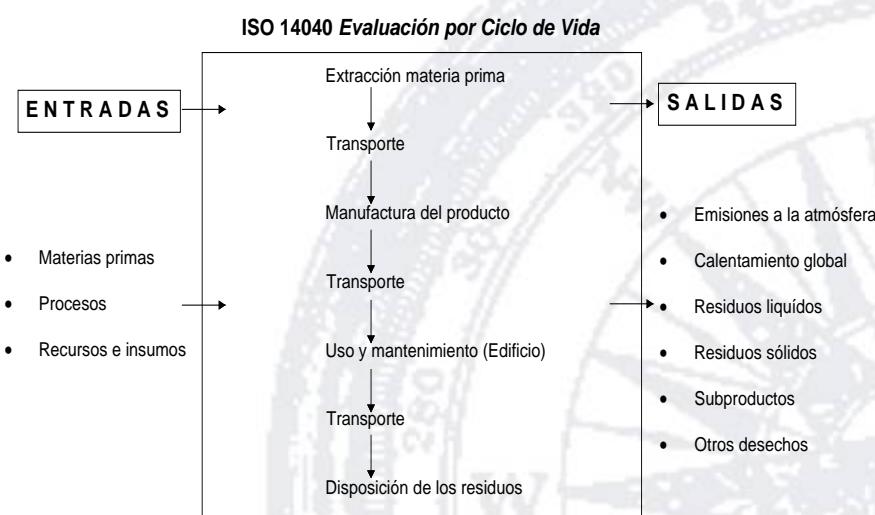


Figura 1. Metodología de Evaluación por Ciclo de Vida según ISO 14040 (Fuente: elaboración propia del autor según ISO 14040).

Zona geográfica de origen y zona geográfica de aplicación: El modelado requiere una distancia entre el fabricante del producto y el usuario final, de acuerdo a las especificaciones del producto el origen está en la ciudad de Shanghai, China y el usuario en la ciudad de Toluca, México.

Limitaciones y alcances del análisis: determinados por las variables de entrada y de salida y a través de las fases de extracción-transporte-manufactura-transporte a la obra y a la disposición final (desecho) referidos en el ciclo de vida completo de los materiales de construcción (figura 2).

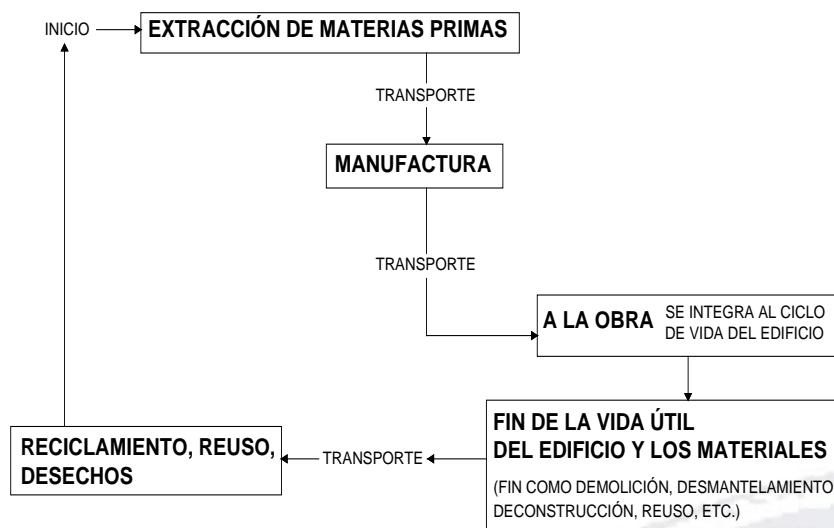


Figura 2. Ciclo de vida de los materiales y productos de construcción (fuente: elaboración propia del autor con base en ISO 14040).

Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la ejecución del análisis comparativo a través de la metodología señalada anteriormente.

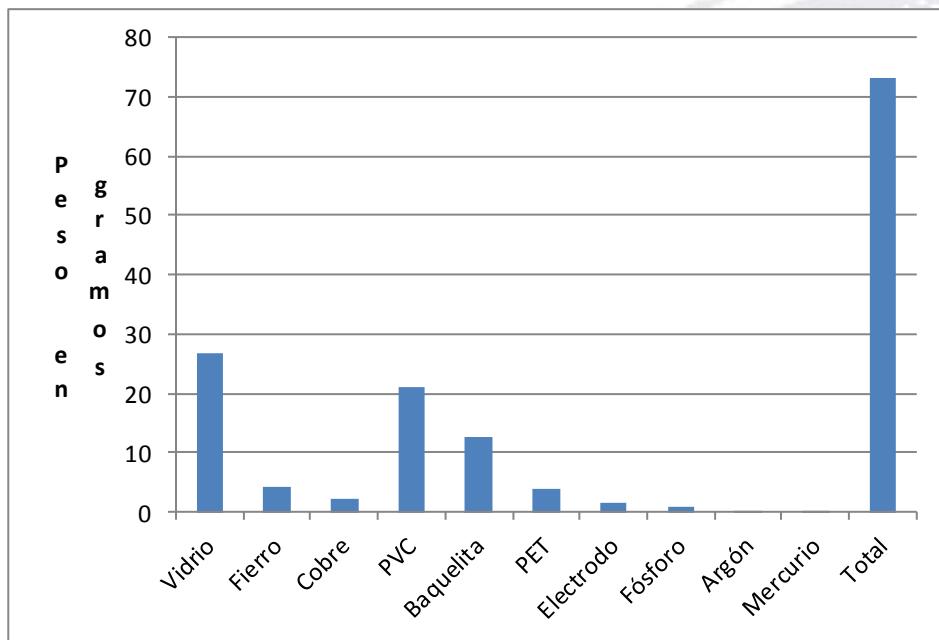
Información de las luminarias objeto de estudio

Primeramente se organizó la información del objeto de estudio (luminarias tanto fluorescente, de LED como incandescente). La tabla 1 muestra la cantidad de los materiales componentes de la luminaria fluorescente compacta de 18 watts que pesa un total de 73.0715 grs. Cabe hacer notar que el peso en gramos del mercurio está aparte del peso del electrodo.

Tabla 1. Materiales que componen a una luminaria fluorescente compacta de 73.0715 gramos.

Luminaria fluorescente	
Materiales	Peso (Gramos)
Vidrio	26.8
Fierro	4.2
Cobre	2.25
PVC	21.2
Baquelita	12.5
PET	3.8
Electrodo	1.4
Fósforo	0.9
Argón	0.019
Mercurio	0.0025
Total	73.0715

(Fuente: elaboración propia del autor con base en los datos tomados en laboratorio).

**Gráfico 1.** Materiales que componen a la luminaria fluorescente del caso de estudio

Observe en el gráfico 1 que el vidrio y el PVC usado en la fabricación de la luminaria fluorescente son los de mayor peso. Así mismo en el gráfico 2 se puede observar que el vidrio es el de mayor peso en la luminaria incandescente.

La tabla 2 muestra los materiales que componen a la luminaria de LED

Tabla 2. Materiales que componen a la luminaria de LED

Luminaria LED	
Materiales	Peso (Gramos)
Fósforo	0.8470
Plástico	8.1180
Aluminio	47.39
Cobre	3.74
Níquel	0.0024
Latón	1.18
Hierro fundido	2.96
Cromo	0.00016
Inductor	0.00019
IC Chip	0.00007
Capacitor SMD	0.00043
Capacitor E.	0.00037
Diodo	0.00037
Placa circuito	10.65
Resistor SMD	0.00012
Resistor	0.00016
Transistor	0.00037

Resina	3.17
Soldadura	0.21
Empaqueado	26.11
Total	104.3779

(Fuente: elaboración propia del autor con base en los datos tomados en laboratorio).

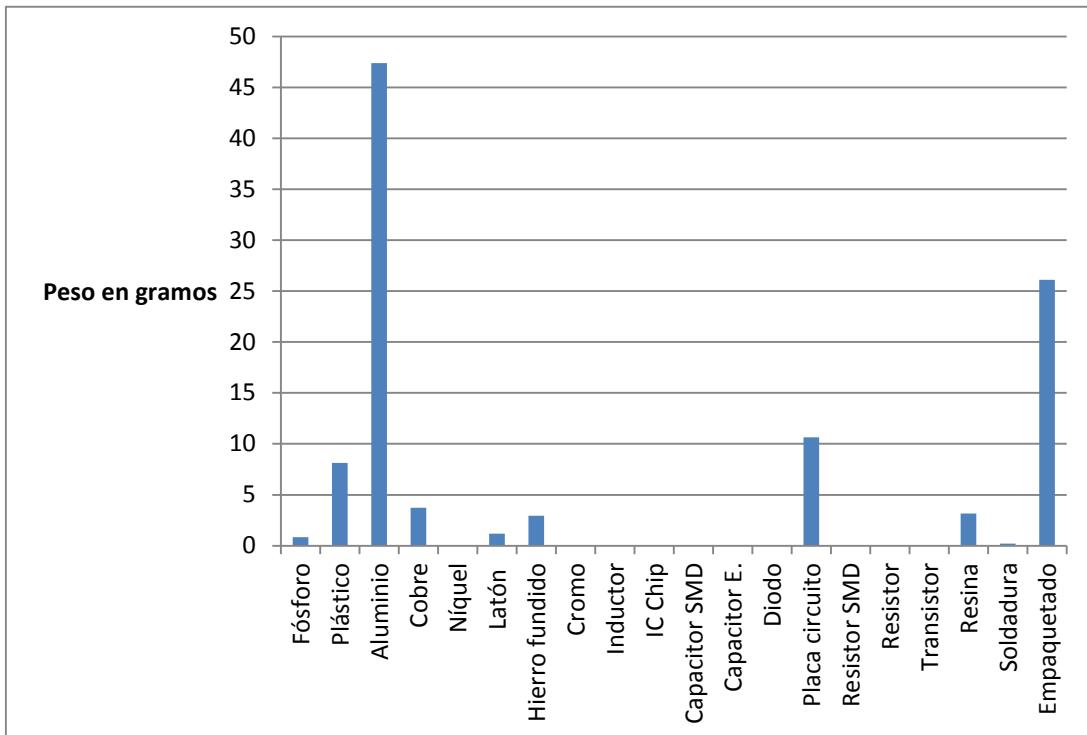


Gráfico 2. Materiales que componen a la luminaria de LED

Y la luminaria incandescente de la misma marca y fabricante pero de 100 watts que pesa un total de 43.392 gramos con los datos mostrados en la tabla 3.

Análisis comparativo por ciclo de vida de tres tipos de luminarias empleadas en los interiores de edificios

Tabla 3. Materiales que componen a una luminaria incandescente de 43.392 gramos.

Luminaria incandescente	
Materiales	Peso (Gramos)
Fierro	1.8
Cobre	1.2
Tungsteno	0.022
Plástico	2.17
Vidrio	35.6
Silica	2.6
Total	43.392

(Fuente: elaboración propia del autor con base en los datos tomados en laboratorio).

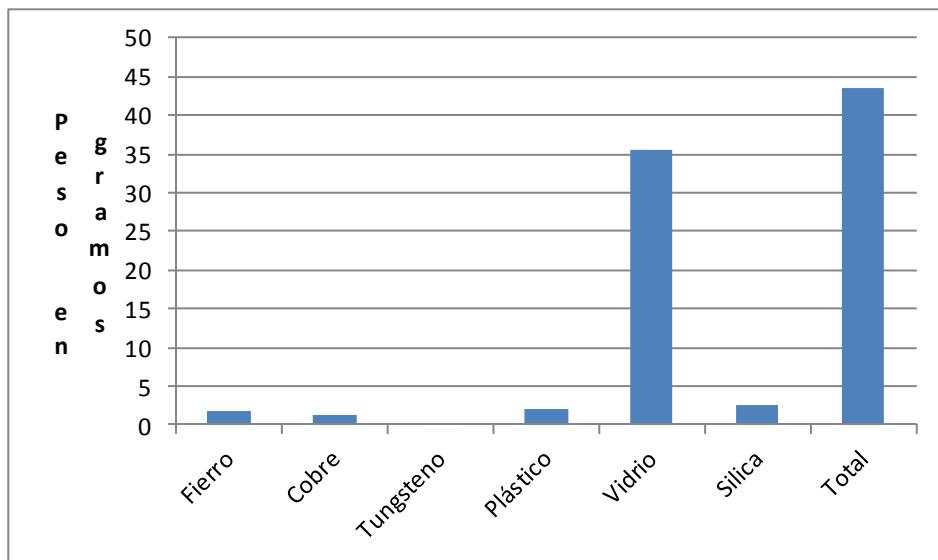


Gráfico 3. Materiales que componen a la luminaria incandescente del caso de estudio

El presente análisis se realizó con base a la metodología de ciclo de vida, como ya se había apuntado arriba, y se tomaron las fases de manufactura del producto (que incluye extracción de materias primas, transporte, los insumos consumidos en la manufactura y la energía consumida en su fabricación), la fase de uso y mantenimiento (que incluye su incorporación al ciclo de vida

del edificio y es donde se presenta la vida útil del producto; por lo que en esta fase se contabiliza toda la energía consumida para hacer funcionar a la luminaria en un tiempo fijado para el experimento en 30,000 horas) y finalmente la fase de desecho o disposición final del producto (que también incluye transporte y procesos para eliminación de materiales peligrosos como el mercurio y arsénico principalmente).

La tabla 4 muestra los resultados finales de salida del análisis o evaluación por ciclo de vida para cada fase según la metodología de ISO 14040 de la figura 1 del presente estudio.

Tabla 4. Resultados del análisis por ciclo de vida realizado con el *Software GaBi®*, por concepto y por fase para cada una de las luminarias con base en datos de las tablas 1, 2 y 3.

Resultados del análisis por ciclo de vida por concepto y por fase				
Concepto	Luminaria LED	Luminaria compacta fluorescente	Luminaria incandescente	Unidad
Durante la fase de producción (extracción de materias primas, transporte a la fábrica y manufactura del producto):				
Diesel	310.02	1296.01	9766.08	kWh
Electricidad	0.4824	2.352	6.72	kWh
Durante la fase de uso y mantenimiento (incluye operabilidad de la luminaria por 30,000 horas y el transporte al acopio de desechos):				
Electricidad	37.5	54	300	kWh
Diesel	0.00234	0.0115	1.34	kWh
Embalaje	45.72	248.64	3734.4	Gramos
Durante la fase de fin de la vida útil (incluye procesos de separación, reciclamiento y disposición final de los residuos):				
Diesel	0.0087	0.0364	1.728	kWh

Desperdicios plásticos	20.79	160.03	0.1152	Gramos
Varios desperdicios	188.76	406.08	2884.8	Gramos
Mercurio (al aire)	0.00234	0.0153	0	Gramos
Arsénico (al agua)	0.084	2.68	0.96	Gramos

(Fuente: elaboración propia del autor con base en los resultados del experimento).

De igual forma se presentan las comparativas para cada fase del ciclo de vida empezando por la de producción que abarca desde la extracción de las materias primas, su transporte a la fábrica y la manufactura del producto; observe que el impacto al ambiente en la fase de producción es moderadamente mayor en la luminaria de LED que en la fluorescente (gráfico 4).

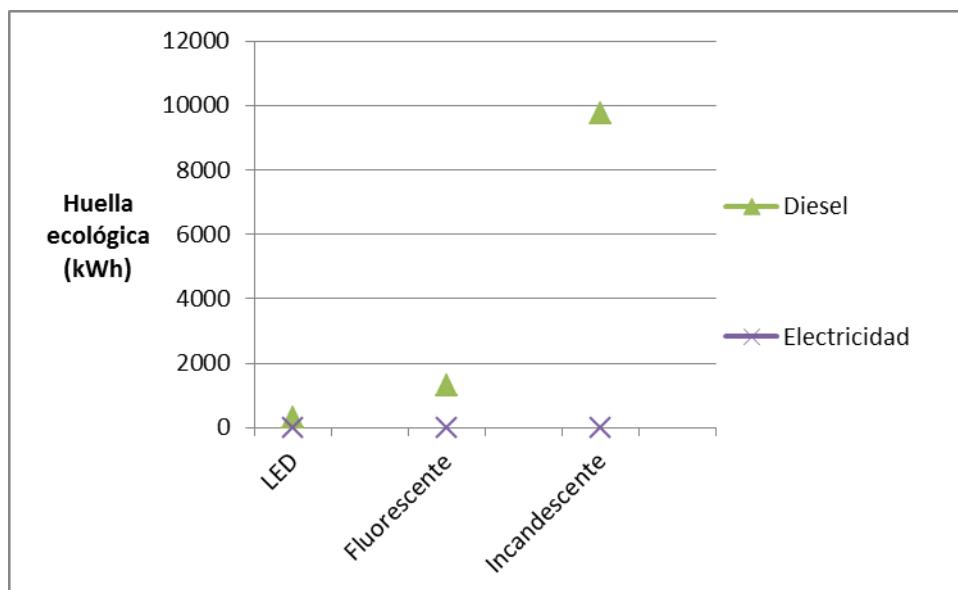


Gráfico 4. Comparativa del análisis por ciclo de vida para la fase de producción de cada una de las luminarias (fuente: elaboración propia del autor con base en los resultados del experimento).

Durante la fase de uso y mantenimiento el gráfico 5 muestra que el impacto ambiental de la luminaria incandescente es intensamente mayor que la fluorescente y que la de LED, debido principalmente a la etapa de uso y probada para 30,000 horas como se había señalado con anterioridad en la sección de la metodología.

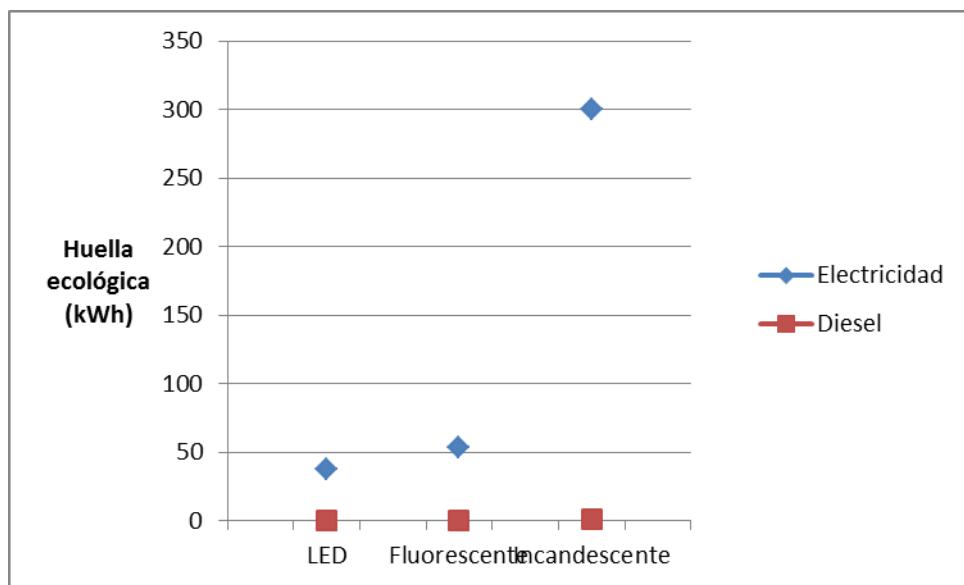


Gráfico 5. Comparativa del análisis por ciclo de vida para la fase de uso y mantenimiento de cada una de las luminarias en el rubro de energía y según tabla 4 (fuente: elaboración propia del autor con base en los resultados del experimento).

El gráfico 6 se refiere a la comparativa por ciclo de vida para la fase de uso y mantenimiento de cada una de las luminarias en el rubro de embalaje medida en gramos.

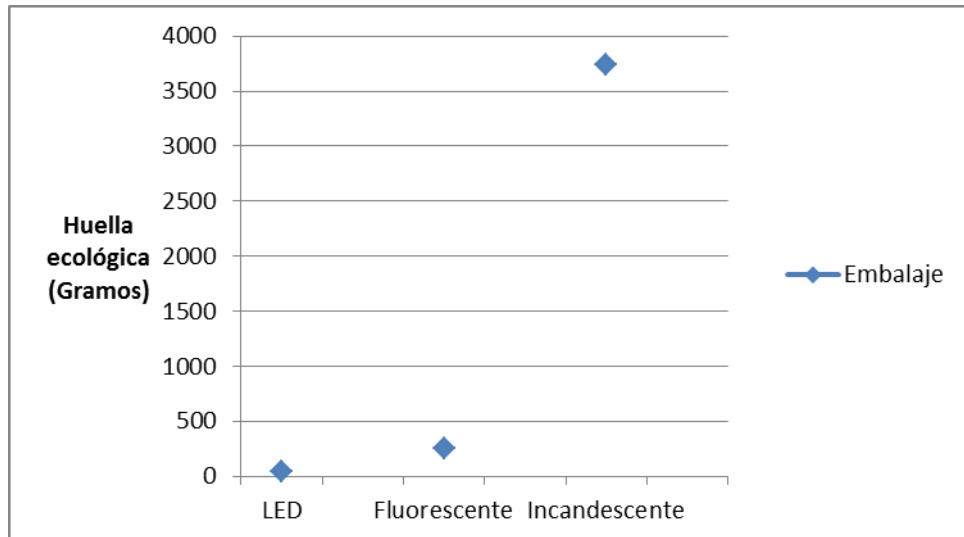


Gráfico 6. Comparativa del análisis por ciclo de vida para la fase de uso y mantenimiento de cada una de las luminarias en el rubro de embalaje y según tabla 4. (Fuente: elaboración propia del autor con base en los resultados del experimento).

En el gráfico 7 se muestra la comparativa realizada por ciclo de vida en la fase de fin de la vida útil y disposición final de los desechos que incluye: procesos de separación, reciclamiento y

disposición final de los residuos, observándose que el impacto ambiental de la luminaria incandescente es mucho mayor en el rubro de los desperdicios varios para esta etapa en comparación con las otras dos luminarias (considerando las 30,000 horas que se tienen que cubrir) pero en el resto de los rubros el impacto es menor para la incandescente.

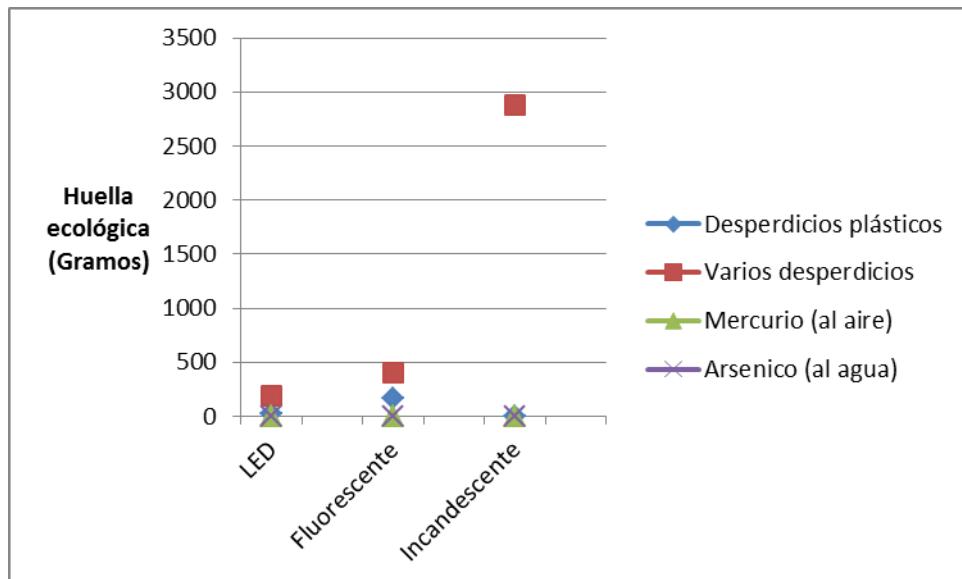


Gráfico 7. Comparativa del análisis por ciclo de vida para la fase de fin de la vida útil y disposición final de los desechos medidos en gramos de cada una de las luminarias (fuente: elaboración propia del autor con base en los resultados del experimento).

El gráfico 8 muestra una comparativa del análisis por ciclo de vida para la fase de fin de la vida útil y disposición final de los desechos medidos en kWh (rubro del Diesel) para cada una de las luminarias.

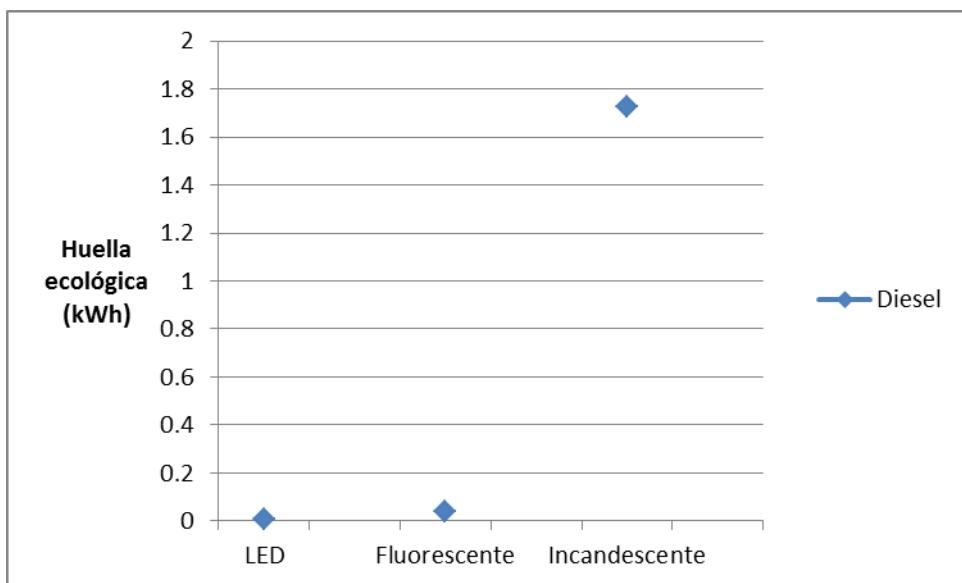


Gráfico 8. Comparativa del análisis por ciclo de vida para la fase de fin de la vida útil y disposición final de los desechos medidos en kWh (rubro del Diesel). (Fuente: elaboración propia del autor con base en los resultados del experimento).

En los gráficos 4, 5, 6, 7 y 8 podemos notar que para las fases de producción el impacto ambiental de la luminaria incandescente es mucho mayor; y en las fases de uso y mantenimiento (que es la que mayores impactos ambientales se presentan) y de disposición final de los desechos la luminaria incandescente presenta también los mayores impactos al ambiente. Cabe señalar que sumando todos los impactos ambientales por concepto se llega a la conclusión que, efectivamente, la luminaria incandescente presenta los mayores impactos ambientales (por favor observe la tabla 4), debido a que se presenta un gran consumo en la fase de uso y operación y se requieren 32 remplazos para llegar a 30,000 horas. En lo referente al consumo eléctrico (lo cual pertenece a la fase del uso, operación y mantenimiento) se tiene que la incandescente en las 30,000 horas de funcionamiento de la prueba consume un total de 300 kWh y la luminaria fluorescente consume 54 kWh; por tanto, la luminaria incandescente consume 5.55 veces más que la luminaria fluorescente (solamente para el concepto de uso y operación). Por su parte la luminaria tipo LED consume solo 37 kWh, es decir, 8.10 veces menos que la incandescente y 1.45 veces menos energía que la fluorescente de tipo compacta.

A continuación en el gráfico 9 se presentan los resultados para el potencial de calentamiento global generados a través del Software GaBi®, para cada una de dichas luminarias, según la evaluación a través del *método Global Warming Potencial (-GWP-) 100^a*, para convertir diversos

gases de efecto invernadero como el CO₂ a unidades de medida CO₂e (di-óxido de carbono equivalente). La estimación está basada en el impacto global que un gas de efecto invernadero causaría al calentamiento global a lo largo de 100 años sobre una escala normalizada a partir del impacto de un átomo de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera y durante todo el ciclo de vida de las luminarias (fabricación, uso y disposición final). Estas unidades son llamadas equivalentes de CO₂e.

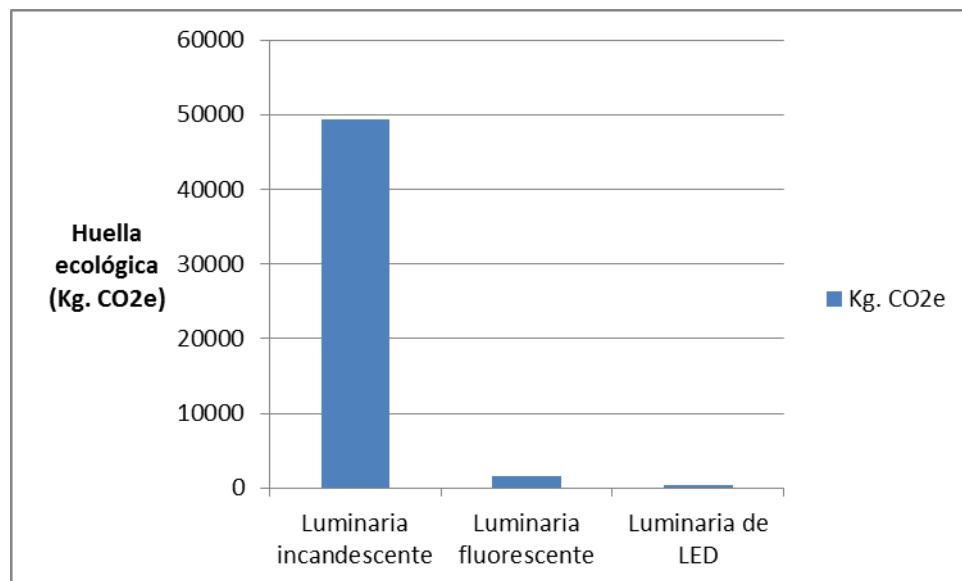


Gráfico 9. CO₂e contribuyente al calentamiento global por cada luminaria (fuente: elaboración propia del autor con base a los resultados del experimento).

El gráfico 9 muestra que la producción, uso y disposición final de la luminaria incandescente, incluyendo sus remplazos (49,334.4 CO₂e) contribuye al calentamiento global 29.87 veces más que la fluorescente (1,651.2 Kg. CO₂e) también con sus remplazos y 146.82 veces más que la de LED (336 Kg. CO₂e). Por lo tanto es muy conveniente seguir las disposiciones recientes de la Secretaría de Energía en México en materia de la reducción paulatina de luminarias incandescentes en los hogares e industria, lo cual sin duda traerá grandes beneficios en la disminución del consumo energético sin sacrificar valores de confort lumínico, que por ejemplo, para uso en el hogar estriban entre 600 y 1200 luxes dependiendo del espacio a iluminar y de las actividades que ahí se realicen.

Podemos afirmar finalmente que la luminaria LED es la que menos contamina en todo su ciclo de vida y la que menos impactos ambientales causa, y podemos afirmar que su costo económico se amortiza con el tiempo ya que se estima que las luminarias incandescentes del caso de estudio (con un costo aproximado de 5 pesos m. n) dejarán de usarse cuando se dejen de producir, y para esto pasará alrededor de una década más (Secretaría de energía, 2010). Por otro lado, el futuro de las luminarias fluorescentes es muy prometedor porque se están desarrollando nuevos productos sobre todo referentes a las de tipo compacto (\$ 70 pesos m. n. de la luminaria fluorescente compacta del caso de estudio); por otro lado, las de tipo LED por ahora se creía que no eran comerciales pero de acuerdo con el presente estudio se considera la mejor opción debido a que para llegar a las 30, 000 horas de funcionamiento los otros dos tipos de luminarias requieren remplazos en las incandescentes de 32 luminarias y en las fluorescentes de 3.2 luminarias, por tanto, el costo de la de LED (\$ 190 pesos m. n de la luminaria *LED* del caso de estudio), justifica su elección.

Conclusiones

De manera puntual, serían las siguientes:

- El impacto al ambiente en la fase de producción es intensamente mayor en la incandescente que en las otras dos debido a los remplazos (32 remplazos necesarios).
- El impacto ambiental de la luminaria incandescente es intensamente mayor que la fluorescente y de LED, debido principalmente a la etapa de uso y probada para 30,000 horas.
- En la fase de fin de la vida útil y disposición final de los desechos que incluye: procesos de separación, reciclamiento y disposición final de los residuos, se observó que el impacto ambiental de las luminarias incandescentes es mucho mayor también por los remplazos necesarios.
- Sumando todos los impactos ambientales por concepto se llega a la conclusión que, efectivamente, la luminaria incandescente presenta los mayores impactos ambientales, debido a que se presenta un gran consumo en la fase de uso y operación.
- En lo referente al consumo eléctrico (lo cual pertenece a la fase del uso, operación y mantenimiento) se tiene que la luminaria incandescente en las 30,000 horas de funcionamiento de la prueba consume un total de 300 kWh, la luminaria de LED consume

37.5 kWh y la luminaria fluorescente consume 54 kWh; por tanto, la luminaria incandescente consume 5.55 veces más que la luminaria fluorescente (solamente para la fase de uso y operación) y 8.10 veces más que la de LED.

- La producción, uso y disposición final de la luminaria incandescente (49,334.4 CO₂e) en el ejemplo del presente estudio, contribuye al calentamiento global 29.87 veces más que la fluo-rescente (1,651.2 Kg. CO₂e) y 146.82 veces más que la de LED (336 Kg. CO₂e).
- Se concluye que la luminaria LED es la mejor opción tomando en consideración todo el ciclo de vida completo del producto incluyendo el costo.

Agradecimientos

Se agradece al CONACYT por el apoyo brindado en la elaboración del presente artículo como parte de varios productos académicos emanados del proyecto de investigación financiado.

Referencias

- Congreso Americano (2007). Energy Independence and Security Act of 2007. Congreso de Estados Unidos de Norteamérica.<http://thomas.loc.gov/cgi-bin/bdquery/z?d110:HR00006:@@@D&summ2=m&>. (Consultado el 27 de agosto de 2014).
- Hartmann D. L. (1996). *Global Physical Climatology*: Academic Press, Nueva York, Estados Unidos de Norteamérica.http://www.craig.org/pdf/LCA_light_bulbs_final_summary.pdf. (Consultado el 14 de Agosto de 2014).
- International Association of Energy-Efficient Lighting. (1995). *Power Quality and Lighting*. www.iaeel.org/iaeel/news1/1995/trefyra1995/LiTec_a_3_4_95.html. (Consultado el 10 de Agosto de 2014).
- ISO (1997). *ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment– Principles and Framework*: ISO, Suiza.
- Michaud, R., Beley, C., Clement, E., Margni, M. y Samson, R. (2014). *Comparative life cycle assessment of light bulbs: Incandescents and Compact Fluorescents*. www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=cfls.pr_cfls. (Consultado el 10 de Agosto de 2014).
- Parsons, D. (2006). The Environmental Impact of Compact Fluorescent Lamps and Incandescent Lamps for Australian Conditions, en *The Environmental Engineer* 3 (4), pp. 124-137.

Principi Paolo y Fioretti Roberto. (2014). A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office – compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) – a case study, *Journal of Cleaner Production*, 83 (15), pp. 96-107.

Ryckaert W.R., Smet K.A.G., Roelandts I.A.A., Van Gils M. y Hanselaer P. (2012). Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation, *Energy and Buildings*, 49 (2012), pp. 429-436.

Secretaría de energía. (2010). *NOM-028-ENER-2010: Eficiencia energética de lámparas para uso general. Límites y métodos de prueba*: Secretaría de Energía, México.

Soneji, H. (2008). *Life Cycle Energy Comparison Of Compact Fluorescent and Incandescent Light Bulbs. Sustainability Science Paper*, 12. <http://www.djluv.com/career/research/Soneji-CFL-LCAStPaper.pdf>. (Consultado el 1 de Agosto de 2014).

Tosenstock, S. (2007). Another perspective en *Electric Perspectives*, 32 (59), pp. 100-105.

Welz Tobias, Hischier Roland, Hilty Lorenz M. (2011). Environmental impacts of lighting technologies — Life cycle assessment and sensitivity analysis, *Environmental Impact Assessment Review*, 31 (3), pp. 334-343.