

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS INSTRUMENTOS DE POLÍTICA DE PRODUCTO INTEGRADA EN LA FASE DE FIN DE VIDA DE LUMINARIAS

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE PRODUCT POLICY INSTRUMENTS INTEGRATED IN THE END OF LIFE PHASE OF THE BULBS LIFE CYCLE

Diego German Toro Santamaría^{1,*}, Sonia Alexandra Jaimes Suárez², Luz Angélica Rodríguez Bello³

RESUMEN

El análisis ciclo de vida de las luminarias en Bogotá, a partir del uso de Dinámica de Sistemas (DS), permite identificar el comportamiento del sistema de luminarias en términos de las relaciones de causalidad presentes en las fases que lo componen, así mismo las políticas de producto integrado (PPI) contribuyen a la disminución de la cantidad de material enviado al relleno sanitario, el consumo de energía y al aumento del material reciclado que es reincorporado al proceso productivo. Con el fin de medir el impacto de dos de las PPI propuestas, se plantea un modelo de Programación entera mixta que permite minimizar la cantidad de material que es enviado al relleno sanitario y el consumo de energía observando el comportamiento y el alcance de las mismas para los periodos de simulación. Al observar en conjunto los resultados de la simulación por DS y el modelo de optimización se evidencia que este tipo de trabajo conjunto entre simulación y optimización, proporciona escenarios complementarios que compensa las limitaciones de cada una de las herramientas. Para este caso en particular se logra un escenario óptimo con un 98% de mejora en términos de material reciclado que es reincorporado al proceso productivo y un 99% de disminución en el consumo de energía.

Palabras Clave: Análisis del ciclo de vida, modelos de optimización, programación lineal, dinámica de sistemas.

ABSTRACT

The analysis of bulbs life cycle in Bogotá using Systems Dynamics (SD), enables the identification of the behavior of the bulbs system in terms of the causal relationships existing in the different phases of it. Likewise, the integrated product policies contribute to decrease the amount of material sent to landfill and the energy consumption, and also to increase the recycled material reincorporated into the productive process. In order to measure the impact of two of the integrated product policies, an integer programming mixed model is proposed,

¹Maestría en Ingeniería Industrial, Ingeniería Industrial, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia. orcid.org/0000-0003-3101-1602, diego.toro@mail.escuelaing.edu.co

²Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia. orcid.org/0000-0003-0693-6654, sonia.jaimes@escuelaing.edu.co

³Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia. orcid.org/0000-0003-3341-8537, angelica.rodri-guez@escuelaing.edu.co

*Autor para correspondencia: diego.toro@mail.escuelaing.edu.co

minimizing the amount of material sent to the landfill and the energy consumption by observing their behavior and power for the simulation periods. Considering together the results of SD and the optimization model, it is evident that this kind of combined work between simulation and optimization provides complementary scenarios that compensate the limitations of each individual tool. For this particular case, an optimal scenario is achieved with a 98% improvement in terms of recycled material that is reincorporated into the production process and a 99% reduction in energy consumption.

Keyword: Life cycle analysis, optimization models, linear programming, systems dynamics.

INTRODUCCION

Las acciones hacia la prevención ambiental cada vez son más comunes, debido al gran impacto ambiental que produce la interacción de las personas con el medio ambiente, en los hogares, los electrodomésticos, los alimentos y los viajes son responsables, en conjunto, del 70% al 80% del impacto medioambiental, debido a la contaminación, emisiones de gases efecto invernadero, el uso del suelo y la generación de residuos (Comisión Europea, 2010). Es por esto que medir el impacto ambiental generado en los procesos productivos y del hogar se hace prioritaria, convirtiendo el análisis del ciclo de vida (ACV) de los productos en una herramienta fundamental para cuantificar el uso de los recursos y emisiones a lo largo del ciclo de vida (Comisión de las Comunidades Europeas, 2001).

Los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) son los encargados de generar una gran cantidad de residuos contaminantes y no contaminantes en cada una de las fases del ciclo de vida, particularmente las luminarias generan alrededor del 90% de su impacto ambiental durante la fase de uso. Los tipos de luminarias más comunes en el mercado son: Incandescente, Fluorescente Compacta, Halógena, Led, Fluorescente Tubular y Tubular Led. Encontrando que las Fluorescentes son las más contaminantes al contener gas de mercurio (European Lamp Companies Federation, 2015; Rodríguez *et. al.*, 2015).

Es por esto que se realiza el estudio del ciclo de vida de las luminarias, caso Bogotá desde la perspectiva de dinámica de sistemas, el cual permite tener una perspectiva del comportamiento del sistema en cada una de sus fases Producción, Uso y Disposición (Ogata, 1987), y al mismo tiempo se busca observar el impacto de una serie de políticas de producto integrado (PPI), simulando escenarios que describan el comportamiento en términos del consumo de energía y del material reciclado que es reincorporado al proceso productivo.

El ciclo de vida de las luminarias para este estudio comprende la relación existente entre tres fases: fase de producción, contempla la relación entre la exportación, la importación y la fabricación con materias primas nuevas y con material reciclado. La fase de uso, estudia el comportamiento de los consumidores en cuanto a la relación entre el precio de la luminaria, el precio de la energía y la cantidad de horas que se encienden las luminarias. Y la fase de fin de vida, describe la relación entre el reciclado formal, el reciclado informal, la cantidad de material llevado al relleno y el material reciclado que es reincorporado al proceso productivo en la fase de producción, permitiendo cerrar el ciclo de vida y generando la retroalimentación del mismo.

Las PPI proponen observar el comportamiento del sistema en términos del material reciclado y consumo de energía, usando políticas que: eliminen las sustancias contaminantes, incorporen el material reciclado, generen un impuesto al consumidor por el reciclado, varíen en el precio de la energía y promuevan el cambio de eficiencia Intra-Tecnología.

Azapagic & Clift (1999), proponen una metodología que permiten realizar un trabajo conjunto entre el análisis del ciclo de vida (ACV) y los modelos de optimización de manera eficiente. En primer lugar para mitigar y prevenir el impacto ambiental del ciclo de vida de un producto

se plantea el uso de instrumentos de política de producto integrado, administrativas, informativas y económicas, que intervienen en las diferentes etapas de ciclo de vida. La literatura plantea 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 etiquetado tanto de eficiencia energética, como sello ecológico. Mientras que el instrumento económico más frecuente es impuesto "up stream" y "down stream". (Calcott, & Walls, 2002; Eichner & Runkel, 2005; Khetriwal *et al.*, 2005; Lindhqvist *et al.*, 2008). En eficiencia energética se implementan además instrumentos económicos como precio de venta de la energía de acuerdo al consumo e instrumentos informativos como medidores que retroalimentan el consumo de forma inmediata al usuario (Khetriwal *et al.*, 2009).

Georgiadis (2009), Gottberg *et al.* (2006) y Eichner & Runkel (2005) proponen para el modelado del ciclo de vida estudios en el campo de la eficiencia energética y de los RAEE, donde analizan estrategias de sostenibilidad ambiental (legislación e imagen verde), características de funcionamiento de la cadena de suministro y el impacto en la sostenibilidad del medio ambiente. También se ha investigado el ciclo de vida de los AEE bajo escenarios de preferencias e igualdad en la demanda (Georgiadis, 2010). La disposición de los AEE genera un impacto ambiental, el cual se modela teniendo en cuenta el comportamiento socioeconómico de la población en las fases de uso y la disposición (Eishkaki, 2005; Lee, 2005; Rodríguez, 2013; Schröter, 2005).

Azapagic & Cliff (1999) propone, realizar balances de masa y energía, que son ecuaciones en las que se identifican los insumos del procesos, los cuales son igualados a las salidas del sistema permitiendo encontrar los puntos críticos del ciclo de vida como perdidas de energía, cantidad de residuos generados, cantidad de contaminante producido al final del proceso entre otros (Carreras *et al.*, 2015; Komly, *et al.*, 2012) multiobjective optimization and decision support tools are used to define optimal targets for efficient waste management. The global environmental impacts associated with the treatment of PET bottles from their cradle to their ultimate graves (incineration, landfill, recycling by mechanical, chemical or thermal processes.

Una vez identificadas las ecuaciones de balance se plantean los modelos de optimización que dependen del proceso que se esté analizando y de los objetivos planteados.

Los casos de estudio en los que se han utilizado integración de las herramientas ACV optimización son muy diversos, entre ellos se pueden mencionar diseño de cadenas de suministros en la industria de los biocombustibles y otros productos, quienes tienen diferentes objetivos, como la minimización los costos de operación relacionados con el transporte, la localización y el manejo de los inventarios, la reducción del impacto ambiental en donde se contemplan los porcentajes de combustibles fósiles que son reemplazados por biocombustibles, la generación de residuos que son llevados al relleno sanitario, el reciclado y la reutilización de los residuos (Liu *et al.*, 2014a; Kostin *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2015; Gan *et al.*, 2015; Ramadhan *et al.*, 2014; Dehghanian & Mansour, 2009; Liu *et al.*, 2014b; Čuček *et al.*, 2012).

Este tipo de integración (ACV y optimización) también es usada en el análisis de la producción de cultivos orgánicos al tratar de disminuir la liberación de gases efecto invernadero y la desmineralización de la tierra producidas por el fumigación con pesticidas con altos contenidos de carbono (Khoshnevisan *et al.*, 2015). Así mismo este tipo de combinación de herramientas son usadas para el estudio de la fabricación de productos o máquinas, como es el caso de los sistemas de calefacción y refrigeración (CCHP) híbridos, los cuales consumen grandes cantidades de energía generadas por combustibles fósiles, en las épocas de invierno y verano, produciendo indirectamente emisiones y gases efecto invernadero, por lo que los autores proponen la construcción de un sistema híbrido que utilice un porcentaje de energía alternativa de manera óptima sin disminuir el rendimiento del sistema y así lograr una disminución en el consumo de energías no renovables (Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015).

Entre los diversos usos encontrados para este tipo de integración (ACVy optimización), se hallan los enfocados a la administración de los residuos: de obras civiles, partes de vehículos que llegan a la etapa de fin de vida, de procesos metalúrgicos y de fabricación de botellas de plástico; la administración de estos residuos tiene como objetivo la minimización de los mismos en el relleno y la maximización del uso de materiales reutilizables en los procesos productivos (Carreras *et al.*, 2015; Levis *et al.*, 2013; Paraskevas *et al.*, 2015; Komly *et al.*, 2012; Vadenbo *et al.*, 2014; Poulkidou *et al.*, 2015; Solano, 2012; Ahluwalia & Nema, 2007; Morales *et al.*, 2014; Azapagic & Clift, 1999).

Descripción del ciclo de vida de las luminarias y construcción del modelo de optimización

Llevando la continuidad de la metodología propuesta por la mayoría de autores citados, se presenta la descripción del ciclo de vida de las luminarias a partir de dinámica de sistemas por Rodríguez *et al.*, 2015. por medio de las ecuaciones de balance. A continuación, se presenta el modelo de optimización propuesto, la comparación de los resultados obtenidos por los dos modelos y por último se presentan las conclusiones obtenidas.

Al observar los resultados obtenidos, por Rodríguez *et al.*, 2015, de la simulación a través de dinámica de sistemas y entender el comportamiento del ciclo de vida de las luminarias, se plantea un modelo de programación lineal a partir de las ecuaciones de causalidad planteadas en el modelo de simulación que refleja el comportamiento del sistema en cada una de sus fases y la relación de ciclo cerrado en las mismas. A partir de este se plantean dos funciones objetivo para el modelo de programación lineal, la primera busca minimizar la cantidad de material enviado al relleno sanitario y la segunda minimiza el consumo de energía, con el fin de medir el impacto de dos de las PPI propuestas.

El modelo de optimización propuesto es formulado como un problema de programación lineal entera, resuelto con GAMS usando el solver BONMIN (Bonmin Library 1.3), en un computador de escritorio con un procesador Intel® Atom™ CPU D510 @1.66Ghz, una memoria RAM de 2.00GB y un sistema operativo de 64 Bits.

Descripción del ciclo de vida de las luminarias en Bogotá.

Para describir el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá se hace necesaria la descripción la cadena de suministros con el fin de identificar las relaciones del flujo de material entre los diferentes actores que la componen, representado en las flechas de la Figura 1.

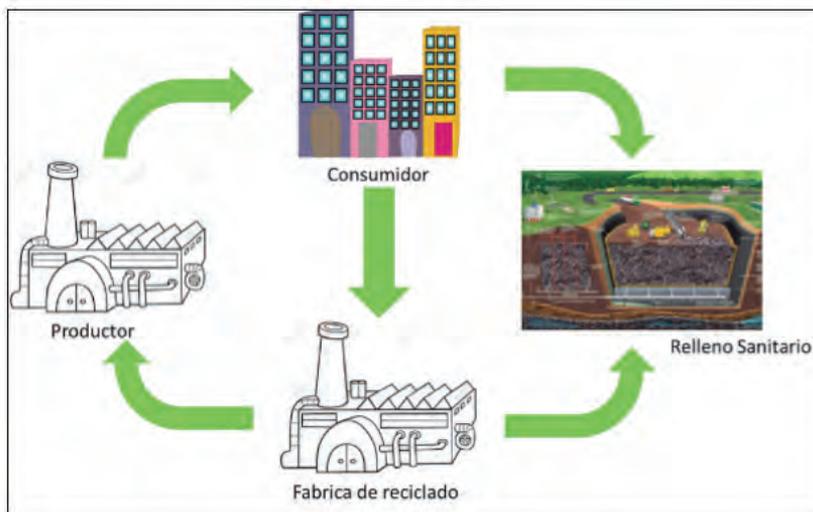


Figura 1. Grafo de la Cadena de Abastecimiento de las luminarias en Bogotá.

Una vez determinadas las relaciones y el flujo de material a lo largo de la cadena de abastecimiento se realizó el análisis y la construcción del modelo que representa el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá. La Figura 2 muestra el diagrama causal del sistema, el cual permite entender como es el comportamiento de las variables en el sistema, como se relaciona a lo largo de las fases que lo componen y como son los procesos de retroalimentación, las líneas que se encuentran en verde representan la fase de disposición y reciclado, las azules la fase de uso y la naranja la fase de producción y comercialización.

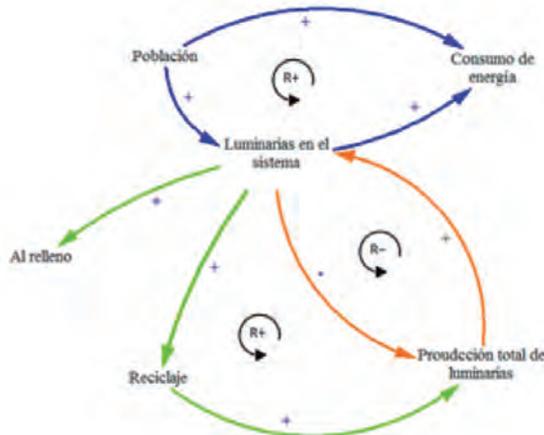


Figura 2. Diagrama Causal del ciclo de vida de las luminarias.

Para la construcción del modelo se determinó que la población de estudio son los estratos socioeconómicos 3 y 4, los cuales fueron agrupados en un solo grupo, que corresponde al 45% de la población bogotana (Secretaría Distrital de Planeación, 2011), la cual se caracteriza por tomar decisiones de compra basados en el precio del producto, pues no tienen en cuenta las relaciones costo beneficio que se presentan hacia el futuro; así mismo se analizan en el modelo cinco tecnologías de luminarias: Incandescente, Fluorescente Compacta, Fluorescente Tubular, Halógena y Led, por ser las más usadas, según hallazgos de encuestas realizadas en la población bogotana. Adicionalmente se determinó que el periodo de simulación debe ser de 50 años, con el fin de poder evidenciar el comportamiento de las PPI.

La Figura 3 muestra en detalle el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá, así como las variables relevantes y las fases que componen el ciclo de vida, producción y comercialización, uso y fin de vida. Para cada una de las fases fueron identificadas una serie de ecuaciones de balance que permiten la relación de las variables no solo dentro de cada fase, sino también entre las diferentes fases que componen el ciclo de vida. Dichas ecuaciones de balance son descritas a continuación.

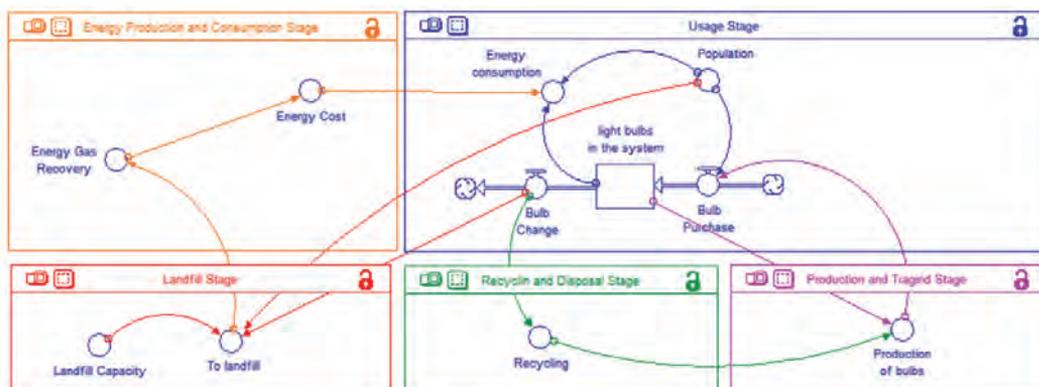


Figura 3. Ciclo de vida de las luminarias.

Producción y comercialización.

Esta fase explica las relaciones entre la producción de luminarias y las luminarias disponibles para la venta, en la Figura 4 se muestra el diagrama de forrester para esta fase.

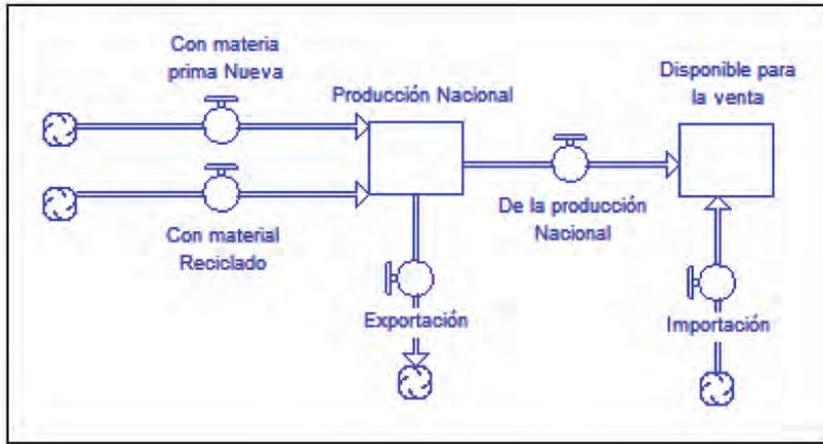


Figura 4. Fase de producción y comercialización.

La producción de luminarias (P_{li}) indica la cantidad de luminarias que se deben producir a partir de materias primas nuevas (MP_n) o materia prima recicladas (MP_r) para cada uno de los seis tipos de luminarias (i). La cantidad de luminarias a producir de cada tipo con materia prima reciclada, depende de la cantidad de material recuperado y reincorporado al proceso productivo en la etapa de Fin de Vida, mientras que la cantidad de luminarias con materia prima nueva depende de la demanda del tipo de luminaria. Sin embargo, la producción de luminarias se ve afectada por los flujos de salida, el primero corresponde a las exportaciones (Ex), que representa un porcentaje de la producción y el segundo representa la cantidad de luminarias de la producción nacional (P_{dn}) disponibles para la venta.

$$P_{li} = MP_n + MP_r - Ex - P_d$$

Por otra parte, el nivel de luminarias disponibles para la venta (L_v) está influenciado por dos flujos que lo alimentan, el primer flujo es la producción nacional (P_{dn}) disponible para la venta y el segundo flujo corresponde a la importación de luminarias (Im). Así mismo (L_v) está sujeto a un flujo que lo disminuye, la demanda (Di).

$$L_v = P_{dn} + Im - Di$$

Uso

Esta fase representa el comportamiento del consumidor, en cuanto a las decisiones de compra, la cantidad de horas que permanecen prendidas las luminarias y el cambio de luminarias que llegaron al fin de su vida útil, permitiendo el equilibrio entre las luminarias que llegan al fin de su vida útil y las que son compradas para reemplazarlas, la Figura 5 muestra esta relación.

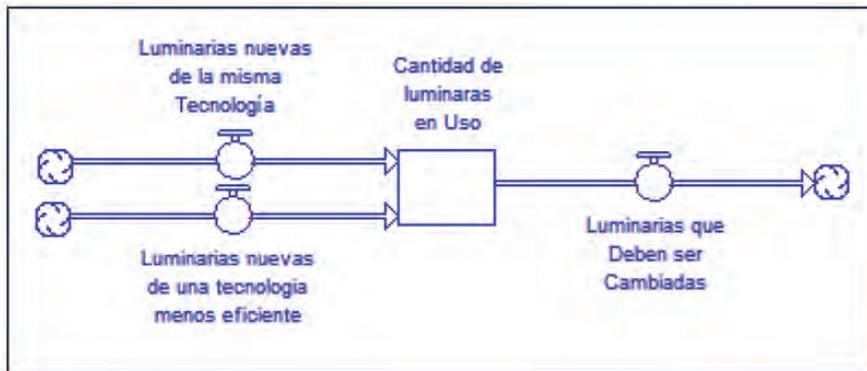


Figura 5. Fase de Uso

En esta fase se considera el nivel inicial del sistema tiene un número determinado de luminarias en uso (L_{uso}), los cuales son: Incandescente 977.506 representando aproximadamente el 15% del total de luminarias del sistema, Fluorescente Compacta 4.366.197 que representa el 69% aproximadamente, Halógena 456.169 representa el 7%, Led 159.501 el 2%, Fluorescente Tubular 456.169 un 7% y Tubular Led 10 que representa menos del 1%, el número de luminarias iniciales del sistema fue calculadas según la cantidad promedio de luminarias en el hogar (7) por la cantidad de hogares 930.959 en el sistema (H) y el porcentaje de utilización de cada tipo de luminaria ($\%U_i$) según la encuesta realizada por los autores en la ciudad de Bogotá porcentaje de utilización de cada tipo de luminaria ($\%U_i$) según la encuesta realizada por los autores en la ciudad de Bogotá.

$$L_{uso} = 7 * H * \%U_i$$

Una vez definido el estado inicial del sistema, se expresa el cambio de luminarias a través del tiempo de simulación como la frecuencia de cambio de las luminarias por daño, la cual está determinada por el tipo de luminaria y corresponde al menor valor entre la vida útil programada por el productor (V_u) y el cambio percibido por el usuario (C_p). La frecuencia de cambio (F_{ci}) es expresada como un porcentaje de las luminarias en el sistema y da lugar a la variable denominada cantidad de luminarias que deben ser cambiadas (L_{Ci}) de cada tipo.

$$F_{ci} = \min (V_u, C_p)$$

$$L_{Ci} = \sum_{i=1}^6 F_{ci} * L_{uso}$$

Sin embargo, el remplazo de luminarias que se dañan implica una decisión por parte del consumidor, en términos de si reemplaza la luminaria dañada por una de la misma tecnología o si compra una luminaria de una tecnología mejor, por ejemplo si la luminaria dañada es Incandescente él consumidor tiene la opción de comprar una Incandescente o reemplazarla por una Fluorescente Compacta, teniendo en cuenta las posibilidades de migración entre las tecnologías, para lo que se hace el siguiente supuesto: el consumidor solo migra a la tecnología de mayor eficiencia que le sigue, esto quiere decir que de Incandescente solo puede migrar a Fluorescente Compacta, de Fluorescente Compacta a Halógena, de Halógena a Led y en el caso de la Tubular Fluorescente a Tubular Led.

Así mismo la decisión del consumidor frente al cambio de tecnología es de la siguiente manera: si el valor pagado por el consumo de energía de la luminaria, es determinado por la

cantidad de horas que la luminarias está encendida, y es mayor al presupuesto del consumidor multiplicado por 1.5, este decide migrar en su totalidad las luminarias a la mejor tecnología siguiente, en caso contrario el porcentaje de luminarias que migran a la nueva tecnología es el menor valor entre el hábito de compra y la eficiencia energética de la luminaria actual. Definiendo el hábito de compra como la relación entre la eficiencia y la variación del precio entre la luminaria actual y la siguiente, y la eficiencia energética como el consumo eficiente de energía de la luminaria, la cual es proporcionada por el fabricante.

Es así como la demanda (D_i) de luminarias de cada tipo por periodo de tiempo, que representa el flujo que relaciona la fase de producción y la fase de uso, está compuesta por la cantidad de luminarias que deberán ser remplazadas de la misma tecnología (L_i) y las que llegan de tecnologías de menor eficiencia energética (L_{i-1}) en cada periodo de tiempo.

$$D_i = L_i + L_{i-1}$$

Finalmente se hace el supuesto que los consumidores no almacenan luminarias en sus hogares, esto quiere decir que la cantidad de luminarias dañadas es igual a la cantidad de luminarias compradas y que los consumidores no compran más luminarias de las que necesitan.

Fin de Vida

Esta fase refleja el comportamiento del consumidor, permitiendo la medición del impacto ambiental. La Figura 6 muestra las relaciones de la fase en su forma gráfica.

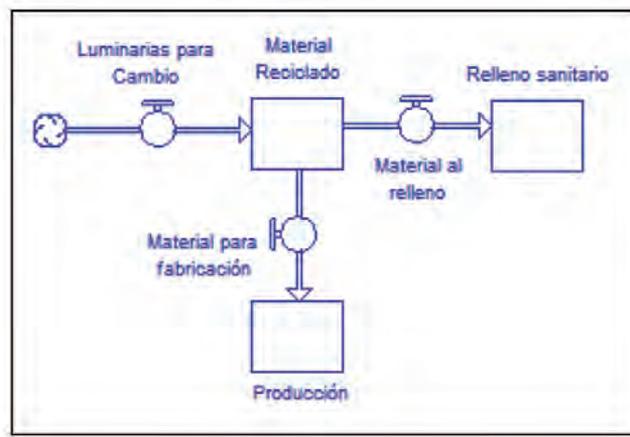


Figura 6. Fase fin de vida

Las PPI diseñadas intervienen en esta fase, ya que están enfocadas en la disminución del impacto al medio ambiente y la salud de los seres humanos, debido a los contaminantes utilizados en las luminarias Fluorescentes Compacta y Tubular, y en el incremento del material reciclado que se incorpora al proceso productivo y la disminución del material que es llevado al relleno sanitario.

Esta fase está compuesta por tres niveles, contaminante (Con), material reciclado (Mpr) y relleno sanitario (Rs). Todas las luminarias que salen de la fase de uso y deben ser cambiadas son llevadas a estos 3 niveles por dos vías, reciclado formal ($Recf$) y reciclado informal ($Recin$). El reciclado formal corresponde a un porcentaje de la cantidad de luminarias dañadas que es reciclado y solo las partes que no pueden ser recicladas son llevadas al relleno, mientras que en el reciclado informal sucede lo contrario, la mayor cantidad de material de las luminarias dañadas es llevado al relleno sanitario disminuyendo su capacidad y produciendo mayor impacto al medio ambiente.

$$Rs = LCi * Recf + LCi * Recin$$

Teniendo en cuenta que el reciclado formal y el reciclado informal son porcentajes, sus complementos por la cantidad de luminarias que salen de la fase de Uso conforman el nivel llamado material reciclado (Mpr), flujo que cierra el ciclo al unirse con la fase de Producción y comercialización y que es expresado de esta forma:

$$Mpr = LCi * (1 - Recf) + LCi * (1 - Recin)$$

Por otro lado, el nivel contaminante (Con) crece por dos tipos de luminarias, las Fluorescentes Compactas y las Fluorescentes Tubulares, que son las que tienen como componente el gas de mercurio, este crecimiento se debe a un porcentaje de recuperación proveniente del canal formal y el informal para estos tipos de luminaria que contienen cierta cantidad de gas de mercurio.

De donde fc es la cantidad de gramos del contaminante proveniente de las luminarias Fluorescentes Compactas y ft es la cantidad de gramos del contaminante proveniente de las Fluorescentes Tubulares, los subíndices f e in corresponden a los canales por los cuales llega el material para ser procesado, la f corresponde al canal formal y la in corresponde al canal informal. Como el contaminante que es procesado corresponde a una parte del total presente en las luminarias, el contaminante restante es enviado al relleno sanitario o es liberado en el ambiente cuando las luminarias no son manipuladas adecuadamente, esto ocurre frecuentemente debido a la poca capacitación que tienen los recolectores informales en el cuidado y manipulación de este tipo de luminarias. El contaminante que es enviado al relleno sanitario o que es liberado al medio ambiente no es cuantificado en el modelo propuesto.

Así mismo se propone un límite de capacidad del relleno sanitario Doña Juana ($CapRs$), al que llegan toda la basura de Bogotá, para la recepción de luminarias que no se reciclan, el cual fue calculado a partir de los datos de capacidad disponible del relleno y la cantidad esperada de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que son desechados cada año.

$$CapRs = 8'750.000.000 \text{ g}$$

De igual manera se supone que existe relación entre la capacidad del relleno y el precio de la energía, puesto que el relleno tiene la capacidad de producir bio-gas que es transformado en energía y haciendo que el precio de la energía se reduzca. Para este supuesto proponemos: Si el uso del relleno es menor al 50% de su capacidad el precio de la energía se mantendrá constante; sin embargo, si el uso está entre el rango del 50% y el 75% de su capacidad, el precio de la energía disminuirá en un 5%; así mismo si el uso es mayor el 75% y menor al 100% de la capacidad, el descuento en el precio de la energía será de un 10% y finalmente si el uso del relleno sobrepasa su totalidad la reducción en el precio de la energía será del 20%.

A continuación, se enuncian los 2 instrumentos PPI diseñados para intervenir en el modelo propuesto, permitiendo encontrar las políticas que producen el mayor impacto en las variables de interés: 1. Material reciclado que es reincorporado al proceso productivo y 2. Consumo de energía.

Descripción de las PPI seleccionadas **Variaciones en el costo de la energía**

Se plantea este instrumento como una política económica con el fin de evaluar el comportamiento del consumidor con relación a la migración de luminarias hacia tecnologías más eficientes y percibir los ahorros en el consumo de energía, para ello se plantean cuatro escenarios diferentes al actual, en donde se incrementa el precio de la energía en un 10%, 20%, 30% y 40 % respectivamente. Encontrando que la migración a tecnologías más

eficientes se hace más rápido cuando el precio de la energía es más alto, adicionalmente se evidencia un mayor ahorro de energía a medida que se incrementa el precio, dado en pesos colombianos (COL\$).

Por otro lado, al realizar el análisis de las variables de interés se encuentra que el porcentaje de crecimiento con relación a las condiciones actuales del material reciclado reincorporado en el sistema productivo es del 2,79%, mientras que la reducción en el consumo de energía corresponde al 3,88%. estos resultados se encuentran bajo las condiciones actuales del sistema en donde se contempla un crecimiento poblacional, al realizar una simulación en donde el crecimiento poblacional se hace cero para las condiciones iniciales y se aplica la política, se obtiene como resultado un ahorro del hasta el 22% en el consumo de la como lo muestra la Figura 7.



Figura 7. Consumo de energía sin crecimiento poblacional en (COL\$)

Incorporación de materiales reciclados

Para este instrumento de política económico, se plantea la condición tres escenarios diferentes con el fin de observar el comportamiento del sistema durante el horizonte de simulación. La finalidad del instrumento de política es poder ofrecer un incentivo al consumidor mediante un descuento en el precio de la luminaria, siempre y cuando lo productores incrementen la cantidad de material que se reincorpora al proceso productivo. La Tabla 1 muestra las condiciones iniciales y los escenarios planteados.

Tabla 1. Escenarios para la incorporación de material reciclado.

	Tasa de Reincorporación (%)	Descuento (%)
Condición Inicial	8	0
Escenario 1	28	13
Escenario 2	48	23
Escenario 3	68	33

El descuento realizado en cada escenario debe ser igual a la mitad menos uno de la tasa de reincorporación, es por esto que para el escenario 1, la tasa de reciclado asciende de 8% a 28% y el porcentaje de descuento frente al valor de las luminarias es de 13%.

Al realizar la simulación de los diferentes escenarios para esta PPI se encuentra un aumento significativo en la cantidad de material reincorporado en el sistema, sin embargo, para el escenario 2 y 3 los niveles de material reciclado y reincorporado son los mismos, lo que hace pensar que una reincorporación mayor al 48% de material reciclado no es atractiva para los productores y los consumidores. Sin embargo, al evaluar las variables de interés se evidencia que el porcentaje de material reciclado en el proceso productivo tiene un crecimiento del 36,73% en relación con las condiciones iniciales, mientras que el consumo de energía tuvo una disminución del 0.48%.

Modelo de optimización

Para el planteamiento del modelo de optimización se tomaron como base las ecuaciones de balance producidas en la construcción del modelo de simulación de dinámica de sistemas que representa el ciclo de vida de las luminarias en Bogotá. Estas ecuaciones incorporan la relación de las variables de interés no solo dentro de las fases que componen el ciclo de vida sino entre ellos. Para poder observar en conjunto los resultados de las variables de interés en cada uno de los dos modelos planteados, es necesario que ellos sean los más semejante posible, y representen el mismo ciclo de vida.

Descripción de los supuestos

Debido a las diferencias existentes entre dinámica de sistemas y los modelos de programación entera mixta se hace necesario realizar una serie de supuestos que permitan eliminar la incertidumbre y la variabilidad de algunos parámetros a lo largo del tiempo de análisis, planteando los siguientes supuestos:

- ❖ Debido a la variabilidad de la tasa de incorporación (λ) en dinámica de sistemas, se decide tomar los datos arrojados por iThink e ingresarlos como un parámetro en el modelo de optimización, suponiendo que el comportamiento a lo largo de los 50 periodos es el mismo.
- ❖ En el modelo de dinámica de sistemas, el valor de la variable precio de la energía (P) representa el valor por kilowatt/hora que se debe pagar el usuario en cada periodo de tiempo, por la variabilidad del parámetro a través del tiempo de simulación, en dinámica de sistemas, se toman los valores de precio de la energía calculados por iThink como un parámetro para el modelo de optimización, suponiendo comportamientos iguales en los dos modelos.
- ❖ La variable migración entre tecnologías representa el porcentaje de las luminarias tipo que salen de la fase de uso y deben ser reemplazadas, estas luminarias a ser reemplazadas pueden ingresar al sistema de dos formas, la primera corresponde al porcentaje de luminarias que ingresan a la misma tecnología, y la segunda es el porcentaje que ingresa a la mejor tecnología siguiente, para dinámica de sistemas el cálculo de λ se hace a partir del hábito de uso. Sin embargo, para el modelo de optimización es considerado como un parámetro y su valor es tomado de iThink, suponiendo que el comportamiento para el modelo de optimización es el mismo y el hábito de uso no cambia.
- ❖ En el modelo de dinámica de sistemas, el factor de daño de las luminarias que salen de la fase de uso es una variable calculada como el mayor valor entre la obsolescencia percibida por el consumidor dividida por el hábito de uso, y la obsolescencia programada por el fabricante, dividido por el hábito de uso. Al suponer que el hábito de uso es constante y el comportamiento del sistema es el mismo, la variable λ de dinámica de sistemas, ahora será un parámetro para el modelo de optimización y sus valores se toman de los resultados de iThink.
- ❖ la cantidad de horas que permanece encendida una luminaria al año es de 1800 horas en promedio, sin embargo, el modelo de dinámica de sistemas plantea que este valor puede disminuir si el usuario nota un incremento en el valor de su factura. Debido a la variabilidad en las horas de uso para cada tipo de luminaria en el modelo de dinámica de sistemas, se suponen comportamientos iguales y la variable λ se ingresa como un

parámetro en el modelo de optimización para cada luminaria tipo en cada periodo, los valores son tomados de los resultados arrojados por iThink.

- ❖ Al igual que con las variables anteriores, el porcentaje de utilización de material reciclado en la producción de luminarias, es un valor variable durante el periodo de simulación para el modelo de dinámica de sistemas y es calculado como el número de luminarias de cada tipo que están en uso, dividido el total de luminarias del sistema en uso. Al suponer comportamientos iguales del sistema la variable de dinámica de sistemas se ingresa como un parámetro en el modelo de optimización en términos de las luminarias tipo i para cada periodo p .

Formulación del modelo.

A continuación, se hace la descripción del modelo de optimización de programación entera mixta, que representa el comportamiento del sistema, que busca medir el impacto de las PPI seleccionadas.

Conjuntos:

i = Tipo de luminarias; (1, 2, 3, 4, 5, 6)

j = Luminarias producidas de la forma; (1,2)

p = Periodo de tiempo; (1, ...,50)

h = Tipo de luminaria (Alias de i)

Parámetros:

Tu_p = Tasa de incorporación en el período p .

Pre_p = Precio de la energía en el período p .

$PotMed_i$ = Potencia media de la luminaria tipo i .

g_i = Peso de la luminaria tipo i en gramos

S_i = Porcentaje de salida de la fase de uso de la luminaria tipo i .

TR_f = Tasa de reciclado formal=0,7

TR_I = Tasa de reciclado informal=0,3

Ce_{ih} = Matriz de la tasa de migración de luminarias del tipo i al tipo h .

Pu_{ip} = Material reciclado en la fabricación de luminarias tipo i en el período p .

$Nmpn_{i1p}$ = Cantidad de luminarias del tipo i manufacturadas en producción nacional (1) con materia prima nueva en el período.

Hm_p = Cantidad de viviendas en el período p

$CapR$ = Capacidad total del relleno = 8'750.000.000 gramos.

Lum = Porcentaje de material reciclado usado en una luminaria nueva. =60%

U_{ip} = Cantidad de luminarias tipo i provenientes de los hogares nuevos en el período p .

$Hora_{ip}$ = Número de horas de uso de la luminaria tipo i en el período p .

Variables de decisión:

X_{ijp} = Cantidad de luminarias del tipo i que salen de la fase de uso, producidas de la forma j en el período p .

C_{ijp} = Cantidad de Luminarias del tipo i en la fase de uso producidas de la forma j en el período p .

Dis_{ijp} = Cantidad de luminarias del tipo i producidas de la forma j disponible en el período p .

Mr_{ijp} = Cantidad de gramos de Material Reciclado del tipo de luminaria i que es recuperado de la forma de producción j en el período p .

$Dimp_{i2p}$ = Cantidad de luminarias disponibles tipo i de la forma de producción importación en el período p .

$Nmpr_{i1p}$ = Cantidad de luminarias tipo i de la forma producción nacional con materia prima reciclada en el periodo p .

$Land_p$ = Cantidad de material que es enviado al relleno en el periodo p .

$ConEner_p$ = Consumo de energía en el periodo p .

A continuación, se presentan dos funciones objetivo, una para cada una de las políticas seleccionadas, la primera encaminada a minimizar la cantidad en el relleno y la segunda a minimizar el consumo de energía, el modelo de programación entera mixta propuesto se corre para cada una de las funciones objetivo por separado bajo las mismas condiciones y restricciones.

Minimización del material en el relleno.

$$Min Z = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \sum_{p=1}^{50} \{ [Tu * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_f)] + [(1 - Tu) * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_l)] \}$$

La función objetivo está encaminada a la minimización de la cantidad gramos de residuos de luminarias, considerados residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, que son llevados al relleno sanitario desde el canal formal y el canal informal.

Minimización del consumo de energía.

$$Min Z = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \sum_{p=1}^{50} C_{ijp} * PotMed_i * Pre_p * Hora_{ip}$$

Esta función tiene como objetivo minimizar el consumo de energía a lo largo de todos los periodos de tiempo.

Sujeto a:

- Restricción que calcula el costo de la energía consumida en cada periodo p
- Restricción que calcula la cantidad de luminarias en uso, del tipo i de la forma de producción j para cada periodo p .
- Restricción que garantiza que la cantidad de luminarias que salen del sistema sea menor a la cantidad de luminarias en el sistema para cada tipo de luminaria i y cada periodo de tiempo p .
- Restricción que garantiza que las luminarias disponibles deben ser mayores a las que hay en el sistema para cada tipo de luminaria i y cada periodo de tiempo p .
- Restricción que garantiza la disponibilidad de luminarias del tipo i de la forma de producción j en el periodo p , para cada tipo de luminaria i y cada periodo p .
- Restricción que me garantiza que se utilice un porcentaje del material reciclado para la producción de luminarias recicladas con material reincorporado, para cada luminaria del tipo i y cada periodo p .
- Restricción de Reciclado (material reincorporado al sistema productivo), para cada luminaria de tipo i y cada periodo p .
- Restricción de importación, garantiza la disponibilidad de luminarias importadas para cada luminaria tipo i en cada periodo p .

- i) Restricción que garantiza que la demanda es menor que la cantidad disponible, para cada luminaria tipo i en cada periodo p .
- j) Restricción que me determina la demanda, para cada periodo p .
- k) Restricción que me garantiza que la cantidad enviada al relleno es menor que la capacidad del relleno.
- l) Restricción que garantiza la salida de las luminarias de la fase de uso para cada luminaria tipo i de la forma de producción j en el periodo p .

La formulación de las restricciones se encuentra en el Anexo.

RESULTADOS

Solución del modelo de optimización

Al evaluar la política de incorporación de material reciclado en los tres escenarios planteados, incrementando el parámetro tasa de incorporación desde su valor **Base** (0,08) a 0,28; 0,48 y 0,68 respectivamente, y compararlos con el comportamiento actual (**Base** de 0,08) se encuentra que los porcentajes de variación entre los dos escenarios para las variables se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados para la política de incorporación de material reciclado

Variable Interés	Cambio porcentual entre 0,08 a 0,28	Cambio porcentual entre 0,08 a 0,48	Cambio porcentual entre 0,08 a 0,68
Consumo Energía (COL\$)	10%	10%	10%
Cantidad en el relleno (g)	33%	29%	25%
Material Reciclado (g)	29%	32%	35%

Al hacer el análisis de los resultados se puede concluir que en términos de consumo de energía todos los escenarios son iguales y generan un ahorro del 10% en comparación con el estado actual del sistema, sin embargo para las variables cantidad de material en el relleno y material reciclado, a medida que se cambia de escenario se ve una reducción en la cantidad de material en el relleno y del material reciclado en relación a la situación actual del sistema, esto quiere decir que la producción de material reciclado y material en relleno se reducen en un 29% de la situación actual para el primer escenario de la política, mientras que para el ultimo escenario la producción de material reciclado y material que es enviado al relleno, corresponde a un 35% y 25% respectivamente en relación al valor de la situación actual.

Por otro lado, al evaluar la política variación del precio de la energía para los cuatro escenarios propuestos, incrementando el precio de la energía en 10%, 20%, 30% y 40% respectivamente desde su valor **Base** (357,23), se obtienen los resultados presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados para la política variación en el precio de la energía

Variable Interés	10%	20%	30%	40%
Consumo Energía (COL\$)	18%	13%	7%	1%
Cantidad en el relleno (g)	22%	22%	22%	22%
Material Reciclado (g)	28%	28%	28%	28%

Al interpretar los datos arrojados por el modelo de optimización se puede evidenciar que para la variable consumo de energía, si se hace un descuento del 10% el ahorro es de alrededor de COL\$ 1,048 billones, que equivale al 18% de la situación actual, sin embargo, a medida que el porcentaje de incremento es mayor el ahorro disminuye llegando aproximadamente a los COL\$ 45058 millones (US\$ 14,76 millones). Por otro lado, la cantidad de material en relleno y el material reciclado permanecen constantes con un porcentaje de disminución del 22% y el 28% respectivamente.

Comparación de resultados

Un paralelo entre los resultados obtenidos por cada uno de los métodos se presenta en la Tabla 4. Para realizar este paralelo es indispensable conocer los valores obtenidos por cada una de las políticas en las condiciones actuales del sistema, la siguiente tabla muestra los resultados obtenidos por cada una de las herramientas, para el caso de optimización se muestran los resultados de cada una de las funciones objetivo.

Tabla 4. Resultados del modelo de optimización

	FO. 1	FO. 2	DS
Material en relleno (x10³ kg.)	8,760	23,300	4,4243
Material Reciclado (x10³ kg.)	8,880	19,800	337,45
Consumo de energía (x10⁶ kw)	5,18	4,7	170

FO1: minimización del material enviado al relleno sanitario
 FO2: minimización del consumo de energía
 DS: Dinámica de Sistemas.

En primer lugar, se comparan los resultados obtenidos por cada método para la política incorporación de material reciclado en el proceso productivo para cada uno de los escenarios y las tres variables de interés. (Tabla 5)

Tabla 5. Comparación de resultados entre el modelo de Dinámica de sistemas y el modelo de Optimización para la política de incorporación de material reciclado

Material Reciclado	Dinámica de Sistemas.	Optimización	Incremento
Escenario 1	4,80E+06	9,40E+09	99,95%
Escenario 2	5,39E+06	1,04E+10	99,95%
Escenario 3	6,06E+06	1,13E+10	99,95%

En cuanto al material reciclado para la política incremento del material reciclado se observa en la Figura 8 el comportamiento del sistema mediante dinámica de sistemas, representada por el eje vertical de la izquierda, versus el comportamiento del sistema con el modelo de optimización, representado por el eje vertical derecho, para los 50 períodos de planeación. En la Figura 8 se puede observar que el comportamiento de las dos herramientas es similar, sin embargo, los valores logrados por cada una son muy diferentes.

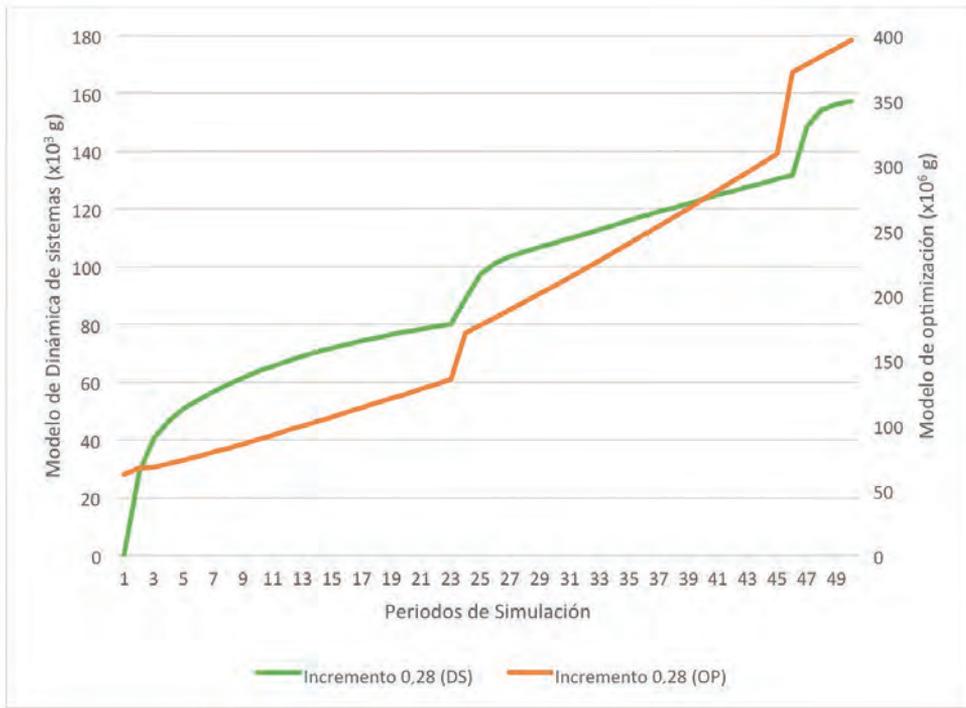


Figura 8. Material reciclado en Gramos (g) para la política 1

En cuanto al consumo de energía para la política incremento del material reciclado, la Tabla 6 muestra los resultados para cada uno de los escenarios planteados, y la Figura 9 muestra el comportamiento de las herramientas en uno de los escenarios planteados.

Tabla 6. Confrontación de resultados política 1 Consumo de energía

Consumo de Energía	Dinámica de Sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1	1,70E+14	5,18E+12	97%
Escenario 2	1,70E+14	5,18E+12	97%
Escenario 3	1,70E+14	5,18E+12	97%

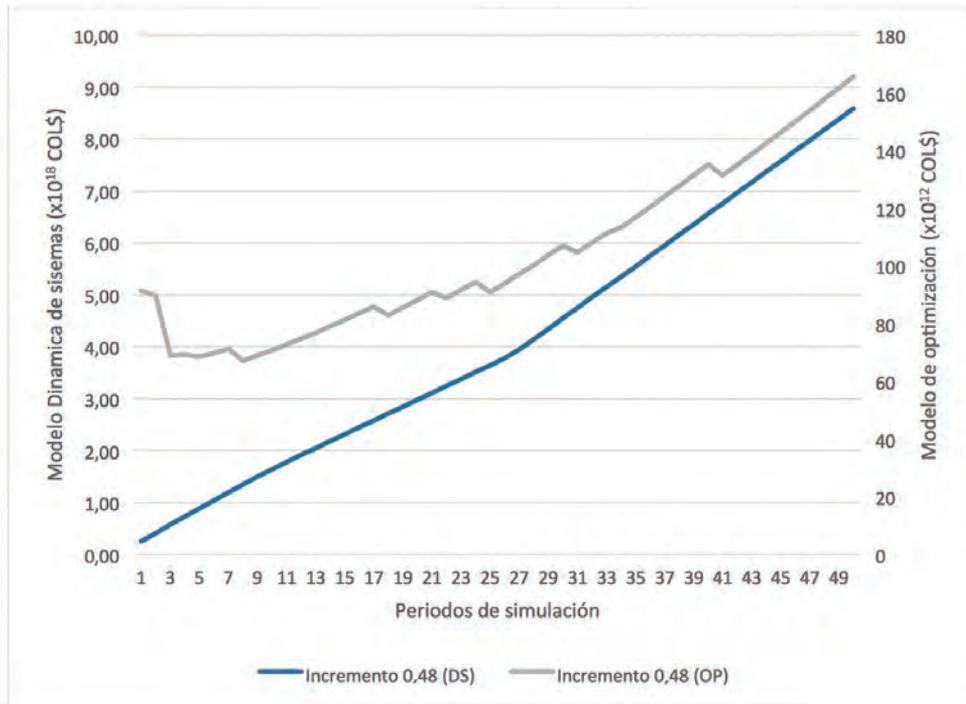


Figura 9. Consumo de energía, política 1

Para entender mejor el comportamiento del sistema con las dos herramientas en cuanto al consumo de energía, se debe comparar la migración de luminarias a una mejor tecnología, la Figura 10 evidencia la rápida migración a tecnologías más eficientes por parte de los modelos planteados, en donde dinámica de sistemas muestra una migración más lenta mientras que el modelo de optimización realiza una migración rápida en los primeros años.

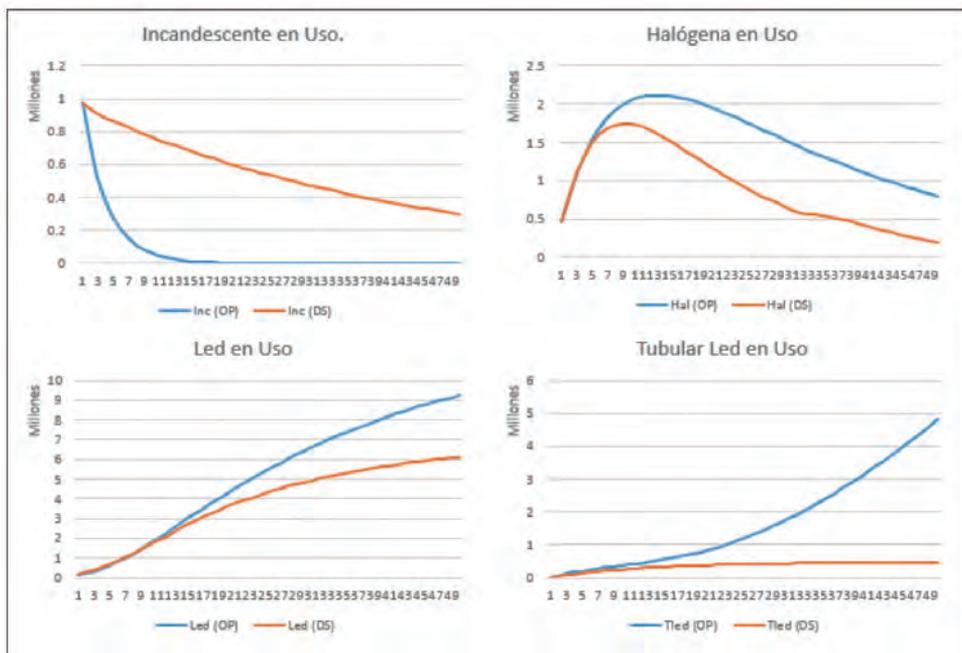


Figura 10. Migración de luminarias, política 1

En cuanto a la variable material en relleno para la política 1, la Tabla 7 presenta los resultados obtenidos por cada una de las herramientas, dejando ver la reducción potencial para cada escenario con el modelo de optimización. En la Figura 11 se puede evidenciar el comportamiento de la variable material en relleno para el escenario 3 (= 0.68) donde el eje vertical derecho representa los valores del modelo de optimización y el eje vertical izquierdo los valores del modelo de dinámica de sistemas.

Tabla 7. Confrontación de resultados política 1

Material en relleno	Dinámica de Sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1	2,34E+11	8,24E+09	96%
Escenario 2	2,03E+11	7,20E+09	96%
Escenario 3	1,75E+11	6,31E+09	96%

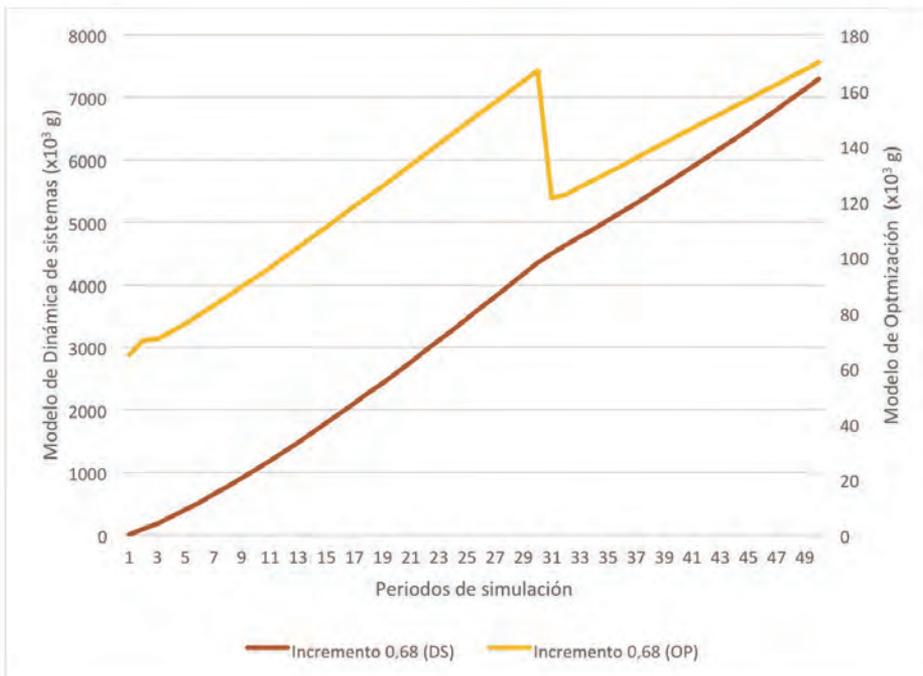


Figura 11. Material en relleno política 1

En segundo lugar, se confrontarán los resultados obtenidos por cada herramienta para la política 2, incremento en el precio de la energía, para cada uno de los escenarios propuestos y para cada una de las variables de interés, en la Tabla 8 se observan los valores resultantes y el porcentaje de incremento para la variable material reciclado en cada uno de los escenarios propuestos.

Tabla 8. Confrontación de resultados política 2

Material reciclado	Dinámica de Sistemas	Optimización	Incremento
Escenario 1	4,33E+06	2,33E+10	99,98%
Escenario 2	4,40E+06	2,33E+10	99,98%
Escenario 3	4,40E+06	2,33E+10	99,98%
Escenario 4	4,58E+06	2,33E+10	99,98%

La Figura 12 muestra el comportamiento de la variable Material reciclado para cada una de las herramientas, donde el eje vertical derecho refleja los valores obtenidos con dinámica de sistemas y el eje vertical izquierdo los valores obtenidos con el modelo de optimización.

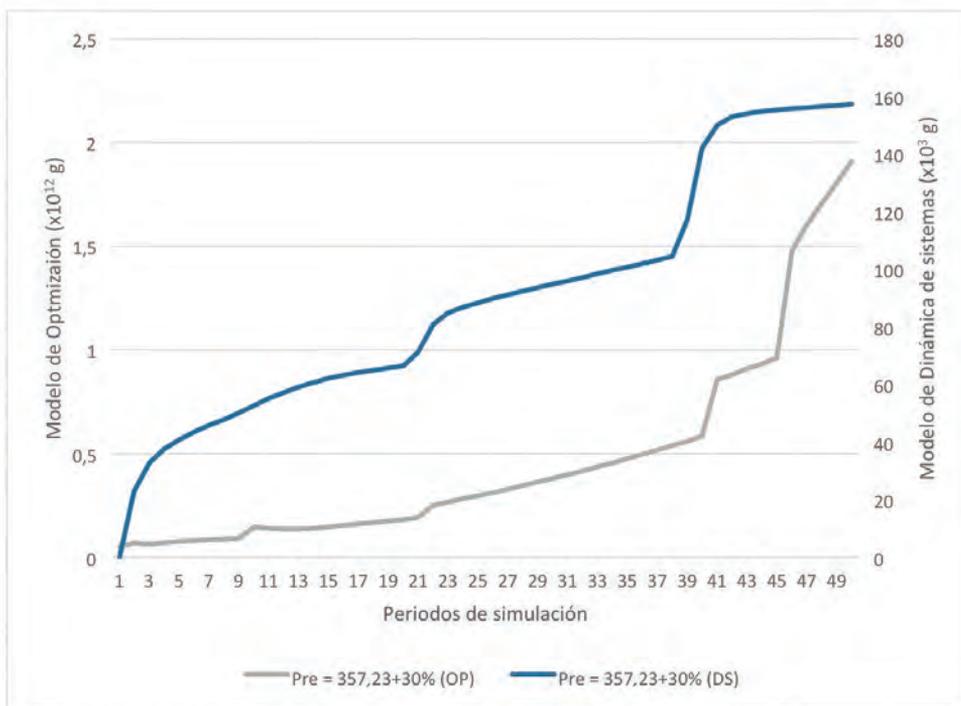


Figura 12. Cantidad de material reciclado política 2

En cuanto al material enviado al relleno sanitario por parte de la política 2, incremento en el precio de la energía, la Tabla 9 muestra los valores y el porcentaje de reducción encontrados con cada una de las herramientas para cada uno de los escenarios propuestos.

Tabla 9. Confrontación de resultados política 2

Material en Relleno	Dinámica de Sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1	2,64E+11	1,98E+10	92%
Escenario 2	2,66E+11	1,98E+10	93%
Escenario 3	2,66E+11	1,98E+10	93%
Escenario 4	2,79E+11	1,98E+10	93%

La Figura 13 muestra el comportamiento de la variable material en relleno, donde el eje vertical izquierdo contiene los valores del comportamiento para dinámica de sistemas y el eje vertical derecho los valores del comportamiento para el modelo de optimización.



Figura 13. Cantidad de material en el relleno política 2

La última variable de interés es el consumo de energía, la Tabla 10 muestra el comportamiento de esta variable y el porcentaje de reducción para los cuatro escenarios planteado.

Tabla 10. Confrontación de resultados política 2.

Consumo energía	Dinámica de Sistemas	Optimización	Reducción
Escenario 1	4,36E+14	4,70E+12	99%
Escenario 2	4,36E+14	5,02E+12	99%
Escenario 3	4,37E+14	5,36E+12	99%
Escenario 4	4.36E+14	5.70E+12	99%

La Figura 14 muestra el comportamiento de la variable consumo de energía para el escenario 1 (= 357.23+10%) donde el eje vertical derecho refleja los valores del modelo de optimización, mientras que el eje izquierdo muestra los valores del modelo de dinámica de sistemas.

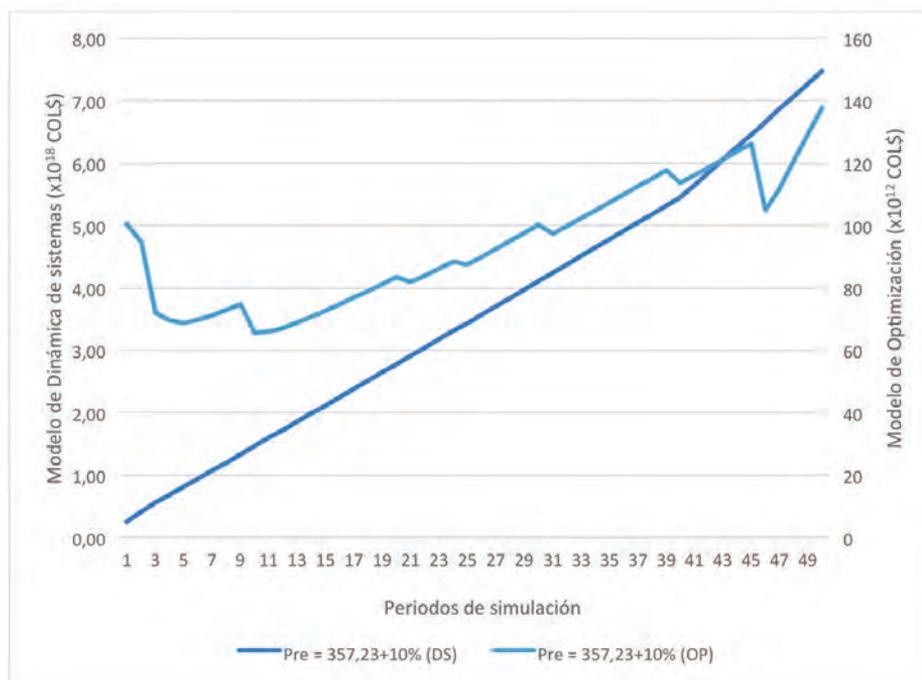


Figura 14. Consumo energía política 2.

Para entender el comportamiento de la variable consumo de energía es necesario observar el comportamiento de la migración de las luminarias a una tecnología más eficiente, la Figura 15 donde se muestra el número de luminarias Incandescente, Halógena, Led y Tubular Led, en uso para cada uno de los modelos comparados.

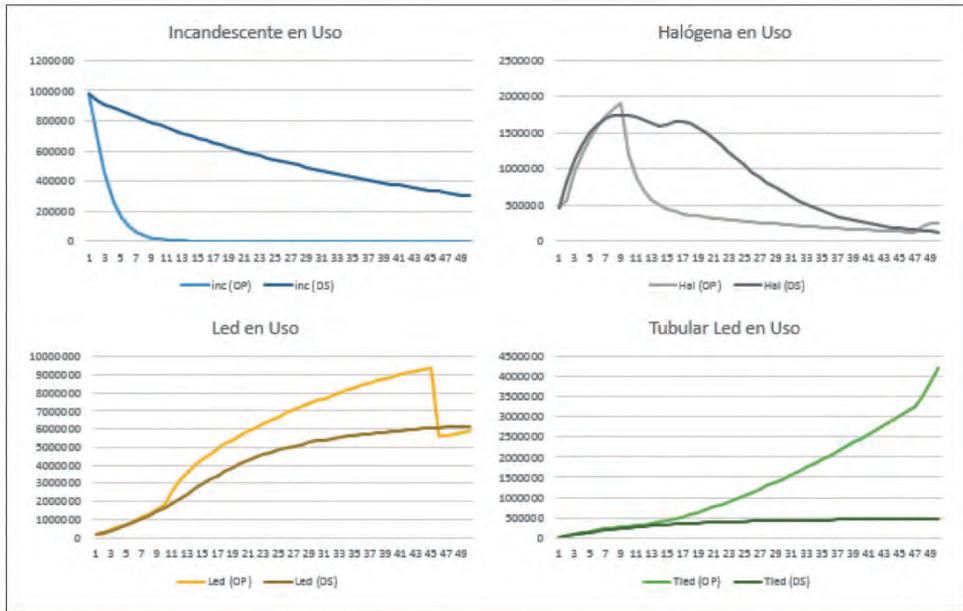


Figura 15. Migración de luminarias política 2.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el desarrollo de la investigación que inicio con la descripción del modelo de dinámica de sistemas y las PPI propuestas, seguido de la recolección de la información, construcción del estado del arte y del modelo de programación entera mixta que permite medir el impacto de las PPI, aplicadas a la fase de fin de vida de las luminarias en Bogotá y finalmente presentando la solución del modelo propuesto y la comparación de las herramientas usadas, se concluye.

Los bucles de retroalimentación que permiten incluir el material reciclado en los procesos de producción, garantizan la minimización del material enviado al relleno en primera instancia y minimizan el consumo de energía en segunda instancia.

Se considera que dinámica de sistema es una herramienta adecuada para la descripción de ciclos de vida, permitiendo entender las relaciones del sistema a partir de las ecuaciones de balance, y representando el comportamiento de las variables de interés y el dinamismo del sistema bajo la influencia de PPI, siendo el punto de partida para la construcción del modelo de optimización, evitando realizar supuestos, como el comportamiento de los consumidores o la cantidad de horas que permanece encendida las luminarias dependiendo del consumo de energía.

Las PPI seleccionadas reflejan resultados para las variables de interés: material reciclado y consumo de energía; para el modelo de dinámica de sistemas se obtuvieron valores de mejora correspondientes al 36,7% y 3,88% respectivamente, mientras que para el modelo de optimización los porcentajes de mejora son del 37% y 30% respectivamente, al comparar el estado actual del sistema con un modelo de implementación de políticas.

Al realizar la comparación de resultados de las dos herramientas usadas, se evidencia que el modelo de optimización realiza una asignación adecuada de recursos en términos de las luminarias en el sistema, permitiendo maximizar la cantidad de material reciclado y reincorporado en el proceso productivo hasta en un 99% y minimizar el consumo de energía y el material enviado al relleno sanitario en un 98%.

Por la naturaleza de las herramientas, no es posible realizar una comparación directa entre dinámica de sistemas y optimización, debido a que la dinámica de sistemas está enfocada en la descripción del comportamiento de los sistemas, mientras que los modelos de optimización distribuyen los recursos del sistema de acuerdo al cumplimiento de un objetivo de minimización o maximización, sin embargo, se puede concluir que estas dos herramientas son complementarias, ya que al entender las relaciones presentes en el sistema por medio de las ecuaciones de balance, se pueden generar modelos de optimización más reales que proporcionen los pasos a seguir para cumplir un objetivo.

Al enfrentar las gráficas construidas con los valores arrojados para las variables de interés para cada una de las herramientas utilizadas, se observa que a pesar de que los valores de cada una son diferentes, la tendencia es la misma y se puede concluir que ese comportamiento ratifica que el uso de la política genera soluciones e incrementos en el material reciclado y disminución en el consumo de energía y el material enviado al relleno.

Al observar el comportamiento de las decisiones de compra del consumidor que genera la migración de luminarias a tecnologías más eficientes en cada una de las herramientas utilizadas, se evidencia que las luminarias incandescente y halógena son las que presentan una migración en las dos herramientas.

Los tiempos computacionales de solución del modelo de programación entera mixta son de aproximadamente 42 segundos, al igual que los tiempos computacionales de solución que el modelo de dinámica de sistemas, permitiendo que la toma de decisiones se haga en tiempo real.

La integración de herramientas que permitan describir los ciclos de vida de los productos y los modelos de optimización son usadas en diferentes áreas del conocimiento, teniendo como objetivo la minimización del impacto ambiental, en conjunto con la maximización del beneficio, permitiendo el diseño y construcción de procesos amigables con el medio ambiente.

Para estudios futuros, es de interés realizar modificaciones al modelo de optimización propuesto con el fin de eliminar los supuestos sobre la tasa de incorporación, el precio de la energía y el porcentaje de utilización, haciendo que la restricción que garantiza la incorporación de material reciclado sea no lineal y la incorporación de nuevas restricciones para calcular el precio de la energía y la tasa de incorporación, permitiendo que el modelo tenga un comportamiento autónomo. Por otro lado es igualmente interesante la construcción de nuevas funciones objetivo que permitan observar el comportamiento de las PPI que no se tuvieron en cuenta, como la eliminación de sustancias contaminantes, impuestos al consumidor para el reciclado y el cambio de la eficiencia intra-tecnología, que permita la construcción de un modelo multi-objetivo con una única función objetivo que integre las diferentes PPI, permitiendo medir el impacto conjunto de las mismas.

REFERENCIAS

AHLUWALIA, P.K. y NEMA, A.K. A life cycle based multi-objective optimization model for the management of computer waste. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2007, **51**(4), 792-826 [cit. 2015-07-14]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.01.001. ISSN 09213449. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344907000043>

AZAPAGIC, A. y CLIFT, R. The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers & Chemical Engineering* [online]. 1999, **23**(10), 1509-1526 [cit. 2015-07-14]. DOI: 10.1016/S0098-1354(99)00308-7. ISSN 00981354. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098135499003087>

CALCOTT, P. y WALLS, M. Waste, recycling, and design for environment: Roles for markets and policy instruments. *Resource and energy economics*, 2002, **27**(4), pp.287-305.

CARRERAS, J., BOER, D., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G., CABEZA, L.F., MEDRANO, M. y JIMÉNEZ, L. Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact. *Energy and Buildings* [online]. 2015, **88**, 335-346 [cit. 2015-07-14]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.12.007. ISSN 03787788. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814010585>

Comisión de las Comunidades Europeas. Libro Verde Sobre Políticas de Productos integrada, vol. 2001–68. Bruselas: Comisión de las Comunidades Europeas, 2001, p. 34.

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

ČUČEK, L., KLEMEŠ, J. y KRAVANJA, Z. *Assessing Direct and Indirect Effects within a LCA Based Multiobjective Synthesis of Bioproducts Supply Chains* [online]. 2012, [cit. 2014-07-14]. DOI: 10.1016/B978-0-444-59506-5.50044-4. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444595065500444>

DEGHANIAN, F. y MANSOUR, S. Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2009, **53**(10), 559-570 [cit. 2015-05-14]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.04.007. ISSN 09213449. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344909000664>

EICHNER, T. y RUNKEL, M. Efficient policies for green design in a vintage durable good model. *Environmental and Resource Economics*, 2005, **30**(3), 259-278

ELSHKAKI, E.V. 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*, 2005, pp.1353–1363

European Lamp Companies Federation. Did you know ... the potential energy savings of an energy efficient lamp? Energy. [En línea]. 2015. [Consulta: 2014.05.22]. Disponible en: <http://www.elcfd.org/documents/050301_DYK_the_potential_of_energy_savings_of_an_energy_efficient_lamp.pdf>

GAN, S.S., PUJAWAN, I.N., SUPARNO, S y WIDODO, B. Pricing decision model for new and remanufactured short-life cycle products with time-dependent demand. *Operations Research Perspectives* [online]. 2015, **2**, 1-12 [cit. 2015-07-14]. DOI: 10.1016/j.orp.2014.11.001. ISSN 22147160. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214716014000104>

GEORGIADIS P., A. E. The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks. *European Journal of Operational Research*, 2010, pp. 420–433.

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

GOTTBERG, A., MORRIS, J., POLLARD, S., MARK-HERBERT, C. y COOK, M. Producer responsibility, waste minimisation and the WEEE Directive: case studies in eco-design from the European lighting sector. *The Science of the Total Environment*, 2006, **359**(1-3), pp. 38–56.

KHETRIWAL, D., KRAEUCHI, P. y SCHWANINGER, M.A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India. *Environmental Impact Assessment Review*, 2005, **25**(5), pp. 492-504.

KHETRIWAL D., KRÄUCHI P., WIDMER R. Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration – learning from the Swiss experience, *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**, pp. 153-165.

KHOSHNEVISAN, B., BOLANDNAZAR, E., SHAMSHIRBAND, S., SHARIATI, H. M., ANUAR, N.B. y MAT KIAH, M. L. Decreasing environmental impacts of cropping systems using life cycle assessment (LCA) and multi-objective genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*[online]. 2015, **86**, 67-77 [cit. 2015-07-14]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.062. ISSN 09596526. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614008853>

KOMLY, C.E., AZZARO-PANTEL, C., HUBERT, A., PIBOULEAU, L. y ARCHAMBAULT, V. Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles. *Resources, Conservation and Recycling*[online]. 2012, **69**, 66-81 [cit. 2015-07-14]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.08.008. ISSN 09213449. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344912001462>

KOSTIN, A., MELE, F. y GUILLÉN-GOZÁLBEZ, G. *Multi-objective optimization of integrated bioethanol-sugar supply chains considering different LCA metrics simultaneously* [online]. 2011. [cit. 2017-07-14]. DOI: 10.1016/B978-0-444-54298-4.50034-9. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444542984500349>

LEE, T.K. Resource Cyclical Dynamics of Electric and Electronic Equipment Waste. [En línea]. 2005. [Consulta: 2014.05.22]. Disponible en: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2005/proceed/papers/LEE493.pdf>

LEVIS, J.W., BARLAZ, M., DECAROLIS, J. y RANJITHAN, S.R. A generalized multistage optimization modeling framework for life cycle assessment-based integrated solid waste management. *Environmental Modelling & Software* [online]. 2013, **50**, 51-65 [cit. 2015-07-14]. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.08.007. ISSN 13648152. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815213001850>

LINDHQVIST, T., MANOMAIVIBOOL, P. y TOJO, N. La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano. [En línea]. 2008. [Consulta: 2015.09.23]. Disponible en: <http://www.basuracero.org/sitio/admin/archivos/la-responsabilidad-extendida-d.pdf>

LIU, Z., QIU, T. y CHEN, B. A LCA Based Biofuel Supply Chain Analysis Framework. *Chinese Journal of Chemical Engineering* [online]. 2014a, **22**(6), 669-681 [cit. 2015-09-20]. DOI: 10.1016/S1004-9541(14)60079-3. ISSN 10049541. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1004954114600793>

LIU, Z., QIU, T. y CHEN, B. A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with multi-conversion paths in China. *Applied Energy*[online]. 2014b, **126**, 221-234 [cit. 2015-09-15]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.001. ISSN 03062619. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191400333X>

MORALES MENDOZA, L.F., BOIX, M., AZZARO-PANTEL, C., MONTASTRUC, L. y DOMENECH, S. *Biodiesel Production from Waste Vegetable Oils: Combining Process Modelling, Multiobjective Optimization and Life Cycle Assessment (LCA)* [online]. 2014, [cit. 2015-08-10]. DOI: 10.1016/B978-0-444-63456-6.50040-5. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444634566500405>

OGATA, K. *Dinamica de Sistemas*, Mexico: Prentice Hall Hispanoamerica S.A. 1987. ISBN 968-880-074-0.

PARASKEVAS, D., KELLENS, K., DEWULF, W. y DUFLOU, J. R. Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2015, **105**, 357-370 [cit. 2015-08-10]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.102. ISSN 09596526. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614010646>

POULIKIDOU, S., SCHNEIDER, C., BJÖRKLUND, A., KAZEMAHVAZI, S., WENNHAGE, P. y ZENKERT, D.A A material selection approach to evaluate material substitution for minimizing the life cycle environmental impact of vehicles. *Materials & Design* [online]. 2015, **83**, 704-712 [cit. 2015-08-10]. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.079. ISSN 02641275. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515004293>

RAMADHAN, N.J., WAN, Y.K., NG, R.T.L., NG, D.K.S., HASSIM, M.H., AVISO, K.B. y TAN, R.R. Life cycle optimisation (LCO) of product systems with consideration of occupational fatalities. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2014, **92**(5), 390-405 [cit. 2015-08-10]. DOI: 10.1016/j.psep.2014.04.003. ISSN 09575820. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582014000494>

RODRÍGUEZ, LA., GONZÁLEZ., N, REYES, L. y TORRES, A. Sistema de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Enfoque de dinámica de sistemas. *Revista Facultad de Ingeniería Sistemas y Telemática*, 2013, **11**(24), pp. 39-53. ISSN: 1692-5238

RODRÍGUEZ, L. A., JAIMES, S., ESTUPIÑÁN, E. y TORO, D. Product policy impact in the lifecycle of light bulbs through systems dynamics [En línea]. 2015. [Consulta: 2014.08.23]. Disponible en: <www.systemdynamics.org/conferences/2015/papers/P1304.pdf>

SOLANO, E. Multi-objective Linear Programming Optimization for Waste Management Simulation. En: SIMUL 2012: The Fourth International Conference on Advances in System Simulations, Lisboa, Portugal, 2012, pp.125–130. ISBN: 978-1-61208-234-9

VADENBO, C., HELLWEG, S. y GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks – Part I: Model description. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2014, **89**, 52-63 [cit. 2015-08-10]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.05.010. ISSN 09213449. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344914001189>

WANG, J., YANG, Y., MAO, T., SUI, J., y JIN, H. Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system. *Applied Energy* [online]. 2015, **146**, 38-52 [cit.2015-08-11]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.02.056. ISSN 03062619. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261915002330>

ZHANG, D., EVANGELISTI, S., LETTIERI, P., y PAPAGEORGIOU, L. G. Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and life cycle assessment. *Energy* [online]. 2015, **85**, 181-193 [cit. 2015-08-12]. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.036. ISSN 03605442. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544215003308>

Anexos

Restricciones del modelo:

- a. Restricción que calcula el costo de la energía consumida en cada periodo p

$$ConEner_p = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 C_{ijp} * PotMed_i * Pre_p * Hora_{ip} \quad \forall p$$

- b. Restricción que calcula la cantidad de luminarias en uso, del tipo i de la forma de producción j para cada periodo p .

$$\sum_{j=1}^2 C_{ijp} = \sum_{j=i}^2 C_{ijp-1} - \sum_{j=1}^2 X_{ijp} + \sum_{j=1}^2 X_{ijp-1} * Ce_{ih} + \sum_{j=1}^2 X_{i-1jp-1} * Ce_{ih-1} + U_{ip} \quad \forall i; p; h \leq i$$

- c. Restricción que garantiza que la cantidad de luminarias que salen del sistema sea menor a la cantidad de luminarias en el sistema para cada tipo de luminaria i y cada periodo de tiempo p .

$$\sum_{j=1}^2 C_{ijp} \geq \sum_{j=1}^2 X_{ijp} \quad \forall i; p$$

- d. Restricción que garantiza que las luminarias disponibles deben ser mayores a las que hay en el sistema para cada tipo de luminaria i y cada periodo de tiempo p .

$$\sum_{j=1}^2 Dis_{ijp} \geq \sum_{j=1}^2 C_{ijp} \quad \forall i; p$$

- e. Restricción que garantiza la disponibilidad de luminarias del tipo i de la forma de producción j en el periodo p , para cada tipo de luminaria i y cada periodo p .

$$\sum_{j=1}^2 Dis_{ijp} = Nmpn_{i1p} + Nmpr_{i1p} + Dimp_{i2p} \quad \forall i; p$$

- f. Restricción que me garantiza que se utilice un porcentaje del material reciclado para la producción de luminarias recicladas con material reincorporado, para cada luminaria del tipo i y cada periodo p .

$$Nmpr_{i1p} = \sum_{j=1}^2 Mr_{ijp} * Pu_{ip} * \frac{1.60}{g_i} \quad \forall i; p$$

- g. Restricción de Reciclado (material reincorporado al sistema productivo), para cada luminaria de tipo i y cada periodo p .

$$\sum_{j=1}^2 Mr_{ijp} = \left\{ Tu * g_i * \sum_{j=1}^2 X_{ijp} * TR_f \right\} + \left\{ (1 - Tu) * g_i * \sum_{j=1}^2 X_{ijp} * TR_l \right\} \quad \forall i; p$$

- h. Restricción de importación, garantiza la disponibilidad de luminarias importadas para cada luminaria tipo i en cada periodo p .

$$Dimp_{i2p} = 0.5 * (Nmpn_{i1p} + Nmpr_{i1p}) \quad \forall i; p$$

- i. Restricción que garantiza que la demanda es menor que la cantidad disponible, para cada luminaria tipo i en cada periodo p .

$$\sum_{j=1}^2 C_{ijp} \leq \sum_{j=1}^2 Dis_{ijp} \quad \forall i; p$$

- j. Restricción que me determina la demanda, para cada periodo p .

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^6 C_{ijp} = Hm_p * 7 \quad \forall p$$

- k. Restricción que me garantiza que la cantidad enviada al relleno es menor que la capacidad del relleno.

$$CapR \leq \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \sum_{p=1}^{50} \{Tu * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_f)\} + \{(1 - Tu) * g_i * X_{ijp} * (1 - TR_l)\}$$

- l. Restricción que garantiza la salida de las luminarias de la fase de uso para cada luminaria tipo i de la forma de producción j en el periodo p .

$$X_{ijp} \geq S_i * C_{ijp} \quad \forall i, j, p$$