

ESTUDIO DEL CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN BOGOTÁ, USANDO DINÁMICA DE SISTEMAS

Luz A. Rodríguez B., MSc⁽¹⁾, Sonia A. Jaimes S., MSc⁽²⁾, Enrique Estupiñán E., MSc⁽³⁾. y Diego G. Toro S., Ing⁽⁴⁾

⁽¹⁾AK.45 No.205-59 (Autopista Norte) Bogotá - Colombia
Call center: +57(1) 668 3622
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
angelica.rodriguez@escuelaing.edu.co

⁽²⁾AK.45 No.205-59 (Autopista Norte) Bogotá - Colombia
Call center: +57(1) 668 3622
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
sonia.jaimes@escuelaing.edu.co

⁽³⁾AK.45 No.205-59 (Autopista Norte) Bogotá - Colombia
Call center: +57(1) 668 3622
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
enrique.estupinan@escuelaing.edu.co

⁽⁴⁾AK.45 No.205-59 (Autopista Norte) Bogotá - Colombia
Call center: +57(1) 668 3622
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
diego.toro@mail.escuelaing.edu.co

Palabras claves: Política de producto integrada (PPI), Dinámica de Sistemas, Ciclo de Vida. Eficiencia Energética, Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE).

Abstract:

La vida útil de las luminarias, como la de cualquier Aparato Eléctrico y Electrónico (AEE) está determinada por diferentes factores que interactúan entre ellos, como son la forma en la que se usa, la cantidad de horas de uso, el tipo de tecnología que utilizan, los materiales que son usados para su fabricación, entre otros. No obstante, el ciclo de vida de los productos y específicamente de los AEE no se limita a la fase de uso. Otras fases son importantes como la de fin de vida, extracción de materiales y producción, más aun cuando en estas fases se generan bastantes impactos ambientales.

Dado que la interacción de todas las etapas del ciclo de vida genera múltiples interrelaciones, éste artículo modela, a través de dinámica de sistemas el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá, y posteriormente evalúa los comportamientos del sistema, al considerar diferentes Políticas de Producto Integradas (PPI), las cuales contribuyen a minimizar los impactos ambientales y a hacer un mejor uso de los recursos energéticos. Se asume que el ciclo de vida de las luminarias empieza en su producción, donde se requieren materias primas que pueden tener dos procedencias, material virgen y material reincorporado al proceso productivo proveniente del reciclado de luminarias. Posteriormente, la fase de uso inicia con la decisión de los usuarios en el proceso de compra o selección del tipo de luminarias, donde se identifican los factores que influyen en estas decisiones, para lo que se integraron factores socioeconómicos y culturales del estrato socioeconómico

correspondiente, reflejando la población bogotana. En la fase de fin de vida, se estudiaron el proceso de reposición de las luminarias dañadas realizado por el consumidor, y los canales de reciclado formal e informal, identificando el material que termina en el relleno sanitario y el que es reincorporado a la cadena productiva de las luminarias como materia prima.

Las políticas que se evaluaron fueron eliminación de material peligroso, reincorporación de materia prima reciclada al proceso productivo, cambio de precio de energía y cambios de nivel de eficiencia en las luminarias.

1. INTRODUCCION

Las Políticas de Producto Integradas PPI, para el caso de los AEE, impactan en la etapa de uso, por el consumo de energía que requieren para su funcionamiento y en la etapa de disposición debido a los componentes peligrosos por su impacto al medio ambiente y la salud. Es por esto que desde la etapa de fabricación es importante reducir el uso de sustancias tóxicas [2]. Por otro lado, se debe tener en cuenta que, en los hogares, los electrodomésticos, los alimentos y los viajes son responsables, en conjunto, del 70% al 80% del impacto medioambiental, desde la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero, hasta el uso del suelo y los residuos [3]. Por eso el estudiar el comportamiento del usuario en la compra, uso y disposición, así como su reacción frente a las PPI de electrodomésticos determina muchas de las alternativas que permitirían prevenir el impacto que estos puedan generar en el medio ambiente.

En estudios previos de los autores se han establecido interrelaciones entre las diferentes variables que intervienen en el ciclo de vida de los electrodomésticos. Para el caso de estudio donde se analizaron los televisores se evidenció cómo la incorporación de materiales recuperados al ciclo productivo de nuevos televisores es tan baja que no ejerce ninguna influencia en el sistema, sin embargo la incorporación de políticas de incentivo al reciclaje hace que estos sean entregados a canales formales [16]. En otro estudio analizó el ciclo de vida de las neveras, debido a su alto impacto en uso y disposición los instrumentos de información específicamente las etiquetas son las que contribuyen al menor consumo de energía y los impuestos para el reciclaje son los que garantizan mayor cantidad de RAEE en el canal formal y por lo tanto mayor recuperación de materiales. Los estudios realizados, han sido modelados usando dinámica de sistemas, ya que esta herramienta permite incorporar las interrelaciones de las variables y modelar a través del tiempo los posibles cambios en el sistema, considerándola como la herramienta adecuada para el entendimiento de las relaciones, causa efecto, permitiendo hacer el análisis de los subsistemas y la retroalimentación entre ellos, generando resultados completos del sistema.

Estudios de otros autores realizados específicamente sobre el ciclo de vida de las luminarias, revelan aspectos esenciales que han sido motivo de preocupación: 1) el uso excesivo e ineficiente de los recursos naturales; 2) la generación de grandes cantidades de residuos y 3) los residuos nocivos, que tienen un efecto perjudicial para el medio ambiente y la salud [8].

Este artículo presenta el modelo propuesto para el ciclo de vida de las luminarias, en donde se describen y analizan cuatro instrumentos de políticas en cada uno de los subsistemas. Dichos instrumentos de política son económicos, administrativos e informativos que permiten reconocer el escenario de menor impacto ambiental.

Cabe destacar que según estudios realizados por otros autores se evidencia que el comportamiento del consumidor es intuitivo, ya que al presentarse un incremento en el costo de la energía, los

usuarios deciden no invertir en luminarias más eficientes, sino que optan por consumir menos, apagando o eliminando luminarias que se consideran no indispensables [14].

2. ESTADO DEL ARTE

Se busca disminuir el impacto ambiental a través del uso de instrumentos de política administrativos, informativos y económicos en las diferentes etapas de ciclo de vida. Realizando revisión de literatura de los mismos se encontró que los instrumentos administrativos más usados son: 1) la restricción de uso de sustancias contaminantes, 2) estándares mínimos para reciclaje o tasas de reciclado. En cuanto a los instrumentos informativos uno de los que más se usa es el 3) etiquetado tanto de eficiencia energética, como sello ecológico. Los instrumentos económicos más frecuentes son 4) los impuestos “*up stream*” y “*down stream*”. [1], [4], [11], [13]. A nivel de eficiencia energética se usan además instrumentos económicos como precio de venta de la energía de acuerdo a consumo e instrumentos informativos como medidores de consumo de retroalimentación inmediata al usuario [10].

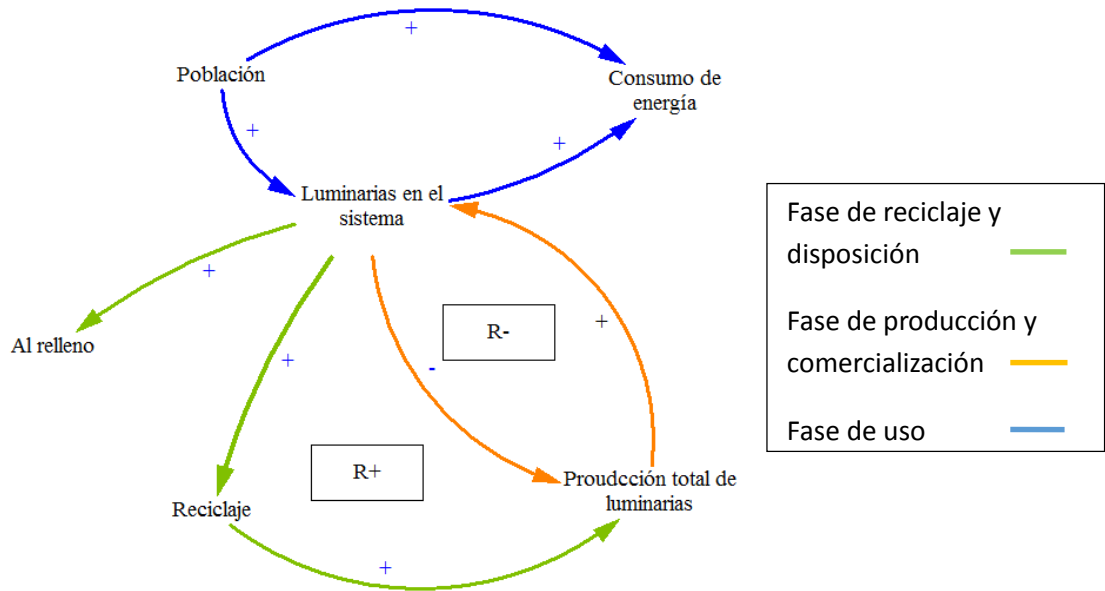
Para modelar se revisaron diferentes estudios en el campo de la eficiencia energética y de los RAEE, como los de Georgiadis et al., quienes analizan las estrategias de sostenibilidad ambiental (legislación e imagen verde), las características de funcionamiento de la cadena de suministro y el impacto en la sostenibilidad del medio ambiente [6]. También se ha investigado el ciclo de vida de los AEE bajo escenarios de preferencias e igualdad en la demanda [7]. La disposición de los AEE al tener gran impacto ambiental ha generado investigaciones en las cuales se modela el comportamiento socioeconómico de una población enfocado en el uso y la disposición [5], [12], [15], [16].

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El objetivo del estudio es modelar el ciclo de vida de las luminarias, a través del comportamiento e interrelación de las fases de producción y comercialización, uso, reciclaje y disposición de las luminarias en un periodo de 50 años, en la ciudad de Bogotá. Para lo anterior se integraron todos los estratos socioeconómicos de la ciudad en un grupo; así mismo se incluyeron en el modelo las siguientes tecnologías de luminarias: Incandescente, Fluorescente Compacta, Fluorescente Tubular, Halógena y Led, corresponden a los hallazgos de las encuestas realizadas en la población bogotana.

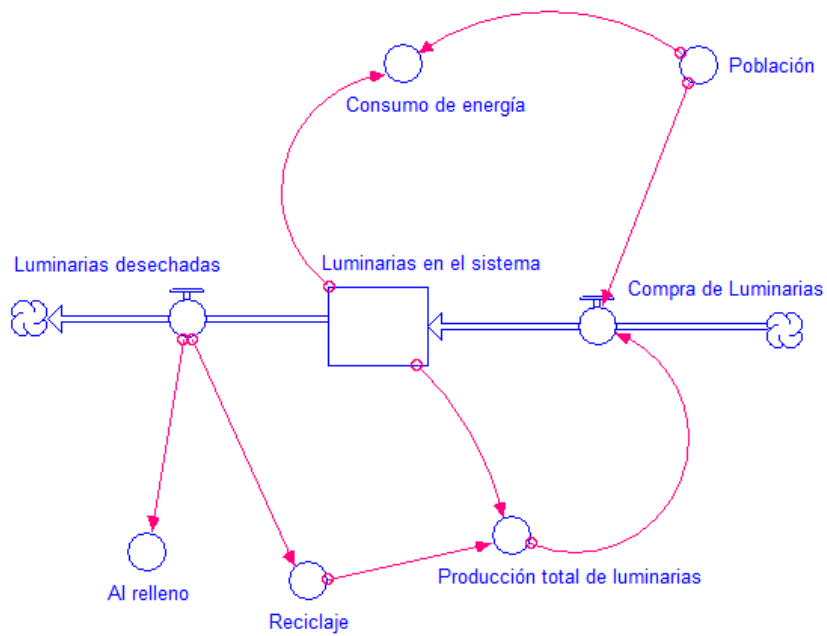
Los diagramas, causal y Forrester que representan las fases anteriormente descritas, así como sus interrelaciones se presentan a continuación. (Gráfica 1 y 2).

- Diagrama causal general



Gráfica 1. Diagrama Causal General.

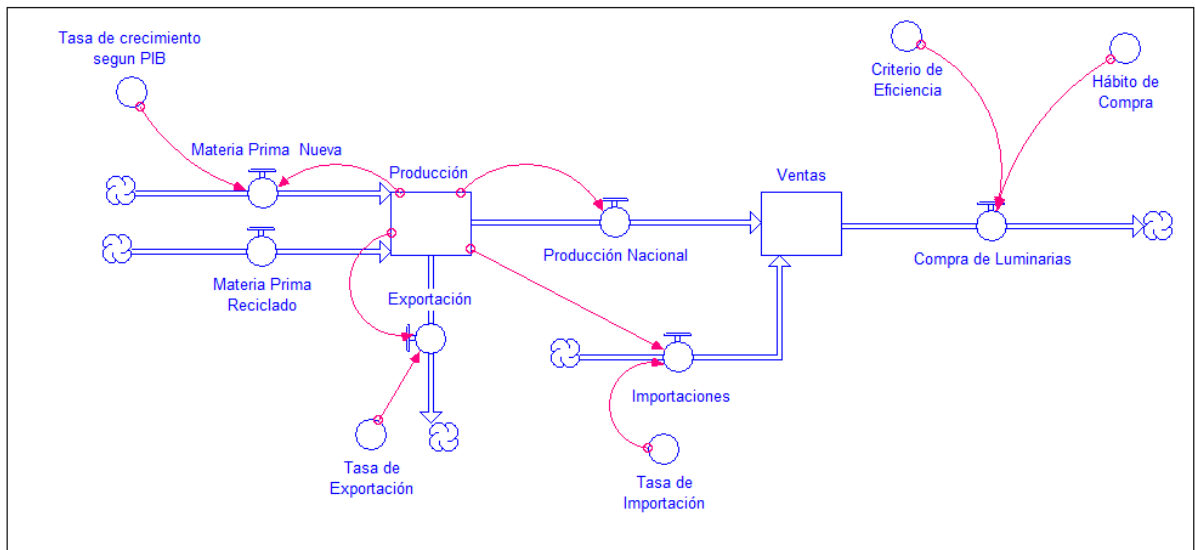
- Diagrama de Forrester general



Gráfica 2. Diagrama Forrester

FASE DE PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN

En la fase de producción y comercialización, se contemplan las luminarias provenientes de la producción nacional, fabricadas a partir de materias primas nuevas y recicladas, así como las luminarias provenientes de la importación. En particular en el proceso de producción de luminarias se hace uso de materiales reciclados resultantes de la recuperación de materiales del proceso de reciclaje en la etapa de fin de vida. Para la comercialización y distribución se incluyen las exportaciones y las ventas nacionales, el precio de venta y las características técnicas de las luminarias (como principales factores que afectan la decisión de compra por parte del usuario). El siguiente diagrama (Gráfica 3) que representa esta fase, así como las relaciones entre las variables.

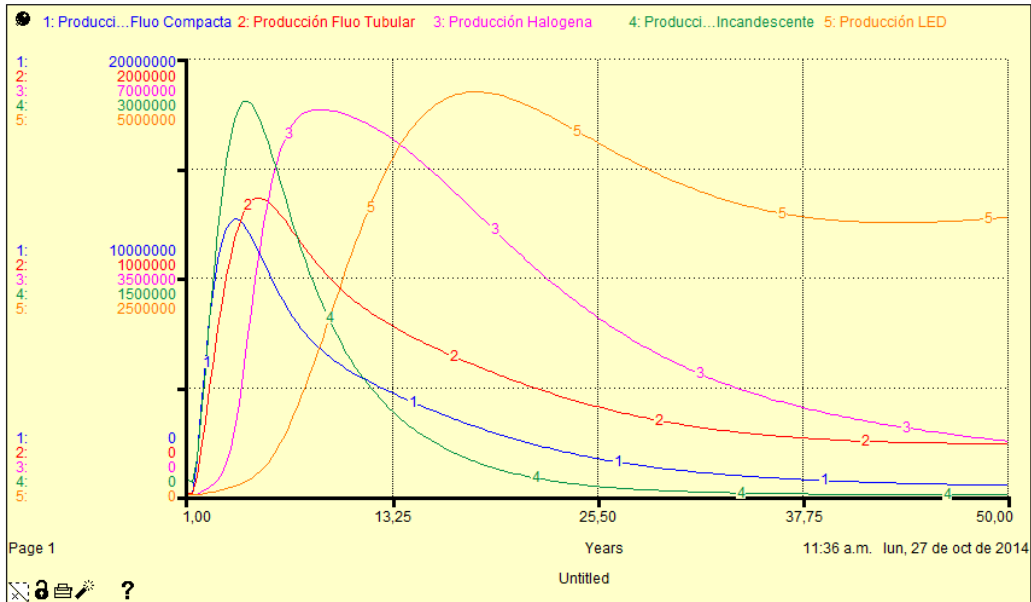


Gráfica 3. Diagrama Forrester fase de Producción y Comercialización.

Las relaciones representadas en el diagrama de Forrester anterior, se pueden expresar con las siguientes ecuaciones.

$$\text{Producción} = \text{Producción con materia prima nueva} + \text{Producción con materia prima reciclada} - \text{Exportaciones}$$

$$\text{Ventas} = \text{Producción Nacional} + \text{Importaciones} - \text{Compra de Luminarias}$$

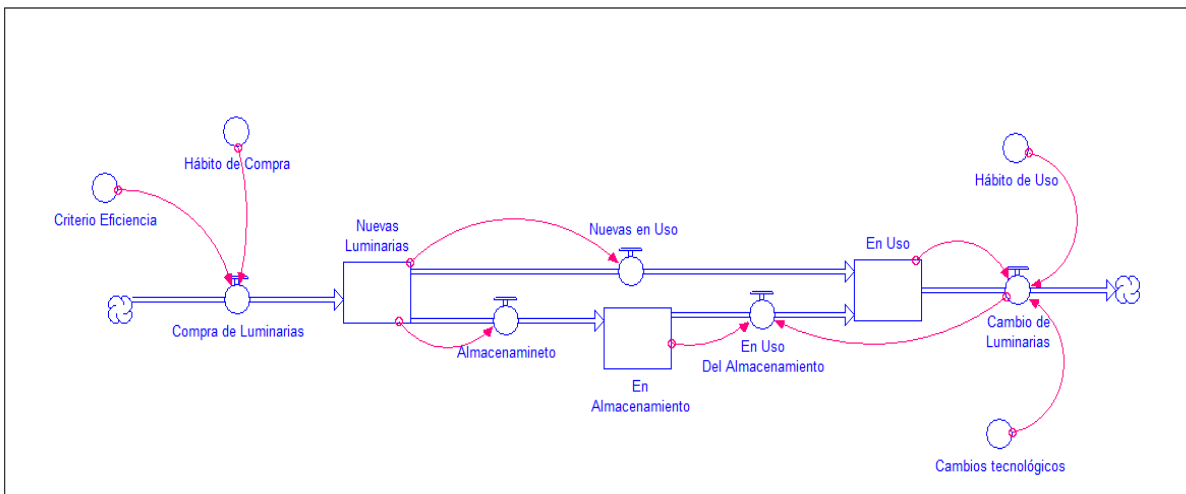


Gráfica 4. Curva de producción por tipo de luminaria.

La gráfica 4 muestra el comportamiento de la producción de luminarias en el sistema para cada uno de los tipos de luminarias almacenadas. En general el comportamiento tiene una tendencia de crecimiento los primeros años, para después descender y entrar, al final del periodo analizado, en un periodo de estabilización. Este comportamiento está relacionado con el incremento de la vida útil de las luminarias que pasa de meses a quinquenios cuando se cambia de tecnología incandescente a LED.

FASE DE USO

En esta fase, se contempla el consumo de energía por cada tipo de luminaria y el comportamiento del consumidor, se evalúa el cómo se ven afectados, por el hábito de uso, los cambios tecnológicos y la necesidad de cambio de luminarias en los hogares. El siguiente diagrama (Gráfica 5) representa esta fase, así como las relaciones entre las variables.

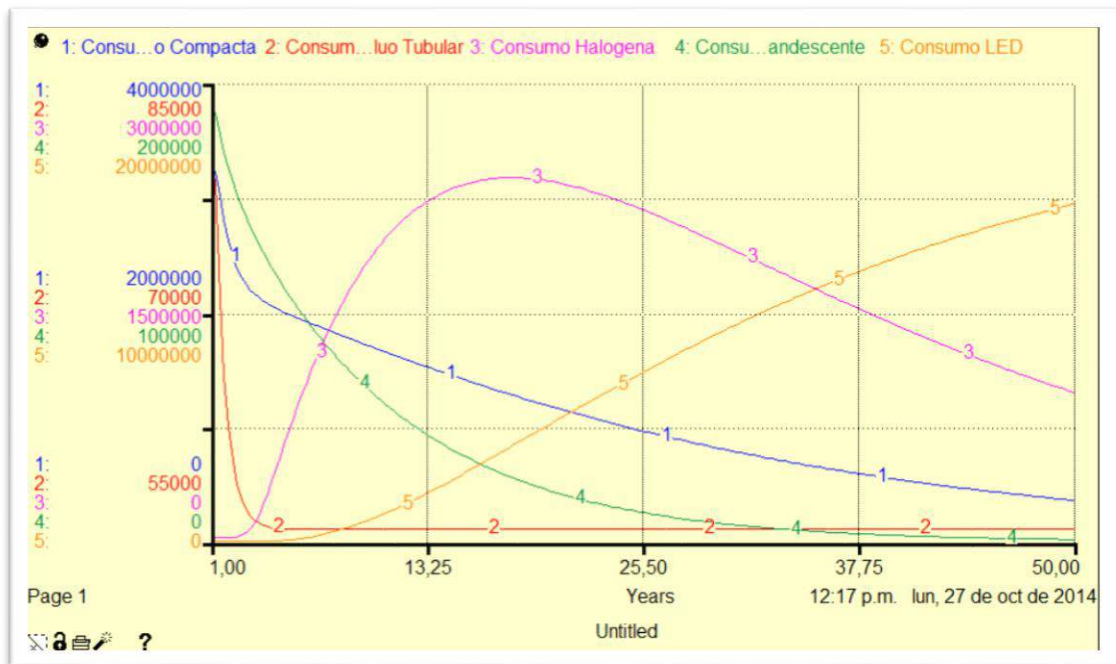


Gráfica 5. Diagrama Forrester Fase de Uso.

Las luminarias en el sistema y la manera de ingresar y salir de él se representan a través de la siguiente ecuación.

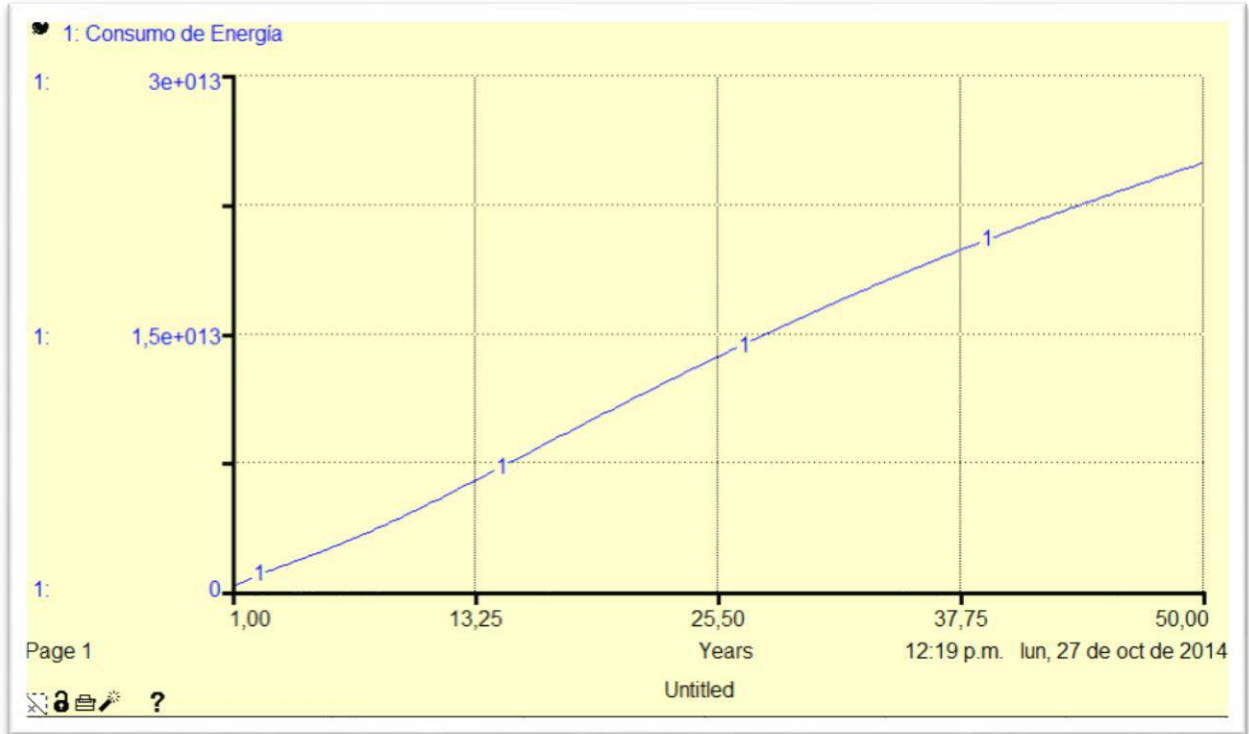
$$\text{Luminarias en el sistema} = \text{En Uso} + \text{En Almacenamiento} - \text{Cambio de Luminarias}$$

La gráfica 6 muestra el comportamiento del número de luminarias, de los diferentes tipos analizados, en el sistema durante los 50 años de análisis. Se puede deducir que, dados los hábitos de compra y uso, así como los cambios tecnológicos, al final del periodo de análisis las luminarias más representativas en el mercado serán las LED, aunque el sistema comenzó mayoritariamente con luminarias fluorescente compactas e incandescentes. En la parte transitoria, se observan cambios decrecientes en las luminarias incandescentes y las compactas fluorescentes, que son reemplazadas por halógena y LED dado que la primera tiene menor impacto ambiental frente a las compactas fluorescentes por su contenido de mercurio, y las segundas dado su eficiencia energética y bajo impacto ambiental y alto costo unitario.



Gráfica 6. Curva de Consumo de Energía por tipo de luminaria.

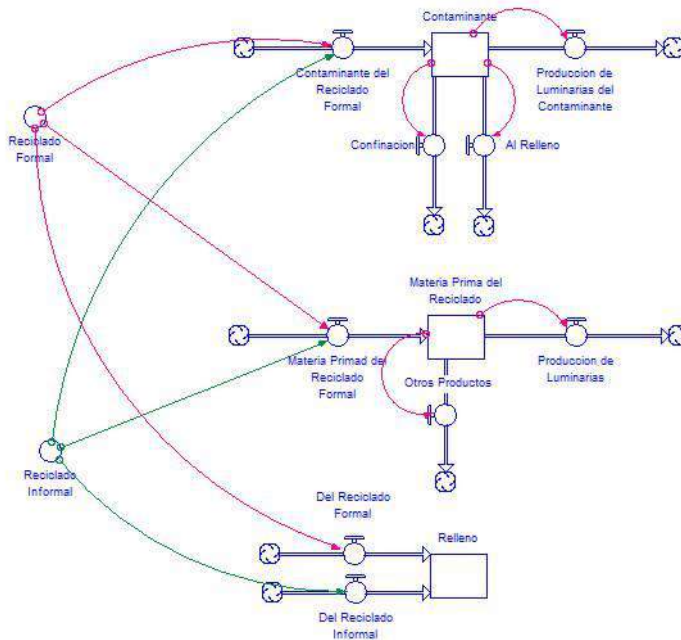
En cuanto al consumo de energía, del sistema, en la gráfica 7 se puede observar que su comportamiento durante los 50 años de análisis siempre es creciente, lo que era de esperarse por el aumento sostenido de la población y su consecuente necesidad de uso de luminarias.



Grafica 7. Consumo Total de Energía durante el periodo de análisis.

FASE DE RECICLADO Y DISPOSICIÓN FINAL

En esta fase se consideran tres productos fundamentales: materias primas recuperadas por el reciclaje y que serán reincorporadas en el proceso, material contaminante recuperado por el reciclaje que deberá ser manejado por expertos y reincorporado en los procesos productivos y material para disposición proveniente de las materias primas y de los contaminantes recuperados en el reciclaje pero que no pueden ser insertados nuevamente en el proceso productivo. Esta fase puede ser desarrollada por dos canales: el formal que está en cabeza de empresas formalmente constituidas y cumplen con los estándares necesarios para la manipulación de las luminarias y el informal caracterizado por ser realizado por personas del común sin algún tipo de capacitación en el tema, generando mayor impacto negativo en el medio ambiente. El siguiente diagrama (Gráfico 8) representa las relaciones de esta fase.



Grafica 8. Diagrama Forrester Fase Reciclado y Disposición Final.

Las relaciones representadas en el diagrama de Forrester anterior, se pueden expresar con las siguientes ecuaciones.

Relleno = Proveniente del reciclado formal + Proveniente del reciclado informal

Materia Prima = Proveniente del reciclado – Destinado a producción de luminarias – Enviado al relleno

Contaminante = Proveniente del reciclado – Destinado a producción de luminarias – Enviado al relleno – Enviado a confinación

4. ANÁLISIS DE INSTRUMENTO DE POLÍTICA.

Hay instrumentos de política asociadas al manejo adecuado de los productos en las diferentes etapas del ciclo de vida. En cuanto al manejo adecuado del producto en las diferentes etapas del ciclo de vida hay gran número de instrumentos de política administrativos, informativos y económicos que pueden aplicarse con el propósito de mitigar el impacto al medio ambiente. Entre los instrumentos de políticas administrativas están las obligaciones establecidas por ley o jurídicos, la restricción de sustancias peligrosas, el establecimiento de la responsabilidad extendida del productor, estándares de contenidos mínimos de material reciclado, estándares para la determinación de programas y sistemas para la planificación de la capacidad en las redes de manufactura de recuperación y sistemas de recolección y reciclaje. Entre los instrumentos de política económicos están los impuestos “upstream” y “downstream”, que afectan al productor y al usuario respectivamente, así como subsidios por cumplimiento de metas de instrumentos administrativos. Dentro de los instrumentos de política informativos están las eco-etiquetas que dan información al consumidor

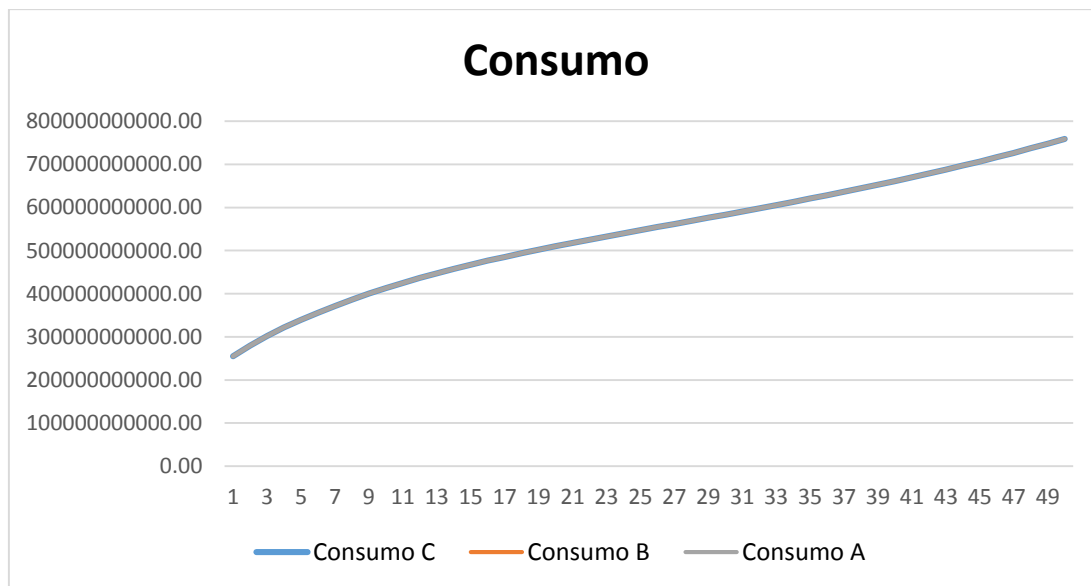
sobre los componentes que tiene el producto. En cuanto a la eficiencia energética se distinguen instrumentos de políticas como el eco-diseño, las etiquetas de eficiencia energética, regulaciones de consumo mínimo por tipos de luminarias, medidor de consumo, incremento de precios de kilovatio de acuerdo a nivel de consumo.

Para el modelo en estudio se determinó aplicar cuatro instrumentos de políticas en los subsistemas con el propósito de observar la incidencia de estas en el modelo. En el subsistema de producción se determinó la aplicación de regulaciones de consumo mínimos por cada tipo de luminaria, esto con el propósito de observar el impacto en el sistema de la eficiencia energética por el cambio de eficiencia intra-tecnologías, incrementando los niveles de eficiencia intra-tecnológica en donde las etiquetas tipo C nos indica una eficiencia media disponible en el mercado, la etiqueta B indica un incremento en la eficiencia y la etiqueta A nos lleva al máximo nivel de eficiencia disponible en el mercado, al realizar el modelado para estas tres etapas y compararlo podemos observar que el comportamiento en los tres niveles de eficiencia es similar y constante lo que no proporciona un cambio significativo en la estabilidad y comportamiento del sistema a largo plazo, como lo muestran las siguientes gráficas. Esto se debe a que la diferencia en el costo no estimula a moverse a un producto de mayor eficiencia, dado que la tasa de retorno no es atractiva.

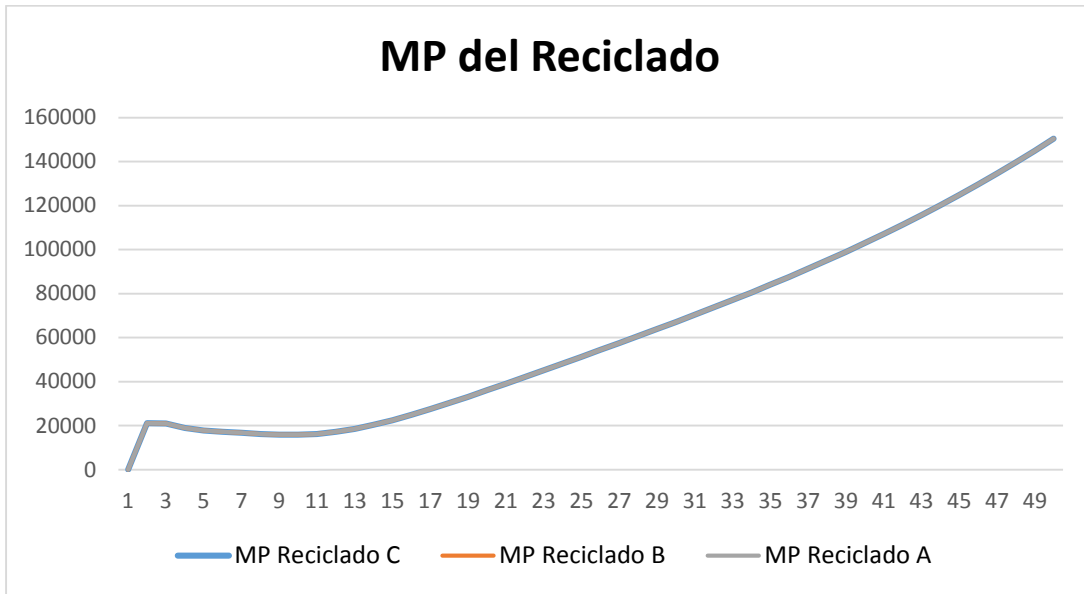
Luminaria	Costo Luminaria		
	Etiqueta C	Etiqueta B	Etiqueta A
Incandescente	\$ 4.500	\$ 4.700	\$ 5.800
Fluorescente Compacta	\$ 5.000	\$ 5.500	\$ 6.700
Fluorescente Tubular	\$ 4.850	\$ 5.300	\$ 6.400
Halógena	\$ 5.011	\$ 5.900	\$ 7.000
LED	\$ 20.900	\$ 21.600	\$ 22.700

Tabla 1. Etiqueta de Eficiencia Vs. Coto de las Luminarias.

El consumo es creciente dado el crecimiento de los hogares. La materia prima proveniente de reciclado crece sobre el final de la simulación sugiriendo que se recuperan más material de las luminarias compactas fluorescentes.

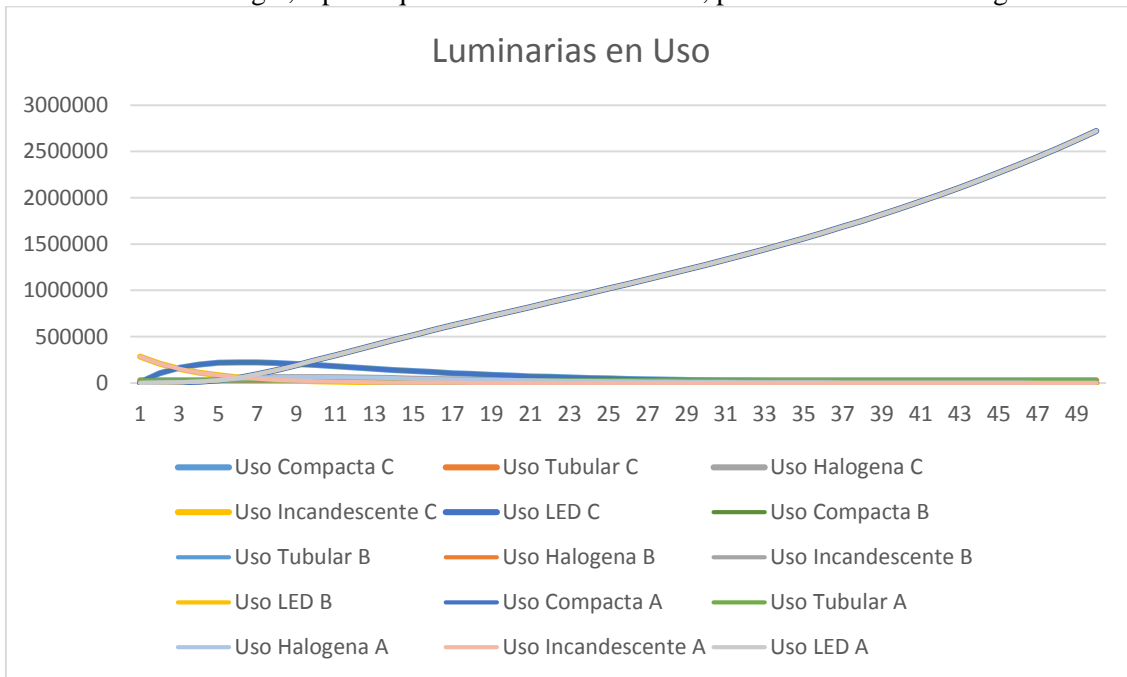


Grafica 9. Consumo de Energía Vs. Etiqueta de Eficiencia.



Grafica 10. Materia Prima del Reciclado Vs. Etiquetas de Eficiencia.

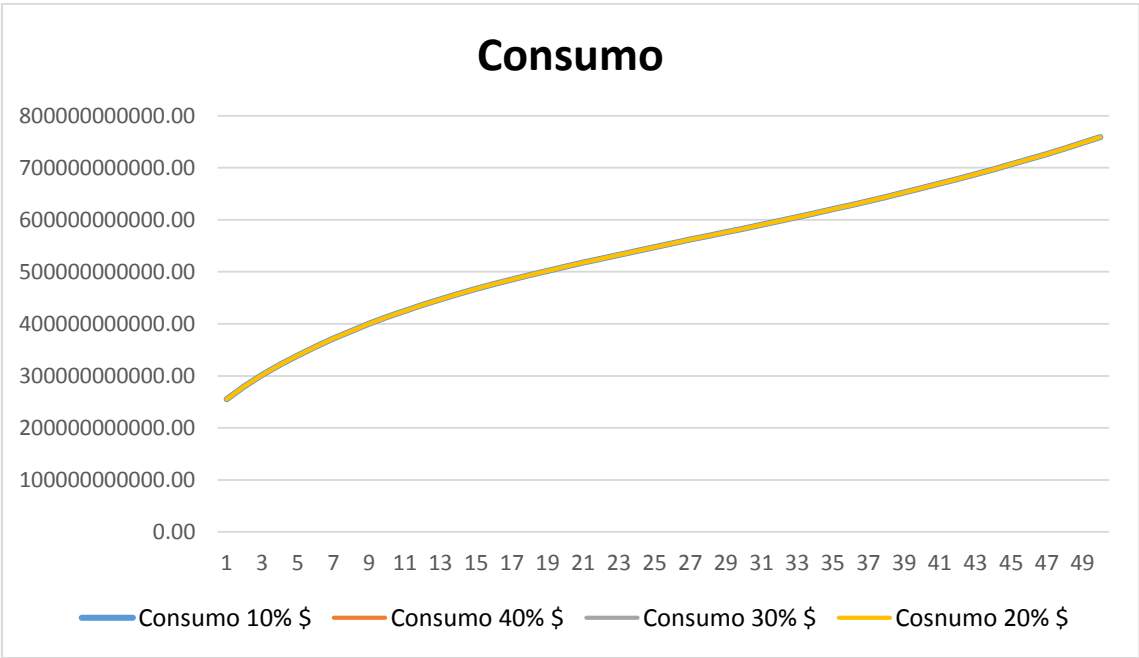
El modelo refleja un comportamiento de los usuarios racional al moverse a la luminaria que consume menos energía, a pesar que tiene el costo más alto, pero la vida útil más larga.



Grafica 11. Comportamiento de cada tipo de luminaria según la Etiqueta de Eficiencia.

En el subsistema de uso se quiere apreciar el comportamiento en el consumo de energía ante la variación del precio de la energía, por lo que se realizó la simulación incrementando el precio de la energía en un 10%, 20%, 30% y 40%, observando que esta política no genera una variación significativa en el consumo, manteniéndolo estable e igual en todos los escenarios, como lo muestra

la siguiente gráfica de consumo. Es posible que incrementando el costo de energía por encima de estos valores, se encuentre el punto donde el usuario ve más atractivo comprar una luminaria más eficiente y no cambiar su hábito de uso manteniendo la luminaria apagada.



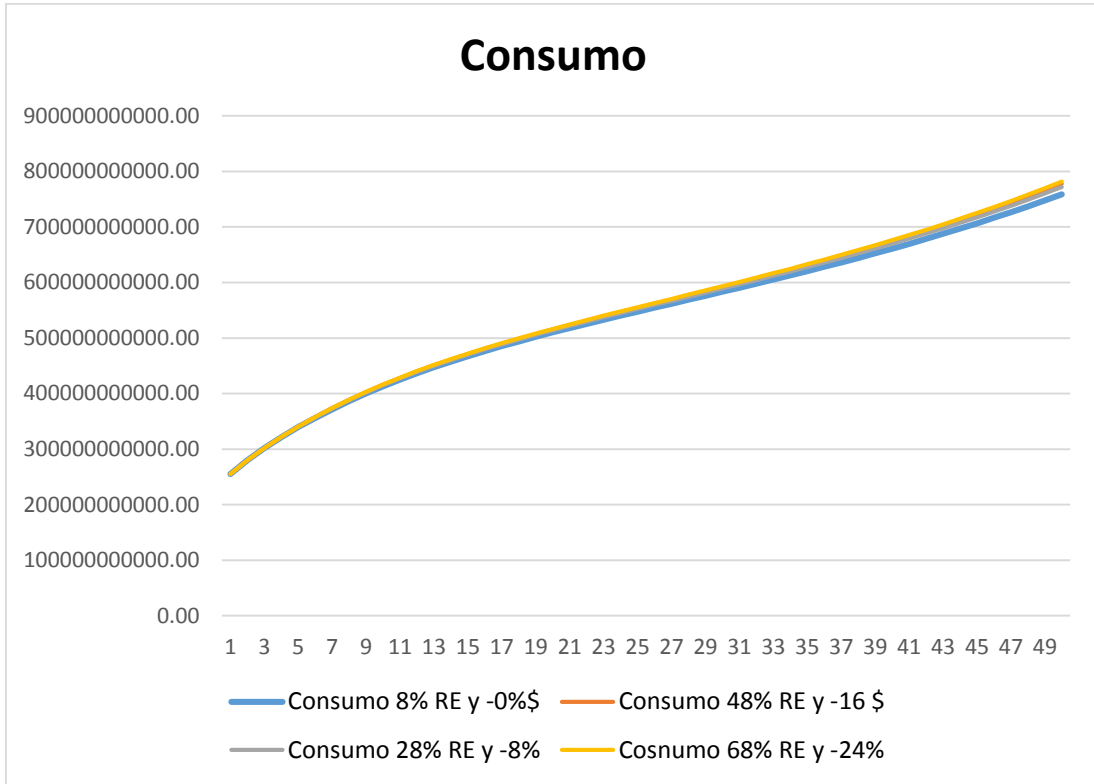
Grafica 12. Comportamiento del Consumo Vs. Incremento del Precio de la Energía.

En el subsistema de fin de vida se busca cuantificar el impacto que tiene el incorporar materias primas recicladas a la producción que se manifiesta en un descuento en el precio de la luminaria, por lo que se modelo el sistema para cuatro situaciones diferentes.

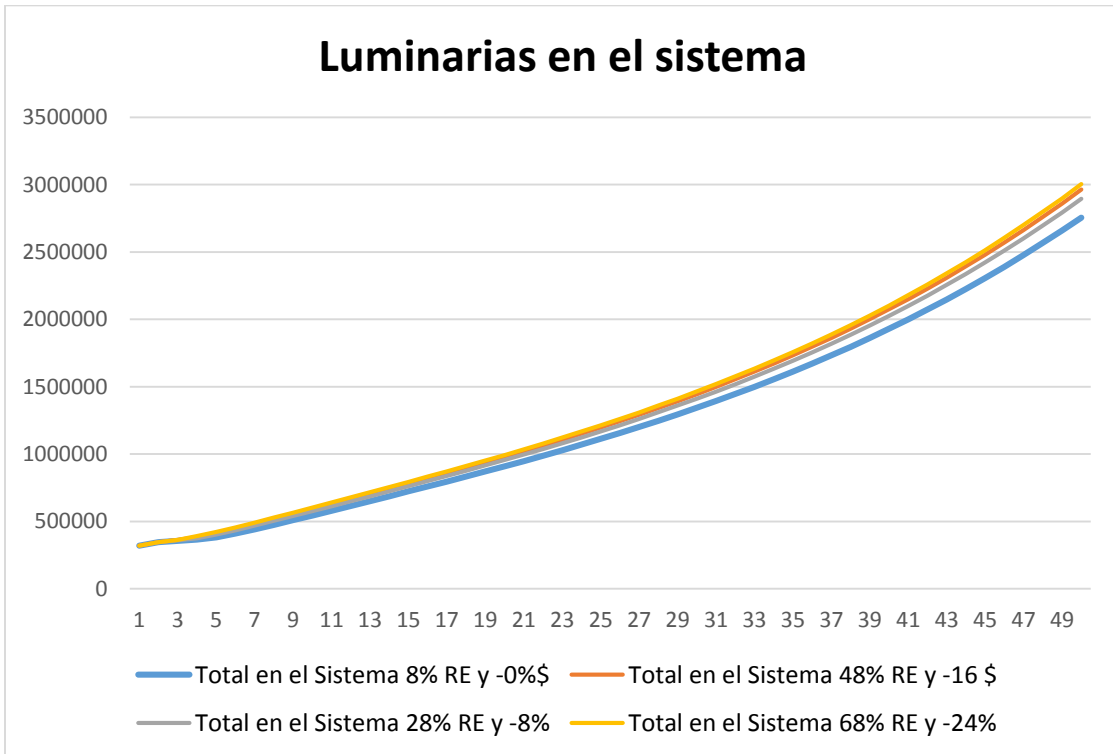
	Tasa de Aprovechamiento	Descuento realizado
Situación inicial	8%	0%
Escenario 1	28%	8%
Escenario 2	48%	16%
Escenario 3	68%	24%

Tabla 2. Tasa de Aprovechamiento de Material Reciclado Vs. Descuento Realizado al Costo de la Luminaria.

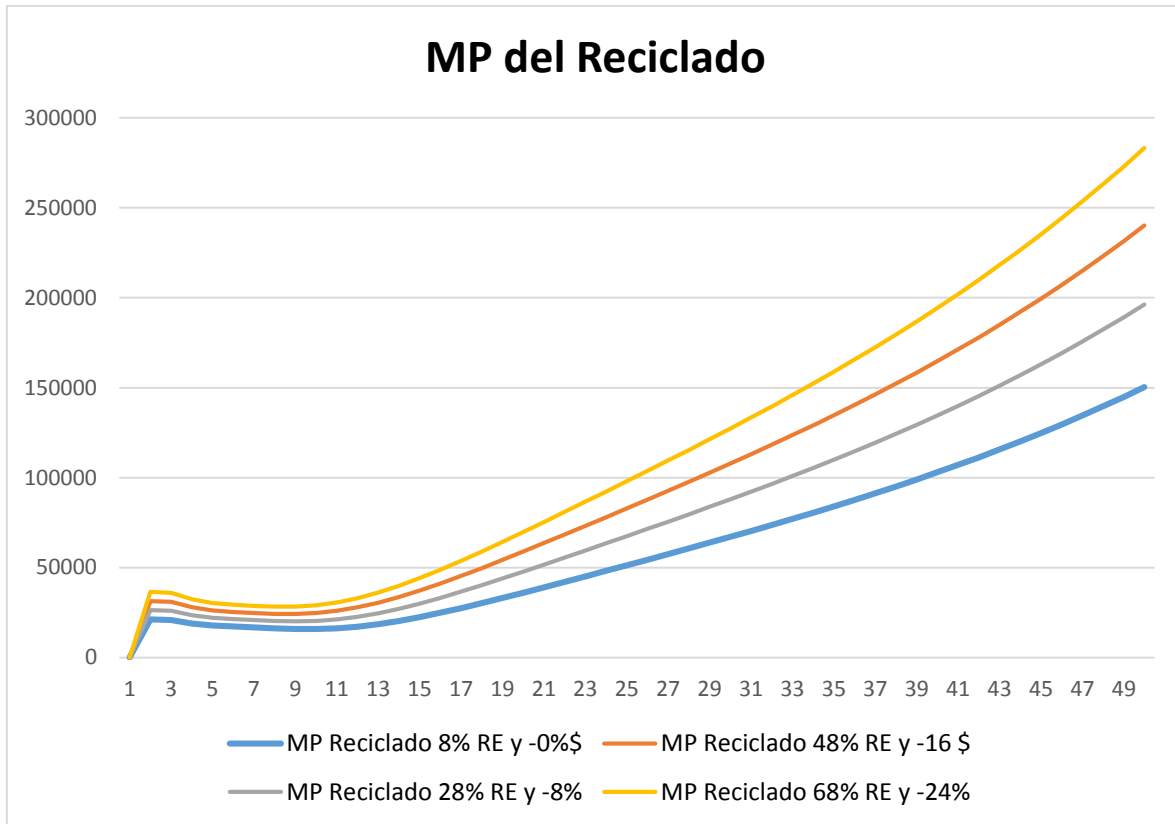
Al realizar la simulación para los cuatro escenarios se puede observar el incremento del consumo de energía y de la cantidad de luminarias totales en el sistema hacia los últimos años, y una disminución significativa en el material en el relleno, como se puede observar en las siguientes gráficas.



Grafica 13. Comportamiento del Consumo de Energía por cada Escenario de Subsidio.

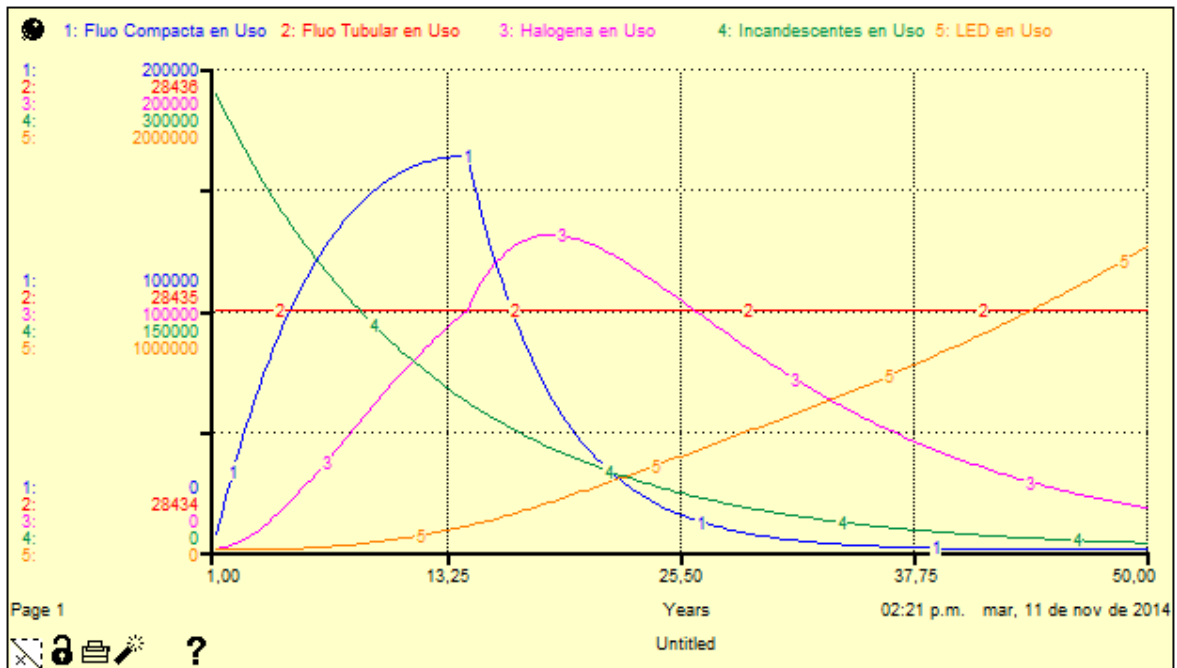


Grafica 14. Cantidad de Luminarias Totales en el Sistema por cada Escenario de Subsidio.



Grafica 15. Materia Prima Proveniente del Reciclado por cada Escenario de Subsidio.

Finalmente en la fase de fin de vida, se evaluó la política de eliminación de sustancias peligrosas (específicamente el gas de mercurio) que está presente en la manufactura de luminarias fluorescente compacta. Estas políticas buscan la eliminación de este tipo de luminaria del mercado, se determinó un horizonte de aplicación de 13 años como plazo máximo (En el horizonte de simulación corresponde al año 2028). De esta manera se evidenció el incremento de luminarias halógenas durante el tiempo de aplicación de la política, los otros tipos de luminarias no se ven afectadas debido a que los usuarios de fluorescente compacta migran en su totalidad a la tecnología más eficiente que para este caso corresponde a luminarias halógenas y que a la vez es más cercana en precio a la que se elimina. Finalmente se evidencia una caída rápida en la cantidad de luminarias fluorescente compacta en uso demostrando las consecuencias de la aplicación efectiva de esta política.



Grafica 16. Cantidad de Luminarias En Uso Por Cada tipo de Luminaria.

5. CONCLUSIONES

El análisis permite conocer el comportamiento e impacto de las distintas políticas y verificar la efectividad de las mismas en la recuperación de materiales y el consumo energético con el objetivo de cuantificar el impacto ambiental generado.

Por lo que se puede concluir que la diversidad de luminarias del mismo tipo con diferentes niveles de eficiencia y con costos muy similares, bajo las condiciones actuales del sistema, no genera una variación significativa del sistema; al igual que el incremento en el precio pagado por la energía consumida. El comportamiento está justificado en la medida en que la potencia promedio de las luminarias baje considerablemente, lo que se logra migrando a una tecnología diferente, mas no en el caso de un pequeño incremento en la eficiencia, máximo un 20% de ahorro; y de la misma forma mientras el costo de la energía no supere con creces el costo de la luminaria no se realizaría un cambio en el tipo de luminarias instaladas. Mientras que una política de descuentos y mayor utilización de materiales reciclados en la fabricación incentivan la compra de luminarias y reducen el impacto medioambiental significativamente. Así mismo al instaurar la política de eliminación de sustancias peligrosas evidenciamos una disminución en el contaminante del sistema al llevar a cero la producción de fluorescente compacta.

En el futuro sería de interés estudiar la posibilidad de incorporar una variable de nivel educativo que permita modelar el comportamiento del sistema intra-tecnología, asociado con diferencias mayores en las potencias promedio de cada nivel de la etiqueta. Así como revisar la sensibilidad del modelo al precio de la energía, y evaluar el impacto económico versus el impacto ambiental que ese generaría al implementar la política de eliminación de sustancias peligrosas. Y ampliar el modelo para incluir otros estratos socioeconómicos y así tener el modelo de la población bogotana.

Bibliografía

- [1] Calcott, P., & Walls, M. (2002). Waste, recycling, and “design for environment”: Roles for markets and policy instruments. *Resource and energy economics*, 27(4), 287-305.

- [2] Comisión Europea, 2001. Política de producto integrada. En línea: <http://ec.europa.eu/environment/ipp/home.htm>. Consultada 2014.05.22.).

- [3] Comisión Europea, 2010. Consumo y Producción sostenibles, más inteligente y más limpio. En línea: http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/brochure_scp/kg006508ES_2.pdf. Consulta: 2014.05.22).

- [4] Eichner, T., & Runkel, M. (2005). Efficient policies for green design in a vintage durable good model. *Environmental and Resource Economics*, 30(3), 259-278

- [5] Elshkaki, E. v. (2005). Dynamic stock modelling: A method for the identification and estimation of future waste streams and emissions based on past production and product stock characteristics. *Energy*, 1353–1363

- [6] Georgiadis, P. M. (2009). Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: a system dynamics analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 475–493.

- [7] Georgiadis P., A. E. (2010). The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks. *European Journal of Operational Research*, 420–433.

- [8] Gottberg, A., Morris, J., Pollard, S., Mark-Herbert, C., & Cook, M. (2006). Producer responsibility, waste minimisation and the WEEE Directive: case studies in eco-design from the European lighting sector. *The Science of the Total Environment*, 359(1-3), 38–56.

- [9] Greening L., Greene, D., Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption-the rebound effect-a survey. *Energy Policy* 28 389-401.

- [10] Khetriwal, D. S., Kraeuchi, P., & Widmer, R. (2009). Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration—learning from the Swiss experience. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 153-165.

- [11] Khetriwal, D., Kraeuchi, P., & Schwaninger, M. (2005). A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), 492-504.
- [12] Lee, T. K. (2005). Resource Cyclical Dynamics of Electric and Electronic Equipment Waste.
- [13] Lindqvist, T., Manomaivibool, P., & Tojo, N. (2008). La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano. Recuperado de <http://www.basuracero.org/sitio/admin/archivos/la-responsabilidad-extendida-d.pdf>
- [14] Panzone, L., (2013). Saving money vs investing money: Do energy ratings influence consumer demand for energy efficient goods?. *Energy Economics* 38, 51–63s .
- [15] Rodríguez LA, González N, Reyes L, Torres A. Sistema de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Enfoque de dinámica de sistemas. X *Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*, 26, 27 y 28 septiembre de 2012. Cali, Colombia. ISBN: 978-958-8357-71-3.
- [16] Schröter, T. S. (2005). A system dynamics model for strategic management of spare parts in closed-loop supply chains. *The 23rd International Conference of the System Dynamics Society.*, 1–13.